

能動絞りカメラ

渡 邊 拓 也^{†1} 長 原 一^{†2} Changyin Zhou^{†3}
石 黒 浩^{†1} Shree K. Nayar^{†3}

カメラの絞りは光量を調整するだけでなく、カメラ撮像系のぼけ関数 (PSF) を制御できることが広く知られている。近年、特殊な絞り形状を用いて、PSF を制御する符号化撮像 (Coded aperture imaging) が注目されている。符号化撮像では、安定したぼけ復元 (defocus deblurring) や画像の奥行き推定 (depth from defocus)、ライトフィールド取得 (light field acquisition) などの応用に対して、従来、様々な絞りパターンが数多く提案されてきた。一般的には、符号化絞りパターンの最適形状はアプリケーションやシーンに大きく依存することが知られている。また、奥行き復元やライトフィールド取得では、複数パターンの絞りをを用いて撮像した複数枚の画像を要求するため、高速にパターンを変更できることが望まれてきた。しかしながら、従来の符号化絞りカメラの多くは、パターンを印刷したフィルムをレンズに挿入するなど、その構造から絞りの変更が容易ではなかった。そこで本研究では、反射型液晶ディスプレイ素子 (LCoS) を用いた能動絞りカメラを提案する。能動絞りカメラは、絞り形状を高解像度かつ高フレームレートで制御することができるため、効率的に変絞画像の取得が可能である。本論文では、構築した試作機を用いてぼけ復元、奥行き推定、ライトフィールド取得の検証を行い、提案する能動絞りカメラの有効性を確認した。

Programmable Aperture Camera

TAKUYA WATANABE,^{†1} HAJIME NAGAHARA,^{†2}
CHANGYIN ZHOU,^{†3} HIROSHI ISHIGURO^{†1}
and SHREE K. NAYAR^{†3}

It is well known that a camera aperture not only adjusts an image intensity but also controls a point spread function (PSF). Coded aperture imaging which uses a special pattern as an aperture attracted a lot of attentions in the past years. There is a variety of aperture patterns has been proposed for various applications including defocus deblurring, light field acquisition and depth from defocus. The optimal patterns of the aperture are deeply depended on

applications or scene contexts, and some application requires to capture multiple images with different patterns. However, many traditional coded aperture implementations are difficult to change patterns since they requires to insert a printed film or punched paper into a lens. Therefore, we propose a programmable aperture camera using a Liquid Crystal on Silicon (LCoS) which realizes a high resolution, high light efficiency with video rate pattern. We also demonstrated the prototype camera in three applications; defocus deblurring, depth from defocus and light field acquisition, and confirmed the utility of the camera.

1. はじめに

一般的なカメラは、レンズや絞り、撮像センサなどで構成されている。絞りは、一般的には環境からの入射光量を調節したり、被写界深度とよばれる奥行き差によるぼけを制御するために用いられる。また、光学的には、絞りの形状は画像のぼけ関数 (PSF) を直接制御できることが知られており、従来の円形または羽絞りの代わりに特殊な絞りパターンを用いる符号化絞りの研究が様々な応用に対して盛んに行われている。例えば、Veeraraghavan ら¹⁾ は、ぼけ復元に対しては周波数空間において広帯域な絞りが最適であると結論付け、その形状を探索により求めた。さらに、Zhou ら²⁾ は、ぼけ復元のための符号化絞りの最適形状は入力画像のノイズレベルに依存することを示した。一方で、Levin ら³⁾ は、DFD による奥行き推定に対して、周波数領域で多くのゼロ交差を持つような絞り形状が、奥行きぼけの曖昧性を低減し、奥行き推定精度を向上させることを示した。また、Zhou ら⁴⁾ は、これを 2 枚の絞りに拡張して、奥行き推定だけでなく、ぼけ復元も安定化できる符号化絞りのペアを決定する手法を提案した。Liang ら⁵⁾ は、符号化絞りを複数用いて撮像された複数枚画像からライトフィールドを取得する手法を提案した。この符号化絞りのパターンは、単純に開口位置を変化させるだけでなく、複数視点画像を多重化撮像するように設計されており、逆多重化処理後の画像の信号対雑音比 (SN 比) が向上するように最適化されている。Raskar ら⁶⁾ は、絞りの空間パターンではなく、露光中の時間的パターン、すなわち開

^{†1} 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{†2} 九州大学大学院情報科学研究科

Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

^{†3} Department of Computer Science, Columbia University

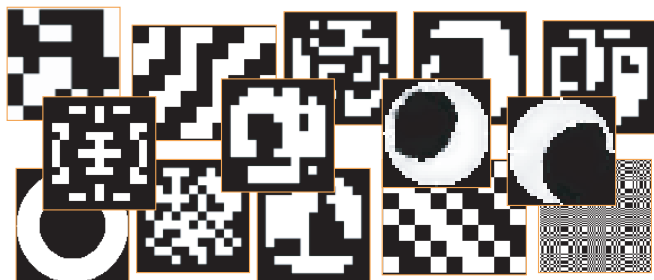
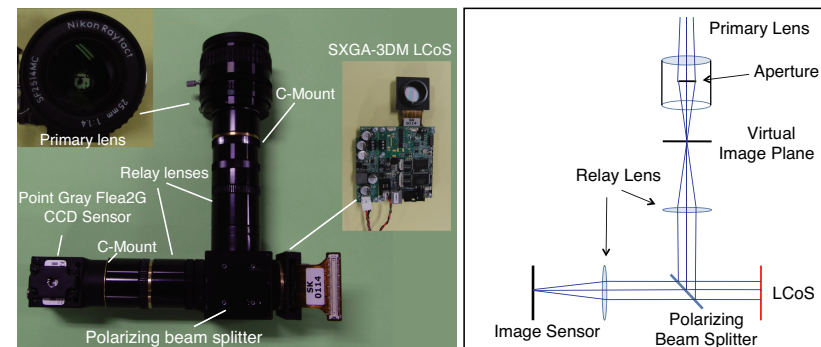


図 1 アプリケーション毎に最適化した符号化絞りの例
Fig. 1 A variety of coded aperture patterns optimized for various applications.

閉タイミングを符号化することで画像のモーションブラーを安定に復元できる手法を提案した。このように、従来より様々なアプリケーションにおいて様々な種類の符号化絞りパターンが提案されてきた(図 1)。これらから分かるように、最適化絞り形状はアプリケーションや撮影対象に大きく依存しており、すべてに適用できる共通の絞りという物は存在しない。そのため、理想的には、絞りパターンは撮影するシーンの内容や撮影状況に応じて、動的に変更できることが望まれる²⁾。また、符号化絞りをを用いた撮像手法の中には、異なる絞りパターンを用いて撮影した複数枚の画像を要求するアプリケーション⁴⁾⁵⁾⁶⁾もあり、絞りパターンを任意の形状に高速に制御可能な、能動絞りカメラの需要が高まっている。従来の符号化絞りの実装では、一般的に、レンズを分解して穴の空いた紙やフィルム印刷されたパターンを挿入していたため、そのパターンを動的に変化させることは不可能であった。一部では、従来でも透過型液晶ディスプレイ(LCD)を用いて絞りを制御しようとする研究も存在した⁹⁾⁵⁾。しかし、LCDは駆動回路の隠蔽による入射光の妨げや回折の影響、透過率が低いといった問題があった。それに対して我々は、能動絞りカメラは以下に挙げる4つの特徴を備えるべきであると考える。

- (1) 高透過効率 センサ素子に受光するまでに光を損失すると、撮像画像のSN比が低下する。ばけ復元、奥行き推定、ライトフィールド取得などのアプリケーションで精度の高い結果を得るためには、高い透過効率であることが重要である²⁾⁷⁾。
- (2) 高フレームレート 符号化絞りをを用いた撮像手法の中には、同一シーンを異なる絞りパターンを用いて撮影した複数枚の画像を要求する場合がある⁴⁾⁵⁾。特に動的なシーンでは、モーションブラー抑制のために短時間で撮影しなければならない。さらに、絞りパターンの変更をセンサ素子の撮影と同期させなければならない。



(a) Our prototype programmable aperture camera (b) The optical diagram of the prototype camera

図 2 LCoS を用いた能動絞りカメラ
Fig. 2 Programmable aperture camera using an LCoS device

- (3) 高コントラスト これまでに提案された最適絞りパターンは、高いコントラスト比で設計されており、その多くがバイナリパターンである。もしコントラスト比が低ければ、最適な絞りパターンを実現することができない。
- (4) レンズ可交換 撮影するシーンやアプリケーションに応じて、異なるレンズやセンサ素子と交換できることが望ましい。

これらの要求を満たすために、本研究では図 2 に示すような反射型液晶ディスプレイ(LCoS)を用いた能動絞りカメラを提案する。LCoSは反射型の光学素子で、高い開口率(92%)と反射率(60%)を有する。透過型LCDと比較した場合、LCoSは光の損失や回折の影響が少ないという利点がある。LCoSを使用することで、高解像度(1280×1024pixels)、高フレームレート(最大5kHz)かつ高コントラスト比で絞りパターンを制御することが可能となる。また、提案カメラでは、すべてのCマウントレンズやレンズアダプタを用いることでNikonのFマウントなどの一眼レフカメラ用レンズなどを装着することができる。提案する能動絞りカメラは、すべて市販の素子を用いているので、誰でも容易に構築することができ、さらに、アプリケーションに応じて再設計することも可能である。

2. 関連研究

符号化絞りを實現するシステムは、従来にも様々な実装方法が提案されてきた。もっとも一般的な方法として、レンズを分解し、絞りパターンを印刷したフィルム、あるいは切り抜

いた紙片で作られたマスクを挿入する方法がある¹⁾²⁾³⁾。しかし、これらの方法では、レンズを分解しなければならず、挿入したマスクを容易に変更できないという欠点がある。また、ミラーを用いて入射光を機械的に多数のセンサに分割することで、絞りを符号化する方法も提案されている。Aggarwal らは、高ダイナミックレンジ画像生成のために、ピラミッドミラーを用いて絞りを分割する方法を提案した¹⁰⁾。また、Green らは DFD による奥行き復元のために、複雑な形状のミラーを用いて異なる絞り形状による複数画像を同時撮像している¹¹⁾。

本研究同様、符号化絞りの形状を動的に変化できる実装手法として、透過型液晶ディスプレイ (LCD) を用いた方法が提案されている⁵⁾⁹⁾。ところが、LCD を用いる場合、透過する液晶素子間に駆動回路があるため、透過を妨げられ回折が生じるという問題がある。もちろん、画素数を制限することで、光効率をあげることは可能であるが、それと相反して低解像度が問題となる (Liang らの研究⁵⁾ では 5×5 ピクセル)。Grosse らは、LCD によりプロジェクタの絞り形状を能動的に変化させるシステムを提案している。プロジェクタの場合は、LCD の光損失を光源の強化で補えるが、カメラなどの受光光学に用いる場合には、損失は直接画像の明るさ、すなわち入力画像の SN 比に直結する問題となるため無視できない。

そこで本論文では、反射型液晶ディスプレイ (LCoS)¹²⁾ を絞り制御に用いる方法を提案する。これまで LCoS は、高ダイナミックレンジ画像生成のための能動フィルタとして用いられてきた¹³⁾。LCD や LCoS 同様、動的制御を目的とする装置として、デジタルミラーデバイス (DMD) があり、Nayar らは DMD を用いてセンサ素子の各ピクセルへの放射輝度を制御し、高ダイナミックレンジや特徴検出といったアプリケーションを実装した¹⁵⁾。しかしながら、DMD の各ピクセルは 2 値で制御するため、バイナリパターンの実装のみでしか用いることができない。

3. 提案システム

本研究では、反射型液晶ディスプレイ LCoS を絞りとして使用する能動絞りカメラを提案する。一般的に、LCoS はバックプロジェクションテレビやビデオプロジェクタなどに用いられており、ピクセルごとに反射する光線の偏光方向を制御することが可能である。典型的な透過型 LCD と比較して、LCoS は高コントラストかつ高解像度であり、さらに、光の損失や回折の影響が少ないという利点がある。LCD は駆動回路の隠蔽により回折が生じるが、一方 LCoS は全ての素子が反射面の後ろに設置されているため、より高い開口率を得ることができる。

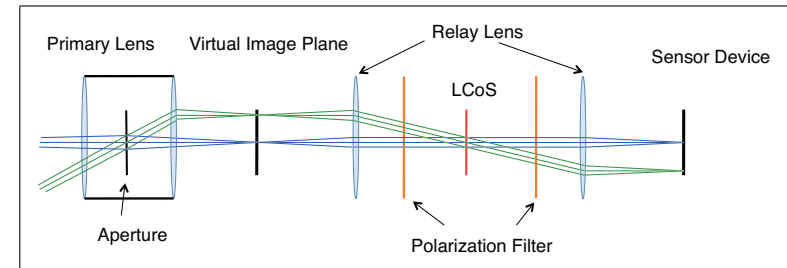


図 3 等価光学系
Fig. 3 An equivalent optical diagram

我々の目的の 1 つは、どんなレンズでも分解することなく装着できるように、最前面レンズと能動絞りを分離することである。そこで、LCoS をリレーレンズ系に取り入れたシステムを提案する。図 2 (b) に提案システムの概念図を、(a) に構築した試作機を示す。図に示すように、提案システムは LCoS とリレーレンズ、偏光ビームスプリッタ、CCD カメラ、そして市販レンズで構成され、全て市販の素子で構築することができる。試作機の LCoS には、Forth dimension display SXGA-3DM LCoS micro-display を使用した。そして、リレーレンズとして焦点距離 100mm と 125mm の 2 種類の非球面ダブルレットレンズ (Edmund Optics) を 2 枚ずつ用い、合成距離は 55mm とした。また、キューブ型偏光ビームスプリッタ (Edmund Optics #49002)、Point Grey の CCD センサ ($1/3''$ CCD, 1280×960 pixels, 25fps) を用いた。センサのシャッターは LCoS ドライバの外部トリガーを用いて、LCoS と同期している。図 2 (a) 左上に使用した市販レンズ、右に LCoS を示す。また、最前面レンズとセンサは標準の C マウントで装着されているため、どのような C マウントカメラやレンズとでも直接試作機に接続することができる。さらに、一眼レフカメラ用のレンズ (Nikon F マウントレンズ等) も適切なアダプタを用いることで装着が可能である。今回の実験では、Nikon 25mm F/1.4 C マウントレンズを使用した。

図 2 (b) に示す提案システムの概念図より、シーンからの入射光は最前面レンズにより仮想画像平面上で一旦集光する。仮想画像平面上に集光した光線は、1 枚目のリレーレンズを通過し、偏光ビームスプリッタで偏光、反射され LCoS に入射する。LCoS は、各ピクセル上で任意の角度に偏光方向を制御する。例えば、LCoS の画素値が 255 (8bit) に設定されている場合、光線は反射する際 90 度回転される。これにより、光線は偏光ビームスプリッタを通過することができるようになり、センサ素子に到達する。逆に、LCoS の画素値が 0

に設定されている場合、光線は偏光されず、偏光ビームスプリッタにより遮断される。最後に、2枚目のリレーレンズによりセンサ素子に集光する。これにより、最前面レンズが仮想画像平面に作成した像が、センサ素子に転送されることになる。

ここで、LCoSをミラーとみなすと、図2(b)の概念図は、図3のような等価光学系に置き換えることができる。図3より、センサ素子は2枚目のリレーレンズの焦点距離の位置に配置されるため、1枚目のリレーレンズの焦点距離に位置する仮想画像平面とは共役関係となる。また、LCoSは最前面レンズの絞りとして共役関係となり、さらに、この光学系中の他の素子よりも小さいため、絞りとしてみなすことができる。

4. 光学系の解析と評価

4.1 有効 F 値

提案システムではLCoSが絞りの役割を果たすため、最前面レンズのF値($f/\#$)はシステムの有効なF値ではない。提案システムの実際のF値は、リレーレンズの焦点距離 f_r とLCoSの物理サイズから決定される。円形絞りの場合、F値は焦点距離と絞りの直径との比で計算できる。また、LCoSの長方形本来の大きさで考える場合は、直径として $2\sqrt{uv}/\pi$ を用いる。 (u, v) はLCoSの大きさであり、システムのF値は以下の式で表すことができる。

$$f/\# = \frac{2}{f_r} \sqrt{\frac{uv}{\pi}} \quad (1)$$

最前面レンズの最大F値は $f/1.4$ だが、式(1)より試作機のF値は $f/2.84$ と求められた。

4.2 画 角

図3より、リレーレンズ系は仮想画像平面をセンサ平面に大きさ1対1でコピーすることが分かる。そのため、提案システムの画角(FOV)は、センサ素子を仮想画像平面の位置に配置した場合と同等である。よって、FOVはセンサ素子の大きさと最前面レンズの焦点距離を用いて計算できる。

$$FOV \approx 2 \arctan \frac{d}{2f_p} \quad (2)$$

ここで、 d はセンサ素子の対角、 f_p は最前面レンズの焦点距離を表す。試作機では、最前面レンズに焦点距離25mmのレンズを使用しているので、式(2)よりFOVは 13.69° と計算できる。当然のことながら、異なる焦点距離のレンズと交換することで、FOVを変えることが可能である。

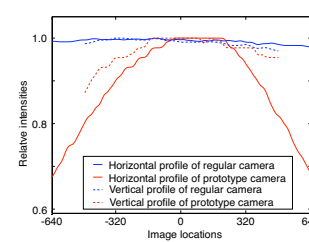


図4 口径食
Fig. 4 Vignetting profiles

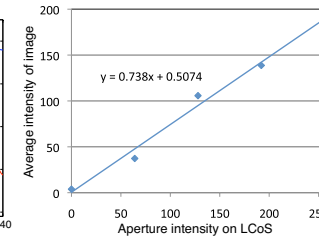


図5 LCoSの輝度値と透過率
Fig. 5 Intensity relation of LCoS and Image

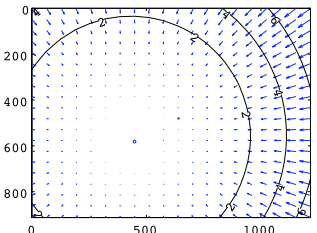


図6 レンズによる画像歪み
Fig. 6 Lens distortion

4.3 光 効 率

光効率は符号化絞りにおいて重要な指標である。理想的には、試作機の光効率は次のように計算できる。

$$27.6\% = 50\%(\text{polarization}) \times 92\%(\text{fill factor}) \times 60\%(\text{reflectivity}) \quad (3)$$

しかし、撮影画像の輝度値は、他の多くの光学素子(ビームスプリッタ、リレーレンズ)によっても低減される。そこで、正確な光効率を得るため、2枚の均一白色平面の画像を撮影した。1枚は試作機を用いて撮影し、もう1枚はLCoSやリレーレンズなど試作カメラの追加光学系を省いた前面レンズとCCDセンサの組み合わせで撮影した(ただしF値は、試作カメラと同等の $f/\#2.8$ で固定した)。その結果、2枚の撮影画像の平均輝度値の比は37.85:229.4であった。この比が試作機に用いる追加光学による損失を表しており、効率はおよそ17%であった。また、理論的なLCDの光効率は同様に以下の式で計算できる。

$$7.4\% = 50\%(\text{polarization}) \times 55\%(\text{fill factor}) \times 27\%(\text{transmittance}) \quad (4)$$

これにより、LCoSでの実装による光効率は、LCDでの実装よりも理論値で3倍以上高いことがわかる。

4.4 口 径 食

白色均一オブジェクトをカメラにより撮影することで、カメラの口径食(入射角に対する輝度の減衰)の影響を求めることができる。図4に試作機の口径食を青線で示した。実線と点線はそれぞれ水平方向と垂直方向の変化の断面を示す。同図に比較として通常のカメラ(同じ前面レンズとCCD)での結果を示した。試作機は、追加の光学素子の影響から口径食の影響が大きくなっており、最大で3割程度の損失がある。しかしながら、これはこの特性を用いて逆変換をかけることで、補正可能である。

4.5 コントラスト

符号化絞り手法のもう1つの重要な指標は、符号化絞りのコントラストである。コントラストを調べるため、異なる輝度値の円形絞りをを用いて均一白色平面の画像を撮影した。図5は、LCoSで制御した円形絞りの入力輝度値に対する撮影画像の平均輝度値を表す。図より撮像輝度値はLCoSの表示輝度に対してに綺麗に比例することがわかる。また、この回帰直線から絞りの最大コントラスト比は372:1と計算できた。このコントラスト値は、試作カメラが8bit(256階調)の画像を撮像することを考えると、十分に高い値であると考えられる。

4.6 画像歪み

試作機は、新たにリレーレンズを用いているため、画像の幾何的歪みが大きくなっている可能性がある。この画像歪みを調べるために、Matlab camera calibration toolboxを用いてこれを計測した。その結果を図6に示す。図中の小円は歪みの中心を示し、矢印はレンズの歪みによるピクセルの変位を表す。この結果より画像中心付近では無視できるが、画像の端で最大6 pixel程度の画像歪みが計測された。しかしながら、この歪みも測定したパラメータを用いて幾何補正を行う事で、校正が可能である。

4.7 PSFの評価

絞り形状は理想的にはその形状がそのままPSFとして計測される。しかしながら実際の光学系では、レンズの収差や光線の回折により、実際のPSFは歪められる。試作機のPSFを評価するため、ある符号化絞りを表示し、そのPSFを測定した。その結果を図7に示す。

今回の評価では、図7(a)に示す絞りパターンを使用した。絞りパターンは特定の意図なく選択した。図7(b)で、奥行きと視野角に応じてPSFがどのように変化するかを示す。今回の実験では、奥行き5段階(2mから4m)、視野角5段階(-5°から5°)におけるPSFを測定した。PSFの大きさが奥行きだけでなく、視野角に応じて変化していることがわかる。これは、試作機が若干の非点収差を持つための影響であると考えられる。

ただし、大半のPSF形状は非常に類似していることが確認できる。そこで、PSFと入力絞り形状との類似度を測るため、各PSFのスケールを正規化し、入力パターンとの L_2 距離を計算した。図7の上段に距離マップを示す。 L_2 距離より、PSFの形状偏差は、ぼけサイズが大きくなるにつれて減少していることがわかる。しかし、ぼけ復元において、 L_2 距離は良い測定法ではないことが知られている。そこで、2つのPSF間の相違度を測定するために、あるPSF画像を別のPSFでデコンボリューションする際に、Wiener復元誤差を用いた。長原らの研究¹⁶⁾で示されるように、この復元誤差はK-L divergenceであることが分かっている。図7(c)下段に、この相違度マップを示す。すべての相違度の値は小さ

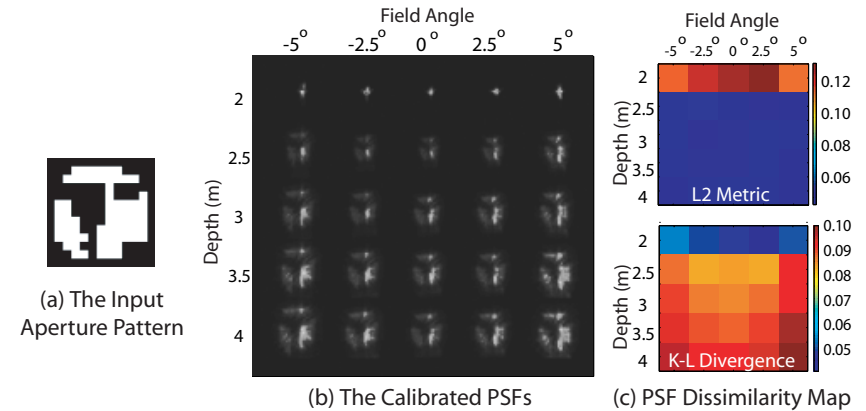


図7 試作機のPSF評価

Fig. 7 Evaluating the PSFs of the prototype camera

表1 試作機のスペック

Table 1 Specification of the prototype camera

Image resolution	1280×960 pixels
Aperture resolution	1280×1024 pixels
Frame rate	25 fps
Minimum F-number	2.84
FOV(diagonal)	13.76° (25 mm Nikon C-mount)
Actual aperture contrast	372:1
Light transmittance	16.49%

く、さらに、ぼけサイズが大きくなるにつれて減少していることが確認できる。以上、実機評価により得られた試作機の総合スペックを表1にまとめて示す。

5. アプリケーションによる評価

5.1 ライトフィールド取得

まず始めに、Liangらが提案した手法⁵⁾により、試作機を用いてライトフィールドを取得をした。一般に、4次元ライトフィールドは $l(u, v, x, y)$ で表現される⁸⁾。ここで、 (u, v) は絞り平面上の座標、 (x, y) は画像平面上の座標を表す。通常のカメラで撮影した画像は、4次元ライトフィールドの2次元投影であり、多くの角度情報はこの投影により失われる。

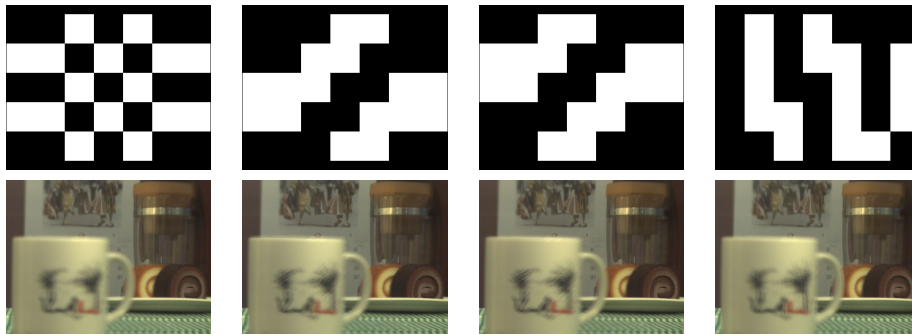


図 8 多重符号化絞りに対応する撮影画像

Fig.8 Four multiplexing aperture codings and the corresponding captured images

符号化絞りを用いたライトフィールド取得手法において、 (x, y) 空間の空間解像度は単純にセンサの解像度により決定され、 (u, v) 空間の角解像度は符号化絞りの解像度により決定される。坂東らは、ライトフィールド取得のために 2×2 のカラー符号化絞りをを用い、レイヤー推定を行った¹⁷⁾。また、Liang らは角解像度が 3×3 や 7×7 のライトフィールドを取得する絞りの多重化手法を提案した⁵⁾。ただし、絞りの多重化は画像の SN 比の向上には寄与するが、角解像度 $m \times n$ のライトフィールドを取得するためには、 $m \times n$ 種類の異なる符号化絞りをを用いて $m \times n$ 枚の画像を必要とすることには変わりがない。すなわち、従来より、高解像度のライトフィールドの取得には多数の画像が必要で、撮像に時間がかかることが問題であった。

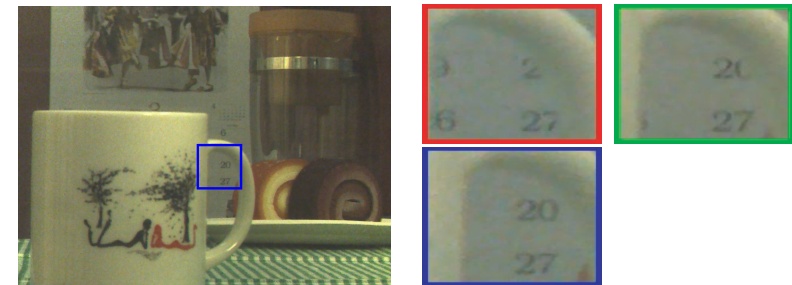
一方で、今回提案する能動絞りカメラは、様々な解像度のパターンを高速に切り替えることができる。すなわち、必要に応じた角解像度を適宜設定でき、また従来と比べて高速に撮像できる利点がある。具体的には、試作カメラは 25fps で絞り形状を変更可能であるので、31 視点のライトフィールドを撮影するのに 1.2 秒しか要しない。また、高解像度のパターンを用いることで、さらに多視点のライトフィールドを撮影することも可能である。

図 8 に、今回実験で使用した絞りパターンと撮像画像のうちの 4 枚を例として示す。絞りの多重符号化には、S 行列を用いた（多重符号化についての詳細は Shechener らの研究¹⁸⁾を参照されたい）。これらを含む 31 枚の撮影画像から、 $1280 \times 960 \times 31$ ($7 \times 5(u, v)$ 視点のうち、4 隅を除く 31 視点) のライトフィールドを復元した。図 9 に異なる視点 (u, v) のライトフィールドとその切り抜き拡大画像を示す。拡大画像より、開口位置に応じた視差



$(u, v) = (2, 3)$

$(u, v) = (4, 3)$



$(u, v) = (6, 3)$

Close-up images

図 9 復元した 4 次元ライトフィールド

Fig.9 The reconstructed 4D light field

より、文字とマグカップのハンドルの位置関係の変化が確認できる。また、復元したライトフィールドを用いることで、奥行き推定やデジタルリフォーカスといった後処理を行うこともできる⁵⁾¹⁷⁾。

5.2 ぼけ復元

既存の符号化絞り手法を行う際の大きな制約は、PSF の実際の形状がレンズの収差や回折により、入力パターンの形状から歪められることである。レンズの収差や回折の度合いは、レンズによって異なるが、レンズの複雑さのために、パターン最適化の際にそれらの効果を考慮に入れることは難しい。これら絞り最適化における不完全性は、論文では見落とされることが多い。さらに、ぼけ復元に用いる最適な符号化絞りは、撮影するシーンや照明な

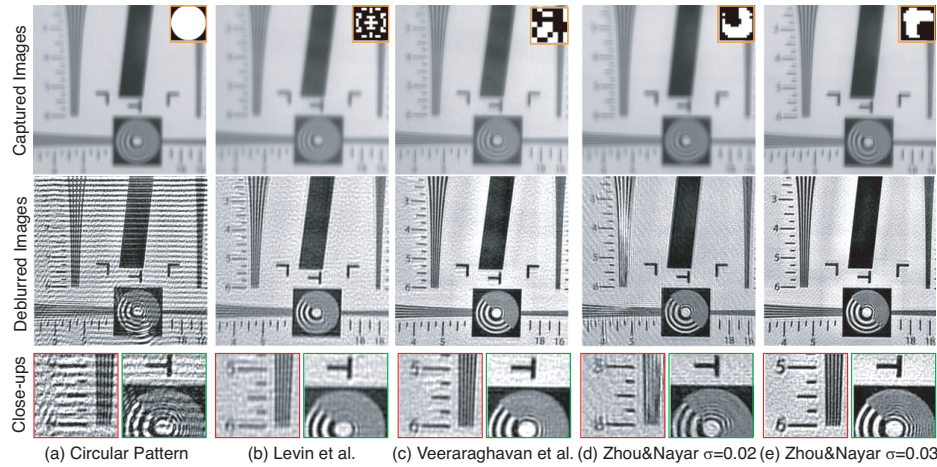


図 10 試作機を用いたぼけ復元のパターン選択

Fig. 10 Pattern selection for defocus deblurring by using the programmable aperture camera

ど撮影対象や環境に応じて異なる²⁾。そのため、絞りパターンを動的に変更できることが望ましい。

実験では、図 1 に示すような、複数の異なる絞りパターンを用いて、IEEE の解像度チャートを撮影した。図 10 上段に撮影画像を示す。また、測定した PSF を用いて各撮影画像のぼけ復元を行い、その結果を図の中段に、切り抜き拡大図を下段に示す。図より、パターンごとに復元精度が異なることがわかる。今回の実験環境では、パターン (e) での復元が最も精度が良いことが確認できた。また、本提案システムを用いれば、シーンに応じて最適な絞りパターンを選択することができ、ぼけ復元に対して有効であると言える。

5.3 奥行き推定

最後に、Zhou らが提案した絞りパターンを用いて奥行き推定 (DFD) を行った⁴⁾。奥行き推定に用いる PSF は、周波数領域で多くのゼロ交差を持つことが望ましいということが知られている。逆に、ぼけ復元に用いる PSF は広帯域である必要がある。そのため、Zhou らはゼロ交差を多く持ち、かつ広帯域という相反する特徴を有する 2 つの符号化絞りの組を提案した。我々の提案する能動絞りカメラを用いれば、異なる複数の絞りパターンでも容易に変更することが可能である。

f_0 を合焦点画像とすると、ある奥行き d で符号化絞りの組 k_i を用いて撮影した画像 f_i は次のように表現することができる。

$$f_i = f_0 \otimes k_i(d) + \eta, i = 1, 2 \quad (5)$$

さらに、式 (5) をフーリエ変換すると、次のようになる。

$$F_i = F_0 \cdot K_i^{d*} + \zeta, i = 1, 2 \quad (6)$$

K_i^{d*} は、PSF K_i を実際の奥行き d^* でのサイズにスケーリングしたものである。我々の目標は奥行き \hat{d} と、ぼけ復元画像 \hat{F}_0 を得ることである。そこで、それらを推定するためのコスト関数を次のように定義する。

$$W^{(d)} = \sum_{i=1,2} |IFFT(\hat{F}_0^{(d)} \cdot K_i^{\hat{d}} - F_i)| \quad (7)$$

$$\hat{F}_0 = \frac{F_1 \cdot \bar{K}_1^{\hat{d}} + F_2 \cdot \bar{K}_2^{\hat{d}}}{|K_1^{\hat{d}}|^2 + |K_2^{\hat{d}}|^2 + |C|^2} \quad (8)$$

ここで、 $IFFT$ は 2 次元逆フーリエ変換を表す。 \bar{K} は K の共役複素数であり、 $|X|^2 = X \cdot \bar{X}$ である。また、 C は撮影画像の SN 比を表す。このとき、各ピクセルに対して $W^{(d)}(x, y)$ を最小化することで、次のようにデプスマップ U を推定することができる。

$$U(x, y) = \arg \min_{d \in D} W^{(d)}(x, y) \quad (9)$$

さらに、 U を用いて、次式より全焦点画像を復元することができる。

$$I(x, y) = \hat{F}_0^{(U(x, y))}(x, y) \quad (10)$$

図 11 (a) (b) に撮影画像と、図中左上に対応する符号化絞りを示す。また、図 11 (c) に推定したデプスマップ、図 11 (d) に復元した全焦点画像を示す。今回の実験では、オブジェクトの奥行きを 3 段階設定し (試作機から 400, 700, 1500mm), 700mm 付近に焦点を合わせた。図 11 (c) より、各レイヤーで正しく奥行きが推定できていることが確認できる。さらに、全焦点復元画像より、画面全体でぼけのない画像が生成できていることが確認でき、本提案システムが奥行き推定に対しても有効であることが示された。

6. ま と め

本論文では、LCoS を用いた能動絞りカメラを提案・構築し、高いコントラスト比かつ光

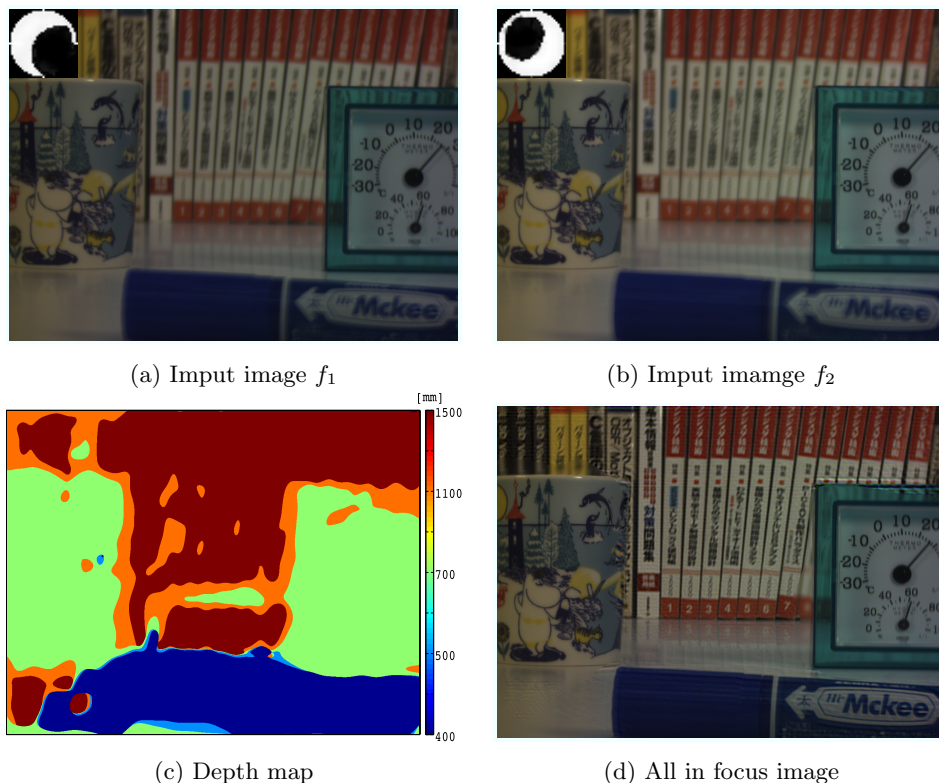


図 11 DFD による奥行き推定
Fig. 11 Depth estimation by depth from defocus

効率，ビデオフレームレートでの高解像度な絞りパターン制御を実現した．提案システムのもう一つ大きな特徴として，レンズを分解することなく，あらゆる C マウントレンズや F マウントレンズでも接続することができる．これにより，あらゆる符号化絞り手法に適用することができる．我々は，多重ライトフィールド取得と，ぼけ復元のためのパターン選択，奥行き推定の 3 つのアプリケーションに適用し，試作機の評価を行い，本提案システムの有効性を確認した．

参考文献

- 1) A. Veerarathavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Hohan and J. Tumblin: "Dappled Photography: Mask Enhancement Camera for Heterodyned Light Field and Coded Aperture Refocusing," *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2007.
- 2) C. Zhou, S. Nayar: "What are good apertures for defocus deblurring?," *International Conference of Computational Photography*, 2009.
- 3) A. Levin, R. Fergus, F. Durand, W. T. Freeman: "Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture," *ACM SIGGRAPH 26*, pp.70, 2007.
- 4) C. Zhou, S. Lin, S. Nayar: "Coded Aperture Pairs for Depth From Defocus," *Proc. International Conference on Computer Vision*, 2009.
- 5) C. K. Liang, T. Lin, B. Wong, C. Liu, H. H. Chen: "Programmable Aperture Photography: Multiplexed Light Field Acquisition," *ACM Trans. Graphics 27*, 2008.
- 6) R. Raskar, A. Agrawal, J. Tumblin: "Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter," *ACM Trans. Graphics*, pp.795-804, 2006.
- 7) S. Hashinoff, K. Kutulakos, F. Durand, W. Freeman: "Time constrained photography," *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp.1-8, 2009.
- 8) M. Levoy, P. Hanrahan: "Light field rendering," *ACM SIGGRAPH*, pp.31-42, 1996.
- 9) A. Zomet, S. Nayar: "Lensless imaging with a controllable aperture," *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.339-346, 2006.
- 10) M. Aggarwal, N. Ahuja: "Split Aperture Imaging for High Dynamic Range," *International Journal of Computer Vision 58*, pp.7-17, 2004.
- 11) P. Green, W. Sun, W. Matusik, F. Durand: "Multi-aperture photography," *Proc. ACM SIGGRAPH 26*, 2007.
- 12) Wikipedia: Liquid crystal on silicon. (http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_on_silicon)
- 13) H. Mannami, R. Sagawa, Y. Mukaigawa, T. Echigo, Y. Yagi: "High dynamic range camera using reflective liquid crystal," *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp.14-20, 2007.
- 14) M. Grosse, O. Bimber: "Coded Aperture Projection," *ACM SIGGRAPH*, 2008.
- 15) S. Nayar, V. Branzoi, T. Boulton: "Programmable imaging: Towards a flexible camera," *International Journal of Computer Vision 70*, pp.7-22, 2006.
- 16) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, S. Nayar: "Flexible depth of field photography," *Proc. European Conference on Computer Vision*, Vol.3, 2008.
- 17) Y. Bando, B. Chen, T. Nishita: "Extracting depth and matte using a color-filtered aperture," 2008.
- 18) Y. Schechner, S. Nayar, P. Belhumeur: "A theory of multiplexed illumination," *Proc. IEEE ICCV*, Vol. 2, pp.808-815, 2003.