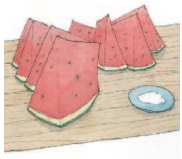


# 複眼撮像システムとその応用



技術解説

谷田 純\*

Compound-eye Imaging Systems and their Applications

Key Words : compound-eye, camera, computational imaging, image sensor, microlens

## 1. はじめに

複眼は、昆虫や甲殻類に多く見られる視覚器官である。その特徴的な形態は古くから興味の対象であり、構造や光学特性などの研究が進められてきた。一方、多数の微小レンズと受光素子で構成される複眼は、光学素子の微小化や撮像デバイスの高集積化に支えられた最新の撮像技術と高い適合性を持っている。本稿では、自然界に見られる複眼にヒントを得た複眼撮像システムを紹介し、新しいイメージング技術におけるプラットフォームとしての有用性を明らかにする。



図1 複眼の構造

## 2. 複眼とは

昆虫や甲殻類に代表される節足動物は、複眼と呼ばれる視覚器官を有している。典型的な複眼は、図1に示すように、レンズと視細胞群により構成される個眼が集合した構造をもつ。個眼の数は、ミジンコの130個からミツバチやトンボなどの10000個以上まで、生物種によって大きく異なる<sup>1)</sup>。一つの個眼は、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<sup>2)</sup>。レンズは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呼ばれる光受容構造を形成する。連立像眼では各個眼が独立した光信号を検出するのに対して、重複像眼では円錐晶体と感桿の間に透明層が存在し、一つの個眼レンズに入射した光信号は隣接する個眼でも重複して検出される。連立像眼は昼行性の動物に多く見られる典型的な複眼であり、重複像眼は優れた集光能力により夜行性の動物が有している。

複眼の構造や光学特性を解明する研究は古くから行われている<sup>3)</sup>。工学的には、構造が簡単で、機能解析も容易な連立像眼が主として用いられる。連立像眼では、各個眼が一つの画素信号をとらえ、複眼全体で画像情報を取得する。複眼を構成する個眼の集合体は、球面を形成するように放射状に配列し、複眼全体では、180度を超える極めて広い視野角が得られる。同じ視野角を単一レンズで実現しようとすると、非常に大きなレンズが必要になってしまう。個眼レンズは、特定方向から届いた光信号を光受容構造に集光するだけでよく、精密な収差補正やアライメントは必要ない。複眼の空間分解能は、隣り合う個眼の光軸間の角度 $\Delta\phi$ とすると、 $1/2\Delta\phi$ で与えられる<sup>1)</sup>。トンボなどは扁平した複眼形状をもつが、場所によって $\Delta\phi$ が異なることになり、視野内での空間分解能の重み付けがなされている。自然発

生発



\* Jun TANIDA

1958年6月生  
大阪大学 大学院工学研究科 応用物理学専攻 (1986年)  
現在、大阪大学 大学院情報科学研究科 情報数理学専攻 情報フォトニクス講座 教授 工学博士 情報フォトニクス  
TEL : 06-6879-7851  
FAX : 06-6879-7295  
E-mail : tanida@ist.osaka-u.ac.jp

生的なメカニズムで、光信号を捕らえるレンズが形成され、空間分解能まで制御されている点は極めて興味深い。このように、複眼が示す性質や特徴はいろいろな応用可能性を包含し、多くの科学者の興味を引きつけてきたことも納得される。

### 3. 人工的複眼撮像システム

自然界の複眼に触発されて、さまざまなタイプの人工的な複眼撮像システムが開発されている。以下ではいくつかの典型的な方式について紹介する。

#### 3.1 連立像眼模倣システム

先駆的な実装例として、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する撮像システムが提案されている<sup>4)</sup>。自然界の複眼を忠実に模倣したシステムとしては、高分子樹脂の紫外線硬化と熱硬化を組み合わせた人工複眼がある<sup>5)</sup>。球面上にマイクロレンズを多数作り、外部からの紫外光照射により、自己組織化的に複眼構造を形成する。直径2.5mmの球面上に、最大径25 $\mu$ mの個眼レンズが8370個形成された人工複眼が発表されている。

これらの複眼撮像システムでは、連立像眼と同様に、各個眼は撮像対象の一点の信号のみを取得する。容易に想像されるように、このタイプの撮像システムでは、取得画像の画素数は個眼数で決定され、物理的にはマイクロレンズの数で制限される。図1に示した連立像眼の要点は、球面上に個眼レンズを配置する点にある。その結果、各個眼が異なる方向からの光信号を取得するとともに、レンズ数の増加に対しても物理的な制約を緩和できるという利点がある。しかしながら、現在の半導体集積回路技術は平面基板を基本としており、球面上にレンズを配置する複眼撮像システムとは隔たりが大きい。

#### 3.2 拡張型連立像眼システム

連立像眼の問題を解決するシステム構成法として、個眼レンズを点情報ではなく、物体像全体を捕らえる光学素子として用いる方式が考えられる。すなわち、個眼レンズにより物体像を結像させ、個眼画像として物体情報を取得する。複眼撮像システム全体で多数の個眼画像が得られるため、演算処理により物体情報を再構成する。この考えに沿った複眼撮像

システムとして、TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) が提案されている<sup>6)</sup>。図2にTOMBOの構成と試作システムの写真を示す。イメージセンサ上にマイクロレンズアレイと信号分離隔壁を配置し、各個眼レンズで形成された物体像をイメージセンサにより撮像する。すべての個眼レンズが同じ仕様の場合でも、各個眼ユニットは異なる視点から物体を観測するため、それぞれの個眼画像は異なる物体情報をもつ。このとき、複数の個眼画像から視差情報を抽出して、物体距離を推定することができる<sup>7)</sup>。あるいは、個眼ユニットの光学特性を意図的に違うものにすれば、さまざまな種類の情報を同時に取得できる。

個眼ユニットが画像を捕らえる場合、撮像領域と個眼ユニットの視野との関係により、視野分割型と視野重複型の二つの形態に分類される。図3にその様子を示す。視野分割型は各個眼ユニットが異なる撮像領域を、視野重複型はすべての個眼ユニットがほぼ同一の撮像領域を、それぞれ観察する。視野分割型は、個眼画像のつなぎ合わせ処理で広視野画像を容易に得る。視野重複型は、視野内の各点に関する複数の情報を同時に得ることができ、多様な情報取得に応用できる高い拡張性をもっている。なお、図3では、球面上に個眼レンズを配置することで視

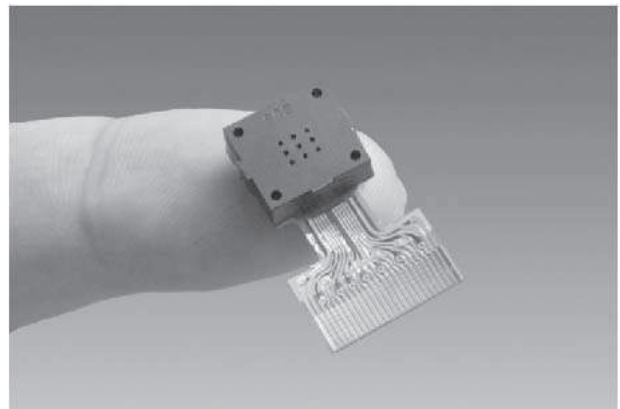
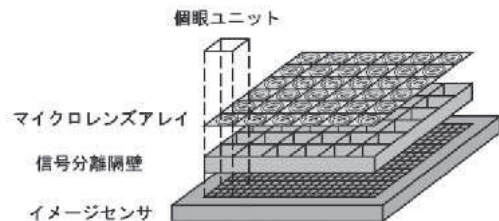


図2 複眼撮像システム TOMBO

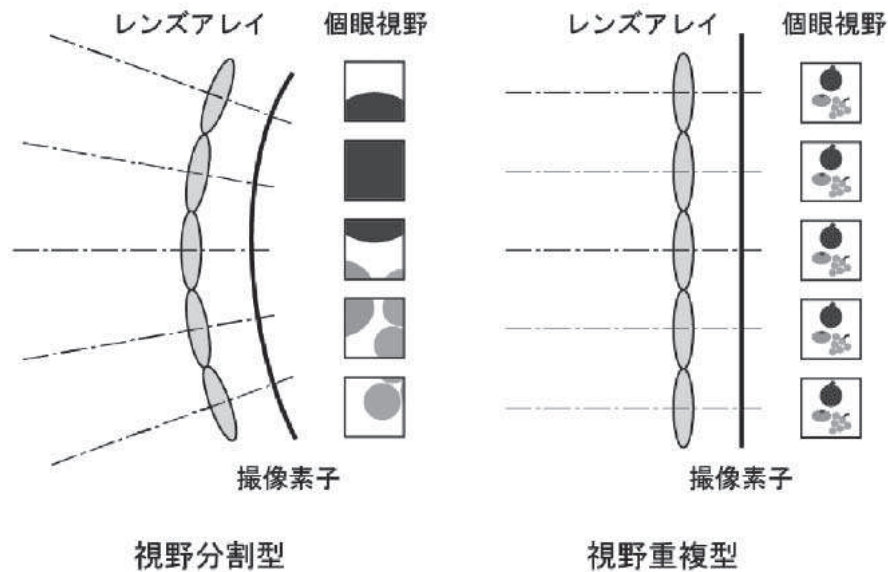


図3 複眼撮像システムの二形態

野分割を実現しているが、反射鏡やプリズムを挿入したり、イメージセンサ上の個眼領域のピッチに対して個眼レンズのピッチを拡げたりして、個眼レンズの光軸を外側に振ることで同等な効果が得られる<sup>8)</sup>。

### 3.3 ライトフィールドカメラ

最近、ライトフィールドカメラと呼ばれる新しいタイプの撮像装置が商品化され、注目されている<sup>9)</sup>。ライトフィールドとは、3次元空間を伝播する光を光線として記述したもので、記録されたライトフィールドから3次元空間の光線の状態、すなわち、物体情報を自由に再構成することができる。一見構成が異なるライトフィールドカメラであるが、図4に示すように、複眼撮像システム的一种と見なすことができる。結像面、あるいは、その付近にマイクロレンズアレイを配置することにより、結像点に収束

する光線をマイクロレンズで分離させ、その光線情報を取得する。

ライトフィールドカメラの特徴として、取得信号に対する演算処理により、任意の距離にフォーカス位置を変更(リフォーカス)したり、観測者の視点を自由に設定したりできる。これらの再構成画像は、ワンショットの撮像データから生成でき、シャッターチャンスを逃さず、後で空間情報を自由に再構成できる計算イメージングとして注目されている。なお、これらの機能は、視野重複型複眼撮像システムに共通なものであり、複眼撮像システムの用途を拡げるものと期待される。

### 3.4 マルチスケールレンズシステム

複眼撮像システムは、カメラシステムの小型化や集積化だけに用いられるのではなく、撮像システムそのものの高性能化にも利用されている。通常のレ

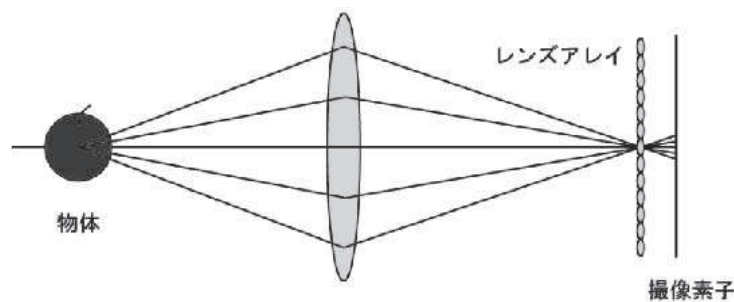


図4 ライトフィールドカメラ



レンズを用いた結像光学系は、光軸付近で光学特性が最も良く、周辺視野では軸外収差の影響により解像力は低下する。その結果、広視野かつ高解像度な撮像システムの実現は極めて困難である。この問題に対して、大口径の対物レンズと二次レンズアレイの組み合わせによるマルチスケールレンズシステムが提案されている<sup>10)</sup>。基本的な考え方は、図5に示すように、対物レンズによって生じる収差を、視野の分割領域ごとに設置する二次レンズで補正する。収差は、視野の各部分で大きさや特性が異なり、その補正に多大な努力が費やされている。そこで、各分割領域に適した収差補正を行う二次レンズを挿入することで、光学性能の向上と光学系設計の問題が解決できる。この方式に基づいたAWAREと呼ばれる数10億オーダーの画素数をもつギガピクセルイメージングシステムが報告されている<sup>11)</sup>。

### 3.5 重複像眼システム

工学応用では敬遠されがちな重複像眼であるが、私たちのグループでは、その特異的な光学特性を活用した撮像システムを提案している<sup>12)</sup>。図6に示

すように、個眼レンズとして正立結像レンズを用い、それらを球面上に配置する。正立結像レンズには、コピーやスキャン装置で用いられる屈折率分布型ロッドレンズが利用できる。この光学系は、異なる距離にある物体点を同一面に重ねて結像する。また、同じ距離にある物体については、横方向に並んだ物体点を重ねて結像する。その結果、奥行き方向と面内方向に走査した物体像の重畳信号が撮像面で得られる。一般に、奥行き方向のずれはピントボケを生み、面内方向のシフトは軸外収差を伴うが、これらは位置依存性をもつため、簡単に補正できない。しかし、重複像眼光学系で得られる重畳画像ではピントボケや軸外収差の影響が平均化され、位置不変的な信号劣化を受けた画像と見なすことができる。そのため、ウィナーフィルタなどのデコンボリューションにより信号劣化を回復でき、同時に被写界深度と撮像視野を拡張する効果も得られる。

### 4. 複眼撮像システムの応用例

撮像装置としての複眼撮像システムの特徴は、1) 小口径レンズによる結像光学系の薄型化、2) 微小

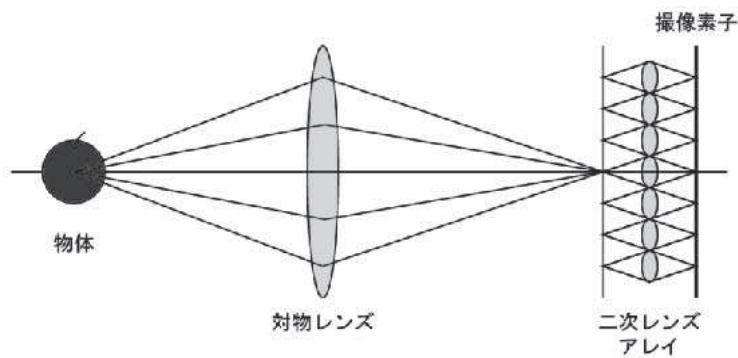


図5 マルチスケールレンズシステム

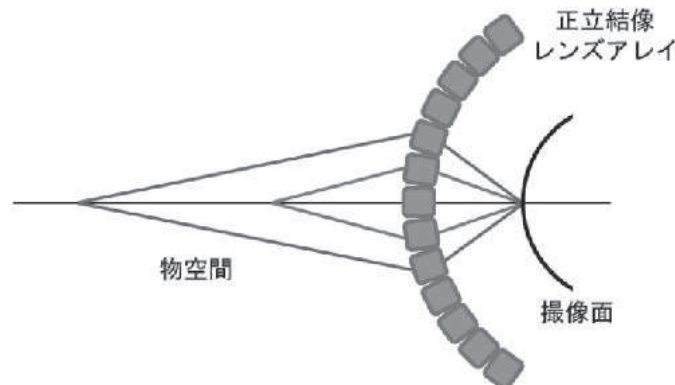


図6 重複像眼光学系

レンズアレイとイメージセンサの一体集積化、3) 光線情報の取得による物体情報の再構成、4) 多種情報の一括取得、5) 2次レンズアレイによる広視野超高解像イメージング、などがあげられる。これらの特徴により、さまざまな応用が提案されている。

具体的には、超薄型カード型カメラ、3次元情報取得カメラ、スペクトルイメージングカメラ、偏光カメラなどの特殊な撮像システムが考えられている。また、装置のコンパクト性を活かして、アンビエント環境センサ、監視カメラ、口腔内検査カメラ、医用・工業用内視鏡なども有望な用途として、実験システムが試作されている。

一方、多様な情報を手軽に取得できる特徴から、計算イメージング用の汎用入力デバイスとしても有用である。個眼ユニットごとに光学特性をカスタマイズして、対象情報を効率的に取得し、再構成するシステムの構築が可能になる。さらに、新たな信号処理の枠組みとして注目されているコンプレッシブセンシング<sup>13)</sup>を利用して、個眼ユニットごとに異なる光学変調を加え、空間座標、波長、時間などの多次元情報を一括取得する手法も検討されている<sup>14)</sup>。

## 5. おわりに

複眼撮像システムは、光学素子の微小化や撮像デバイスの高集積化の技術トレンドに沿った新しいイメージング技術のプラットフォームとして有望なものである。シンプルな構成でありながら、大きな自由度を備えている。また、複眼撮像システムはコンピュータの演算能力向上に支えられた計算イメージングとも高い親和性をもつ。これらの特徴を活かした多様な課題への適用が期待される。

## 参考文献

- 1) J. S. Sanders and C. E. Halford: "Design and analysis of apposition compound eye optical sensors," *Opt. Eng.* **34**, 222-235 (1995).
- 2) 蟻川謙太郎: "複眼という眼", 見える光, 見えない光 (共立出版, 2009) pp.57-77.
- 3) G. A. Horridge: "Apposition eyes of large diurnal insects as organs adopted to seeing," *Proc. R. Soc. Lond. B* **207**, 287-309 (1980).
- 4) S. Ogata, J. Ishida and J. Sasano: "Optical sensor array in an artificial compound eye," *Opt. Eng.* **33**, 3649-3655 (1994).
- 5) K.-H. Jeong, J. Kim and L. P. Lee: "Biologically inspired artificial compound eyes," *Science* **312**, pp.557-561 (2006).
- 6) 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**, 1806-1813 (2001).
- 7) R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura and J. Tanida: "Three-dimensional information acquisition using a compound imaging system," *Opt. Rev.* **14**, 347-350 (2007).
- 8) J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer, A. Tünnermann: "Thin compound-eye camera," *Appl. Opt.* **44**, 2949-2956 (2005).
- 9) R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, H. Horowitz and P. Hanrahan: "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," *Comput. Sci. Tech. Rep. CTSR 2* (2005).
- 10) D. J. Brady and N. Hagen: "Multiscale lens design," *Opt. Express* **17**, 2026-2032 (2009).
- 11) D. J. Brady, M. E. Gehm, R. A. Stack, D. L. Marks, D. S. Kittle, D. R. Golish, M. E. Vera and S. D. Feller, "Multiscale gigapixel photography," *Nature* **486**, 386-389 (2012).
- 12) T. Nakamura, R. Horisaki and J. Tanida, "Computational superposition compound eye imaging for extended depth-of-field and field-of-view," *Opt. Express* **20**, 27482-27495 (2012).
- 13) D. L. Donoho: "Compressed sensing," *IEEE Trans. Info. Theory* **52**, 1289-1306 (2006).
- 14) R. Horisaki, K. Choi, J. Hahn, J. Tanida and D. J. Brady, "Generalized sampling using a compound-eye imaging system for multi-dimensional object acquisition," *Opt. Express* **18**, 19367-19378 (2010).