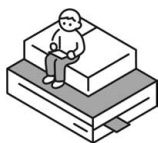


新刊紹介



複眼カメラ — トンボの眼から学ぶ複眼撮像システム —

谷田 純 著
朝倉書店, 2024 年
(ISBN 978-4-254-21044-6)



カメラ機能の本質とは何だろうか？一言で答えるのは難しいが、ざっくりいえば「物空間の三次元構造を光学的手段で二次元センサー面上に写像して、所望の物体情報を取得すること」ではなかろうか。だとすれば、カメラ機能の本質は17世紀のカメラ・オブスクラ (camera obscura) の時代から今も変わらない。だが、それを実現するための手段は周辺技術の発展とともに多様化し、高度な進化を遂げつつある。副題にあるように、本書はトンボの眼からヒントを得た複眼撮像システム TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) の原理から応用までに関する総合的な解説書である。といっても、ただの解説書ではない。本書は、著者自身がその研究開発に直接携わり、仲間と苦楽をともして種々の TOMBO を構築し、その実体験を通じて獲得した知識と経験を実践的解説書として初めて体系化したものである。なので、余人の著わすことのできないユニークな解説書である。もう一つの特色は、近年急速な発展を遂げつつある計算イメージング (computational imaging) という学際的新分野について具体例を通じて学ぼうとする実学志向の技術者のためのよい参考書となる点である。計算イメージングは、著者の谷田氏がライフワークとしてきた物理 (光科学) と数理 (情報科学) の融合が最も自然な形でうまく成功している分野である。このように、著者の熱き思いが込められている本書は、今後の計算イメージング分野の発展に大きく寄与するのではないかと期待される。全体は11章からなる。以下に、評者の理解の範囲で、その概要を紹介する。

第1章 光と眼

本論に入る前の準備のための章である。異分野からの読者を想定して「光とは何か」「眼とは何か」について概説し、専門用語の定義を述べている。光学が専門で生物学の知識に乏しい評者にとって、生物の複眼の構造や機能的分類に関する概説は有用であった。また、生物の構造や機能

を模して新技術を考案する方法論がバイオミメティクス (biomimetics) という新分野を形成しているというのも初めて知った。自然淘汰に耐え、悠久の時を経て進化してきた生物の眼を「極限の合目的性を備えたカメラ」とみなし、それを模して複眼撮像システム TOMBO を開発することの合理性もうなずける。

第2章 イメージングの基礎

計算イメージングの概念について述べるとともに、その基礎となる空間情報のエンコーディング (encoding: 三次元物理情報を二次元数値情報へ変換) とデコーディング (decoding: 二次元数値情報から三次元物理情報を復元) の原理を説明している。三次元物空間から二次元像空間への幾何学的写像は、レンズの瞳中心を通る主光線による中心投影に基づいている。物体上の1点を発した光線群のそれぞれが通過する位置と方向がわかれば、各位置で光線の向きに直交する局所的な接平面が決まり、それらを連続的につなげるにより波面を構成することができる。このように原理は幾何光学的であっても、波動光学的な波面の概念を導入することができる。各点での「光線の位置と方向」の空間分布をライトフィールド (light field) とよび、奥行き異なる三次元物体にリフォーカス (refocus) する機能をもたせることができることを示している。イメージセンサーで得られた二次元数値情報から三次元物理情報を復元する過程は、線形モデルに基づく逆問題と位置付け、解を求めるための疑似逆行列や数理的最適化法について概説している。

第3章 イメージング光学系

カメラの主要な光学素子であるレンズの近軸理論と空間周波数の概念を導入したフーリエ結像論を概説した後に、大口径レンズと小口径・短焦点距離のマイクロレンズアレイを連結したハイブリッド光学系について解説している。

大口径レンズによる物体の共役像面上にマイクロレンズアレイを置き、さらに少しだけ離してイメージセンサーを置く。すると、レンズアレイの瞳がピンホールアレイの役割を果たし、大口径レンズによる共役像を結ぶ光線群の集光点の位置情報を与える。その少し後方のイメージセンサー上の光検出位置から各光線の方向が決まるので、ライトフィールドが求まる。このようなライトフィールドカメラへの応用のほかに、大口径レンズの瞳を分割して特性の異なる小レンズをアレイ配置して像面湾曲補正をするマルチスケールレンズシステムについて概説している。

第4章 複眼光学系

複数の同じ結像光学系をアレイ配置した「均一複眼光学系」に重点を置き、その結像特性を論じている。複眼光学系では、投影中心となる個々のレンズユニットの瞳位置が異なる位置に配列されるので、レンズユニットごとに異なる横ずれをした視野をもつ。視野の違い（視差）が物体距離に依存するので、物体の奥行き情報が得られることや、特定の物体距離での横ずれを利用して画素間の像情報を補間するなど、通常の単一レンズではできない機能を紹介している。そして、有限開口のイメージセンサー素子を用いた離散的検出による複眼光学系の空間周波数特性への影響を論じている。また、個々の光軸方向が異なるレンズユニット群を用いた（視野重複のない）視野分割型の複眼光学系についても概説している。

第5章 複眼撮像システムTOMBO

複眼光学系の原理の実施例として、著者らが開発したTOMBOの構成例について述べた章である。均一複眼光学系の視野が各個眼に分配されることを利用して、物体情報の獲得に必要な偏光、分光、時刻等の検出機能を各個眼に割り当てる機能設定について説明している。

第6章 TOMBOのハードウェア実装

これまでに試作された代表的なTOMBOシステムを紹介し、光学素子、個眼ユニット間の信号分離隔壁、イメージセンサー、制御プロセッサなどのTOMBOシステムを構成する部品に要求される仕様と最近の技術発展動向について解説している。

第7章 基本的な利用法

TOMBOシステムのもつべき基本的機能の一つは、複数の個眼ユニットからの像情報を統合して物体像を再構成することである。そのための方法として、画素サンプリング

法、レジストレーション法、画素再配置法などを紹介している。また、TOMBOによる距離計測の原理として、ステレオ法と複眼光学系に固有な方法であるレジストレーション誤差評価法について述べ、それぞれの特性を比較している。TOMBO画像のカラー化には、個眼レンズユニットに色フィルターを付けて単色イメージセンサーで検出する方法と、個眼レンズユニットの画像をカラーイメージセンサーで検出する方法がある。前者は色フィルターを濃度フィルターに変えて検出のダイナミックレンジを調整するなど、選択の自由度を利用した機能拡張性があることを述べている。そのほかに、ローリングシャッター式イメージセンサーを用いて複眼画像に時間差情報を取り入れることにより物体の動きを計測する方法についても紹介している。

第8章 発展的な利用法

均一複眼光学系では各個眼ユニットの視野が物体距離に依存し、イメージセンサーによる遠方物体の視野被覆率が低下する。この問題を解決するための方法として、個眼ユニットを不規則に配置する不規則配列法について説明するとともに、その不規則配列の最適化について述べている。均一光学系では、個眼ユニット数とイメージセンサーの検出素子の開口率の間にトレードオフの関係があるため解像力が制限される。この問題への対応策として反復法による超解像処理について解説している。さらに、TOMBOによる複眼ライトフィールドカメラの実現方法や、フレキシブル基盤を用いて各個眼ユニットの光軸の傾きを変えて視野制御する方法について述べている。

第9章 さまざまな応用

TOMBOに適した応用例として、小型で近接物体の三次元計測ができるという特長を生かした、歯科用口腔内計測システム、マルチスペクトル立体内視鏡、また小型・軽量・多機能性を生かしたドローン搭載カメラとしての環境モニタリング、接写と通常撮影ができることを利用したバイオメトリクス認証、複眼の偏角画像計測機能を用いた文書鑑定など多様な応用をあげて、それぞれの実証機について詳述している。

第10章 情報科学・数理科学による拡張

複眼カメラの性能を高めるのに不可欠な数理学的手段として、計算イメージング、圧縮イメージング、機械学習イメージングなどについて解説している。本章は、具体例による実践的な計算イメージングについて学びたい読者に役立つ知識を提供してくれる。

第11章 さらなる発展に向けて

複眼カメラのシステム全体構成を俯瞰し、今後のシステム設計の鍵となる問題について将来の技術動向を考慮したうえで、最適個眼ユニット数、光学系（物理的手段）と演算系（数理的手段）のバランス、生物の眼の発展史にならった連立像眼から重複像眼への移行の可能性、などについて検討している。

以上のように、評者の立場から各章ごとに概要をできるだけ客観的に紹介してきたが、そうするとどうしても味気ない紹介文になってしまう。そこで最後に、一読者としての自由な立場から、主観的な印象を交えた個人的読後感を述べることにする。読後まず感じたのは、「複眼カメラ」には自分（武田）がこれまであまり深く考えずにいた面白そうな研究テーマの種がいろいろ含まれているようだ、ということだ。どこに面白さを感じるかはもちろん読者次第だ。私自身についていえば、そもそも論として「大口径単一レンズと、同じ口径面積を分割した複眼レンズとでは、どちらの空間情報伝達量が大きいのか？ 情報伝達量の上限は何か、その上限を決める因子はなにか？」という素朴な疑問が湧いてきて、それに自問自答するのを楽しんだ。本書が新たに提示した「空間情報のエンコーディングとデコーディング」という通信理論的概念に触発されて、最初、空間情報伝達量の評価尺度としてシャノン（Shannon）の通信路容量（channel capacity）のようなものをイメージした。だが、本書の議論は統計的ノイズを含まない完全に決定論的（deterministic）な枠組みで構成されているのでシャノン理論の適用外だ。だから、空間情報伝達量は「伝達可能な画像の自由度（degree of freedom）」、つまり「視野と空間周波数帯域幅の積（space-bandwidth product）」で比較すべきだ、と考えなおした。ところが、本書の議論は「収差のない理想光学系」の主光線による点

投影と「回折のない幾何光学」を基礎にしているので、点物体の共役像は広がりのない幾何学的な点となる。つまり、空間周波数帯域幅が無限大となるため画像の自由度が発散し、理想光学系同士の比較は意味をなさない。どうするのだろうと思いながら4章まで読み進めると、なるほど、やはりイメージセンサーを含んだカメラシステム全体として比較評価するのか、と気づかされる。イメージセンサーの有限開口が空間周波数帯域幅を制限し、有限画素間隔が画角を制限するので画像の自由度が発散しない。したがって、無収差・無回折の（物理的にはあり得ない）理想的幾何光学的レンズを仮定したときのカメラの性能の上限はイメージセンサーによって決まる、いわば「センサー限界（sensor-limited）」だったのだ。デジタルカメラ時代の技術者にとって当たり前の結論に、恥ずかしながら、私はやっと辿り着くことができた。何のことはない、私はイメージセンサーがなかったカメラ・オブスクラの時代のアナログ（アナクロ？）光学技術者だったのだ。この例のように、本書は読みながら一人でいろいろと考えを巡らす楽しめと、これまで気づかずになっていた問題を発見する面白さを随所で私に感じさせてくれた。

紙数が尽きたようだ。以上を要するに、本書は、複眼カメラ TOMBO を具体例に、光学、情報科学、生物学などの異分野を横断するテーマを総合的に論じた他に類例のない解説書である。評者の狭い視野では、本書の多面的な価値と魅力を十分に伝えられていないのではないかとおそれる。広い分野の多くの読者により、異なる視点から「複眼的」に読み解かれることによって、本書の真価はおのずと顕れるであろう。ともあれ、ユニークな解説書である。ぜひ一読され、自身の視点で本書の価値と魅力を発見することを勧めたい。

（宇都宮大学オプティクス教育研究センター 武田光夫）