

シオマネキが持つ複眼を応用した 水陸両用パノラマカメラ

サリー・コール・ジョンソン

新たな光工学、非平面イメージング、柔軟性のある電子機器を組み合わせ、水中・地上の両環境に対応可能な「カニ眼カメラ」が研究開発された。

シオマネキ(カニ)の潜望鏡のような複眼は、パノラマイメージング機能が優れており、陸上でも水中でも対象物を見ることができる。韓国と米国の研究チームはその点からヒントを得て、表面が平らなマイクロレンズを作製し、水陸両環境で全方位イメージングが可能なパノラマの人工視覚システムを設計した⁽¹⁾。

生物を応用した人工視覚システムはすでに大きな進歩を遂げているが、これまでは水陸両環境でのイメージングには適さなかった。半球状(180度)の視野角に限定されており、完全なパノ

ラマビジョンや外部環境の変化への対応には不十分だった。

そこで同チームは、シオマネキのように水陸どちらでも撮影可能な360度のFOV(視野)カメラ(図1)の開発に着手した。平面光学系で360度の視野領域を有するカメラである。

「シオマネキの眼内レンズは、角膜が平らで、水陸両方のイメージングに適した屈折率分布型になっている」と、韓国の光州科学技術院電気工学・コンピュータサイエンス学部のヤン・ミン・ソン教授(Young Min Song)は解説する。「従来の曲面レンズでイメ

ージングを行った場合、水に浸すと焦点位置がずれてしまう。しかし、平面レンズを使用すれば、水陸の環境を問わず鮮明な画像を表示できる」。

平面光学系マイクロレンズの作製

平面表面のマイクロレンズが存在しないため、同チームは、シオマネキの高性能なレンズを模倣してマイクロレンズを作製した。

米マサチューセッツ工科大コンピュータ科学・人工知能研究所(CSAIL)電気工学・コンピュータサイエンスのフレド・デュラン教授(Frédo Durand)



は、自然界に存在する多様な光学設計に目が離せないと言う。「両生類の生物は、光学的特性が大きく異なる2つの環境で生活するため、特に面白い。このような課題に対処する方法を自然界から学ぶことは、身の引き締まる思いだ」と同教授は述べている。

ほとんどのレンズは、空気とレンズの界面で、スネルの法則を利用して光線を曲げるという困難なことを行う。「しかし、空気中と水中の両方で光学処理を行う場合、屈折率が大きく異なるため、同じように曲げることはできない。それに対して、われわれの光学設計では、表面ではなく、内部で光線を曲げるのだ」とデュラン教授は言う。

同チームは、このレンズを作製するために、屈折率を変えて何度もコーティング加工を行った高分子物質を使用した。試行錯誤の結果、最適化した処理条件で、屈折率分布型の完全な平面を作り出した(図2)。「最も素晴らしい点は、このレンズが自然界のカニ眼レンズと同じような特性を持っていることだ」とソン教授は述べている。

シオマネキの目のマイクロレンズの直径は約 $20\mu\text{m}$ だ。このため、同チームは、多様な用途に適用するために、直径が $17\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ の3種類のマイクロレンズアレイを作製した。

「これらのアレイはすべて、直径、曲率半径、高さなどの点で非常に均一な形状をしている。これは、われわれのマルチスピンコーティング加工を、さまざまな形状のマイクロレンズアレイに適用できることになる」とソン教授は言う。

カニ眼カメラ

同チームは、マイクロレンズを作製後、屈折率分布型の平面マイクロレンズのアレイを備えたカメラを開発し



図1 カニ眼カメラは、陸上でも水中でも機能する(写真提供:GIST ヤン・ミン・ソン教授)

た。そのカメラに柔軟な楕形Si(シリコン)フォトダイオードアレイを組み込み、球体構造(直径わずか 2cm)を搭載することで、コンパクトで持ち運びの便利なものにした。

「360度の視野を実現するために最初に考案したことは、「切り紙」技術(メムブレンを切断して折り畳むこと)で、どのような形状の3D構造のものに取り付けられるようにした。例えば、高密度のマイクロレンズアレイを備えた

非常に小さな3D球状の構造も、この形状から得られたものだ」とソン教授は述べている。

しかし、カメラを製造するためには、フォトダイオードアレイとマイクロレンズアレイを統合する必要があった。「研究室レベルでは、小型で高密度のフォトダイオードを作製することは難しく、データ収集のための多数の電気配線で高密度集積の構成が妨げられてしまう」とソン教授は言う。「別のアプ

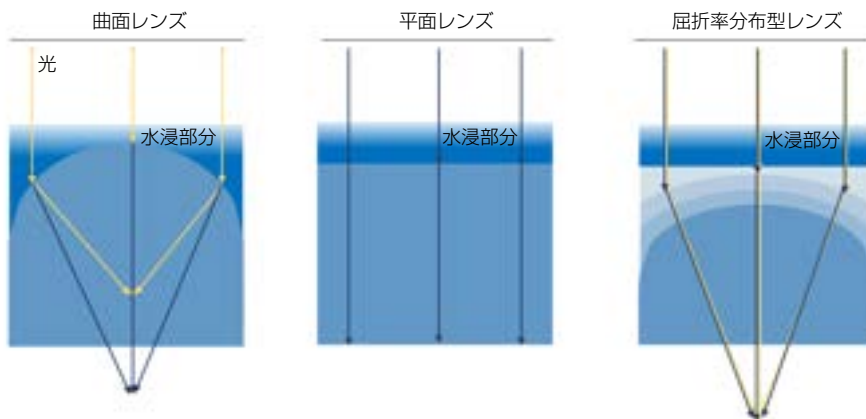


図2 独自の人工的カニ眼マイクロレンズが開発された(画像提供:M・リー氏ら⁽¹⁾)

水陸両用視覚のための光学シミュレーション

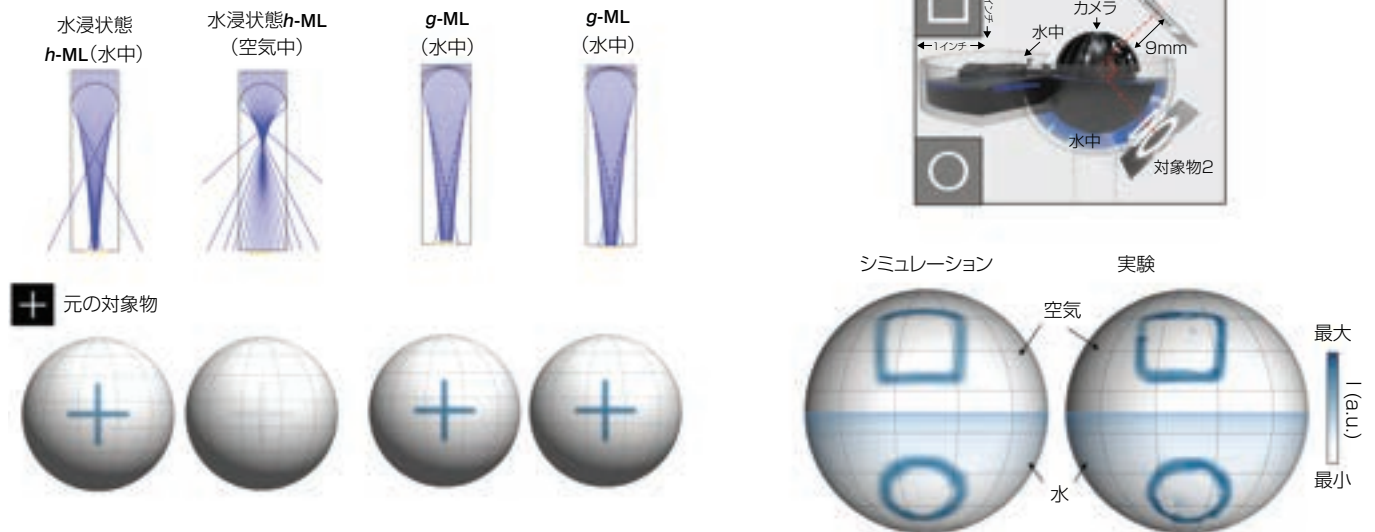


図3 水陸両用視覚のための光学シミュレーション(画像提供:M・リー氏ら⁽¹⁾)

ローチとして、楕形の形状を用いた」。

データはどのように処理されるのだろうか。ソン教授は次のように述べている。「カメラにはフォトダイオードアレイを搭載しているため、フォトダイオードとデータ収集ボードを電気金属線で接続している。従来のカメラに比べて画素数が少ないため、シンプルな線画パターン(四角、丸など)を使っている」。

カニ眼カメラのテスト

このシステムをテストするために、同チームは光学シミュレーションと、空気中と水中での撮影デモを行った。

カメラを水中に半分ほど浸して水陸両方でイメージングを行ったところ、歪みのないクリアな画像を得られ、同チームは驚きと感銘を受けた。さらに、水平360度、垂直160度のパノラマ視野を、空気中でも水中でも確保できることが判明した。そのために、同チームは、角度位置の異なるレーザスポットを複数有するレーザ照射装置を作成した。

「われわれは、このカメラで水中を撮影できることを実証した(図3)。光学シミュレーションの結果、従来のマイクロレンズアレイ(曲面レンズ)を使用した場合、水中か陸上で焦点位置がずれてしまい、鮮明な画像を得られないことが判明した。一方、われわれの平面マイクロレンズを使用すると、水陸いずれでも鮮明な画像を撮影できる」とソン教授は言う。

これは、同チームの知り得る限り、水陸両用ビジョンシステムとパノラマビジョンシステムの両方を実現した世界初の実証実験だ。また、仮想現実や拡張現実の用途、水陸両方の動作を必要とする小型ロボット、自律走行車の全天候型ビジョンなど、360度全方位カメラへの扉を開くことになるだろう。

タイムライン

同チームのカニ眼カメラの研究はまだ初期段階にあり、課題が残されている。

る。最大の問題の1つは、「切り紙」のような柔軟性のあるエレクトロニクス技術が、現時点では従来のCMOS技術と互換性がないことだ。

ソン教授は次のように述べた。「しかし、大手電機メーカーは曲面イメージセンサに大きな関心を寄せており、近い将来、研究者やエンジニアがわれわれの新しいコンセプトをカメラシステムに組み込むソリューションを見出せるだろう」。

その他の課題としては、明順応、解像度、画像処理などがある。

今後、どのような研究がなされるのだろうか。同チームは、動物がどのように世界を見ているのかを理解できるよう、自然界の眼について研究を続け、他のタイプの視覚の探求も続けると言う。

「昆虫の眼を研究し、コンパクトな形状で広視野と高解像度を有するレンズを開発中である」とデュラン教授は述べた。

参考文献

(1) M. Lee et al, Nat Electron, 5, 452-459 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00789-9>.