

フォーカススイープ撮像による DFD

松井修平^{†1} 長原 一^{†1} 谷口 倫一郎^{†1}

撮像した画像のぼけの大きさから撮影シーンの奥行きを求める手法は DFD (Depth From Defocus) として知られている。DFD では、ぼけ方の異なる 2 枚の画像を使用するが、一般的なカメラのぼけ広がり関数 (PSF) の場合、奥行きに対するその形状変化が穏やかであるため、精度は良いとは言えなかった。それに対して近年、符号化絞りと呼ばれる特殊な形状の絞りをういて画像撮像することで PSF を制御し、DFD の奥行き推定精度を向上させる方法が提案されている。これらぼけ画像からの DFD を用いた応用では、奥行きを求めるのと同時に、全焦点画像をデコンボリューションにより同時推定することが多い。しかしながら、符号化絞りは入射光を遮ることで PSF を制御することから入力画像の SN 比が悪化するため、全焦点画像復元の観点からは不利であると言える。そこで本論文では、フォーカススイープ撮像を用いた DFD 手法を提案する。フォーカススイープ撮像は、露光時間中にフォーカスを変えながら撮像する手法で、レンズの焦点変化を用いて PSF を制御することができる。そのため、符号化絞りとは異なり、入射光を有効利用できるため画像復元に有利である。本論文では、実験において DFD や符号化絞りとの奥行き推定性能や画像復元性能を比較することで有効性を示す。

Focus Sweep Imaging for Depth From Defocus

SHUHEI MATSUI,^{†1} HAJIME NAGAHARA^{†1}
and RIN-ICHIRO TANIGUCHI^{†1}

Depth From Defocus (DFD) is to recover a scene depth from defocus appearances in images. DFD usually uses two different focus images, one is near focus and the other is far focus, and estimates the size of depth blur from the captured images. However, the depth estimation is not so accurate, since a point spread function (PSF) caused by regular circular aperture moderately changes the size or shape along the depth. In recent years, coded aperture technique, that uses special pattern as an aperture for engineering the PSF, has been used for improving the accuracy. It is often required for recovering an all in focus image as well as the depth estimation in DFD applications. Coded aperture has an disadvantage in terms of image deblurring, since the deblurring requires higher SNR of captured images. The aperture always attenuates an incoming light for controlling PSF and decreases an input image SNR as a result. In this paper, we propose a new DFD approach for DFD

that uses focus changes during an image integration time for engineering the PSF. We can capture higher SNR input images, since we can control the PSF with wide aperture setting unlike coded aperture. We confirmed the effectiveness of the method in comparison with the previous DFD and coded aperture approached in experiments.

1. はじめに

近年、コンピュータショナルフォトグラフィの分野の発達に伴い、撮影時により多くの情報を取得することを目指したカメラが提案され始めてきた。例えば、撮影シーンの奥行き情報が得られた場合、任意視点画像の生成するイメージベースドレンダリング、任意の箇所に焦点を当てるデジタルリフォーカシングなどのポストキャプチャが可能となり、その他にも対象物体の 3D 復元など、様々な応用への活用が期待できる。このようなカメラは、今までは複眼のカメラによる実現が現実的であったが、コストの面や、キャリブレーションなどの面からみると、単眼カメラでの実現が可能となるのが望ましい。そこで、本論文では単眼カメラによる奥行き推定を目指した新しい撮影手法を提案する。

画像中のぼけ情報から奥行きを測定する手法は DFD と呼ばれ、数々の手法が従来より提案されている^{1),2)}。一般的な DFD では、2 枚の画像のぼけから撮影シーンの奥行きを測定するが、通常のカメラが持つ円形の絞りで、シーン中の奥行きに対してぼけ広がり関数 (PSF) の形状変化が穏やかであるため、奥行き推定の性能が良くないとされていた。そこで、符号化絞りと呼ばれる特殊なマスクを絞りに用いることで、独特な PSF を持たせる手法が提案され、奥行き推定がロバストに行えることが示された³⁾。Levin ら⁴⁾ は符号化絞りでは奥行きに対して大きくぼけ形状が変化するように PSF を設計することで、単一の画像から奥行き推定できる手法を提案した。しかし、この手法ではロバストな奥行き推定のために PSF に零交差を多く含ませているため、ぼけ復元には有効とは言えなかった。一方、Zhou ら⁵⁾ は 2 枚の絞りを使用し、片方のみでは零交差を多く含み奥行き推定をロバストに行えるが、両方の絞りの特性を合わせることで全焦点画像復元にも有効である絞りを提案した。しかし、符号化絞りでは光を遮ることで PSF を制御するという本質から、入射光を制限していることとなるため、撮影画像の SN 比は通常に撮影するものと比べて悪くなってしまふ。これに対して、ウェーブフロントコーディング¹⁰⁾ や、ラティスフォーカスレンズ¹¹⁾ は、絞り

^{†1} 九州大学大学院システム情報科学研究院

Graduate school of information science and electrical engineering, Kyushu University

に特殊な光学素子を取り付けることで PSF を制御する手法である。これらは最大開口で撮像できるため SN 比の面からみれば有利な手法であるが、レンズに光学素子を取り付ける必要があるため、通常の撮影との切り替えが困難である。

本論文では、カメラのフォーカスをスイープさせながら 2 枚の画像を取得する新しい DFD 推定のための画像撮像法を提案する。提案手法は、絞りを開放した状態で PSF を制御することから、撮像画像の SN 比が高いという利点を持つ。また、提案手法では、レンズもしくはセンサを動かしてフォーカスを変化させる必要があるが、市販のカメラの多くに搭載されているオートフォーカス機構を利用することで比較的容易に実装を行える。さらに、通常の撮影や異なるシーンの奥行きに対応するためには、単にスイープモーションを変更するだけで対応できることから、撮影条件への柔軟性も高い。本手法では、フォーカスの変化により異なる PSF が生じる事を利用し、その PSF をスイープにより多重化することで PSF を制御する。具体的には、スイープ区間を半分に分け、2 枚の入力画像として撮像することで、同一のシーンを異なる 2 種類の PSF 撮像された 2 枚の撮像画像を得る。その結果、片側の PSF の周波数特性は零交差を含み、両方の PSF を合わせると広帯域な特性を実現できることから、奥行き推定と全焦点画像推定を両立できる。本論文では、2 章で関連研究を述べる。3 章で提案するハーフスイープ撮像法について説明し、その PSF について考察する。4 章でハーフスイープ撮像に対応した DFD 推定手法を提案する。提案手法の有効性を検証するため、5、6 章においてシミュレーションおよび実画像を用いて実験を行った結果を示す。

2. 関連研究

従来より、ぼけからの奥行き復元を安定化するために、PSF を制御する方法が数多く提案されてきた。マスクによる符号化絞りをを用いた PSF の制御手法は初期には日浦ら³⁾により提案され、複数のピンホールを用いた絞りが DFD 推定をロバストに推定できることを示した。Levin ら⁴⁾は、PSF の周波数特性が奥行きに伴うぼけのスケール変化に対して過敏に変化するような符号化絞りが DFD に最適であると提案している。実際に評価関数として KL ダイバージェンスを用い、異なる奥行き周波数スペクトル間の KL ダイバージェンスを最大化することで、最適絞りパターンを探索により求めた。この最適絞りパターンは、周波数スペクトルに多くの零交差を含み、この零交差がぼけのスケール変化に伴い大きくずれる。

もし異なったスケールの PSF でデコンボリューションされたこの零交差の不一致から大きなアーチファクトを生む。すなわち、このアーチファクト誤差を増大させることが DFD 性能の向上につながることを定性的に示した。その結果、通常は奥行きぼけの曖昧性から最

低 2 枚の入力画像が必要であるが、本手法では単一のぼけ画像からの奥行き復元を実現している。しかしながら、零交差は特定の周波数情報を失うことを意味しており、この絞りはぼけ復元には向かない。

そこで、Zhou ら⁵⁾は、2 枚の絞り形状ペアの最適化により求めることで、DFD 性能とぼけ復元の両立を図った。一般的にぼけ復元のための絞りは周波数応答が広帯域であることが望まれる。一方で先に述べた様に、DFD 性能向上のためには零交差を多く含む周波数応答が求められる。ぼけ復元のための広帯域の絞りと、DFD のための絞りの周波数特性は相反しているため、最適化を両立できない。しかしながら、実際は DFD 推定において画像のぼけ復元と距離推定は同時に行われているため、距離推定のためのぼけのサイズ推定には、正確なシーンのアピランス推定が必要であり、逆に正確な奥行きが求められなければ、ぼけ復元画像も正確にできないというジレンマがあった。Zhou らは、絞り特性評価のコスト関数を定義し遺伝的アルゴリズムを用いて 2 枚の絞りペアの形状を同時最適化することにより、一方の絞りでは零交差を含み距離の違いによるアーチファクトを増強するが、両者の周波数特性を合わせると広帯域となるような相補的な周波数特性となる絞りペアを求めた。ただし、複数の絞りを必要とするということは、絞りの切り替えや複数回の撮像を必要とすることから動物体の撮像や撮影の簡便さの点からは問題が残る。

これを解決する手法として高速に絞りを変化しながら撮像できる能動絞りカメラが提案されている^{7),8)}。このカメラでは複数絞りによる撮像を容易にできるが、複数板を時分解撮像していることに変わりなく、動画には対応できていない。Green ら⁹⁾は、絞りをミラーで実装し、異なる絞り形状に対応する入射光を 4 枚のセンサで同時撮像する手法を提案した。ただし、このミラー絞りの特徴は、同時に複数画像が撮影できる利点以外は、画像の SN 比など本質的にマスクを用いた符号化絞りの実装と変わらない。

Levin⁶⁾は、複数の符号化絞りパターンによる特性を数学的にモデル化した。そのモデルから DFD 性能に関わる要素やその上限値を議論し、符号化絞りパターンの最適性を解析的に考察した。その結果、2 枚の絞りペアにおいては、Zhou ら⁵⁾が探索により求めた絞り形状が最適であることを理論的にも裏付けた。また、2 枚以上の複数であれば Green ら⁹⁾の絞りも最適であると結論付けている。DFD が行うぼけによる距離推定やぼけ復元処理は一般的に画像のノイズに弱いことが知られている。符号化絞りにおける PSF の符号化は本質的に光を遮ることで実現されているため、この画像の SN 比の観点からは有利ではない。

絞りのように光を遮らずに PSF を制御する方法として、ウェーブフロントコーディングがある。ウェーブフロントコーディングでは、レンズの絞り位置に波長板と呼ばれる特殊

な光学素子を挿入することで、PSF 形状を制御しようとする方法である。Dowski ら¹⁰⁾ は、Levin ら⁴⁾ のマスク絞り同様、周波数空間で多くの零交差を含み、距離推定性能を向上させる波長板を提案した。

また、Levin ら¹¹⁾ は、奥行きによらず広帯域の周波数特性が得られる最適なぼけ復元のための PSF を理論的に考察し、それを実現する光学系としてラティスフォーカスレンズを提案した。このレンズの PSF 形状は奥行き変化を持つため、ぼけ復元と同時に距離推定も行うことができる。これらウェーブフロントコーディングでは、絞りを開放したまま PSF を制御できることから、明るい画像が撮像でき SN 比の観点からは有利である。ただし、特別な光学素子が必要なこと、レンズにそれを挿入するため、その周波数特性が固定である点や通常の絞り撮影との同居ができないなど撮影の柔軟性に乏しい。

これに対して、長原ら^{12),13)} は、画像の露光時間中にフォーカス位置を変化させながら撮影するフォーカススイープ撮像法を提案した。この方法では、ウェーブフロントコーディング同様、絞りを開放したまま、カメラの PSF を制御することができる。文献^{12),13)} では、奥行き異なるシーン全体をカバーするように焦点位置をスイープすることで、奥行き不変の PSF を生成し、奥行き知識や推定の必要なく全焦点画像を復元している。

本論文では、この手法を拡張して DFD 推定のための PSF 制御に用いる。具体的には、シーンの奥行きに対して焦点のスイープ範囲を半分分割し、2 枚のスイープ範囲異なる画像を撮影するハーフスイープ撮像を提案する。このハーフスイープ撮像により得られた 2 枚の画像は、Zhou ら⁵⁾ の絞りペア同様、両方の PSF 特性を足すと広帯域になるが、一方では零交差を含み奥行き復元を行う事ができる。本手法の利点は、絞りを開けたまま撮像することから画像の SN 比で有利である。また、焦点位置の移動制御のみで実現できるため、シーン毎に適応した撮像ができることや通常の撮影の切り替えができるといった柔軟性を持つ。更には、現在の市販のカメラには、すでにオートフォーカスのために、アクチュエータによる焦点移動機構が備わっている。これをハーフスイープ撮像法に活用することを考えると、本手法の実現性は高いと考える。

3. ハーフスイープ撮像

フォーカススイープ撮像¹²⁾ は、露光時間中にセンサを光軸に沿って等速で動かしながら撮像する手法のことである。つまり焦点変化を用いて多重化露光することで、PSF を制御する。本論文で提案するハーフスイープ撮像は、フォーカススイープを DFD 推定のための撮像法に拡張した。具体的には、センサの移動範囲を二つに分割し、前方と後方焦点範囲の 2

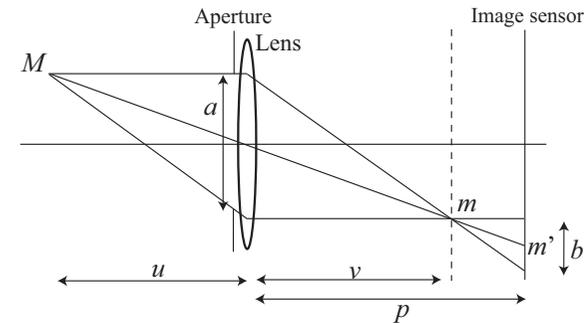


図 1 レンズ幾何
Fig. 1 Projective geometry of lens

段階にそれぞれ分けて露光した 2 枚の画像を撮像する。このようなハーフスイープ撮像におよびそれにより得られる PSF の特性について以下に説明する。

カメラのレンズの集光の様子は、図 1 の様に示される。図 1 において、レンズの焦点距離を f 、絞りの直径を a 、レンズから撮像素子までの距離を p を示している。ここで、距離 u の対象物体上の点 M は、 v の位置 m に集光する。この関係はガウスのレンズ則により次式の様に表示される。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

ここで、 $v = p$ の場合は、焦点の合った画像が得られるが、図 1 の様に、撮像素子の位置 p と焦点面 v が一致しない場合、 M にある対象は画像上では m' を中心とした大きさ b の円として射影される。このぼけの大きさ b は次式の様に表示される。

$$b(p) = \frac{a}{v} |(v - p)| \quad (2)$$

ここで、PSF の形状をピルボックス型と仮定すると、その PSF は $P(r, u, p)$ として以下の式によって与えられる。

$$P(r, u, p) = \frac{4}{\pi b^2} \prod\left(\frac{r}{b}\right) \quad (3)$$

ここで、 r は PSF の中心 m' から集光点からの半径、 $\prod(x)$ は矩形関数を表し、 $|x|$ が $1/2$ よりも小さい時 1 となり、それ以外では 0 となる。

次に、スイープ撮像により得られる PSF について考える。提案するハーフスイープ撮像

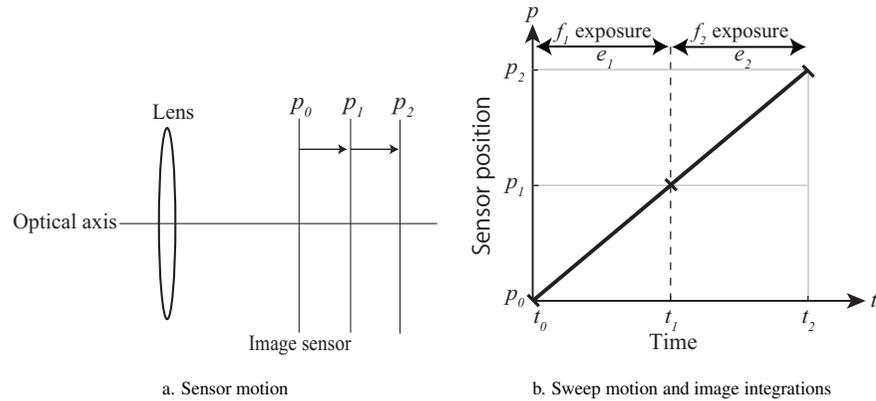


図2 ハーフスイープ撮像
Fig. 2 Half sweep imaging

では、図 2-a に示す様に、2 枚の画像撮像する間に、光軸に沿って p_0 から p_2 に等速直線運動すると仮定する。また、撮像対象の焦点位置はすべてこの区間 p_0 から p_2 内に存在するとする。撮像時の撮像素子の位置は $p(t) = st + p_0$ に示す様に時間関数で表され、図 2-b に示す様な関係で表される。この図に示すように、ハーフスイープ撮像で撮像される 2 枚の画像 f_1 と f_2 の露光時間 e_1, e_2 は、それぞれ撮像素子の移動時間 t_0 から t_1 および t_1 から t_2 の区間に対応する。すなわち、それぞれの撮像画像 f_1 と f_2 は、図 2-a の p_0 から p_1 および p_1 から p_2 の各区間範囲でセンサ移動しながら撮像することになる。その結果、2 種類の多焦点画像の重畳画像として 2 枚の撮像画像 f_1, f_2 が得られる。

ここで、このようなハーフスイープ撮像により得られる画像の撮像 PSF についてモデル化する。ハーフスイープ撮像により得られる画像 f_1, f_2 は、

$$f_i = h_i \otimes f_0 + \xi, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

の様に、理想画像 f_0 とハーフスイープ撮像の PSF 関数 h_i のコンボリューションとしてモデル化できる。ここで、 ξ はノイズを表す。この h_i は、先に述べた様に、撮像素子が動きながら異なるぼけの大きさで多重露光撮像したことになることから、次式の様に各センサ位置のぼけを各区間 p_0 から p_1 または p_1 から p_2 で積分したことと見なせる。

$$h_i(r, u) = \int_{p_{i-1}}^{p_i} P(r, u, p) dp \quad (5)$$

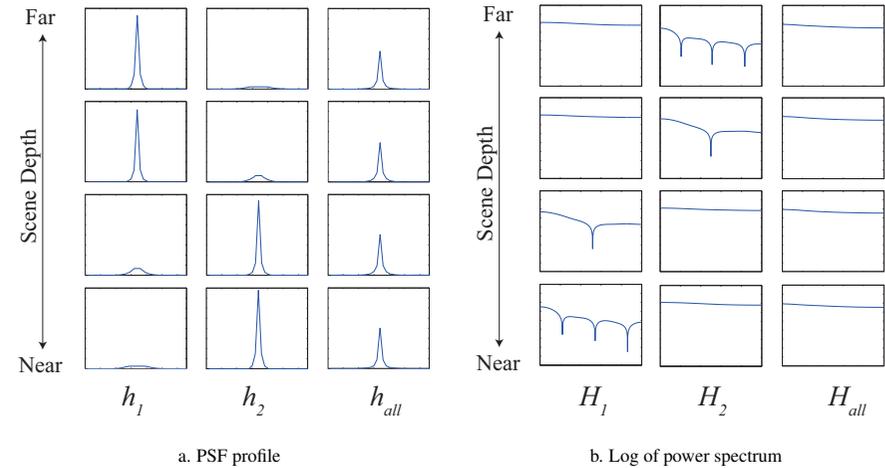


図3 ハーフスイープ PSF
Fig. 3 Half sweep PSF

具体的に、レンズのぼけを式 3 で表されるピルボックス関数であると考え、ハーフスイープ撮像での PSF は、次式の様に導出できる。

$$h_i(r, u) = \frac{uf}{(u-f)\pi asp_i} \left(\frac{\lambda_{p_{i-1}} + \lambda_{p_i}}{r} - \frac{2\lambda_{p_{i-1}}}{b(p_{i-1})} - \frac{2\lambda_{p_i}}{b(p_i)} \right) \quad (6)$$

ここで、 $b(p)$ は式 2 で示されるレンズからセンサまでの距離 p におけるぼけ円の直径であり、 λ_p は $b(p) = 2r$ の時 1 をとり、その他で 0 をとる。

式 6 でモデル化された PSF を用いて図 3-a にハーフスイープ撮像による理論的な PSF の断面形状を示した。図 3 において 2 つの撮像 PSF h_1, h_2 について、異なる 4 段階の物体の奥行きについて示した。この物体の奥行きは、焦点位置 v 換算で、 p_0 から p_2 の区間を 4 分割する位置として設定した。また、同図に $h_{all} = (h_1 + h_2)/2$ で示される平均 PSF も示した。この平均 PSF は、長原ら^{12),13)} のフォーカススイープ撮像法の PSF に対応する。

h_1 と h_2 を観測してみると、ある奥行きにおいては各 PSF で異なる形状をとっており、各 PSF においては奥行きごとで異なる形状であるが、 h_{all} では、どの奥行きに対してもほぼ不変な形状をしていることが分かる。PSF の周波数特性を分かりやすく議論するために、これらの PSF を周波数パワースペクトルを図 3-b に示した。ここで、縦軸は log 表記であり、 H_1, H_2, H_{all} はそれぞれ h_1, h_2, h_{all} のフーリエ変換を示す。図 3-a と同様に、 $H_1,$

H_2 の周波数特性は、奥行きごとで、また各 PSF 間で異なる特性をとっている。一方で平均 PSF H_{all} では、どの奥行きでもほぼ不変で広帯域な特性である。注目したいのは、大きくぼけた方の PSF 特性で、焦点位置から離れれば離れるほど零交差の数が増えていることが分かる。Levin ら⁴⁾ の考察よりこの様な零交差は、奥行き推定において有利となることが期待できる。一方で、 H_{all} の PSF では、長原ら^{12),13)} の考察にあるように、周波数特性でみると広帯域であるためデコンボリューションによるぼけ復元に向き、全焦点画像の生成に有利であることが分かる。以上の様に、ハーフスイープ撮像により得られる 2 枚の撮像画像は、Zhou ら⁵⁾ の DFD 最適化した符号化絞りペア同様、両方の PSF 特性を足すと広帯域になるが、一方では PSF に零交差を含むため奥行き復元に向くという特性を実現していることが定性的に示された。

4. DFD 推定手法

ここでは、ハーフスイープ撮像で得られる 2 枚の符号化撮像画像からシーンの奥行きと全焦点復元を行う方法を提案する。ハーフスイープ撮像は、式 4 に示す様にモデル化される。その関係は周波数空間において、次式の様に表される。

$$F_i^{(d)} = F_0 \cdot H_i^{(d)} + N \quad (7)$$

ここで、2 枚の撮像画像は F_i 、全焦点画像は F_0 、奥行き d の PSF カーネルは $H_i^{(d)}$ 、 N はノイズ成分のフーリエ変換をそれぞれ表す。DFD では、この逆推定により、 F_0 と d を求める問題である。一般にぼけ復元画像 F_0 の推定には、次式に示すウィナーデコンボリューションフィルタが用いられる。

$$\hat{F}_0 = \frac{F \cdot \bar{H}}{|H^2| + |C|^2} \quad (8)$$

ここで、撮像画像フーリエ変換を F 、PSF のフーリエ変換を H とした時、ぼけ復元画像のフーリエ変換 \hat{F}_0 を示す。 \bar{H} は H の共役複素数であり、 $|H^2| = H \cdot \bar{H}$ である。また、 C は SN 比の逆数である。しかしながら、式 8 から分かるように、ウィナーフィルタは単一画像を対象としているためにそのまま用いることはできない。3 章で示した様に、 h_1 と h_2 の平均カーネル h_{all} はすべての奥行きに対して広帯域であることから、次式の様に平均画像と平均 PSF カーネルをぼけ復元に用いることを考えた。

$$F_{all} = \frac{F_1 + F_2}{2}, \quad \overline{H_{all}^{(d)}} = \frac{\overline{H_1^{(d)}} + \overline{H_2^{(d)}}}{2} \quad (9)$$

すなわち、式 9 で表される F_{all} と H_{all} を式 8 に代入することで、ハーフスイープ撮像に対応したウィナーフィルタの拡張式を導出できる。

$$\hat{F}_0^{(d)} = \frac{(F_1 + F_2) \overline{(H_1^{(d)} + H_2^{(d)})}}{|H_1^{(d)} + H_2^{(d)}|^2 + 4|C|^2} \quad (10)$$

一方で、奥行き d を求めるためのコスト関数は次の様に示される。

$$W^{(d)} = \sum_{i=1,2} |IFFT(\hat{F}_0^{(d)} \cdot H_i^{(d)} - F_i)| \quad (11)$$

ここで、 $\hat{F}_0^{(d)}$ は、式 10 で求められ、このコスト関数は復元画像に想定する距離のぼけカーネルをコンボリューションした推定撮像画像と実際の撮像画像との誤差を表す。IFFT は 2 次元逆フーリエ変換であり、画像を周波数空間から 2D 画像へと戻してから誤差を算出している。ここでは誤差が少ないほど正しい奥行き d が推測されていることを示す。最終的に、各ピクセル (x, y) において、最小となる d を以下の様に探索し、撮像シーンのデプスマップ U を推定することができる。

$$U(x, y) = \arg \min_{d \in D} W^{(d)}(x, y) \quad (12)$$

また、推定されたデプスマップ U から全焦点画像 I を以下の式で復元できる。

$$I(x, y) = \hat{F}_0^{(U(x,y))}(x, y) \quad (13)$$

5. シミュレーション実験

本論文が提案するハーフスイープによる PSF 符号化の有効性を示すため、シミュレーション比較実験を行った。比較手法として 2 枚の異なる焦点画像による一般的な DFD と Zhou らの符号化絞り⁵⁾ による DFD を用いた。本シミュレーション実験では比較を含む 3 手法とも、焦点距離 9mm、 $f/1.4$ のレンズで撮影を行うことを想定した。

ここでは図 1 に従って、レンズから対象物体までの距離を u 、レンズから像が結ぶ箇所までの距離を v 、レンズからセンサまでの距離を p とする。実験の条件として、撮影対象の奥行きの範囲を $u=83 \sim 2000\text{mm}$ と想定した。式 1 より、撮影シーンの焦点位置の範囲は $v=9.04 \sim 10.09\text{mm}$ となる。ここで、この v の範囲を 20 分割し、20 段階のシーンの奥行きとした。この時、 u と v の関係は、表 1 に示す通りとなる。20 段階における v の変化量は、 $\Delta v=0.055$ である。 p が v から Δv ずれるごとに撮像画像は半径 0.5 ピクセルの大きさのぼ

表 1 物体と焦点位置の関係 (f=9mm)

Table 1 Relation between object depth and focus position

Object depth : u [mm]	2000.0	803.1	524.6	390.7	312.1	260.3	223.6	196.3	175.1	158.2
Focus position : v [mm]	9.04	9.10	9.15	9.21	9.26	9.32	9.37	9.43	9.48	9.54
Object depth : u [mm]	144.5	133.1	123.4	115.1	108.0	101.8	96.2	91.4	87.0	83.0
Focus position : v [mm]	9.59	9.65	9.70	9.76	9.81	9.87	9.92	9.98	10.03	10.09

けを持ち、最大で 10 ピクセルの大きさのぼけを持つ。対象物体のテクスチャは図 5-a に示すように左側のエッジを多く含む石材模様で比較的奥行き推定に強いテクスチャと、右側のエッジの少ない木目調の比較的奥行き推定に弱いテクスチャの 2 種類を用いた。このようなテクスチャの物体が、図 4-a に示すように、先述した 20 段階の異なる奥行きに存在すると仮定して、実験に必要な撮像画像をシミュレーションにより生成した。図 4 において、奥行きは Jet カラーマップで示されており、下部の赤色が遠くで、上部の青色に進むにつれ近くなることを表す。

実験設定について下記に示す。以降では便宜上、図 2-a に従って、 $p=9.04\text{mm}$ を p_0 、 $p=10.09\text{mm}$ を p_2 とし、 p_0 と p_2 の中間地点を p_1 とする。一般的な DFD では、円形の絞りを使用して撮影した焦点位置の異なる 2 枚の画像を撮像するとした。2 枚の入力画像は、最遠方物体に焦点の合う p_0 と最近接物体に焦点の合う p_2 にセンサを設置し撮像した画像として設定した。符号化絞りによる方法では、Zhou ら⁵⁾ が提案した全焦点画像復元と奥行き推定の両方に最適化された 2 つの絞りを使用して画像を撮像した。2 枚の入力画像は、両方とも最近接物体に焦点が合うように p_2 にセンサを設定し、絞りの形状のみを切り替えて撮像すると想定した。提案するハーフスイープ符号化では、 p_0 から p_1 の区間と、 p_1 から p_2 の区間でハーフスイープ撮像を行い、2 枚の画像を撮像するとした。PSF はビルボックス関数を仮定して式 6 より求めたハーフスイープ PSF h_1 、 h_2 を 20 段階の撮像対象物体に対して計算し、理想テクスチャとコンボリューションすることで 2 種類のハーフスイープ動作に対する撮像画像を得た。このように仮想的に生成した各撮像画像と PSF を使用して、DFD のアルゴリズムより全焦点画像生成と奥行き推定を行った。ハーフスイープ符号化では章 3 で提案した手法を使用したが、一般的な DFD と符号化絞りでは Zhou ら⁵⁾ の使用した復元手法を用いた。

図 4 に推定されたデプスマップの結果を示す。左から、図 4-a にデプスマップの真値、図 4-b に一般的な DFD の手法で得られたデプスマップ、図 4-c に Zhou ら⁵⁾ の符号化絞りを使用した DFD で得られたデプスマップ、図 4-d に提案手法であるハーフスイープにより得られ

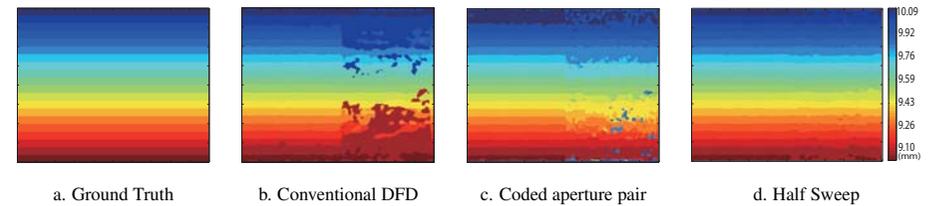


図 4 奥行き推定結果

Fig. 4 Estimated depth map

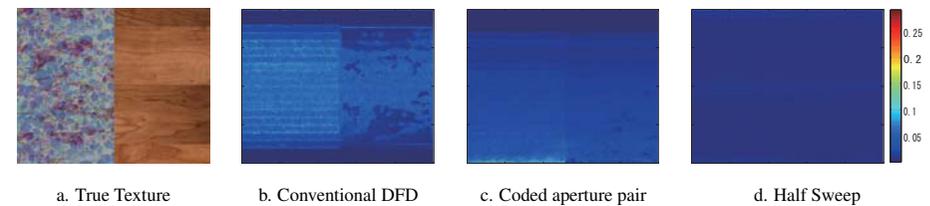


図 5 復元誤差マップ

Fig. 5 Error map of deblurred image

たデプスマップを示した。デプスマップは、Jet カラーマップ表示で示されており、物体の距離は、表 1 に示す実際の奥行き u に対応する焦点位置 v として mm で示している。全体的にみて左側の奥行き推定に強いテクスチャでは大きな推定誤りは見られなかったが、右側の弱いテクスチャにおいて手法毎の違いが強く現れた。図 4-b の一般的な DFD の結果では、両端の方から精度が落ちており、符号化絞りの結果図 4-c では、全体的に細かな推定誤りが見られる。一方、図 4-d に示す提案手法のハーフスイープでは、全体的に良好な推定結果となっており、3 手法の中では最も真値に近い結果を得られた。また、図 5-b、c、d に生成した全焦点画像と真値との誤差の結果を示す。右側のカラーバーは、図の色に対応しており、復元画像と真値との誤差の大きさを表している。ハーフスイープでの復元性能の高さが確認できる。

求めたデプスマップと全焦点画像から精度の比較を行い、その結果を表 2 にまとめた。デプスマップでは真値との差を RMS (Root Mean Square) により比較し、全焦点画像では真値との復元誤差を PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) により比較した。RMS は真値との誤差なので小さいほど精度が良いと言え、PSNR は画像の信号とノイズとの比率であり、高いほど良いことを示す。一般的な DFD と符号化絞りは、図 4 で大きく差があり、符号化絞り

表 2 奥行き推定誤差と全焦点画像復元誤差

Table 2 Depth and deblurring error		
	DepthMap(RMS)	Texture(PSNR)
Conventional DFD	26.98	30.21[dB]
Coded aperture pair	25.91	32.24[dB]
Half sweep	7.81	39.98[dB]

のほうが良く見えたが、RMS ではそこまで大きな差とならなかった。これは、符号化紋りが全体的に悪い結果となっていることに起因する。これらの結果から、シミュレーション画像により奥行き推定と全焦点画像復元のーフスイープの有効性が確認できた。

6. 実シーンにおける実験

本論文で提案するーフスイープ撮像による奥行き推定と全焦点画像生成を実シーン画像を用いて検証した。実際にはーフスイープ撮影可能なカメラが実装できていないことから、図 6 に示すように、通常のカメラを用いて焦点を変化させながら撮影した複数枚画像列（フォーカスタック）を撮影し、これらを積分することで、ーフスイープ撮像をシミュレートした。即ち、本実験で用いる入力画像は、撮像時の PSF が実際の光学系による影響を受けているが、スイープモーションや積分による異なる焦点による PSF の重畳が理想的な画像であると考えられる。実験に用いたフォーカスタックデータは Canon EOS 20D にシグマの 30mm のレンズを装着して撮影した。撮影時の絞りは最大開口の $f/\# = 1.4$ に設定した。本文中では、フォーカススイープ撮像^{(12), (13)}をセンサの運動により説明を行っていたが、レンズが移動しても同様の焦点変化が得られる。今回は、市販の一眼レフカメラを用いたことから、レンズによる焦点移動を採用した。そのようにして得られた撮影画像は 14 枚であり、手前側 7 枚と奥側に 7 枚に分割し、それぞれを積分することで f_1 と f_2 を生成した。

撮影対象の位置は最も奥で $u=4840\text{mm}$ 、最も手前で $u=671\text{mm}$ である。これより撮影対象の焦点位置は式 1 から $v=30.2 \sim 31.4\text{mm}$ の範囲であることが分かる。ここで、この v の範囲を 14 段階に等分し、14 段階の奥行きを測定した。中間地点を $v=30.8\text{mm}$ にとり、 $p_0=30.2\text{mm}$ 、 $p_1=30.8\text{mm}$ 、 $p_2=31.4\text{mm}$ と設定すると、 p_0 から p_1 と p_1 から p_2 におけるーフスイープ撮像による PSF を式 6 で求めることができる。これらを使用し撮影シーンの奥行き推定と全焦点画像復元を行った。

図 7 にて、実シーンでの実験結果を示す。図 7-a, b はフォーカスタックより生成した画像 f_1, f_2 である。また、図 7-c にそれぞれ推定されたデプスマップ、図 7-d に復元した

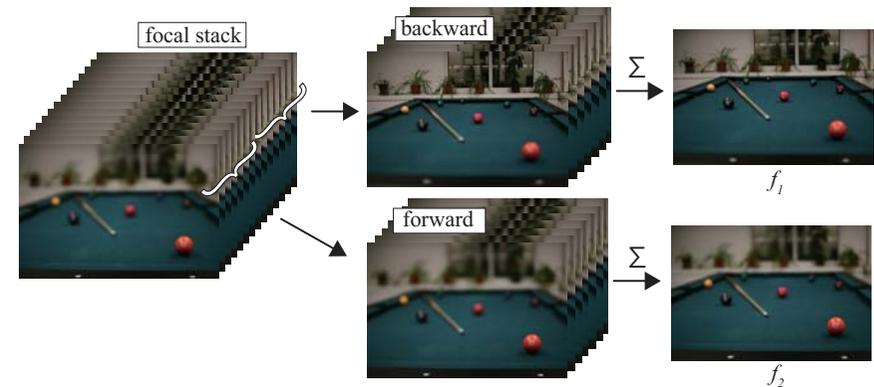


図 6 フォーカスタックを用いたシミュレーション画像の生成
Fig. 6 Simulated half sweep imaging from focal stack

全焦点画像を示した。図 7-e, f は全焦点画像復元結果の比較画像である。図 7-c のデプスマップから、手前側から奥側に向けて、青、緑、黄、赤の順に配色されており、撮影シーン中のビリヤード台の奥行き変化に沿って滑らかに奥行きが推定されていることが分かる。また、手前の 5 番のボールなどがレイヤーとして奥行き復元されている。一方で、DFD では画像のぼけから奥行きを推定するため、エッジが存在しない背面の壁などは正しく推定できていなかった。一方で、全焦点画像においては、入力画像(図 7-a, b)の f_1, f_2 と復元結果画像(図 7-d)の比較(特に図 7-e, f)から入力画像のぼけが復元され、すべての奥行きにある物体の鮮鋭度が向上していることが分かる。デプスマップにおいて、推定が不安定であったエッジの少ない背景においても、視覚的には大きなアーチファクトは認められなかった。以上のことから、実画像においてもシミュレーション同様、本手法の奥行きと全焦点画像復元の安定性や有効性を確認できた。

7. おわりに

本論文では、フォーカススイープ撮像を用いて PSF を制御するーフスイープ撮像の手法を提案した。ーフスイープで得られる 2 枚の画像の PSF 特性を周波数空間で観測することで、片側の PSF では奥行き推定に向けた零交差を持ち、両方の性能を合わせることで奥行き推定に向けた広帯域な特性を持つことを示し、定性的にーフスイープが奥行き推定に適している根拠を示した。そして、ーフスイープ撮像における DFD 推定方法を提示

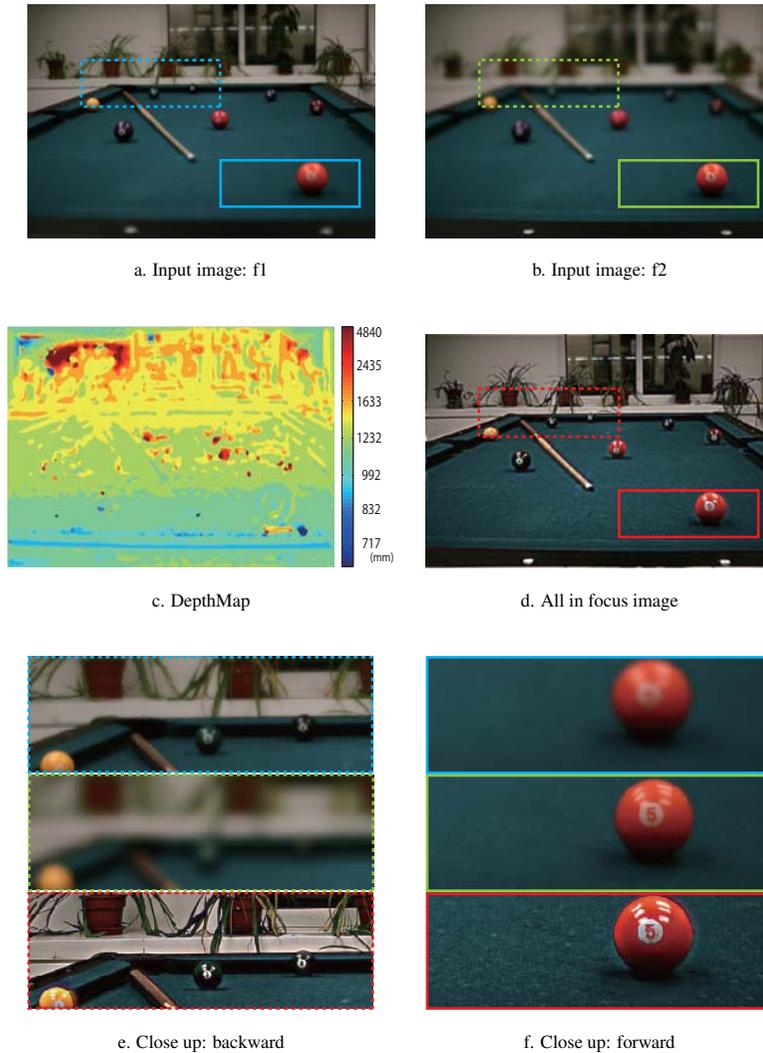


図7 実シーンにおける実験結果
Fig.7 Experimental results of real scene

し、シミュレーション実験を通じて、2枚の画像を使用する一般的なDFD, Zhouら⁵⁾の符号化絞りによるDFDと性能の比較を行った。奥行き推定性能、全焦点画像復元性能のどちらにおいても、ハーフスイープが最も良い結果を出力したため、有効性を示すことができた。また、実シーンの画像を使用して、仮想的な実験を行うことで、実際のシーンにも本手法が対応できることを示した。

参考文献

- 1) A. Pentland: A New Sense for Depth of Field, *IEEE PAMI*, 9(4): 423-430, 1987.
- 2) M. Subbarao and N. Gurumoorthy: Depth recovery from blurred edges. *In CVPR*, pages 498-503, 1988.
- 3) 日浦慎作, 松山隆司: 構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-II, No. 11, pp. 1912-1920, 1999.
- 4) A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. Freeman: Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, *ACM Transactions on Graphics*, no. 3, 2007.
- 5) C. Zhou, S. Lin, and S. Nayar: Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2009.
- 6) A. Levin: Analyzing Depth from Coded Aperture Sets, *Proc. European Conference on Computer Vision*, Sep. 2010.
- 7) H. Nagahara, C. Zhou, T. Watanabe, H. Ishiguro, S. K. Nayar: Programmable Aperture Camera Using LCoS, *Proc. European Conference on Computer Vision*, Sep. 2010.
- 8) 渡邊拓也, 長原一, C. Zhou, 石黒浩, S. K. Nayar: 能動絞りカメラ, 情報処理学会技術報告, Vol. CVIM174, no.28, 2010.
- 9) P. Green, W. Sun, W. Matusik, F. Durand: Multiple-Aperture Photography, *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2007
- 10) E. R. Dowski, and W. T. Cathey: Single-lens single-image incoherent passive-ranging systems, *Applied Optics*, Vol. 33, No. 29, Oct. 1994.
- 11) A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand, and W. T. Freeman: 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2009.
- 12) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. Nayar: Flexible Depth of Field Photography, *European Conference on Computer Vision*, 2008.
- 13) S. Kuthirummal, H. Nagahara, C. Zhou, S. K. Nayar: Flexible Depth of Field Photography, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 33, 2011 (will appear).