複眼画像システム

谷田 純

Compound-Eye Imaging Systems

Jun TANIDA

A compound-eye is a distinctive visual organ appeared in arthropod. Typical compound-eyes are categorized into an apposition eye and a super position eye. The compound-eye has interesting features such as very-wide field-of-view, individual signal processing in ommatidia, and polarization sensitivity. For engineering applications, they are useful and various artificial compound imaging systems have been constructed. Although compactness of the implementation is attractive at first glance, flexibility in imaging functions and performances with system configuration and signal processing is a more important feature of the compound imaging system. The compound imaging system is expected to be a fundamental platform of computational optical imaging system.

Key words: compound-eye, ommatidia, image sensor, image processing, computational imaging

小さいころにトンボの眼を見て、その特異な形状や引き 込まれるような輝きに興味を抱いた方が少なからずおられ るのではないだろうか.筆者もその一人であり、その眼が 非常に多くの眼の集まりであると知り、トンボがどのよう に世界を見ているのか不思議に思ったものである.昆虫な どの節足動物がもっているこの視覚器官は複眼とよばれ、 私たちの眼である単眼とは大きく異なった構造と像取得の 方法を特徴とする.しかし、私たちが特殊と考えている複 眼であるが、地球上の動物の7割を昆虫が占めているとい う事実からすると、視覚器官としてはむしろ標準的な形態 ということもできる.単純な構造でありながら、視覚器官 として必要十分な機能を実現する点において、このとらえ 方は間違いではない.集積エレクトロニクスや微小光学素 子などの微細加工技術との親和性が高く、撮像システムの 一方式として古くから研究の対象であった.

本稿では、複眼の構造と機能を説明し、それに倣った人 工的複眼システムの特徴と実装例について整理する. さら に、複眼撮像システム TOMBO (thin observation module by bound optics) を取り上げ、最近の応用事例を紹介する.

自然界の複眼

自然界でみられる複眼は、図1に示すように、レンズと 視細胞群で構成される個眼が集合した視覚器官である、複 眼を構成する個眼の数は生物種によって異なり、ミジンコ の130 個からミツバチやトンボの10000 個以上まで広く分 布している¹⁾. 個眼は、レンズと導光組織で構成され、レ ンズを透過した光と光受容構造の対応関係により、連立像 眼と重複像眼に分類される²⁾. レンズは外界に露出する角 膜と円錐晶体からなり,数個の視細胞が集まって感桿とよ ばれる光受容構造を形成する。神経層が視細胞層の前に位 置する脊椎動物の単眼とは異なり、視細胞層が光の入射側 に配置する構造のため、光の利用効率は高い³⁾ 連立像眼 では、それぞれの個眼が独立した光信号を検出する. それ に対して, 重複像眼には円錐晶体と光受容構造の間に透明 層が存在するため、ある個眼のレンズに入射した光信号は 隣接した個眼でも重複して検出される。連立像眼は単純な 構造であり, 昼行性の動物に多くみられる典型的な複眼で ある.一方,重複像眼は集光能力に優れるため,夜行性の 動物が有している.

光学システムとしての複眼の機能を解明する研究は古く から行われている⁴⁾.工学的には,構造が簡単で,かつ,

大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘 1-5) E-mail: tanida@ist.osaka-u.ac.jp



図1 複眼の構造.角膜,円錐晶体,感桿を単位とする個眼 が集合して複眼を構成する.

解析も容易な連立像眼がもっぱら対象とされる。連立像眼 では、各個眼が1画素の信号をとらえ、複眼全体でひとつ の画像情報を取得する、複眼を構成する個眼は、角膜が球 面を形成するように放射状に配列するため、 複眼全体で は、180度を超えるきわめて広い視野角が実現される。こ のような広視野角を単一のレンズで得るためには巨大なレ ンズが必要となり、現実的ではない。空間分解能は、隣り 合う個眼の光軸間角度を $\Delta \phi$ とすると、 $1/2\Delta \phi$ で与えられ る¹⁾ 複眼は、必ずしも完全な球状ではないため、Δo は 場所による変動があり、空間分解能も一様でない、 個眼密 度により,視野内の空間分解能の分布が調節されている. また、個眼の視細胞層は、視細胞内部の櫛状構造により、 直線偏光を識別する偏光感度を有している³⁾。偏光情報に より、天空方位の知覚やコントラストの増幅などに利用さ れている。また、シャコの一種は1/4波長位相差板に相当 する機能をもち、円偏光を識別することができる5)。この ように、自然界の複眼は示唆に富んだものであり、科学者 の興味を引きつけることも納得される。

2. 人工的複眼システム

诰

自然界に存在する複眼を模倣したり、その機構を応用したりして構成される人工的複眼システムは、工学的応用において大きな可能性を有している.ここでは、ハードウェアである構造と、ソフトウェアである信号処理に分けて、その特徴を説明する.

2.1 構

人工的複眼システムの実装には,集積エレクトロニクス と微小光学素子が利用される.この場合,半導体集積技術 の制約により,平面基板上に個眼要素を配置する形態がと られる.これは自然界の複眼の特徴を著しく損なうもので あるが,実装が容易である点,素子構成の工夫や信号処理 などにより新機能を生み出せる点などの理由から,典型的 な構成形態である.

図2に人工的複眼システムの概念図を示す. 個眼に相当 する個眼ユニットの集合体として複眼システムが構成され る.各個眼ユニットは並列に動作し,それぞれ異なった物 体情報を取得することができる.例えば,視点,方位,波 長,偏光,ダイナミックレンジ,サンプリング時刻などが 対象となる.これらの個眼ユニットを一体化した集合構造 としてハードウェアが実装される.

通常, 複眼を形成するレンズには、マイクロレンズアレ イが用いられる. ピンホールアレイでも同等の機能が得ら れるが, 光利用効率はきわめて悪い. マイクロレンズは小 口径のため, Fナンバーが同じであれば, 結像面までの距 離が短く, 撮像システムのコンパクト化に寄与する.

2.2 信号処理

複眼光学系による画像情報の取得原理を,図3を用いて 説明する.物体情報は,各個眼レンズにより多数の縮小像 として結像される.このとき,個眼の幾何学的配置により



図2 人工的複眼システム.物体信号が個眼ユニットで取得され,演算処理により画像情報として出力される.



図3 複眼光学系による画像再構成.物体情報が個眼レンズにより複眼像に変換され,各 個眼ごとにサンプリングされた信号の集合体として,出力画像が得られる.



図 4 複眼システムによる撮像モデル. (a) N 個眼の複眼システムによるサブピクセルサンプリング, (b) 単眼システムによるサンプリング, (c) 空間周波数スペクトル. 単眼システムは N=1 に相当する.

それぞれの縮小像は位置ずれを生じる.そこで,特定のサ ンプリング位置における光信号を検出することで,物体情 報を復元できる.サンプリング位置を変化させると,物体 像に対する幾何学的変換を行えることが示されている⁶. また,得られた個眼像を物体面に逆投影すると,高精細な 物体画像を再構成することもできる⁷⁾.

複数の個眼像の統合により高精細画像を再構成する場合,通常の単眼システムとの撮像特性の違いに注意を要する.ここでは、人工的複眼システムの理想的な信号取得の 状態、すなわち、サブピクセルサンプリング配置を取り上 げ、周波数解析に基づいて説明する⁸.図4に、N個の単 眼をもつ複眼システムによるサブピクセルサンプリング と、同じサンプリング間隔をもつ単眼システムにおけるサ ンプリング、ならびに、それらに対応する空間周波数スペ クトル S(v) を示す.サンプリング間隔を p とし、サンプ リング窓はサンプリング間隔に対する開口比 a の矩形開口 とする. N個眼の複眼システムの場合、物体信号は1/Nに 縮小結像されるため、実効的なサンプリング窓幅は apN になる.その結果、スペクトル全体に、サンプリング窓幅 に起因する関数 sin(πapNv)/(πapNv)が掛け合わされる. aN>2の場合、ナイキスト周波数 1/2p より低周波数側に スペクトルの零点が位置する.これは、|v|=1/apNにお ける空間周波数成分の欠落と|v|>1/apNにおけるスペクトルの位相反転を引き起こし、取得される画像情報は劣化する.この問題を解決するためには、個眼数Nを2以下とするか、何らかの画像修正処理を適用する必要がある.

そのほか、人工的複眼システムで実行可能な信号処理と して、三次元情報復元、焦点深度拡張、超解像などがあげ られる.個眼ごとに異なった光学特性をもたせることもで きるため、構成の工夫と信号処理の組み合わせにより、多 様な演算処理を実現できる.この点は、人工的複眼システ ムの注目すべき特徴である.

2.3 実装例

人工的複眼システムの先駆的な実装例として、緒方らに よるセンサーアレイがあげられる⁹⁾.マイクロレンズ、ピ ンホールアレイ、光検出器アレイを積層した 16×16 の独 立した光センサーをユニットとし、それらの組み合わせと して撮像システムを構成する.また、マイクロレンズアレ イとピンホールアレイの組み合わせにより、物体距離に起 因するスケール変化を抑制したスケール不変画像センサー が実現できる⁶⁾.自然界の複眼に忠実な模倣システムとし て、高分子樹脂の紫外線硬化と熱硬化の組み合わせによる 人工複眼が報告されている¹⁰⁾.球面上にマイクロレンズを 多数作り、外部からマイクロレンズに紫外光を照射し、そ の導波光により樹脂を硬化させて、複数の個眼構造を自己 組織化的に形成する.直径 2.5 mm の球面上に、最大径 25 µm の個眼レンズが 8370 個形成された人工複眼が作製され ている.

これらの人工的複眼システムでは、各個眼の光信号は単 一の光センサーにより取得される.すなわち、連立像眼と 同様に、個眼ごとに、画像における一画素の信号が得られ る.それに対して、個眼レンズで形成された物体像を、画 像情報としてとらえる人工的複眼システムも提案されてい る.複眼撮像システムTOMBOは、図5に示すように、イ メージセンサー上にマイクロレンズアレイと信号分離隔壁 を配置した撮像システムであり、個眼レンズによる物体像 を用いて物体情報を再構成する⁷⁾.再構成には演算処理が 必要となるが、さまざまな情報処理に対応できる高い拡張 性を備えている.

TOMBO の報告は,複数の微小カメラの集合体として人 工的複眼システムをとらえるという考え方に発展した.す なわち,異なった種類の光信号を同時に取得することによ り,高い自由度をもつ光センサーとして利用できる.信号 処理理論と組み合わせれば,これまでのカメラでは得られ

図5 複眼撮像システム TOMBO. 平面イメージセンサー上 のマイクロレンズアレイと信号分離隔壁により, 個眼ユニッ トが構成される. 個眼ユニットは縮小された物体画像信号を 取得し, 信号処理により物体情報が再構成される.

なかった高度な機能を提供する撮像システムを構成するこ とができる.このような考えに基づいて,米国国防高等研 究計画局の MONTAGE (Multiple Optical Non-redundanT Aperture GEnerated sensors) プログラムが開始された[†]. 同プログラムにおいて,サブピクセル計測,位相,偏光, ダイナミックレンジ拡張,波長分散を個眼ごとに割り当てる PERIODIC カメラ¹¹⁾,薄型赤外イメージングシステム¹²⁾ などが提案されている.

一方,ライトフィールドカメラ¹³⁾として知られる光線 情報を記録する撮像システムの実装技術として,複眼構造 は重要な役割を果たしている.プレノプティックカメラ は,通常のカメラの結像面にピンホールアレイを配置し, 結像点に入射した光線を再度分離させて検出する¹⁴⁾.物体 情報を光線信号として記録できるため,信号処理により, 奥行き情報の抽出,フォーカス面の変更,視点の移動など が行える.この方式は,ピンホールアレイを高密度マイク ロレンズアレイにより実装して光エネルギーの利用効率と 画像解像度を高めた可搬型システムの開発により,特に注 目されるようになった¹⁵⁾.計算イメージングとして情報 科学分野で研究が進められており,コンピューターの演算 性能の向上とともに実用化が期待されている.

ただし、プレノプティックカメラでは、結像面に配置されたマイクロレンズアレイの素子数が解像点数を決めるため、さらなる高解像化が難しい.そこで、結像面をマイクロレンズアレイで再結像させる結像型プレノプティックカメラが提案されている¹⁶⁾.これらのプレノプティックカメラは、結像レンズを前面に配置するため、他の人工的複眼システムとは大きく構成が異なっているが、TOMBOシステムと結像型プレノプティックカメラとの等価性が示されている¹⁷⁾.

3. 複眼撮像システム TOMBO の展開

複眼撮像システム TOMBOは、簡単な装置構成のため、

ユニット マイクロレンズアレイ 信号分離隔壁 イメージセンサ

[†] http://www.darpa.mil/MTO/Programs/montage/index.html



図6 TOMBOシステムの2形態. (a) 規則レンズ配置, (b) 不規則レンズ配置. 各センサーからの主光線が描かれてお り,レンズ右側の空間領域において,光線上の物体情報がセ ンサーでとらえられる.

高い拡張性を備える.その特徴を生かして、スペクトルイ メージング¹⁸,超近接物体撮影¹⁹⁾,超広角撮影,動き検 出²⁰⁾などの応用が提案されている.また、複眼光学系に 起因する画像劣化の対策として、超解像アルゴリズムに基 づく画像再構成法の有効性が示されている⁸.ここでは、 TOMBO システムに関連した最近の研究成果について紹介 する.

3.1 不規則レンズ配置 TOMBO

複眼光学系に固有の問題として、物体距離によって結像 特性が大きく変動する点があげられる.通常、複眼画像シ ステムで用いられるマイクロレンズアレイは、個々のレン ズが平面上に、正方格子状、あるいは、六方最密格子状に 配列されている.これは、設計や製造がしやすく、画像信 号処理も容易になる利点による.しかし、図6(a)に示さ れるように、ある物体距離では各個眼が物体の別々の点の 情報をとらえるが、別の物体距離では異なる個眼が同一点 の情報を重複して取得する.また、遠距離において各個眼 の観測点は凝集し、無限遠ではすべての個眼情報は縮退 する.

この問題に対して,個眼レンズを不規則に配置する手法 が提案されている²¹⁾.図6(b)に示すように,各個眼レン ズの中心座標をずらしたり,光軸を傾けたりすることによ り,複眼全体で物体空間をくまなく観測できる.部分的に は観測点の重複が生じるが,物体距離に対する結像特性の 変動は減少し,遠距離領域における特性は大幅に向上す る.具体的なレンズ配置は,いくつかの物体距離における 観測点の被覆率と個眼視野の重複率を評価関数に組み込ん だ最適化アルゴリズムにより設計できる.不規則レンズ配 置の導入により,規則的レンズ配置からの再構成画像に対 して,PSNR (ピーク信号対雑音比)で約6 dB の向上が確 認されている.

3.2 口腔内形状計測

複眼撮像システム TOMBO はコンパクトな形態をもつ



図 7 TOMBO による口腔内形状計測.(上) TOMBO モ ジュールの概観,(下) 顎模型へのパターン投射の様子.

ため,狭隘空間での撮像に適している.その特徴を生かし た応用として、口腔内形状計測が報告されている²²⁾.歯周 病の診察・治療では、歯周ポケットへの穿刺検査のほか、 歯肉の色・立体形状が有益な情報を与える.これらは、治 療計画の検討、患者への説明、治癒経過の記録などに有効 利用できるものと期待される.しかし、歯肉表面はテクス チャーに乏しく、表面の光沢による照明光の反射が避けら れない.そこで、歯肉とともに歯の形状を計測し、歯の表 面に対する相対位置として歯肉形状を記述する.ただし、 歯は強い散乱を示すため、単純な照明による受動的な画像 計測は難しい.

この問題を解決する手法として、外部から目印となる光 パターンを投影し、その変位量から形状を推定する.図7 に、試作した TOMBO モジュールと、歯科実習用の顎模 型に対するパターン投影の様子を示す.マイクロレンズア レイの両脇に投影パターンを出力する回折光学素子を2つ 設置し、光ファイバーで導いた緑色および青色レーザー光 をそれぞれに入射させる.三角測量の原理に基づいて、投 影パターンの変位量から、歯と歯肉の表面形状を決定す る.顎模型の計測において、最小二乗誤差0.46 mmの精度 が得られている.



図 8 赤外線 TOMBO センサーによる複眼サーモグラ フィー. 温度が高い部分ほど明るく表示されている.

3.3 アンビエント環境センサー

「いつでも、どこでも、誰とでも」という情報通信環境 を提供するユビキタス社会は、われわれの生活の利便性を 豊かにし、生産性を高めるものと期待されている.このユ ビキタス情報環境の発展形として、「今だから、ここだか ら、あなただから」という状況に応じた情報環境を提供す るアンビエント情報技術の研究が進められている²³⁾.アン ビエント情報環境の実現には、人を含めた空間情報の把握 が不可欠であり、その目的に適した環境センサーの開発が 必要になる.

この課題に対して,複眼撮像システム TOMBO をもと にした赤外線 TOMBO センサーの開発が進められてい る²⁴⁾. 図8に赤外線 TOMBO センサーによるサーモグラ フィー複眼画像を示す.赤外線センサーは,感度,画素数 ともに発展途上にあり,現状では十分な空間分解能が得ら れていない.そこで,従来の TOMBO における距離推定 手法に加えて,マルチカメラ用に開発されたマルチベース ラインステレオ法に基づいた距離推定手法などにより物体 認識の向上を図る.可視光情報をとらえる通常の TOMBO と赤外線 TOMBO の協調動作により,空間情報の把握, 人物位置の特定などを実現する.

本解説では、自然界に存在する興味深い視覚器官である 複眼に焦点をあて、基本的な特徴を説明し、工学的に応 用された人工的複眼システムについて整理した.また、 人工的複眼システムの具体例として、複眼撮像システム TOMBOにおける最近の研究成果についても紹介した.利 用可能な実装技術の制約により、必ずしも自然界の複眼の 特徴がすべて利用されているわけではない.しかし、周辺 技術の進展に伴い、新たな複眼の特徴が活用されることは +分期待される. 複眼画像システムは,形態上の特徴に注 意が向けられるが,個眼ごとに光学系の特性を設定できる 高い自由度に重要な特徴がある. コンピューターの発達に 伴う計算パワーの増大は,信号理論との組み合わせによる 新しい光学システムの発展を促している. 複眼画像システ ムは,その基本的なプラットホームのひとつとして有望な ものであり,さらなる展開が期待される.

文 献

- J. S. Sanders and C. E. Halford: "Design and analysis of apposition compound eye optical sensors," Opt. Eng., 34 (1995) 222– 235.
- 2) 蟻川謙太郎: "複眼という眼",見える光,見えない光. 寺北 明久, 蟻川謙太郎編(共立出版,2009) pp. 57-77.
- 針山孝彦,堀口弘子,植野由佳,弘中満太郎:"節足動物の視 覚系とその行動", Vision, 17 (2005) 27-38.
- G. A. Horridge: "Apposition eyes of large diurnal insects as organs adapted to seeing," Proc. R. Soc. Lond., B, 207 (1980) 287–309.
- N. W. Roberts, T.-H. Chiou, N. J. Marshall and T. W. Cronin: "A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region," Nat. Photonics, 3 (2009) 641–644.
- K. Hamanaka and H. Koshi: "An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale-invariant processing," Opt Rev., 3 (1996) 264–268.
- 7) 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," Appl. Opt., 40 (2001) 1806–1813.
- K. Nitta, R. Shogenji, S. Miyatake and J. Tanida: "Image reconstruction for thin observation module by bound optics by using the iterative backprojection method," Appl. Opt., 45 (2006) 2893–2900.
- 9) S. Ogata, J. Ishida and T. Sasano: "Optical sensor array in an artificial compound eye," Opt. Eng., **33** (1994) 3649–3655.
- K.-H. Jeong, J. Kim and L. P. Lee: "Biologically inspired artificial compound eyes," Science, **312** (2006) 557–561.
- 11) R. J. Plemmons, S. Prasad, S. Matthews, M. Mirotznik, R. Barnard, B. Gray, V. P. Pauca, T. C. Torgersen, J. Gracht and G. Behrmann: "PERIODIC: Integrated computational array imaging technology," *Adaptive Optics: Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/ Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, CMA1 (Optical Society of America, 2007).
- 12) M. Shankar, R. Willett, N. Pitsianis, T. Schulz, R. Gibbons, R. T. Kolste, J. Carriere, C. Chen, D. Prather and D. Brady: "Thin infrared imaging systems through multichannel sampling," Appl. Opt., 47 (2008) B1–B10.
- 13) M. Levoy and P. Hanrahan: "Light field rendering," Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM New York, NY, 1996) pp. 31–42.
- 14) E. H. Adelson and J. Y. A. Wang: "Single lens stereo with a plenoptic camera," IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Int., 14 (1992) 99–106.
- 15) R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford Univ. Comput. Sci. Tech. Rep. CSTR 2005–02 (2005).
- 16) A. Lumsdaine and T. Georgiev: "The focused plenoptic cam-

era," *Proc. International Conference on Computational Photography* (2009) pp. 1–8.

- 17)藤原泰宏,遠藤由樹,香川景一郎,森本康裕,谷田純:
 "TOMBOと Plenoptic Camera の性能比較",第70回応用物理学会学術講演会講演予稿集,10a-D-5 (2009).
- 18) R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, S. Miyatake and J. Tanida: "Multispectral imaging using compact compound optics," Opt. Express, 12 (2004) 1643-1655.
- 19) R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, S. Miyatake and J. Tanida: "Bimodal fingerprint capturing system based on compound-eye imaging module," Appl. Opt., 43 (2004) 1355–1359.
- 20) 豊田 孝: "COMS イメージセンサを用いた複眼カメラとその 応用",映像情報メディア学会誌, 63 (2009) 284-287.
- 21) R. Horisaki, K. Kagawa, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki and J. Tanida: "Irregular lens arrangement design to improve image

performance of compound-eye imaging system," Appl. Phys. Expr., **3** (2010) 022501.

- 22) K. Kagawa, H. Tanabe, C. Ogata, Y. Ogura, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki, M. Ueda and J. Tanida: "An active intraoral shape measurement scheme using a compact compound-eye camera with integrated pattern projectors," Jpn. J. Appl. Phys., 48 (2009) 09LB04.
- 23) 文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費補助金) アンビエント情報社会基盤創成拠点平成 20 年度成果報告書 (大阪大学, 2009).
- 香川景一郎,谷田純: "小型複眼カメラ TOMBO のサーモグ ラフィへの応用と測距の検討", Optics & Photonics Japan 2009 講演予稿集, 24aF1 (2009).

(2010年3月3日受理)