

1ショットで2次元可視画像と距離画像を撮影可能な超小型複眼カメラモジュール

Small Compound-Eye Camera Module Providing Depth Map and 2 Mpixel 2D Color Image in One Shot

上野 梨紗子 鈴木 和拓 舟木 英之

■ UENO Risako ■ SUZUKI Kazuhiro ■ FUNAKI Hideyuki

被写体までの距離が測れる距離画像カメラは、ゲーム機器などの入力インターフェースとして普及が進んでいる。距離画像カメラの多くは、光を対象物に当て、その反射光が戻る時間から距離を測定（測距）するアクティブ型である。しかしアクティブ型は、通常の可視カメラの他に測距専用の参照光源やセンサを組み込む必要があるため、消費電力が大きく、小型化も困難である。また、外光の影響を受けやすく、使用環境が制限される。

そこで東芝は、参照光源などを使わずに取得した画像から距離を求めるパッシブ型の距離画像カメラモジュールを開発した。これは、メインレンズとCMOS（相補型金属酸化膜半導体）イメージセンサの間にマイクロレンズを入れたモジュールで、画像処理により通常の2次元可視画像と距離画像を同時に取得できる。800万画素のCMOSイメージセンサを搭載したカメラモジュールは、小型（8.5×8.5×6.0 mm）でありながら、1ショット、1フレームの撮影で200万画素相当の2次元可視画像と26,000点の距離画像を出力できることから、携帯機器向けの距離画像カメラとして有望である。

Depth cameras, which can calculate the camera-to-object distance as well as the object image, have recently become available as an input interface for game machines. Such cameras have been conventionally based on an active method using a reference light source in order to measure the distance between the camera and objects, resulting in increased power consumption and size due to the addition of light components including a light source and dedicated sensor to a normal visual type camera. The usage environment is also limited because this method is significantly affected by outdoor light.

To overcome these problems, Toshiba has developed a small compound-eye camera module with dimensions of 8.5 x 8.5 x 6.0 mm appropriate for mobile devices, consisting of a single lens unit, a microlens array (MLA) attached to an 8 Mpixel color complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) sensor, and a read-out board, based on a light-field technology. This camera module makes it possible to provide a depth image with 26,000 data points and a refocused 2 Mpixel two-dimensional (2D) color image by means of a captured raw image in one shot and one frame.

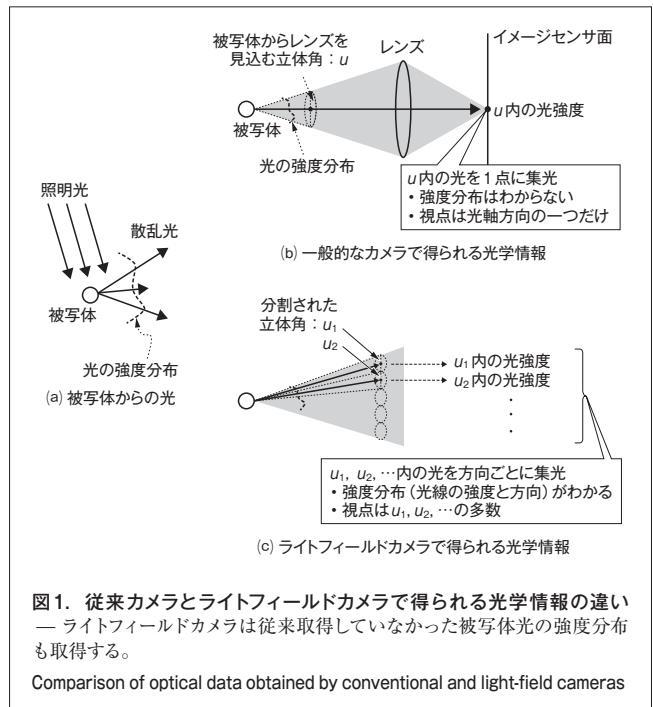
1 まえがき

距離画像カメラとは、一般的なカメラが取得する被写体情報（2次元位置、色、及び時間）に加え、“被写体と撮影者の距離”を含めた3次元情報が記録できるカメラである。

距離情報を得る技術は、測距用の参照光源やセンサを用いるアクティブ方式と、参照光源などを使わずに、撮影された画像そのものから測距するパッシブ方式に大別される。近年話題のゲーム機などに採用されているアクティブ方式による測距は、参照光を用いる直接的な測定のため、高精度であるが、常に高強度の参照光を照射し続ける必要がある。また、参照光を検出する専用のアレイセンサも必要である。更に、同時に2次元可視画像を得るには、別の可視カメラを組み込む必要があり、装置が大型で消費電力も大きくなる。

一方パッシブ方式は、参照光源などが不要なため、サイズや消費電力への要求が厳しい携帯機器などへの搭載に適している。

パッシブ方式の一つとして、ライトフィールドカメラが知られている。図1に示すように、従来のカメラ光学系が被写体からレンズを見込む立体角内に含まれる光を積分して記録するのに対し、ライトフィールドカメラは被写体からの光線群に含ま



れる光線がそれぞれどのような強度と方向（強度分布）である

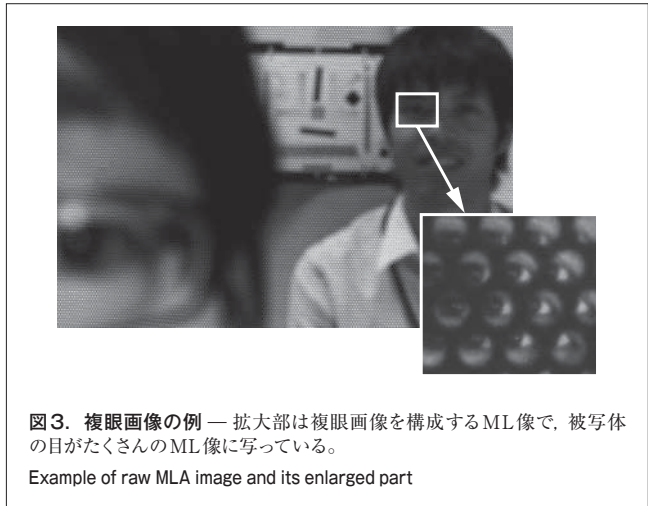
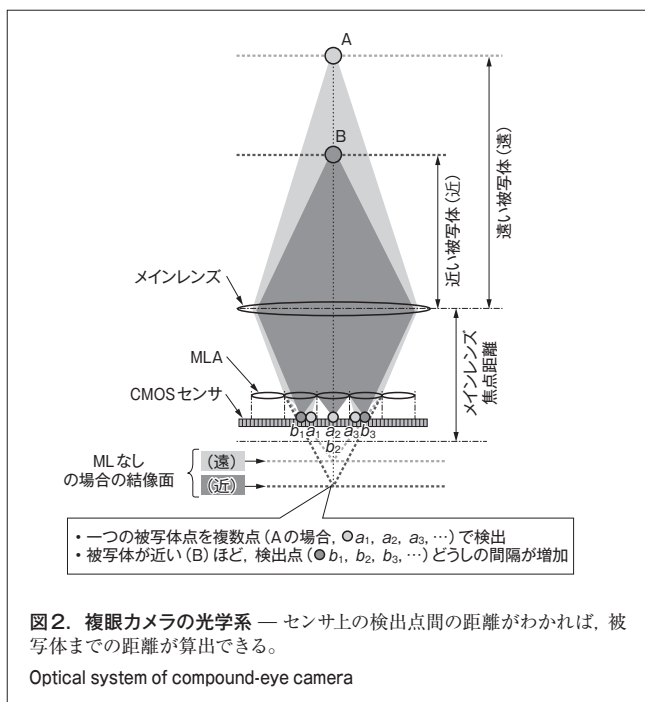
かという情報(ライトフィールド情報)も同時に記録する。光の角度方向の分布がわかれば、これを元に被写体までの距離が求められる。また、この距離情報を利用して、リフォーカスと呼ばれる撮影後のピント位置変更や、多視点での画像合成、被写体サイズの測定など様々な応用処理ができる。

2 原理と光学構成

東芝は、ライトフィールドカメラの中でも、シンプルで小型化に適した複眼カメラ方式に着目した(図2)。その構成は、1個のメインレンズ、光線を分割するマイクロレンズアレイ(MLA: Micro Lens Array)、及びCMOSイメージセンサから成る。

複眼カメラは、メインレンズの画角内にある被写体からの光線群を、その光線角度に応じてMLAで分配し、センサに記録する。この原理は1900年代初頭に提案されていたが^{(1), (2)}、フィルムカメラの時代だったため、光線をフィルムに写しても、その後の画像処理ができず、ライトフィールド情報を利用できなかった。しかし近年、CCD(電荷結合素子)やCMOSイメージセンサなどのデジタル撮像素子の進歩や多画素化により、撮影後に画像データを処理できるようになった。

複眼カメラによる1ショットの撮影データを複眼画像と呼び、多数のマイクロレンズ(ML)像から構成されている(図3)。画面全体では、メインレンズ画角で捉えた風景が撮影されているが、拡大すると、MLAで局所的に縮小されたML像が、少しずつずれながら撮影されているのがわかる。この1ショットの複眼画像から、後述する処理により、距離画像や2次元可視画像を得ることができる。また、このときの2次元可視画像

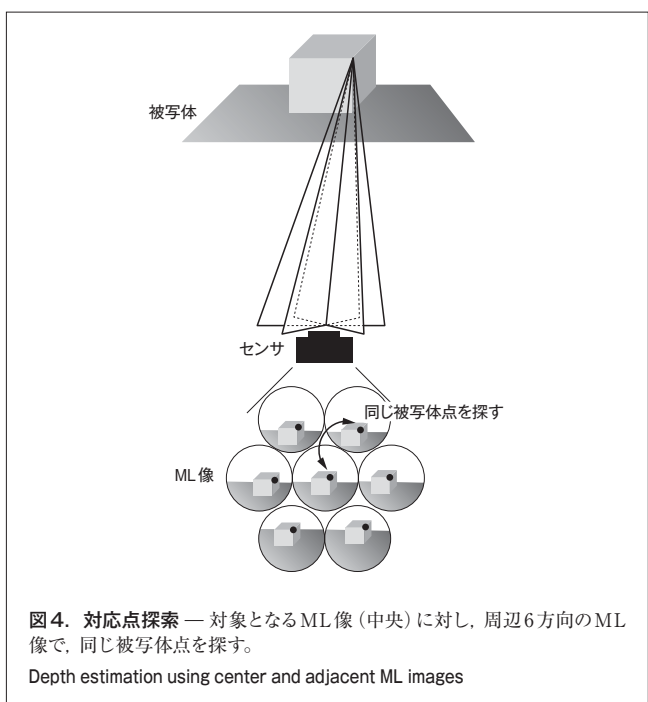


は、距離画像に含まれる光線情報を利用することで、リフォーカスして任意の位置にピントを合わせたり、全距離にピントを合わせたりできる。

2.1 複眼画像で被写体までの距離を算出する方法

図2には、遠い被写体の1点Aからの光線群、及び近い被写体の1点Bからの光線群のそれぞれが、メインレンズで集光された後、MLAでCMOSセンサ上に分配された像点が描かれている。隣り合うMLによる分配点間の距離 Δ は、Aに対してが $|a_i - a_{i+1}|$ 、Bに対してが $|b_i - b_{i+1}|$ であり、被写体までの距離によって異なる。したがって、 Δ は数画素とわずかな量であるが、これを複眼画像から求めることで被写体までの距離を算出できる。

Δ を複眼画像から求めるには、図4に示すような対応点探



索の画像処理を行う。当社が開発した複眼カメラモジュールでは六方配列のMLAを採用しており、あるML像の周囲には、隣接した6方向のML像が存在する。これから得られる6個の Δ は、光学的に理想状態であれば同じ値になるが、実際には光学ひずみや、像質、センサノイズなどに由来するばらつきが生じる。これは距離精度に影響するが、6方向の Δ を平均化することで、距離精度を向上させることができる。撮影した複眼画像の全ML像に対してこのような対応点探索を行い、 Δ を被写体距離に換算することで、距離画像が作成できる。

2.2 2次元可視画像を取得する方法

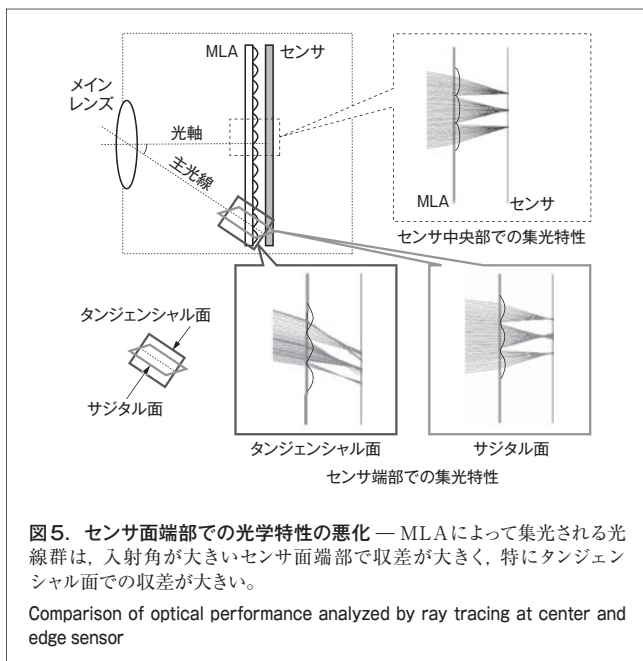
複眼画像から2次元可視画像を作成するには、例えばMLAで光学的に1/N倍に縮小されたML像であれば、画像処理でそれぞれをN倍に拡大して再配置すればよい^{(3),(4)}。このときに被写体の2次元方向の空間解像度は、MLAを挿入していない通常のカメラに対し、1/Nに低下する。この2次元方向の解像度低下は、距離情報(光線角度情報)を撮影画像に埋め込んでいるため、トレードオフとして必然的に発生する。

3 複眼カメラモジュールの小型化とその性能

3.1 小型化に向けた取組み

これまでの複眼カメラは、単レンズ、MLA、及び単センサによるシンプルな構成という特徴を生かした小型化が十分にはなされていなかった⁽⁵⁾。小型化が難しいのは、(1)図5に示すように、センサ面の端部で光線の入射角が大きくなって光学特性が悪化すること、(2)前述のように、距離情報を同時取得する代償として2次元方向の解像度が低下することにあつた。

そこで(1)の対策として、センサ面端部でのサジタル面とタン



ジェンシャル面それぞれの光学的収差を考慮した補正処理を行った。また(2)の対策として、再構成する2次元可視画像の解像度低下を200万画素程度に抑えるために距離方向の情報量を最適化した光学設計を行った。

開発したカメラモジュール⁽⁶⁾を図6に、その仕様を表1に示す。モジュールサイズは携帯機器に組み込める水準の8.5×8.5×6.0 mmである。メインレンズの焦点距離は4.6 mm、撮影画角は対角63°である。CMOSセンサの全画素数は800万画素で、画素には色情報を得るためのRGB(赤、緑、青)カラーフィルタが形成されている。MLAは六方最密配列で画面内に26,000個のMLがあり、ML間は光学的損失を最小限にするためギャップ幅を2%以下にしている(図6(c))。

3.2 出力される2次元可視画像と距離画像の性能

性能試験を行ったときのカメラと被写体の配置、及び得られた1ショット複眼画像を図7に示す。また、複眼画像を処理して

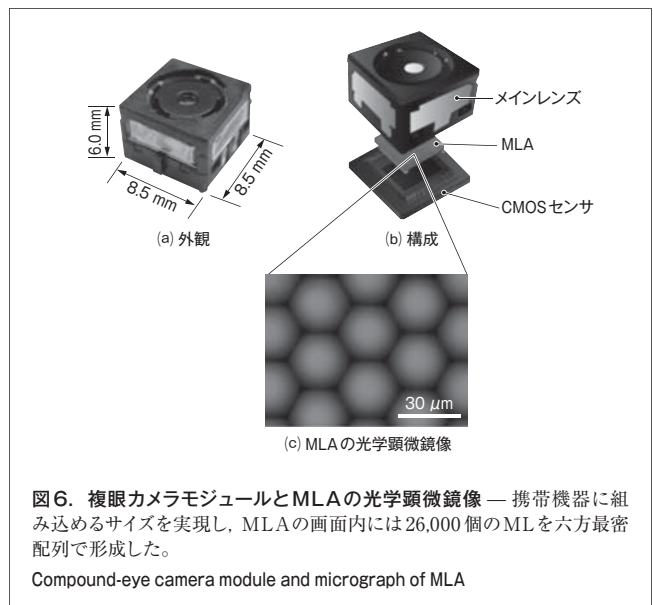
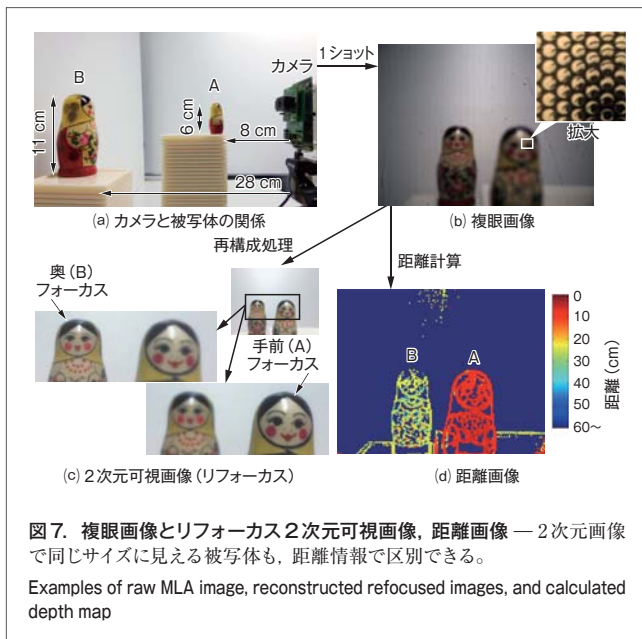


表1. 複眼カメラモジュールの仕様

Specifications of compound-eye camera module

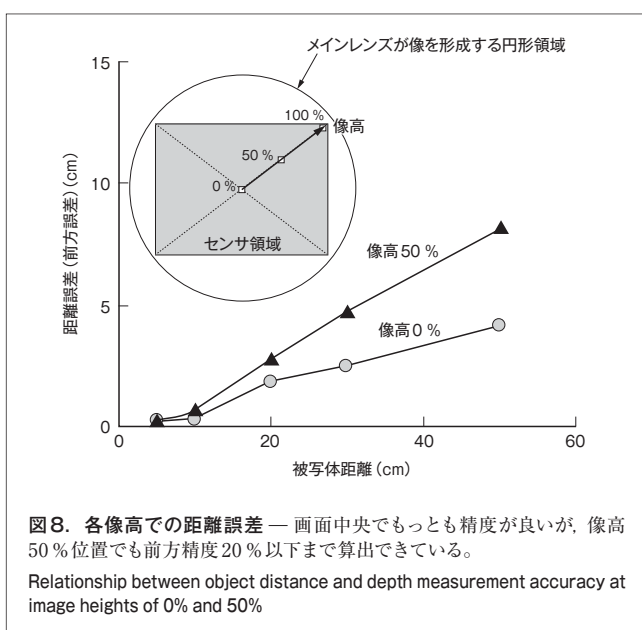
項目		仕様
モジュール	外形寸法	8.5(縦)×8.5(横)×6.0(高さ) mm
CMOSセンサ	光学フォーマット	1/3.2型
	有効画素数	800万画素
	画素サイズ	1.4 μm
メインレンズ	有効焦点距離	4.6 mm
	Fナンバー	2.8
	画角(対角)	63°
MLA	画面内個数	26,000個
	配列	六方配列
出力	2次元可視画像画素数	200万画素
	距離推定可能レンジ*	5 ~ 50 cm
	距離画像(解像点数)	26,000点

*画面中央で誤差10%以内



リフォーカスした2次元可視画像と距離画像も示す。出力した複眼画像のサイズはセンサの画素数と同じ800万画素である。一方、再構成処理したリフォーカス2次元可視画像の出力は200万画素としている。

ここで、画像の解像度は、一般に空間周波数の単位LP (Line Pairs: 線対) /mmで表される。これは、テストチャートの等しい幅を持つ明暗の線対幅の逆数である。開発した複眼カメラで得られる無限遠の被写体解像度は150 LP/mm程度であり、この空間周波数を再現するのに適切な画素数として、出力200万画素としている。また、1個のMLで距離1点を求めているため、距離画像の測定ポイント数はML数と同じ26,000点である。



対角線上にある像点のセンサ中心からの距離を、中心から端部までの距離に対する比で表し、センサ面の中心を像高0%、端を100%と定義したとき、像高0%と50%での実際の被写体距離と距離誤差の関係を図8に示す。被写体までの距離が50 cm以内では像高0%での誤差は10%以下で、像高50%でも20%以下であった。補正処理と光学構成の最適化により、高い像高でも距離精度の劣化を低減できており、画面全域で精度良い距離画像を生成できた。

4 あとがき

CMOSセンサは微細化が進み、画素数が増加してきている。複眼カメラは、この画素数の増加を、2次元可視画像及び距離画像の両情報を1ショットで取得することに利用できるため、CMOSセンサの新たな応用として有望である。

今後はセンサネットワークへの応用など、消費電力や小型化への要求が厳しい領域への展開を目指していく。

文献

- Lippmann, M. G. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*. 7, 1, 1908, p.821 - 825.
- Adelson, H. E. et al. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14, 2, 1992, p.99 - 106.
- 山本琢磨 他. Focused Plenopticカメラにおける超解像に基づく高解像度なりフォーカス画像の生成手法 (ナノフォトニクス・プラズモニクスおよびイメージセンサ一般). *映像情報メディア学会技術報告*. 36, 50, 2012, p.5 - 8.
- Kobayashi, M. et al. "Resolution Measurement of the CMOS Image Sensor Loading Microlens Array for Three-Dimensional Information Acquisition". *Extended Abstracts of the 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials*. Kyoto, 2012-09, Japan Society of Applied Physics. 2012, PS-5-3. (CD-ROM).
- Ng, R. et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Stanford Univ. Computer Science Technical Report CSTR 2005-02*.
- Ueno, R. et al. Compound-Eye Camera Module as Small as 8.5x8.5x6.0 mm for 26 k-Resolution Depth Map and 2-Mpix 2D Imaging. *IEEE Photonics Journal*. 5, 4, 2013, 6801212.



上野 梨紗子 UENO Risako

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー。
光学デバイス、CMOSイメージセンサ、及びIRイメージセンサの研究・開発に従事。
Electronic Imaging Lab.



鈴木 和拓 SUZUKI Kazuhiro, D.Sc.

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー研究主務, 博士(理学)。MEMSデバイス及びイメージセンサの研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Electronic Imaging Lab.



舟木 英之 FUNAKI Hideyuki, D.Eng.

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー研究主幹, 博士(工学)。イメージセンサの研究・開発に従事。応用物理学会、IEEE会員。
Electronic Imaging Lab.