

## ハーフスイープ撮像による DFD

松井 修平<sup>†</sup> 長原 一<sup>†</sup> 谷口倫一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究所 〒 819-0385 福岡市西区元岡 744 番地

E-mail: <sup>†</sup>matsui@limu.ait.kyushu-u.ac.jp, <sup>††</sup>{nagahara,rin}@ait.kyushu-u.ac.jp

あらまし 撮影画像のぼけ情報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。一般的なカメラのぼけ広がり関数 (PSF) での DFD では、奥行きに対するその形状変化が穏やかであるため、推定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を用いて撮像することで PSF を制御し、DFD の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、奥行きを求めると同時に、全焦点画像をデコンボリューションにより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、ハーフスイープ撮像手法による DFD を提案する。本手法は、露光時間中に焦点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。そのため、符号化絞りとは異なり、絞りを解放のまま PSF を符号化できることから、画像復元に有利である。本論文では、実験において一般的な DFD 手法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。

キーワード DFD, 全焦点画像復元, PSF 制御, フォーカススイープ

### 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、任意視点画像を生成するイメージベースドレンダリングや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処理、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は、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う。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、レンズ内に特殊な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 DFD 推定のための新しい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 を制御できることから、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実験および実験を用いた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，異なる奥行きの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場合，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 DFD 推定には最低 2 枚の入力画像が必要であるが，この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まらなければ，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]．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，これらのカメラは，高速にまた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．

Levin [6] 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，奥行きの異なるシーン全体をカバーするように焦点位置を

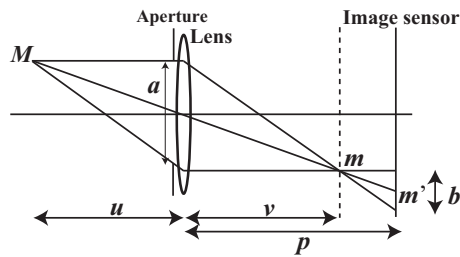
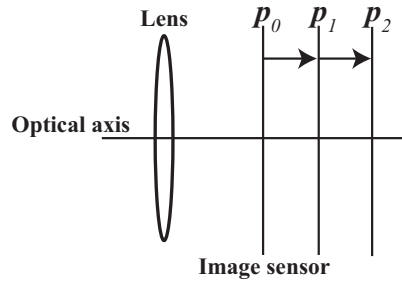
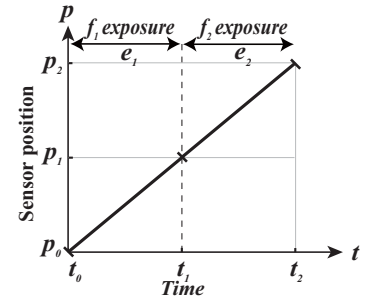


図 1 レンズ幾何



a. Sensor motion



b. Sweep motion and image integrations

図 2 ハーフスイープ撮像

スイープすることで、奥行き不変の PSF を生成し、奥行き  
の知識や推定の必要なく全焦点画像を復元している。  
ただし、この手法では PSF の奥行き不変性から、DFD  
推定に用いることはできなかった。

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に分け、2 枚のスイープ  
範囲の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 比で有利である点である。  
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], [13] 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  
に分け、前方と後方焦点範囲の 2 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  
イープ撮像により得られる PSF の特性について本章で  
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 では、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  $p$  として示している。こ  
こで、距離  $u$  の対象物体上の点  $M$  は、焦点面  $v$  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  
で表される。

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

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  $p_2$   
の範囲を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、この様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、

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

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、

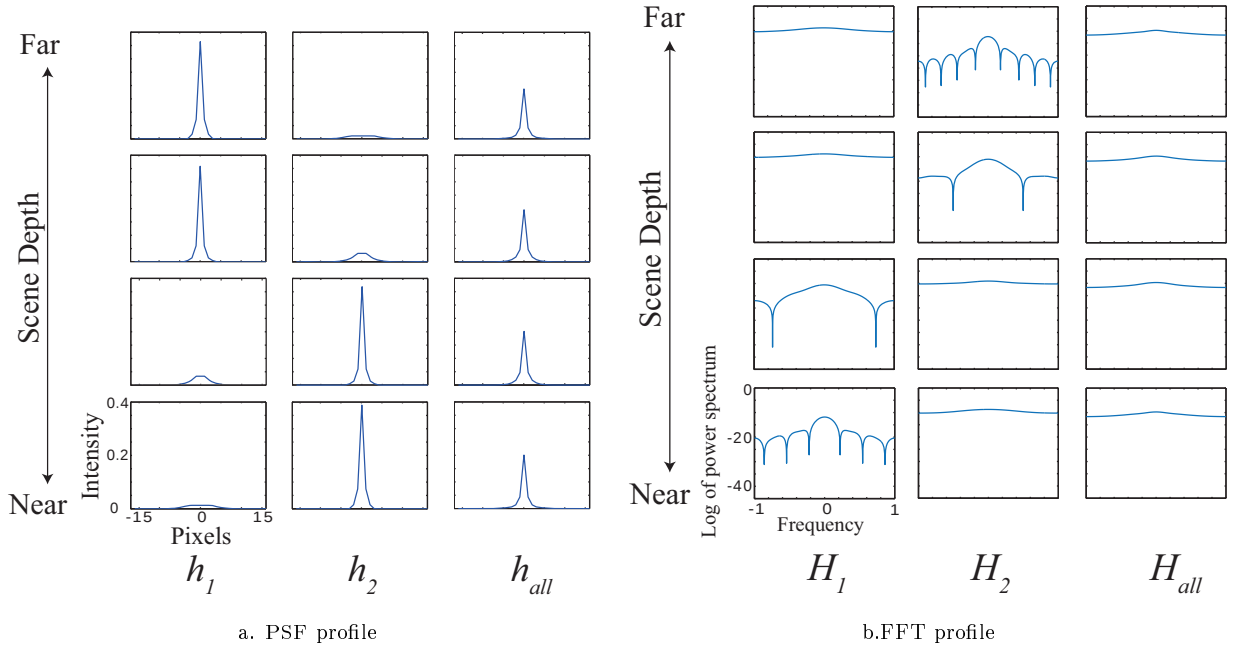


図 3 ハーフスイープ PSF

$\xi_i$  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ため，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  $p_2$  で積分したものと見なせる．

$$h_i(r, u) = \int_{p_{i-1}}^{p_i} P(r, u, p) dp, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

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，次式から導出できる．

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

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， $\lambda_p$  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 つのハーフスイープ撮像の PSF  $h_1, h_2$  を，異なる 4 段階の奥行きについて示した．この奥行きは，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  $h_{all} = h_1 + h_2$  で示される合成 PSF も示した．この合成 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 の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．一方で合成 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 の周波数特性で，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] の考察よりこのような零交差は，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．

$$F_i^{(d)} = F_0 \cdot H_i^{(d)} + N_i, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

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  $H_i^{(d)}$ ，ノイズ成分は  $N_i$  として，そ

それぞれのフーリエ変換後を表す。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、 $\bar{H}$  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。章 3. で示した様に、 $h_1$  と  $h_2$  の合成カーネル  $h_{all}$  はすべての奥行きに対して広帯域であることから、次式の様に合成画像と合成 PSF カーネルを生成し、ぼけ復元に用いることを考えた。

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

すなわち、式 8 における  $F$  と  $H$  のそれぞれに、式 9 に示された合成画像  $F_{all}$  と合成 PSF  $H_{all}$  を代入することで、ハーフスイープ撮像手法に適応したデコンボリューションが可能となる。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。

$$W^{(d)} = \sum_{i=1,2} |IFFT(\hat{F}_0^{(d)} \cdot H_i^{(d)} - F_i)| \quad (10)$$

ここで、 $\hat{F}_0^{(d)}$  は、合成画像と合成 PSF を式 8 へ代入することで求めたものである。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影画像との誤差を表している。 $IFFT$  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、撮影シーンのデプスマップ  $U$  を推定することができる。

$$U(x, y) = \arg \min_{d \in D} W^{(d)}(x, y) \quad (11)$$

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。

$$I(x, y) = \hat{F}_0^{(U(x, y))}(x, y) \quad (12)$$

## 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、シミュレーション実験を行った。ここでは図 1 に従って、対象物体の位置を  $u$ 、像を結ぶ位置を  $v$ 、センサの位置を  $p$  とする。

実験の設定として、撮影対象の奥行き  $u$  は、レンズ前面より  $83.65mm$  から  $2034mm$  の範囲と想定した。この時、式 1 より、撮影シーンの像面の位置  $v$  の範囲に換算する

と、レンズ背面より  $9.04mm$  から  $10.09mm$  の範囲となる。ここで、この  $v$  の範囲を 20 分割し ( $\Delta v = 0.055mm$ )、20 段階のシーンの奥行きとした。像面側で奥行きの段階を定義することで、奥行きの違い毎に同等の比率で画像中のぼけの大きさが変化する。ぼけの大きさは、最小でおおよそ半径 0.5 ピクセルの大きさとし、最大で 10 ピクセル程度の大きさとした。シミュレーションでは、図 4-a に示すような、階段状のシーンを対象シーンとして想定した。図 4 のように、奥行きを示すデプスマップは、色で奥行きの段階が表される。最下部の赤色がカメラからの最遠方を示し、上部になるにつれカメラに近い奥行きとなり、最上部の青色がカメラから最近接の奥行きであることを示す。表 1 に、像面位置  $v$  から対応する対象物体の奥行き  $u$  への変換表を示す。シミュレーションにおける撮影の設定は比較を含む 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。撮影シーンは図 5-a に示すように、左側に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を持ち、右側に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を持つと設定した。

これらの実験設定に基づき、ピルボックス関数でモデル化された理論的な PSF を式 6 より算出し、仮想的なハーフスイープ撮像画像を生成した。ハーフスイープにおける各スイープの範囲は、 $p_0 = 9.04mm$  から  $p_1 = 9.945mm$  までと  $p_1$  から  $p_2 = 10.085mm$  までとした。また、比較手法として、一般的な DFD 手法と、Zhou ら [5] の符号化絞りをを用いた DFD 手法もシミュレートした。一般的な DFD 手法では、円形絞りをを用い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、最遠方に焦点を合わせた画像 ( $p = 9.04mm$ ) と、最近接に焦点を合わせた画像 ( $p = 10.085mm$ ) とした。符号化絞りによる DFD 手法では、Zhou ら [5] の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、最遠方 ( $p = 9.04mm$ ) に焦点を合わせて、撮像した画像とした。このように仮想的に撮影した画像と取得した PSF を使用することで、各手法毎に対象シーンのデプスマップと全焦点画像を推定した。ハーフスイープ撮像手法では、章 4. で述べたアルゴリズムを使用し、推定を行った。一方で、一般的な DFD 手法と符号化絞りをを用いた DFD 手法では、Zhou ら [5] の使用したアルゴリズムを用いた。

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] の符号化絞りをを用いた 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  $u$  に対応する像面位置  $v$  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

表 1 物体と焦点位置の関係 ( $f=9\text{mm}$ )

|                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Object depths : $u[\text{mm}]$   | 2034  | 861.6 | 549.6 | 404.1 | 320.5 | 266.1 | 227.9 | 199.6 | 177.8  | 160.4  |
| Focus positions : $v[\text{mm}]$ | 9.040 | 9.095 | 9.150 | 9.205 | 9.260 | 9.315 | 9.370 | 9.425 | 9.480  | 9.535  |
| Object depths : $u[\text{mm}]$   | 146.3 | 134.6 | 124.7 | 116.3 | 109.0 | 102.6 | 97.04 | 91.4  | 87.64  | 83.65  |
| Focus positions : $v[\text{mm}]$ | 9.590 | 9.645 | 9.700 | 9.755 | 9.810 | 9.865 | 9.920 | 9.975 | 10.030 | 10.085 |

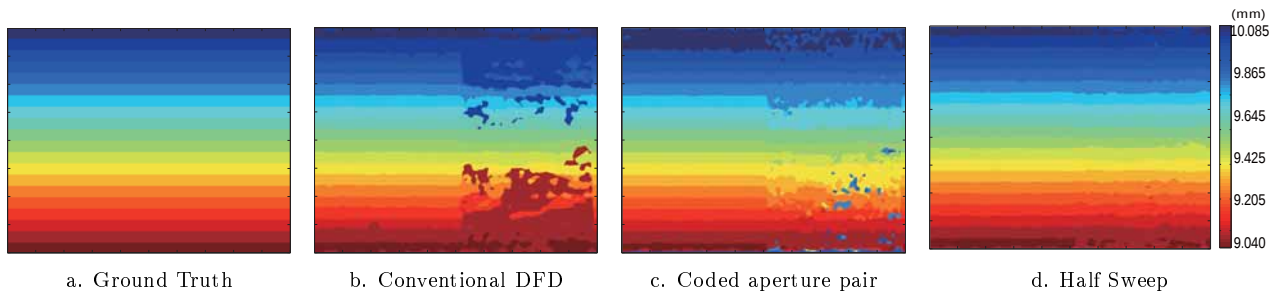


図 4 奥行き推定結果

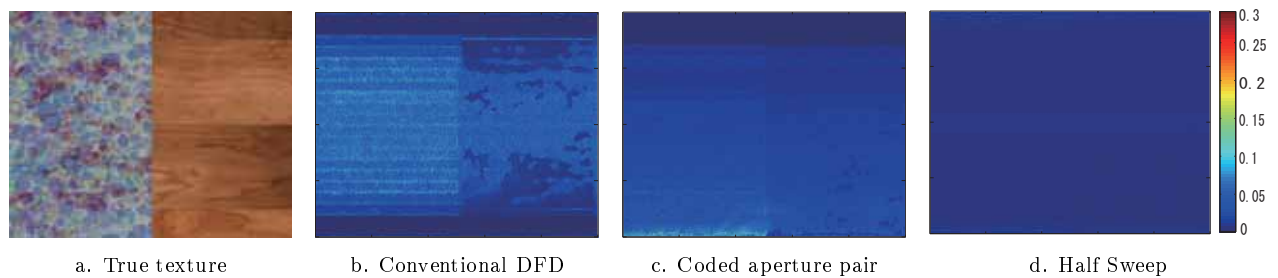


図 5 復元誤差マップ

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、中央の周りの奥行きで推定精度が落ちており、図 4-c に示す符号化絞りを用いた DFD の結果では、全体的に細かな推定誤りが見られた．一方、図 4-d に示す提案手法の結果は、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が得られた．

図 5-b, c, d では、各手法を用いて復元した全焦点画像の精度を示す．復元した全焦点画像では、差の違いが視覚的に分かりにくいいため、推定全焦点画像と真値 (図 5-a) との誤差マップとして図に示した．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．この結果より、ハーフスイープでの全焦点画像の復元性能の高さが確認できる．

表 2 に、各手法を用いて求めたデプスマップと全焦点画像の精度を数値化した結果を示す．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 は真値との誤差であるため、小さいほど奥行き推定精度が良いと言えます、PSNR は画像の信号とノイズとの比率であり、高いほど画質が良いことを示す．数値からもハーフスイープ撮像の結果が最良であることが分かる．一般的な DFD

表 2 奥行き推定誤差と全焦点画像復元誤差

|                     | Depth map(RMS) | Texture(PSNR) |
|---------------------|----------------|---------------|
| Conventional DFD    | 1.349          | 30.21[dB]     |
| Coded aperture pair | 1.300          | 32.24[dB]     |
| Half-sweep imaging  | 0.391          | 39.98[dB]     |

と符号化絞りは、図 4 で大きく差があり、符号化絞り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、符号化絞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ハーフスイープ撮像の有効性が確認できた．

## 6. 実機を用いた実証実験

本論文で提案するハ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プロトタイプカメラで撮影した画像を使用して検証した．図 6 に今回試作し、実験に用いたプロトタイプカメラを示す．

プロトタイプカメラの撮像素子は Sony の 1/3 型プログレッシブ CCD (1032×776 ピクセル) を使用し、Physik Instrument P-628.1CL のステージに取り付けた．このステージは piezo-actuator により最大 800  $\mu\text{m}$  の範囲で CCD を前後に動かすことができる．レンズは

Tokina 12.5 mm を取り付け、撮影では F 値を最大開口の  $f/1.4$  に設定して使用した。ハーフスイープ撮像法では図 2-b に示すような撮影を行うため、CCD のシャッターを完全にアクチュエータの動きと同期させる必要がある。プロトタイプカメラにおいて、アクチュエータは制御信号により任意の動作が可能である。また、シャッターは制御信号をカメラへ入力することでタイミングを制御できる。PC からアクチュエータとカメラの両方へ制御信号を送ることでこれらを同期させた。実機を用いた撮影では、画像のリードアウト時間を考慮する必要があるため、実際には図 2-b のような制御では、ハーフスイープ撮像の実現は難しい。そのため、アクチュエータをスイープ範囲で往復動作させ、往路の前半を露光して 1 枚目を撮影し、復路の前半を露光することで 2 枚目を撮影することでハーフスイープ撮像を実現した。

本実験での撮影対象シーンは、壁の前に複数のオブジェクトをあらゆる奥行きに設置したシーンとした。また、対象シーンの奥行きの範囲はカメラのレンズから 340 ~ 750 mm の範囲であった。このときスイープに必要なピエゾアクチュエータの動作範囲は、 $225\ \mu\text{m}$  であった。図 8-a に、プロトタイプカメラを使用してハーフスイープ撮像を用いて撮影した入力画像 2 枚を示す。 $f_1$  と  $f_2$  の画像は、センサーのスイープ範囲についてシーンの奥側に焦点が合う範囲をスイープして撮影して得られた画像と、シーンの手前側に焦点が合う範囲をスイープして撮影して得られた画像である。図 7-a はプロトタイプカメラを使用して一般的な DFD を実行するために、シーンの最も手前に焦点を合わせた画像と、最も奥に焦点を合わせた画像をスイープをさせずに撮影した結果である。これら各手法により撮影した画像で DFD 実験を行うために、実験の前処理として、各手法で得られる PSF を 10 段階の奥行きに点光源を設置し測定を行うことで、PSF を取得した。

以上のようにして得られた画像と PSF を使用し、オブジェクトの奥行きと全焦点画像を推定した。図 8-b,c は、ハーフスイープ撮像を使用してデプスマップと全焦点画像を推定した結果である。これらの結果はシミュレーション実験と同様に章 4. で述べたアルゴリズムを使用することで得られた。図 7-b,c は、比較対象として一般的な DFD 手法を使用した場合の推定結果である。こちらの結果は Zhou ら [5] が使用したアルゴリズムにより求めた。図 7-b と図 8-b を比較すると、どちらの手法でもオブジェクト間の奥行きの違いが現れているが、提案手法の方がより鮮明に奥行きを推定出来ていることが分かる。一般的な DFD 手法では、特に奥行き諧調の中央周辺にあたる部分でテクスチャの弱い箇所 (右上の葉、画像左側のオブジェクト等) の奥行き推定精度が低い。一方で、提案手法では、各オブジェクトの奥行きを滑らかに求めることができている。この結果は、シミュレーションと同様の傾向であると言える。また、図 7-c と図 8-c を比

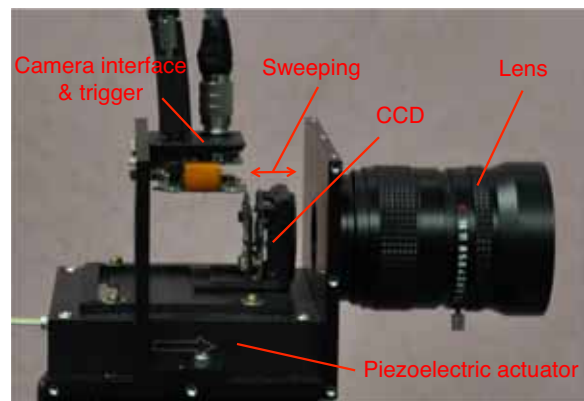


図 6 プロトタイプカメラ

較すると、全焦点画像生成結果に大きな違いがあることが分かる。一般的な DFD 手法を用いた場合の結果では、画像中にノイズやアーチファクトが多く現れている。更には、誤った奥行き推定のために、デコンボリューション後もぼけたままのテクスチャが存在する。この違いを分かりやすく示す為に、図 9 に図 7,8-c の一部を拡大した図を示した。赤枠の箇所ではアーチファクトが顕著であり、緑枠の箇所ではぼけが復元されず葉脈が消えていることが分かる。また、復元精度を比較するため、 $f/16$  の絞り設定で撮影した焦点深度の大きい画像を真値として示した。提案手法で得られた全焦点画像は、真値画像と同一な画像として復元されている訳ではないが、一般的な DFD 手法と比較すると、明らかにアーチファクトが少なく復元性能が高いことが視覚的に確認できた。以上の実験より、提案手法が一般的な DFD 手法に対して有利であることと、実際に実機を使用して本手法が実現できることが証明された。

## 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 を制御するハーフスイープ撮像手法を提案した。ハ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、定性的にハーフスイープ撮像が奥行き推定に適している根拠を示した。そして、ハーフスイープ撮像における DFD 推定方法を提示し、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、実機を用いた実験を行うことで、本手法が実現可能であることと、実際のシーンにおいても有効であることを示した。

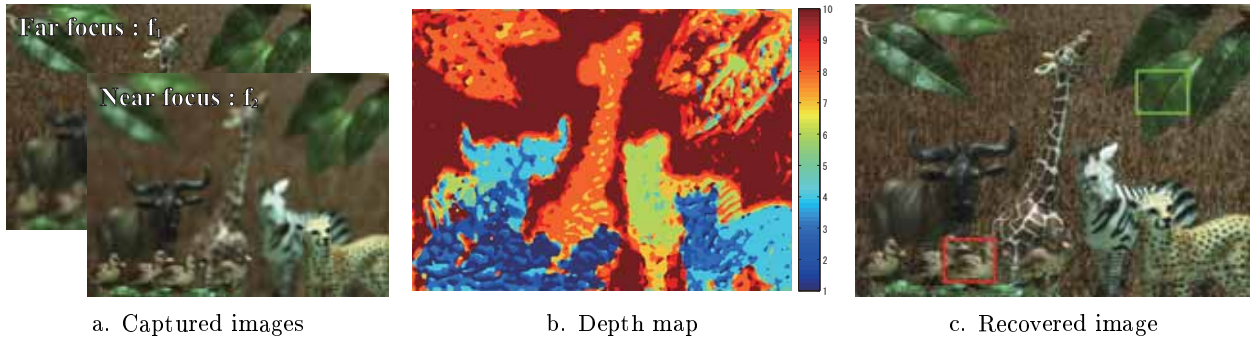


図 7 一般的手法での DFD 結果

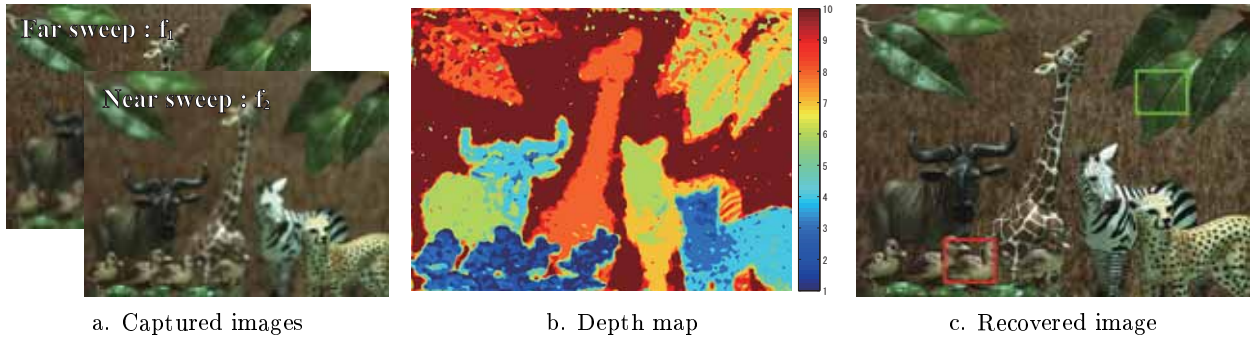
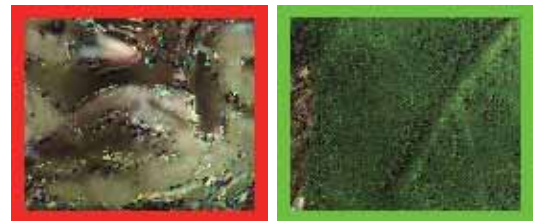


図 8 ハーフスイープ撮像での DFD 結果

## 文 献

- [1] A. Pentland: A New Sense for Depth of Field, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 4, pp. 423–430, 1987.
- [2] M. Subbarao and N. Gurumoorthy: Depth recovery from blurred edges. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 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, *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, No. 1, pp. 58–71, 2011.



Conventional DFD



Half sweep imaging DFD



Ground truth ( $f/\# = 16$ )

図 9 拡大図