

符号化開口ステレオによる被写界深度の拡張

武田 祐一[†] 日浦 慎作^{††} 佐藤 宏介[†]

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科

〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{††} 広島市立大学 大学院情報科学研究科

〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: [†]{takeda,sato}@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, ^{††}hiura@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし レンズの開口形状を符号化することで、逆演算によるぼけ除去を安定化する方法が提案されている。しかし、ぼけの点拡がり関数 (PSF) は物体までの奥行きにより変化するため、ぼけ除去を適切に行うためには被写体までの奥行きを求める必要がある。そこで本研究では、ステレオカメラのレンズ開口部を符号化し、得られた画像から被写界深度を拡張する手法を提案する。本研究ではぼけ除去に適した開口形状が奥行き推定の安定性向上にも有効であることを示す。また、これにより得た奥行きマップから PSF を求めることで、撮影画像からぼけを取り除いた被写界深度拡張画像を求めることが出来ること、さらにこの被写界深度拡張画像と奥行きマップから、任意に設定した合焦距離の前後をぼかした画像を生成するリフォーカシングが可能であることを示す。

キーワード 符号化開口, ステレオ法, ぼけ除去, 被写界深度, リフォーカシング

1. はじめに

古くからピンぼけとぶれは露出の過不足と合わせ失敗写真の三大要因と言われ、その解決のために自動露出や自動焦点、手ぶれ補正等の技術的手段が開発されてきた [1]。しかし現在もなお、屋内や夜間など光量が乏しい環境で被写界深度の深い写真をぶれなく撮影することは容易ではない。なぜなら被写界深度を深くするためには絞りを絞り込む必要があり、それによって減少する露光量を補うべく露出時間を伸ばすことでカメラ保持の動揺や被写体の動きによりぶれが生じるためである。しかし光学系や撮像素子の改良による感度向上は量子雑音 (ショットノイズ) など物理的限界に迫っており、今後大幅な改善は望みがたい。

一方、絞りを絞ることなく撮影した被写界深度の浅い画像から、計算によりぼけを除去する方法が研究されている。特に符号化開口 [2] は通常の円形開口に比べ、ぼけ現象の光学伝達関数 (OTF) に零点が少なくぼけ除去の計算を安定化する働きがあり、近年注目を集めている [3] ~ [7]。しかし、ぼけの大きさはカメラから被写体までの距離によって変化するため、ぼけを除去するためにはシーンの正確な奥行きマップを得る必要がある。

本研究では、ステレオカメラの 2 つのレンズ開口の形状を符号化し、これにより奥行き計測の精度向上を図るとともに、ぼけ除去により被写界深度を拡張する手法を提案する。さらに、求められた奥行きマップと被写界深度拡張画像から計算によりぼけを生成し、任意に設定した奥行きに焦点を合わせ、その前後にぼけを与えた画像を事後的に生成するリフォーカシングが可能であること

も示す。

2. 関連研究

レンズのピント外れに起因するぼけは、シャープな画像に対するぼけカーネル (点拡がり関数) の畳み込みにより表すことが出来る。そのため、逆フィルタなどぼけ過程の逆演算 (デコンボリューション) をぼけ画像に対して施すことにより、鮮鋭な画像を復元することが出来る。しかし実際には、円形など単純な形状のぼけはその空間周波数特性において零点などゲインの小さい箇所が多く含まれるため、復元処理がノイズに対し不安定となる。そこで絞りの形状を、より望ましい空間周波数特性を持つように設計する符号化開口 [2] が提案され、近年広く研究が行われている [3] ~ [7]。望ましい空間周波数特性を与える絞り形状は自明ではないため、Veeraraghavan ら [4] や Zhou ら [5] はランダムに生成した開口形状を元に探索や数値最適化により望ましい開口形状を求め、その符号がぼけ除去に有効であることを示している。

ぼけの大きさは被写体までの距離により変化するため、ぼけ除去を正しく行うためには被写体までの奥行きを求める必要がある。ぼけから被写体までの距離を求めることを Depth from Defocus と呼び、多くの研究が行われている [8]。しかし、単一の画像から奥行きを求めることは容易ではなく、一般には原画像の統計的性質に何らかの仮定をおく必要がある。例えば Veeraraghavan ら [4] は輝度ヒストグラムの尖度に関する仮定を、また Levin ら [3] はエッジ強度ヒストグラムに関するモデルを用いて奥行き推定を行っている。しかしこれらの手法は必ずしも安定ではなく、Levin らは人手による補助が必要で

あったことを報告している．そもそも単一の画像からの奥行き推定が難しいことは，シャープなテキストチャに対しピントを外して撮影した場合と，ぼかしたテキストチャにピントを合わせて撮影した場合の画像とに差がないことから，明らかに不良設定問題である．

Depth from Defocus により安定な距離推定を実現するために，光学的パラメータの異なる複数の画像から奥行きを求める手法が古くから多く研究されてきた [8]．Pentland はレンズと被写体の間にプリズムを設置し [9]，一方 Nayar らはレンズと撮像素子の間にプリズムを設置することで [10] 合焦距離が異なる複数の画像を同一視点から取得する手法を提案した．日浦らはさらに，このような光学系に符号化開口を組み合わせることで距離計測が安定化されることを示し，さらに逆フィルタによりぼけ除去を行い被写界深度を拡張する手法を提案した [2]．

一方，これらのように合焦距離が異なる複数の画像を用いる方法の他に，Surya らが提案した開口形状を変化させる手法がある [11]．この研究では奥行き計測だけを目的としていたが，さらに Zhou らは開口形状を奥行き推定とぼけ除去の双方に好適となるよう設計し，奥行きのあるシーンについて被写界深度を拡張した結果を示している [6]．しかし，これらの手法はいずれも奥行き推定の精度を高めることが難しいという問題がある．Surya ら [11] と Zhou ら [6] の研究で用いられた開口形状はどちらも，その開口部の重心位置が互いに反対にずれたような図形となっている．これは，奥行き推定には Depth from Defocus で用いられてきたような光学伝達関数におけるゲインの変化だけでなく，光学伝達関数の位相成分の情報が重要であることを示唆しており，これはステレオカメラにおける視差に相当する．しかし単一のレンズにおける開口形状の変化では基線長がレンズ口径内に制約されるため，ステレオ法よりも奥行き分解能が低くなってしまう [8]．なぜならレンズによる結像は，レンズ口径内に置いた多数のピンホールカメラで得た像の重ね合わせと等価であるからである．

光学的パラメータが異なる複数の画像を同一のレンズから撮影するためには，レンズと撮像素子の間にプリズムやミラー等を設置するか [12]，パラメータを変えながら逐次的に撮影する必要がある [13]．しかし前者では機器が複雑で高コストとなり，また後者では動物体に対して適用できない．特に後者は，開口面積を大きくすることで露光時間を短縮し，ぶれを防ぐという本来の目的を損なうものである．

そこで我々は，通常のステレオカメラの各レンズの開口形状を符号化することで，奥行き計測とぼけ除去の双方を実現する手法を提案する．武田ら [14] はステレオカメラに符号化開口を組み合わせることで距離計測が安定化されることを示しているが，この開口形状はぼけ除去には不適である．そこで本研究では，ぼけ除去に適していることが既知である開口形状を用いるが，これが距離

計測の安定化にも有効であることを示す．さらに，ステレオ視における視差とぼけの大きさ（錯乱円径）の関係が線形であることを示し，これによりキャリブレーションを大幅に簡単化する．最後に，奥行きのあるシーンにおいて被写界深度を拡張した結果と，奥行きマップを用いたリフォーカス結果を示す．

3. 提案手法

本稿で提案するシステムの構成と処理の流れを図 1 に示す．画像の入力には光軸を平行に設定したステレオカメラを用いるが，双方のレンズには同一形状の符号化開口を付加する．

まず，シーンの奥行きマップを求めるために，ステレオカメラで得た画像組を入力画像としたステレオマッチングを行う．これには，符号化開口を付加していない通常のステレオ計測と同様のテンプレートマッチング処理を用いる．なぜなら，符号化開口は画像のデフォーカス部分に変化を与えるが，それは双方の画像に対して同様に働くからである．さらに符号化開口を用いることでぼけの光学伝達関数が広帯域化し，画像がぼけた場合でも画像の高周波成分が残存することによりステレオマッチングにおける安定性が向上する．

次に，画像に対しウィナーデコンボリューションを施すことによりぼけの除去を行う．焦点ぼけにおけるぼけカーネルの大きさ（錯乱円径）は被写体までの距離に依存して変化するため，ステレオマッチングによって得られた視差からぼけカーネルの大きさを求め，これを用いてウィナーフィルタによるぼけ除去を行う．シーンは様々な奥行きを含むため，入力画像から切り出した画像に窓関数を掛け，これに対してそれぞれの奥行きに対応したぼけカーネルを用いてデコンボリューションを行う．切り出し位置を少しずつずらしながらこの処理を繰り返す，得られた画像の重複部分に対し窓関数を重みとした重み付き和を求めることで全体のぼけ除去画像を得る．

以下では，ステレオマッチングにおける符号化開口の効果について述べる．次に，ステレオ視における視差とぼけカーネルの大きさの関係が線形であることを示し，これによりキャリブレーションを簡単化できることを示す．

3.1 ステレオマッチングに適したコード

ステレオ視は奥行きが未知であるシーンを計測対象としており，それゆえ各画像には被写体の奥行きに起因したぼけが生じる．このぼけはステレオ視におけるマッチングの精度を低下させるため，一般的には計測したい奥行きの範囲全体が被写界深度に収まるように絞りを絞り込む必要があるとされている．しかし屋外や夜間など光量が乏しい環境では露光量を確保するために露光時間を延長する必要があり，カメラを手持ちにより保持した場合や，動きの速い物体ではぶれが生じる．そこで武田

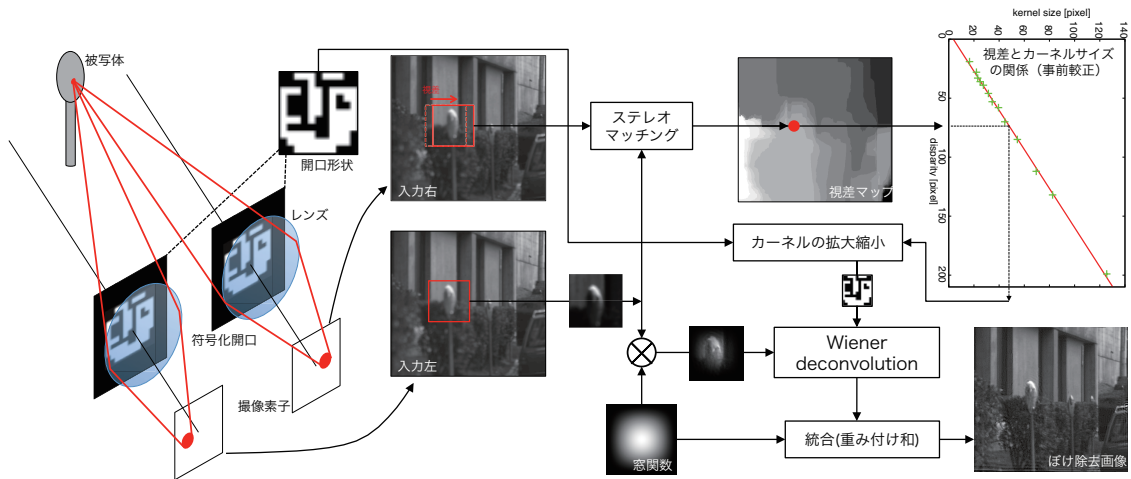


図 1 全体の処理の流れ

ら [14] は、ステレオカメラの双方のレンズの開口形状を符号化し、ぼけによる情報損失を抑制することで対応付け問題を安定化する方法を提案した。

武田らはぼけカーネル f に関し、 f のフーリエ変換を $F(\omega)$ (ω は角空間周波数) としたとき、ピントが合った場合に対して全く情報が失われない理想的な条件として $|F(\omega)|^2 = 1$ を挙げた。これを満たす信号の 1 つにインパルス信号があり、これはレンズを絞込んだ状態に対応するが、実際のレンズ開口部の光透過率は 0 以上 1 以下であることから光量が不足する。そこで彼らは、これらの条件を近似的に満たす符号として M 系列を用いた縞状のコードを提案した [14]。また彼らは実験においてこのコードがステレオ計測における対応付けを安定化することを示しているが、しかし一方でこのコードは縦縞状であるため、縦方向の高周波数成分は失われてしまう。そこで我々は Zhou ら [5] (以下、Zhou コードとする) の提案する広帯域コードを用いることとする (図 2)。このコードは自然画像の事前分布を仮定し、その事前分布に対して最適なウィナーデコンボリューションを適用できるよう遺伝的アルゴリズムを用いて探索したコードであり、画像に含まれるノイズレベル σ に応じて異なった形状となる。

図 3 に一般の羽根絞りの開口形状、M 系列コード、Zhou コードの空間周波数特性を示す。一般の開口に比べ M 系列コードは水平方向の空間周波数においてゲインが高く保たれているが、縦方向の空間周波数は通常の開口と差がなく、ぼけ除去に適しているとは言えない。一方、Zhou コードはどの方向に対しても空間周波数のゲインが高く保たれていることがわかる。そのため、Zhou コードでも武田らの条件に適合しており、ステレオマッチングの安定化が期待できる。

4. 章の実験で用いるステレオマッチングのアルゴリズムについて詳述する。まず事前に、与えられたシーンとシステム構成に合わせ、最大視差を設定しておく。次に、

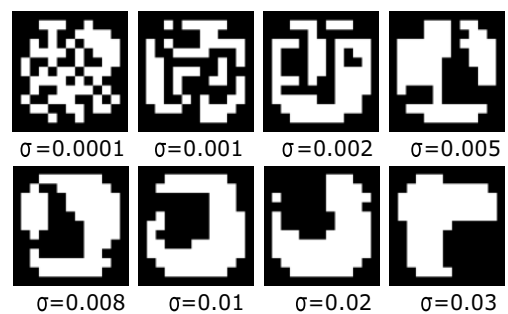


図 2 Zhou の開口形状 [5]。本研究では $\sigma = 0.005$ のものを用いた。

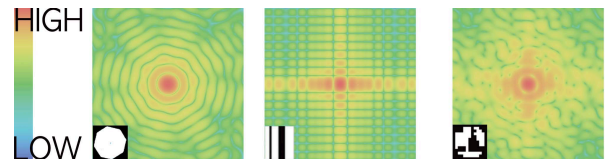


図 3 各開口の対数パワースペクトル。左から一般の羽根絞りによる開口、武田ら [14] の M 系列コード、本稿で用いる Zhou コード。

入力画像を $1/2$ に縮小し、あわせてその画像に対する最大視差も $1/2$ とする。この操作を最大視差が 1 になるまで繰り返す。次に、画像全体をテンプレートとして位置合わせを行い、それを視差マップの初期値とする。続けて入力画像を 2 倍の解像度に戻し、視差マップも 2 倍の解像度に拡大する。この視差マップの値の近傍の視差について、テンプレートマッチングを行い、視差マップの精度を向上させる。この操作を元の解像度に戻るまで繰り返す。テンプレートマッチングにおける画像の類似度の計算には正規化相関を用いた。

3.2 ステレオ法における視差と錯乱円径の関係

従来の符号化開口を用いた被写界深度拡張に関する研究では Depth from Defocus にぼけ除去手法を組み合わせているため [2] ~ [4], [6], [7]、奥行きが求められたときには、ぼけカーネルの大きさ (錯乱円径) も分かっている。

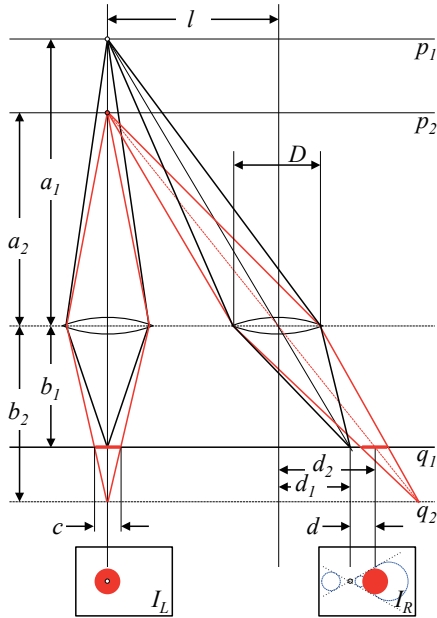


図4 ステレオ視におけるぼけカーネルの大きさと視差の関係

る．しかし本研究ではステレオ視により推定した視差からぼけカーネルの大きさを求める必要があるため，その関係をキャリブレーションにより同定しておく必要がある．ここではステレオ法における視差と錯乱円径の関係を求め，これが線形であることを証明する．またこれにより，キャリブレーションが容易に行えることを示す．

図4は，光軸が平行で同一の口径 D のレンズを持つステレオカメラを示している．このとき，被写体 p_1 の像 q_1 と，被写体 p_2 の像 q_2 の位置は結像公式により以下のように表される．

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

ただし f はレンズの焦点距離である．ここで，撮像素子を面 q_1 に設置することとする．このとき，被写体 p_1 は撮像素子上に合焦し，一方，被写体 p_2 の像はぼけることになる．このときの左画像 I_L と右画像 I_R でぼけカーネルの形状と大きさは同一であり，開口形状に対して相似である．

ここで，合焦面 p_1 に対する視差 d_1 とピント外れ面 p_2 に対する視差 d_2 の差 d は

$$d = d_2 - d_1 = \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) b_1 l \quad (2)$$

により求められる．ただし l はステレオカメラの基線長である．さらに，被写体 p_2 上の輝点が q_1 面上の撮像素子により撮影されたときの錯乱円径 c は，共通のレンズ口径 D を用いて

$$c = \frac{b_2 - b_1}{b_2} D \quad (3)$$

のように定まる．これらの式から，合焦時に対するぼけ

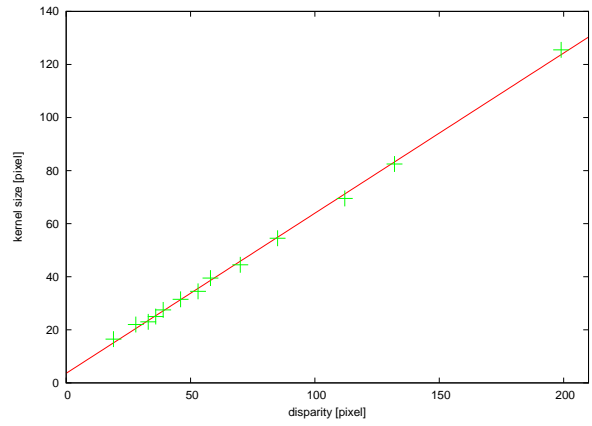


図5 視差とぼけカーネルの大きさの関係

発生時の視差の変化量 d と，錯乱円径 c の比は

$$\frac{d}{c} = \frac{b_1 b_2}{b_2 - b_1} \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) \frac{l}{D} \quad (4)$$

となるが，この時，結像公式（式(1)）から

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2} = \frac{b_2 - b_1}{b_1 b_2} \quad (5)$$

であるため，これを代入すると

$$\frac{d}{c} = \frac{b_1 b_2}{b_2 - b_1} \frac{b_2 - b_1}{b_1 b_2} \frac{l}{D} = \frac{l}{D} \quad (6)$$

のように被写体までの距離に関する変数が全て消去できる．このことから，合焦時に対するピント外れ時の視差とぼけカーネルの大きさは比例し，その比はレンズ口径 D と基線長 l の比であることがわかる．また図4の右画像 I_R に示したように，距離の変化に対し大きさを変えながら移動する錯乱円の包絡線は，合焦点で交わる2本の直線となる．なお簡単のため，図では被写体が左カメラの光軸上にあるものとしたが，明らかに一般性を失うことなく任意の被写体について同様のことを示すことが出来る．

この性質を用いることで，視差からぼけカーネルの大きさへの変換が非常に容易となる．具体的には，シーン中の二つの異なる距離に輝点を置き，その輝点の像の視差と大きさをそれぞれ求めれば，その他の距離における視差とぼけカーネルの大きさの関係は線形補間により求められる．またキャリブレーションの精度を高めるには，より多くの距離において両者を求め，最小二乗法により直線を当てはめれば良い．

実際に，様々な距離に輝点を置いたときの視差とぼけカーネルの大きさの実測値を図5に示す．実験では点光源として光ファイバー光源を用い，ぼけの大きさを手動で求めた．図5で緑の十字は計測した点を，赤の直線はこれに最小二乗法により当てはめた直線を表す．このときレンズのピントはほぼ無限遠に設定されていたが，このことは視差が0であるとき，ぼけカーネルの大きさがほぼ0となっていることに対応する．このように，視差から錯乱円径を容易に求められることがわかる．

3.3 ぼけ除去による被写界深度の拡張

撮影画像 y とぼけカーネル f が既知のとき、ウィナーデコンボリューションを用いて元シーン x を求める。 y と f のフーリエ変換をそれぞれ $Y(\omega)$, $F(\omega)$ とするとき、元シーン x のフーリエ変換 $X(\omega)$ は次の式で示される。

$$X(\omega) = \frac{F^*(\omega)Y(\omega)}{|F(\omega)|^2 + \sigma} \quad (7)$$

ここで $F^*(\omega)$ は $F(\omega)$ の複素共役である。また、 σ はぼけカーネルのうちゲインの小さい空間周波数においてノイズが強調されることを避け、またゼロ除算を避けるための項で、入力画像に含まれるノイズの強さに応じて設定する。またこの値は同時に、Zhou コードの選択にも用いる [5]。 $X(\omega)$ を逆フーリエ変換することで元シーン x を求めることができる。

ウィナーデコンボリューションは式 (7) で示されるように空間周波数領域における処理であるため、1回の処理で扱う画像内において一様な PSF でなければならない。つまり、その画像内では奥行きが一様である必要がある。しかしシーンの奥行きは一様ではないため、図 1 に示すように画像を小領域に分割し、それぞれの小領域でウィナーデコンボリューションを行い、その結果を統合する。

まず画像を互いに重なり合う小領域に分割する。次に、巡回畳み込みの影響を避けるために小領域に窓関数を乗じ、その小領域に対してウィナーデコンボリューションを行う。この時用いるぼけカーネルの大きさは、レンズに装着した開口形状を、較正により得た視差とぼけカーネルの大きさの関係により拡大・縮小したものをを用いる。そして、ぼけを取り除いた小領域を重ねあわせて1枚の画像に統合する。小領域の統合では、領域の中央に近いほど重みが高くなるように、ぼけ除去の前処理に用いた窓関数をそのまま重みに用いた。なお実験では、窓関数としてハミング窓を用い、一辺 64 画素の小領域を縦・横 8 画素ごとに切り出して処理を行った。

4. 実験

ここでは3つの実験結果を示す。最初に Zhou コードを用いることによるステレオマッチングの安定化について、ノイズを人工的に加えた画像により検証する。次に図 1 に示した流れにより、入力画像からぼけを除去し、被写界深度を拡張した例を示す。最後に、得られた被写界深度拡張画像と奥行きマップから、撮影時とは異なる距離に合焦させ、その前後にぼけを与えた画像を生成した結果を示す。

実験に用いたカメラは Nikon D200、レンズは SIGMA EX 30mm F1.4 EX DC である。画像は 8bit JPEG 画像を用いた。実験では2台のカメラを並べる代わりに、1台のカメラをスライドステージ上に設置し、左右に平行移動させて画像を撮影した。実験におけるスライド量

(基線長)は 14mm である。また、符号化開口のコードには図 2 の $\sigma = 0.005$ のものを用い、レンズの後部に装着して撮影した。このときのレンズ本体の絞りは、蹴られが発生しないように開放絞りである $F = 1.4$ に設定した。それに対し比較実験では符号化開口を取り外し、レンズの絞りを露光量と露光時間が同一となるように設定した。このときの F 値は $F = 5.0$ であった。つまり符号化開口の開口部面積は $F = 5.0$ の円形開口の面積と一致しており、ぼけカーネル全体の大きさは符号化開口のほうが円形開口よりも大きい。

4.1 実験 1：ステレオマッチングの安定化

Zhou コードによりステレオマッチングを安定に行うことができるかどうかを確かめるため、次の実験を行った。

まず、1mm の升目ごとに乱数で白か黒としたランダムドットを普通紙に印刷し、テーブル上に奥行き方向に配置した。これを斜め上から撮影し実験を行った。奥行き範囲は約 50cm から 150cm の範囲で、レンズのピントはそのうち最も手前に合わせた。露光時間は共に $1/8[\text{sec}]$ であった。円形開口を用いたときの撮影画像のうちの1つを図 6(a) に、符号化開口を用いたときの入力画像のうちの1つを図 6(b) に示す。

これらの画像から、両者の露光量がほぼ同一であることが分かる。また、符号化開口を用いた画像のほうが、円形開口に比べシーン奥のぼけが大きい部分でも、ランダムドットの高周波成分による明度変化が失われずに残っていることが分かる。

次にステレオマッチングの安定度を検証するため、この撮影画像に対して平均 0、分散が 0 から 9.0(0.5 刻み)のホワイトノイズを付加しステレオマッチングを行う実験を行った。このときノイズを加えなかった時を真値とし、それに対しノイズを加えた時に視差が変化した画素数の割合をマッチングのエラー率とした。その結果を図 7 に示す。なお、分散を変化させたときのマッチングエラー率の平均は、符号化開口を用いた時が 1.72%、円形開口を用いた場合が 3.22% であった。この結果より、分散の大きさが大きくなるにつれマッチングのエラー率は上昇するが、円形開口よりも符号化開口を用いた場合の方がエラー率は低く、武田ら [14] の提案する M 系列の他に Zhou コードのような広帯域コードでもステレオマッチングが安定となることが示された。

4.2 実験 2：ぼけ除去の安定化

本手法を用いることで、奥行きのあるシーンについてぼけ除去を行い、被写界深度を拡張することが出来ることを確認するために次の実験を行った。

図 8 に示したようなシーンに対し、円形開口と符号化開口を用いて撮影し、本手法を用いてぼけ除去を行った。図 8(a), 8(b) にそれぞれの入力画像のうちの一方を、図 8(c), 8(d) にぼけ除去の結果を示す。また、符号化開口



(a) 円形開口での撮影画像． $F=5$, 露光時間:1/8sec



(b) 符号化開口を用いた撮影画像．露光時間:1/8sec



(c) 円形開口を用いた場合のぼけ除去画像



(d) 符号化開口を用いた場合のぼけ除去画像

図 8 実験 2:奥行きのあるシーンにおけるぼけ除去

を用いたときの視差マップを図 9 に示す．ウィナーデコンボリューションにおけるノイズパラメータ σ には同一の定数を用いた．また，画像の鮮鋭度向上の効果をよりはっきり見せるため，レンズのピントはシーンの最も奥の部分よりもさらに遠距離に合わせた設定を用いている．

視差マップからはおおむね正しくステレオマッチングが行われていることが分かる．また図 8(c)，図 8(d) と，その一部を拡大して示した図 10 からは，符号化開口を用いた場合に画像の鮮鋭度が大幅に向上していることがわかる．それに対し円形開口では，画像の鮮鋭度は若干改善している程度であり，十分なぼけ除去が出来ていないことが分かる．

4.3 実験 3：リフォーカシング

本システムの応用例として，得られた被写界深度拡張画像と奥行マップから生成したリフォーカシングの例を示す．実験 2 と同様のシーンについて実験を行った．た

だしリフォーカシングの効果を示すため，この実験ではレンズのピントをシーンのうち奥の物体の近辺に合わせている．そのため，図 11(a) に示した入力画像に見られるように，手前に置かれた書籍の表紙は大きくぼけている．それに対し，実験 2 と同様の方法で符号化開口を用いてぼけ除去を行った画像を図 11(b) に示す．机上や手前の書籍の表紙が先鋭化されていることが分かる．最後に，得られた奥行マップを用いて円形開口をシミュレーションし，ぼかした画像を図 11(c) に示す．元の画像とは反対に，手前の被写体が鮮鋭で，かつ奥の被写体が良好にぼかされていることが分かる．

5. まとめと今後の展望

ピンぼけを含む画像から画像処理により事後的にぼけを取り除き，被写界深度を拡張する手法として，符号化開口ステレオを用いる手法を提案した．平行ステレオにおける視差とぼけカーネルの大きさが比例関係にあり，



(a) 入力画像



(b) ぼけ除去画像



(c) リフォーカシング結果画像

図 11 実験 3:リフォーカシング実験

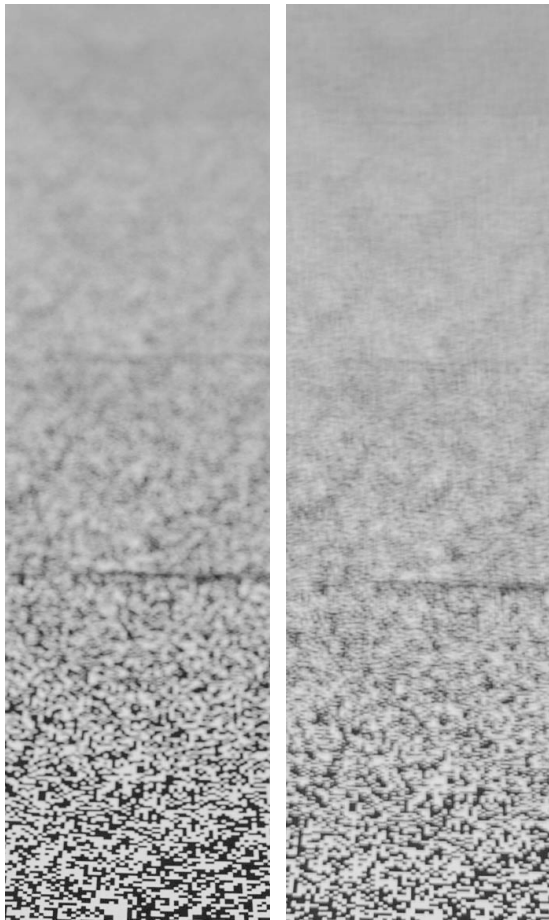
視差から容易に PSF を推定できることを示した．また，符号化ステレオを用いることで安定したステレオマッチングを行うことが可能であることを示した．これにより得た視差マップから PSF を求め，撮影画像から精度良くぼけを取り除くことができることを実験を通して示した．さらに応用例として被写界深度拡張画像と視差マップから合焦距離を変更するリフォーカスを行った．

実験では機材の都合から実際のステレオカメラを用いる代わりに，静的シーンに対しカメラを平行移動させて実験を行ったが，カメラを 2 台用意することで動的シーンに対しても同じ手法で被写界深度を拡張することが可能であり，絞りを絞って撮影した場合に比べて露光時間を短くすることができるため，比較的暗いシーンでも，被写界深度が深く，かつぶれの少ない画像を得ることが出来ると考えられる．

今後はステレオ法と Depth from Defocus 法を統合することで，ステレオカメラの左右の開口形状が異なる場合や，左右のレンズの合焦距離が異なる場合へ手法を拡張し，より精度良く奥行き推定，ぼけ除去を行うことのできる包括的な理論の構築を目指す．

文 献

- [1] 小倉磐夫，現代のカメラとレンズ技術，写真工業出版社，1995.
- [2] S. Hiura and T. Matsuyama, Depth Measurement by the Multi-Focus Camera, Proc. CVPR, 953-959, 1998.
- [3] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, W. T. Freeman. Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture, ACM Trans. Graphics (SIGGRAPH), 2007.
- [4] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin, Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing, ACM Trans. Graphics (SIGGRAPH), 2007.
- [5] C. Zhou and S. Nayar. What are good apertures for defocus deblurring?, Proc. Int. Conf. of Computational Photography, 2009.
- [6] C. Zhou, S. Lin, and S. K. Nayar, Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus, Proc. ICCV, 2009.
- [7] A. Levin, Analyzing Depth from Coded Aperture Sets, Proc. ECCV, 2010.
- [8] Y. Schechner and N. Kiryati, Depth from Defocus vs. Stereo: How Different Really Are They?, Int. J. Computer Vision, Vol. 39, No. 2, pp. 141-162, 2000.
- [9] A. Pentland, A New Sense of Depth of Field, IEEE Trans. PAMI, Vol.9, No.4, pp. 988-994, 1987.
- [10] S. K. Nayar, M. Watanabe and M. Noguchi, Real-



(a) 円形開口 (b) 符号化開口

図 6 実験 1 の撮影画像 . ピントは手前 (図下側) に合わせてある .

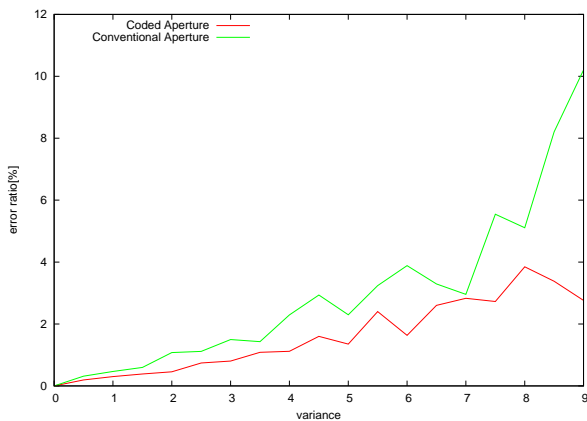


図 7 実験 1 : ノイズに対するマッチングエラー率の比較

- time Focus Range Sensor, Proc. ICCV, pp. 995-1001, 1995.
- [11] G. Surya and M. Subbarao, Depth from defocus by changing camera aperture: a spatial domain approach, Proc. CVPR, pp. 61-67, 1993.
- [12] P. Green, W. Sun, W. Matusik and F. Durand, Multi-Aperture Photography, ACM Trans. Graphics (SIGGRAPH), 2007.
- [13] C. K. Liang, T. H. Lin, B. Y. Wong, C. Liu and H. H. Chen, Programmable Aperture Photography: Multiplexed Light Field Acquisition, ACM Trans. Graphics (SIGGRAPH), 2008.

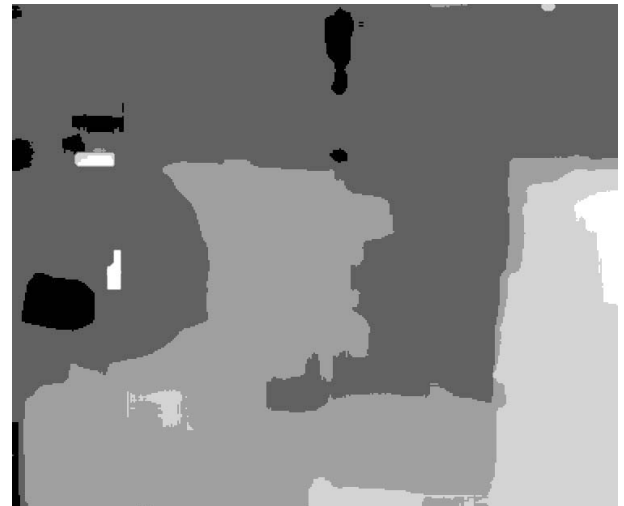
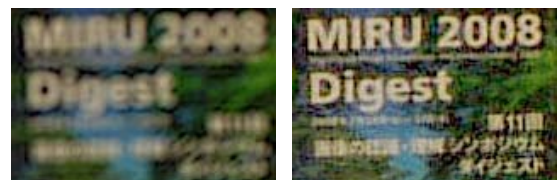


図 9 実験 2: 視差マップ (符号化開口) 明度が大きいほど視差が大きいことを意味する .



(a) 図 8(c) の緑の枠の拡大図 (b) 図 8(d) の緑の枠の拡大図



(c) 図 8(c) の赤の枠の拡大図 (d) 図 8(d) の赤の枠の拡大図

図 10 ぼけ除去画像 (図 8(d),8(c)) の拡大画像

- [14] 武田祐一, 日浦慎作, 佐藤宏介, 符号化開口を用いたステレオ法の頑健化, MIRU2010 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp. 1709-1714, 2010.