

## 単眼カメラで撮影した1枚の画像から 精度良く距離計測できるカラー開口撮像技術

Imaging Technology Accomplishing Simultaneous Acquisition of Color Image and High-Precision Depth Map from Single Image Taken by Monocular Camera

三島 直 MISHIMA Nao 佐々木 貴之 SASAKI Takayuki

画像を利用した距離計測としてステレオカメラが広く知られているが、高精度な距離計測には2台のカメラの間隔を広げる必要があることから、原理的に小型化が難しいという問題があった。

東芝は、ハードウェアの工夫と新たに開発した距離推定アルゴリズムにより、小型化に有利な単眼カメラで、カラー画像と距離情報を同時に取得できる撮像技術を開発した。単眼カメラによる高精度な距離計測は、レンズの開口に2色分割されたカラーフィルターを挿入し、画像のぼけの形状が被写体の距離に応じて色ごとに異なる変化をするように工夫するとともに、得られた色画像ごとに变化させた非対称のぼけを解析して距離を推定するDfAD (Depth from Asymmetric Defocus) 技術を用いたアルゴリズムにより実現した。試作機を用いた精度評価実験を行い、従来のステレオカメラと同等の距離精度が得られることを確認した。

Stereo camera systems equipped with two cameras to generate binocular disparity are widely used in various applications that require three-dimensional (3D) distance measurement, such as drones and robots. To improve the measurement accuracy of these types of stereo cameras, however, it is necessary to lengthen the distance between the cameras, making the overall system larger in size. Demand has therefore been growing for the development of imaging technologies that can reduce the size and cost of such systems.

With this trend as a background, Toshiba Corporation has developed an imaging technology that can simultaneously acquire a color image and a depth map from a single image taken by a monocular camera, allowing such systems to be miniaturized. This imaging technology incorporates the following features: (1) a color-filtered aperture (CFA) comprising cyan and yellow filters inserted into the camera lens aperture to generate asymmetric blurs in the red and blue images, and (2) a distance estimation algorithm called depth from asymmetric defocus (DfAD) technology that makes it possible to obtain a high-precision depth map by evaluating the differences between the asymmetric blurs in the red and blue images. Experiments on a prototype system under various conditions have verified that this newly developed technology achieves distance measurement accuracy comparable to that obtainable with existing stereo cameras.

### 1. まえがき

近年、ロボットによる荷物などのピッキング作業や、ドローンの遠隔操作によるインフラ点検など、様々な領域で画像センシングの重要性が増している。これらの用途では、人物検出や障害物回避などの高度な認識処理が求められるため、2次元のカラー画像を撮影するだけでなく、対象物の形状や、動き、距離などの動的な3次元情報の把握が必要とされ、画像から距離を取得する手法が以前から研究されている。画像を用いた距離計測手法として、ステレオカメラがよく知られているが、高精度に距離計測するには、2台のカメラの間隔(眼間)を広げる必要があり、原理的に小型化と高精度化の両立が難しい。また、カメラの視点を変えながら

撮影した画像から距離を取得するSfM (Structure from Motion) 技術は、移動物体への対応が難しく用途が限定される。

そこで東芝は、ハードウェアの工夫と新たに開発したアルゴリズムにより、小型化に適した単眼カメラを用いて、カラー画像と距離情報を同時に取得できる撮像技術を開発した<sup>(1)</sup>。ここでは、開発した撮像技術の概要と試作機を用いた精度評価結果について述べる。

### 2. 関連研究

撮像過程を工夫し撮影画像に距離情報を符号化して追加することで、撮影画像と距離情報を同時に取得するコンピュータショナルフォトグラフィー技術が注目されている。代表的なものとして、カメラにマイクロレンズアレイを追加する

Plenopticカメラや、構造開口を追加するCoded-Aperture技術が提案されているが、それぞれ、撮影画像の空間解像度が低下すること、撮影画像に発生するリングングによる画像劣化があることから、マシンビジョンには不向きである。

画像劣化を抑えて距離情報を取得する技術として、カメラのレンズにカラーフィルターで構成された構造開口(以下、カラー開口と呼ぶ)を追加することで距離を取得する、Color-Filtered Aperture技術<sup>(2), (3)</sup>が提案されている。これまでに、赤(R)、緑(G)、青(B)の原色フィルターを用いて分割した光線の視差から距離を求める方式と、マゼンタやIR(赤外線)カットフィルターなどを利用した同心円のカラー開口で変化させたぼけの大きさから距離を求める方式が提案されている。しかし、それぞれ、光量低下が大きい問題や、測距範囲が限定される問題があった。

### 3. カラー開口撮像技術

当社は、シアンとイエローの2色のカラー開口で撮影画像のぼけを色ごとに変化させ、その形状の違いを利用して被写体までの距離を推定するカラー開口撮像技術<sup>(1)</sup>を開発した。

以下に、開発したカラー開口の構造と、カラー開口によって生じる画像変化について述べた後、非対称のぼけを解析するDfAD (Depth from Asymmetric Defocus) 技術を用いた距離推定アルゴリズムについて述べる。

#### 3.1 カラー開口撮像モデル

開発したカラー開口は、シアンとイエローのカラーフィルターで開口を2分割する構造である。カラー開口と光線の進み方を、被写体の位置 $u$ が、カメラの合焦位置 $u_f$ より近い場合(図1(a))、 $u_f$ 上の場合(図1(b))、 $u_f$ より遠い場合(図1(c))に分けてそれぞれ示す。被写体が $u_f$ 上にある場合はカラー開口を通った光は撮像面で一点に集まる。 $u_f$ 上でない場合

は、シアンの開口を通った光はシアンのぼけ( $B_c$ )に、イエローの開口を通った光はイエローのぼけ( $B_y$ )になる。撮影画像ではこれらが組み合わせられて、例えば被写体が白と黒のエッジであれば、ライトブルーとオレンジのぼけに見える。 $B_c$ と $B_y$ が現れる方向は $u_f$ の前後で逆になり、その大きさは $u_f$ からの距離に依存して変化する。

撮像面にあるイメージセンサーは、R画像、G画像、B画像に分けて、撮像する。 $B_c$ はG画像とB画像で、 $B_y$ はR画像とG画像で検出される。R画像、G画像、B画像で撮像されたぼけ形状の違いから、 $u$ を推定する。

開発したカラー開口は、画像の明るさへの寄与率が高いG画像の波長帯域で光量低下が少なく、従来手法<sup>(2), (3)</sup>と比べて透過率が高い。そのため、従来手法より光量が少ない場所でも使用しやすく、測定精度の向上にもつながる。また、 $B_c$ と $B_y$ の偏り方向が $u_f$ の前後で反転するので、 $u_f$ の前後の距離を明確に分離できる。同心円形状のカラー開口を用いる従来手法<sup>(3)</sup>では、合焦点から被写体までの距離の絶対値しか計測できないので、カメラの合焦点を被写体の手前や無限遠に固定していたが、開発したカラー開口ではその必要がなく、測距範囲の制約が少ない。

#### 3.2 ぼけと被写体までの距離の関係

レンズの焦点距離を $f$ 、直径を $a$ とし、レンズ中心からイメージセンサーが設置されている撮像面までの距離(像距離)を $v_f$ 、イメージセンサーの画素ピッチを $p$ とすると、レンズの結像公式に基づいた式(1)から、 $u$ を求めることができる。

$$b = \frac{av_f}{2p} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{v_f} \right) \quad (1)$$

ここで $b$ は、絶対値がぼけの大きさに相当するイメージセンサーの画素数に一致し、 $u$ と $u_f$ の前後関係、すなわち、

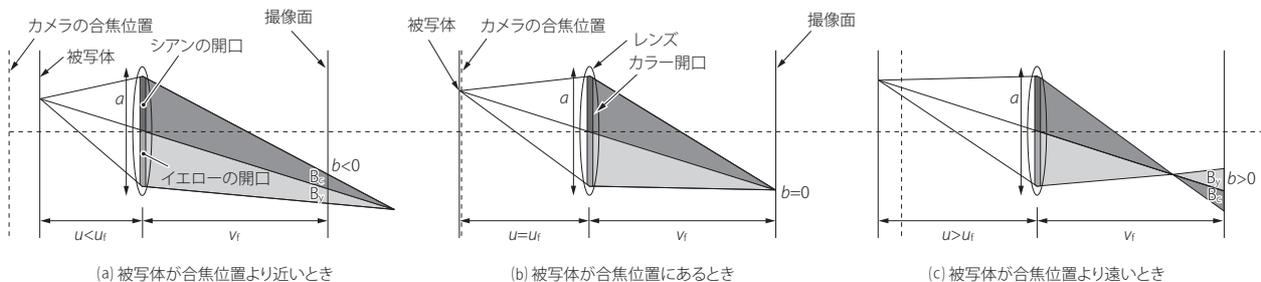


図1. カラー開口による光線の変化

レンズの開口部に挿入したシアンとイエローのカラー開口によって、ぼけの両側に着色が現れる。また着色の方向は、カメラの合焦位置 $u_f$ の前後で変化する。

Ray diagrams showing generation of defocus blurs by asymmetric CFA

$B_c$ と $B_y$ の着色の方向で正負が決まるパラメーターである。

開発したカラー開口の点像分布関数 (PSF : Point Spread Function) を図2に示す。点光源を撮影したときの撮像用イメージセンサーのデータを、R画像、G画像、及びB画像に分けて、画素ごとのPSFの強度を色の違いで表現した。G画像ではぼけが左右対称に分布しているのに対して、R画像とB画像のぼけ形状は非対称に変化している。R画像、G画像、及びB画像のPSFが、それぞれ $b$ の絶対値と符号によって異なることが確認できる。

図3(a)に、カラー開口をカメラに装着して撮影した画像 (RGB画像) を示す。画像の中央のカードは $u_f$ 上にあり、左のカードは $u_f$ より遠く、右のカードは近くにある。遠く (青枠) と近く (赤枠) の拡大図では、白と黒のエッジ部分の左右に、ライトブルーとオレンジのぼけが見え、その着色の方向が逆になっていることが分かる。開発した手法は、このぼけ形状の違いを基に $u$ を推定する。

### 3.3 距離推定アルゴリズム

非対称に変化したR画像とB画像のぼけ形状は、被写体までの距離と1対1に対応しており、ぼけを補正するカーネルはカラー開口の形状と想定する $u$ から解析的に導出できる。そこで、画素ごとに想定距離のぼけを補正するカーネル

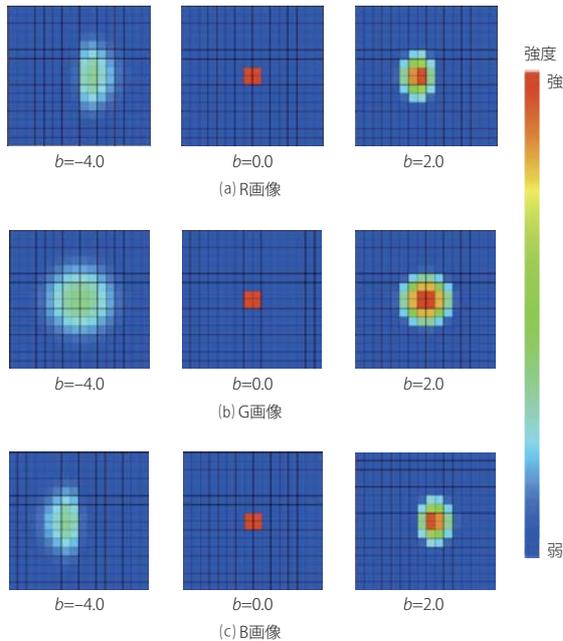
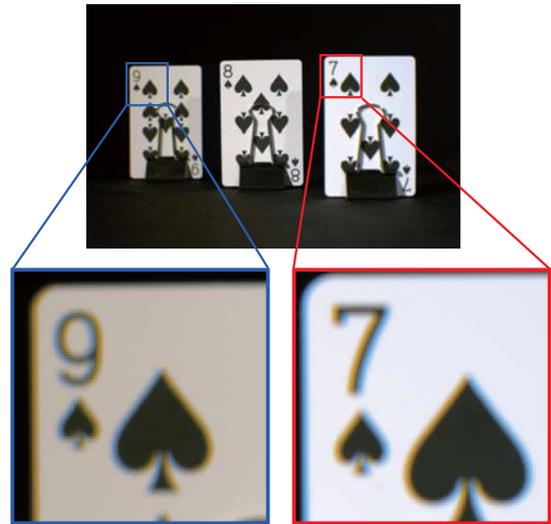


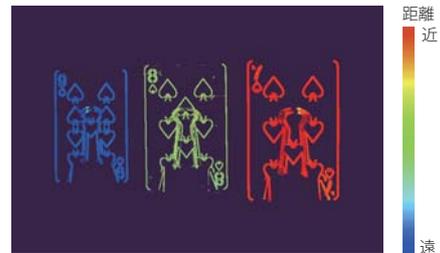
図2. カラー開口のPSF変化

合焦位置 $u_f$ の前後で、カラー開口の色分けの方向に非対称に変化する。

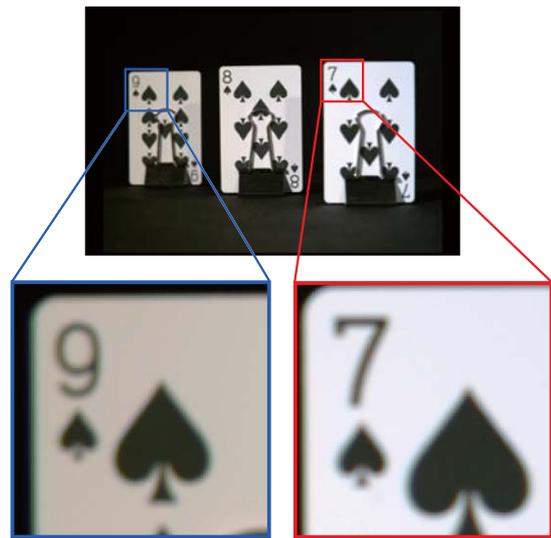
Changes in point spread functions (PSFs) of asymmetric CFA



(a) RGB画像



(b) 距離画像



(c) 非対称ぼけ補正画像

図3. カラー開口撮像技術による画像処理結果

処理前のRGB画像(a)には、被写体の位置に応じて、黒と白のエッジの両側に着色されたぼけが確認できる。このぼけの大きさから被写体までの距離情報(b)を推定し、更にぼけの色ずれを補正した画像(c)を得ることができる。

Output images after processing by newly developed technology

を画像に畳み込み、畳み込み演算後のR画像、G画像、及びB画像の相関が最も高くなる $b$ を探索し、各画素の距離を推定する。

カラー開口により左右非対称に変化したRGB画像のぼけ形状を、左右対称に補正することで距離を推定するDfAD技術を開発した。撮影画像のR、G、及びBの画像をそれぞれ $I^R$ 、 $I^G$ 、及び $I^B$ とし、 $b$ に相当する大きさのぼけを補正するぼけ補正カーネルを $f(b)$ とすると、想定する $b$ に合わせて画像のぼけを補正したぼけ補正画像 $\hat{I}(b)$ は、式(2)で計算できる。

$$\hat{I}^c(b) = f^c(b) * I^c \quad (c=R, G, B) \quad (2)$$

開発したカラー開口のDfAD技術によるぼけ補正カーネルの一例を、図4に示す。

このぼけ補正カーネルは、画像の水平方向に畳み込む1次元カーネルであるため、2次元カーネルを畳み込む従来のDfD (Depth from Defocus) 技術と比較して、演算量が少ない。また、非対称形状を対象形状に変更するDfAD技術は、対象形状の大きさを変更する従来のDfD技術と異なり、ぼけの畳み込みによる位相変化を伴う。距離推定では、光学伝達関数におけるゲイン変化だけでなく位相変化も重要であり、位相変化を伴うDfAD技術は距離推定に適している。

次に、式(2)で計算した $\hat{I}(b)$ の相関を計算し、補正後のぼけ形状の一致度を評価する。一致度を求める相関計算に画像勾配のZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) を用いることで、色差による信号変化に対してロバストに評価できる。一致度の評価関数を式(3)に示す。

$$\hat{b} = \arg \min_b \{ 3.0 - \text{ZNCC}(\nabla \hat{I}^R(b), \nabla \hat{I}^G(b)) - \text{ZNCC}(\nabla \hat{I}^G(b), \nabla \hat{I}^B(b)) - \text{ZNCC}(\nabla \hat{I}^B(b), \nabla \hat{I}^R(b)) \} \quad (3)$$

ここで、 $\nabla \hat{I}(b)$ は $\hat{I}(b)$ のエッジ画像である。

式(3)に基づいて、 $b$ を変化させた場合の評価値の一例を図5に示す。 $b$ を画素サイズより細かく変化させることで、評価値の変化を滑らかにできるため、凸最適化の手法による効率的な1次元探索で、評価値が極小になる $b$ の決定が可能である。

最後に、式(1)を用いて、 $b$ から $u$ を計算する。図3(b)に、RGB画像から推定した距離画像を示す。近距離から遠距離を赤色から青色で表示した。

このカラー開口撮像技術は、撮影時刻の等しい同一光学

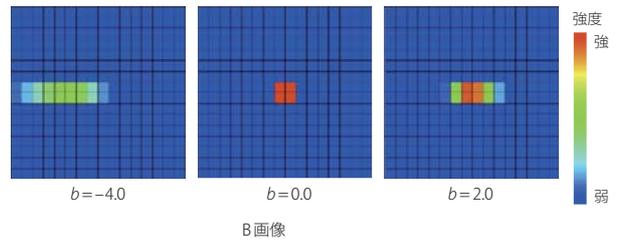


図4. ぼけ補正カーネル

非対称形状のぼけを対称形状に補正する。

Convolution kernels to convert asymmetric blurs into symmetric form

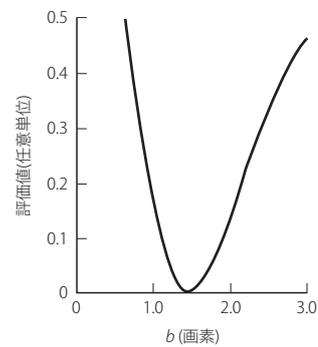


図5. 想定したぼけの大きさ $b$ を変えたときの評価値 $\hat{b}$ の変化

ある画素について求めた $\hat{b}$ のグラフから、凸最適化の手法による1次元探索で $\hat{b}$ が極小になる $b$ を求めて、ぼけの大きさ(画素数)とする。

Changes in evaluation value due to changes in estimated size of blur

系を介した画像から距離を演算するため、時間変化や位置合わせによる影響を受けない。

### 3.4 非対称ぼけの色ずれ補正

合焦点以外の領域では、カラー開口の影響でRGB画像のぼけに色ずれが生じている(図3(a))。開発した距離推定アルゴリズムが、ぼけの色ずれ補正と等価であることから、推定した $u$ に対応するぼけ補正画像を画素ごとに保持することで、カラー開口による非対称のぼけの色ずれを除去した非対称ぼけ補正画像を得ることができる(図3(c))。RGB画像のぼけの色ずれが、補正されていることが確認できる。

## 4. 精度評価実験

焦点距離50 mmのレンズにカラー開口を挿入した試作機を作成し、カラー開口撮像技術の距離精度を確認した。一眼レフカメラに試作機を装着して、カメラの絞り(F値)は4とし、画素数を1/8に縮小した60万画素の画像を評価に使用した。0.6 ~ 1.4 mの距離に置いた平板を撮影して、カ

ラー開口撮像技術で距離を推定し、レーザー測距計で測定した距離と比較して誤差を算出した。

図6に、各距離におけるカラー開口撮像技術による推定結果の誤差を灰色の点で示す。同じグラフ上に表示した実線は、カラー開口撮像技術の理論上の誤差、及び様々な眼間距離のステレオカメラによる理論上の誤差である。カラー開口撮像技術による距離推定の誤差の絶対値は平均2 mm

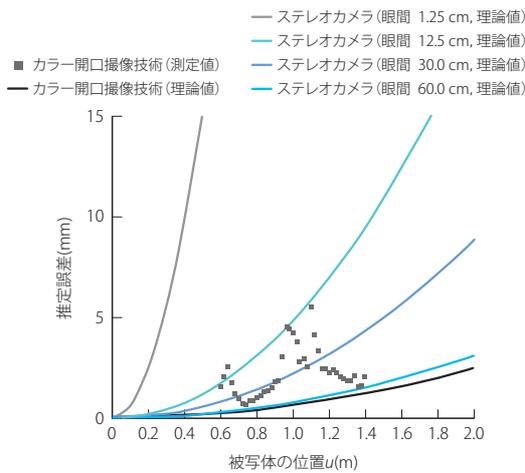


図6. 精度評価結果

試作機の開口の大きさは1.25 cmであるが、計測された誤差は眼間30 cmのステレオカメラの理論誤差と同程度であった。

Results of evaluation of accuracy of prototype system

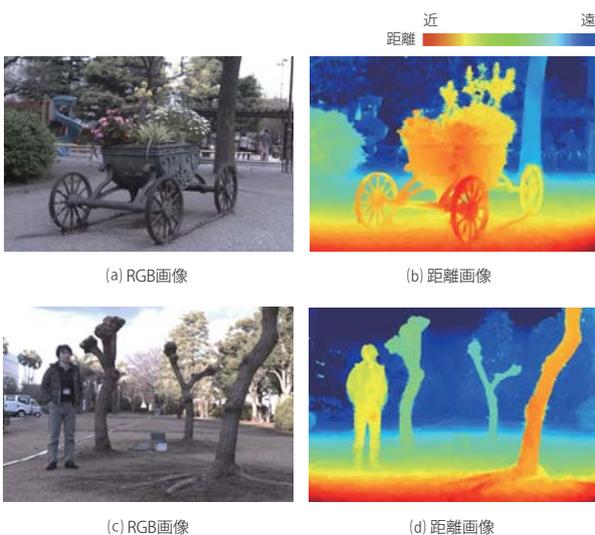


図7. カラー開口撮像技術による屋外での距離推定結果

被写体が十数m離れていても、距離を推定できる。

Examples of images processed by prototype system

と高精度であり、試作機の開口径は1.25 cmであっても、眼間30 cmのステレオカメラの理論的な誤差と同程度であることが確認された。試作機は単眼カメラに搭載しているの、眼間30 cmのステレオカメラに比べて、大幅に小型化できる。

最後に、更に遠距離の被写体を屋外で撮影し、距離を推定した結果を図7に示す。距離が長くてもカラー開口撮像技術を用いて精度良く距離を推定でき、距離推定範囲の広さが確認できた。

## 5. あとがき

単眼カメラで撮影した1枚の画像から、カラー画像と距離情報を同時に取得できる、カラー開口撮像技術を開発した。この技術は、関連研究の従来手法に比べて光量が少ない場所でも使用でき、位置合わせや時間変化による誤差が少なく距離分解能が高い。試作機を用いた精度評価実験で、この技術の距離精度の高さと、距離推定範囲の広さを確認した。

様々な分野でのフィージビリティスタディーを通してこの技術の可能性を探り、今後、小型カメラに適用して計算量削減や回路化の検討を進め、早期の実用化を目指していく。

## 文献

- (1) Moriuchi, Y. et al. Depth from Asymmetric Defocus using Color-Filtered Aperture. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2017, **48**, 1, p.325-328.
- (2) Bando, Y. et al. Extracting Depth and Matte using a Color-Filtered Aperture. ACM Transactions on Graphics(TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2008. 2008, **27**, 5, Article number 134.
- (3) Chakrabarti, A.;Zickler, T. "Depth and Deblurring from a Spectrally-Varying Depth-of-Field". ECCV'12 Proceedings of European Conference on Computer Vision Volume Part V. Florence, Italy, 2012-10. Springer-Verlag. 2012, p.648-661.



三島 直 MISHIMA Nao  
研究開発本部 研究開発センター  
メディアAIラボラトリー  
日本液晶学会会員  
Media AI Lab.



佐々木 貴之 SASAKI Takayuki  
研究開発本部 研究開発センター  
メディアAIラボラトリー  
Media AI Lab.