

カメラ移動に基づく奥行不変 PSF を用いた全焦点画像の生成

小林 丈之^{†,††} 内藤 遼介^{††} 坂上 文彦^{††} 佐藤 淳^{††}

^{††} 名古屋工業大学 情報工学専攻 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

[†] 株式会社 A T A 〒 444-0802 岡崎市美合町字小豆坂 30 番地

E-mail: [†]takeyuki@cv.nitech.ac.jp, ^{††}{sakaue,junsato}@nitech.ac.jp

あらまし 近年、カメラのぼけ関数 (PSF) を用いてデコンボリューションを行うことで、奥行ぼけや運動ぼけの復元を行う研究が進みつつある。特に、コンピューショナルフォトグラフィの研究の進展により、被写体の奥行が一定でない 3 次元シーンにおいても全焦点画像の生成や被写界深度の制御が可能になりつつある。本稿では、カメラを露光中に移動させることで、画像全体の PSF が奥行き不変となることを示し、全焦点画像の生成が可能であることを示す。さらに、全焦点画像の生成精度を定量的に評価し、提案法の有用性を示す。

キーワード 符号化露光, PSF, ぼけ復元

1. はじめに

カメラで被写体にピントを合わせたときに、被写体前後の範囲の中でピントが合っている幅のことを被写界深度という。実際のレンズは有限の開口径を持つため、被写界深度が存在し、ピントが合っていないとぼけが発生する。ぼける前の原画像を推定する処理をぼけの復元といい、従来様々な手法が提案されてきた。その多くは、ぼけの発生が点広がり関数 (PSF: point spread function) の畳込みであることを利用し、ぼけ画像にデコンボリューションによる逆フィルタをかけて復元を行う。PSF は、物体の奥行に依存するために、正確な PSF を計算するためには、物体の形状とカメラからの位置情報が必要となる。

この問題に対して、近年コンピューショナルフォトグラフィの分野で符号化撮像 [1] が注目されている。符号化撮像では、従来の画像処理のみでは不安定であった画像のぼけ復元や Depth from defocus による奥行き推定問題を、カメラのぼけ関数を符号化することで安定的に求めようとする新しい撮像アプローチである。

ぼけ関数の符号化のために、Veeraraphavan ら [2] は、最適化探索手法により符号化絞りパターンを求めた。理想的なレンズカメラのぼけ関数は、絞り形状そのものである。そこで、ゼロ交差を避けた広帯域の PSF を探索する評価関数として、絞り形状そのもののフーリエスペクトルの最小値を用い、それを最大化することでデコンボリューションに向く広帯域の絞りパターンを探索した。

長原ら [3] は、露光時間中に撮像素子を前後に移動させることで、奥行き不変 PSF が得られることを示した。しかし、撮像素子を移動させると、レンズの倍率が変化するため PSF が奥行き不変でなくなってしまう問題がある。そこで、撮像物体を十分に遠くに設置することで、倍率の変化による PSF への影響が十分に小さい条件の

もとで全焦点画像が作成できることを示した。しかしこの方法では、カメラ内部において撮像素子を移動させなければならないため、特殊な構造を持ったカメラを構築する必要があり、既存のカメラを用いて実現することはできない。

そこで本稿では、既存のカメラを露光時間中に移動させるだけで全焦点画像が生成可能な手法を提案する。提案法では、奥行による倍率の変化を除外するためにテレセントリックレンズを既存のカメラに装着して用いる。本稿では、このような既存のカメラを露光時間中に移動させることで、得られる画像中のぼけが撮影対象までの奥行きによって変化しない奥行不変な PSF となることを示す。従ってこの奥行不変 PSF に基づいてデコンボリューションを行うことにより、撮影対象の奥行きによらず全焦点画像が得られることを示す。さらに本稿では、提案法の有効性をレンズシミュレータを構築することで定量評価する。一般に 3 次元環境を撮影した画像の復元問題においては正解画像が存在しないため定量評価が行われてこなかった。そこで本稿では、レンズによる任意物体のぼけ画像が生成可能なレンズシミュレータを構築し、このシミュレータを用いて提案手法の有効性を定量的に示す。最後に、実際に撮影を行った画像から、全焦点画像の生成が可能であることを示す。

提案法では、テレセントリックレンズを用いることから視野に制限が生じるが、特殊な構造を持つカメラを必要とせず、既存のカメラを用いて物体の奥行きによらない全焦点画像を生成することが可能であることから、様々な分野において応用が期待される。

2. 奥行不変 PSF

2.1 物体側テレセントリックレンズ

テレセントリックレンズとは主光線が焦点を通るように配列された光学系をいい、主光線が光軸に対して平行

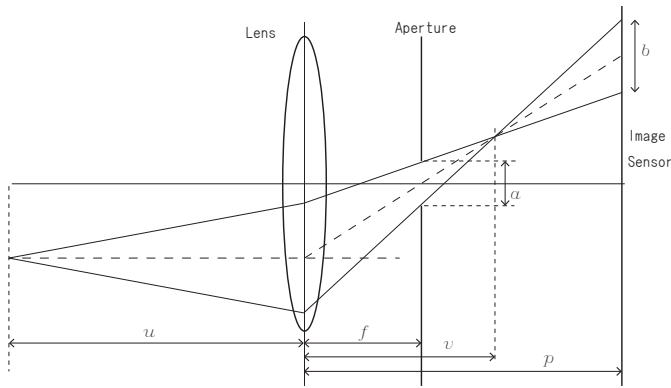


図 1 物体側テレセントリックレンズのモデル

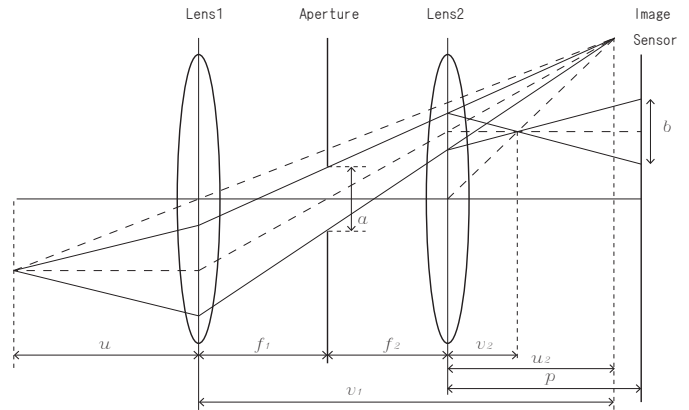


図 2 両側テレセントリックレンズのモデル

なレンズである．レンズの焦点に小さな絞りを置き，光軸と主光線が平行とみなせるようにした光学系である．

テレセントリック光学系には物体側テレセントリック光学系，像側テレセントリック光学系および両側テレセントリック光学系がある．物体側テレセントリック光学系は物体側だけが光軸と主光線が平行な光学系であり，像側テレセントリック光学系は像側だけが光軸と主光線が平行な光学系である．両側テレセントリック光学系は物体側，像側のどちらもテレセントリック光学系となっているもので，通常複数のレンズによって実現される．

物体側テレセントリックレンズの撮像モデルを図 1 に示す．焦点距離 f のレンズより距離 u の対象を撮像すると，式 (1) に示すレンズの法則によりすべての入射光は距離 v の面上に集光する．

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

ここで，撮像面の位置 p が v と一致すれば，焦点の合った画像が得られるが，前後にずれると以下の式で表される様に，射影される光線は大きさ b の円として射影される．

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

ここで， a は絞りの大きさを示し，ぼけの大きさ b が画素の大きさを超えると画像にぼけが生じる．

2.2 両側テレセントリックレンズ

両側テレセントリックレンズは，物体側テレセントリックレンズ同様に，奥行が変化しても撮像画像において撮像物体の大きさが変化しない特徴がある．

両側テレセントリックレンズの撮像モデルを図 2 に示す．2つのレンズの焦点距離を f_1, f_2 とすると，それぞれのレンズの焦点に絞りがくるように配置することで，両側テレセントリック光学系となる．2つのレンズの法則次は次式となる．

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v_1} \quad (3)$$

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{u_2} + \frac{1}{v_2} \quad (4)$$

射影されるぼけの大きさは次式となる．

$$b = a \left| \frac{f_2 u}{f_1^2} + \frac{p}{f_2} - \frac{f_2}{f_1} - 1 \right| \quad (5)$$

また，光学倍率 β は次式となる．

$$\beta = \frac{f_2}{f_1} \quad (6)$$

本稿では，以下両側テレセントリックレンズを用いる．

2.3 奥行不変 PSF の導出

奥行不変 PSF とは，カメラと撮像物体の距離（奥行）が変化しても PSF が変化しないことである．つまり，奥行不変 PSF が得られれば撮像物体の表面形状が複雑に変化していても，すべての箇所に焦点が合った画像（全焦点画像）の生成が可能となる．

撮像面上で考えて，中心位置から，投影される位置までの距離を r とすると，ピルボックス関数のぼけ PSF は次式で表される．

$$P(r, u, p) = \frac{4}{\pi b^2} \Pi\left(\frac{r}{b}\right) \quad (7)$$

ここで， $\Pi(x)$ は矩形関数を表し，次式となる．

$$\Pi(x) = \begin{cases} 1, & |x| < \frac{1}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

また，ぼけモデルをガウス関数とすると，PSF は次式となる．

$$P(r, u, p) = \frac{2}{\pi(gb)^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{(gb)^2}\right) \quad (9)$$

ここで， g は定数である．収差のない，理想的なレンズにおいてはぼけ関数はピルボックス関数として表すことができるが，現実のレンズにおいては，ガウス関数に近い形となる．また，レンズメーカーはぼけ画像が綺麗な

グラデーションとなるように、ガウス関数に近い形になるように設計することがある。

ここで、奥行不変な PSF を得るために、カメラの露光時間中に奥行を変化させることを考える。カメラの露光中は、撮像素子に光が当たり電荷が蓄積される。よって PSF は時間で積算されることになり、これを IPSF(Integrated PSF) と呼ぶ。IPSF は露光開始時刻 $t = 0$ から露光終了時刻 $t = T$ までの時間積分により計算され、次式となる。

$$IP(r, p) = \frac{1}{T} \int_0^T P(r, u(t), p) dt \quad (10)$$

ここで、カメラを光軸方向に一定速度 s で並進させる。すると、レンズと投影物体との距離 u は次式により変化する。

$$u(t) = u(0) + st \quad (11)$$

式 (5)、式 (7)、式 (10) より、IPSF は次式となることがわかる。

$$IP(r, p) = \frac{2f_1^2}{\pi asT f_2} \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_T}{r} - \frac{2\lambda_0}{b(0)} - \frac{2\lambda_T}{b(T)} \right) \quad (12)$$

ここで、 λ_t は条件により以下の値となる。

$$\lambda_t = \begin{cases} 1, & b(t) \geq 2r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $b(t)$ は時刻 t におけるぼけの円の直径である。また、撮像物体の合焦位置は、時刻 $t = 0$ から $t = T$ の間の地点に存在するものとする。

一方ぼけモデルがガウス関数の IPSF は、式 (5)、式 (9)、式 (10) より次式となる。

$$IP(r, p) = \frac{f_1^2}{f_2 \sqrt{2\pi} rasgT} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2}r}{gb(0)} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2}r}{gb(T)} \right) \right) \quad (14)$$

ここで、 $\operatorname{erfc}(x)$ は次に示す相補誤差関数である。

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (15)$$

2.4 PSF によるぼけ復元

今、PSF の $h(x, y)$ が既知である場合に画像 $g(x, y)$ を観測したとする。雑音がない場合には、劣化のない画像 $f(x, y)$ を復元するには、

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (16)$$

を計算し、フーリエ逆変換を行えばよい。ここで、大文字は各関数のフーリエ変換を表す。このようにコンボ

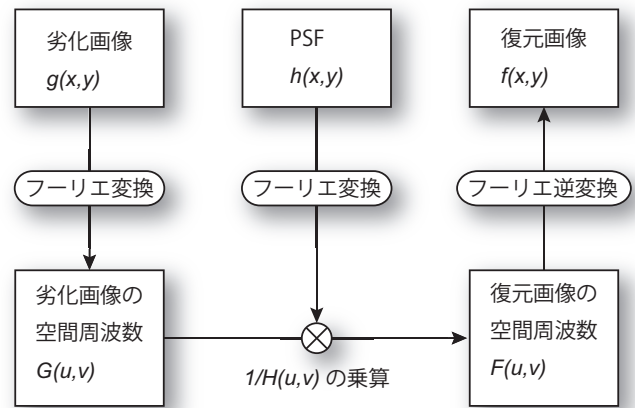


図 3 デコンボリューション

リューションの畳み込みによってぼかされた画像を元に戻す操作をデコンボリューションと言う。デコンボリューションの手順を図 3 に示す。この画像復元に用いた、

$$M(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \quad (17)$$

は逆フィルタと呼ばれる。しかし、実際の画像中には画像ノイズが存在するため、本稿ではデコンボリューションに次式に示すウィナー・フィルタ (Wiener filter) を用い、原画像 $f(x, y)$ と復元画像 $\hat{f}(x, y)$ との平均 2 乗誤差が最小となるような復元結果を求める。

$$M(u, v) = \frac{\overline{H(u, v)}}{|H(u, v)|^2 + [P_{nn}(u, v)/P_{ff}(u, v)]} \quad (18)$$

ここで、 $P_{nn}(u, v)$ 、 $P_{ff}(u, v)$ はそれぞれ雑音と原画像のパワー・スペクトル、 $\overline{H(u, v)}$ は $H(u, v)$ の共役複素数を表す。通常は、 $[P_{nn}(u, v)/P_{ff}(u, v)]$ を正確に求めることができないため、適当な定数 Γ を用意し、式 (18) の近似として、次式を用いる。

$$M(u, v) \approx \frac{\overline{H(u, v)}}{|H(u, v)|^2 + \Gamma} \quad (19)$$

観測された画像のフーリエ変換 $G(u, v)$ に $M(u, v)$ を掛けた後フーリエ逆変換すると、復元画像が求まる。

3. シミュレーション実験

3.1 数値シミュレーション

まず数値シミュレーションにより、IPSF の不変性を確認した。本実験では、 100mm の位置の対象物が合焦するレンズ系において、 $u_n = 95\text{mm}, 98\text{mm}, 100\text{mm}, 103\text{mm}, 106\text{mm}$ の 5 つの位置にある点光源をそれぞれ撮影した。まず、ぼけ関数が式 (7) のピルボックスである場合と式 (9) のガウスである場合のそれぞれにおいて、通常のカメラで撮影した場合の PSF を求めた。この結果を図 4(a) および図 5(a) にそれぞれ示す。次に、レンズと

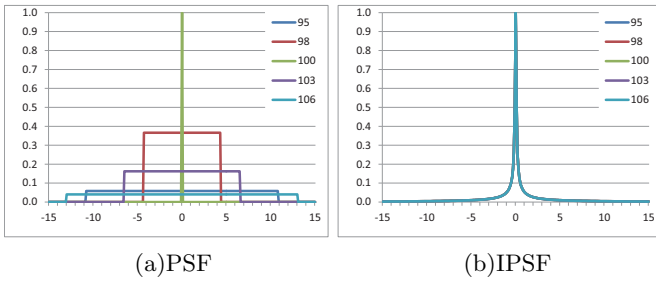


図4 ビルボックス関数の数値シミュレーション

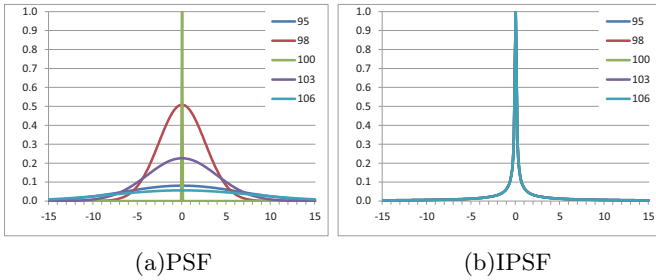


図5 ガウス関数の数値シミュレーション

撮像物体の距離を u_n を中心に $s = 10\text{mm}/\text{sec}$, $T = 6\text{sec}$ にて式 (11) に従って移動させ、IPSF を求めた．このとき、撮像面は $p = 100\text{mm}$ 、焦点距離は $f = 50\text{mm}$ 、絞りの大きさは $a = 10\text{mm}$ とした．求めた IPSF を図 4(b) および図 5(b) に示す．

図 4 および図 5 より、通常の PSF では、 u_n の奥行が変化するとグラフ形状が大きく異なるが、IPSF ではグラフがほぼ一致しているのが分かる．よって、奥行不変であると言え、奥行きが異なる地点でも同じぼけ関数で復元が可能となる．つまり、奥行情報を必要とせずに、ピントが一箇所に定まらない様な複雑な形状の物体でも、1 回の撮影で全焦点画像の生成が可能となる．

さらに、理想的なレンズのぼけ関数のビルボックスと、実際のレンズに近いぼけ関数のガウスを比較すると、IPSF においてはグラフが同じ形状をしている．このことは、ぼけ関数が多少変化しても、同じ IPSF にてぼけが復元できることを示している．通常の PSF でぼけを復元する場合には、あらかじめ点光源を撮影するなどして正確な PSF を計測する必要があるが、本手法ではレンズの微妙な特性の違いを気にすることなくぼけの復元が可能である．

3.2 レンズシミュレーターによるぼけ画像の生成

一般に 3 次元環境を撮影した画像のぼけ復元問題においては正解画像が存在しないため、これまでは定量的な比較評価が行われてこなかった．そこで本稿では、レンズによる任意 3 次元物体のぼけ画像が生成可能なレンズシミュレーターを構築し、このシミュレーターで生成した画像を用いて提案法と従来法との定量的な比較評価を行う．本シミュレーターでは、光の広がりを正確にシミュレートすると共に、画像を積算することで、カメラ

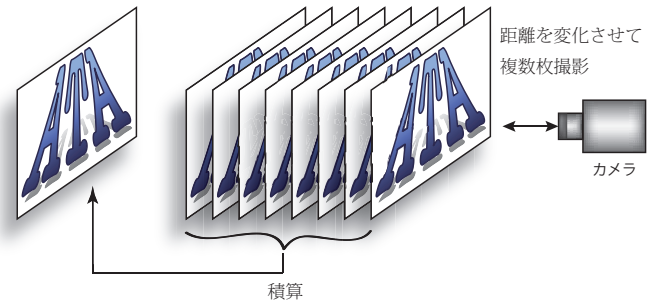
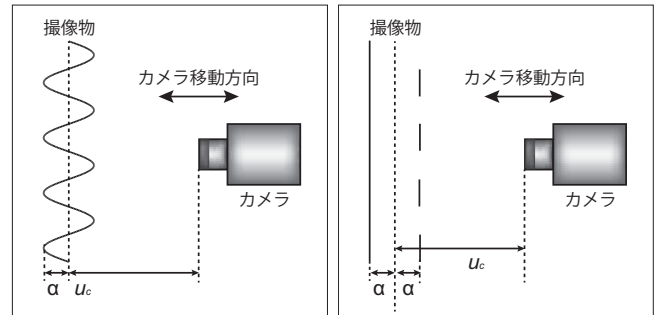
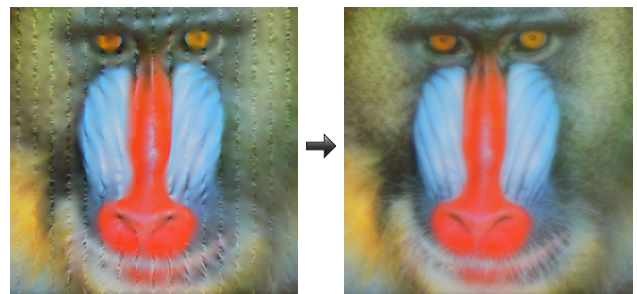


図6 レンズシミュレーターによる積算画像の生成



(a) sin 形状の奥行き物体 (b) 矩形形状の奥行き物体

図7 レンズシミュレーターによる実験



(a) sin ぼけ (b) 積算画像

図8 sin ぼけ画像から復元までの工程

を移動させながら露光した画像を生成することが可能である (図 6)．ただし理想的なレンズであるとし、収差や周辺光量低下については無視している．

本実験では、このシミュレータを用いることで、ぼけ関数をビルボックスとし、50 枚の画像から積算画像を生成した．撮像物体は、図 7(a) で示すように、振幅 $\alpha = 5\text{mm}$ のサインカーブで奥行き形状が変化する物体と、図 7(b) で示すように、前面の物体をスリット状に配置することで、奥行き形状が矩形に変化する物体の 2 種類を用意した．それぞれの撮像物体には、画像がテクスチャとして貼り付けられており、このテクスチャ画像を真値とすることで復元画像の定量的な評価を行った．図 7(b) の矩形形状では、前面のスリットと背景の両方に同じ画像が貼り付けられている．比較のため、本シミュレータを用いて、長原ら [3] の手法 (以下、従来法と呼ぶ) における画像も生成し、併せて評価した．ただし、従来法においてはテレセントリックレンズでないために、奥行き変化に伴う画像の拡大縮小が発生してしまい画像

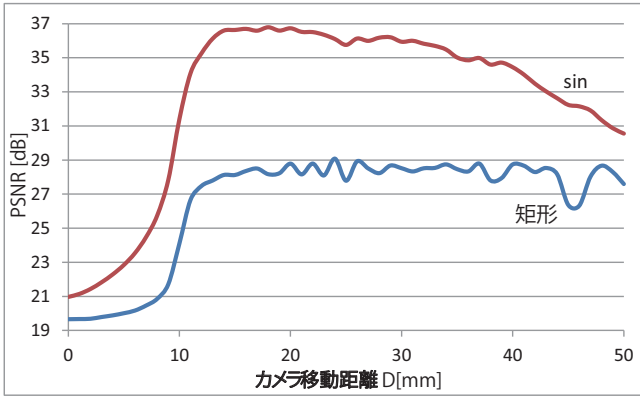


図 9 Mandrill

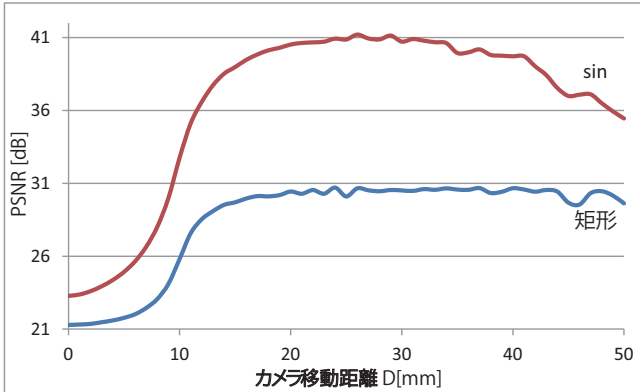


図 10 Lena

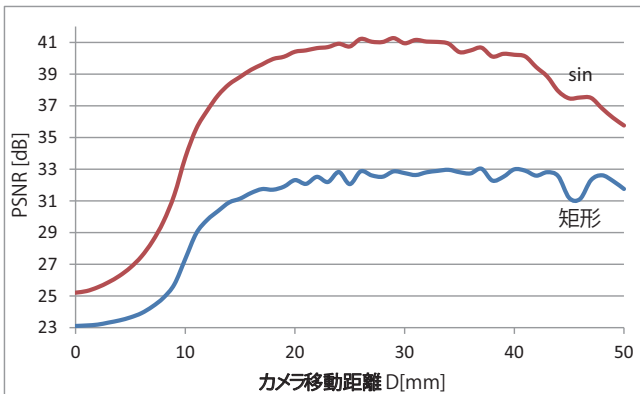


図 11 Peppers

が大きく変形してしまう．そこで，スリット部と背景の画像を貼り付ける倍率を変化させて，中心位置 u_c において画像歪みが発生しないよう調整を行った．中心位置 u_c が，合焦位置となっている．

サイン形状物体を撮像した場合の通常のぼけ画像と，カメラを移動させながら画像を積算して生成した積算画像を図 8 に示す．通常の撮影方法では，図 8(a) のようにピントが合っている箇所がほとんどなく，残りはぼけた画像となっている．これをカメラを移動させながら撮影して積算した画像が，図 8(b) で，画像全体でぼけが均一になっているのが確認できる．

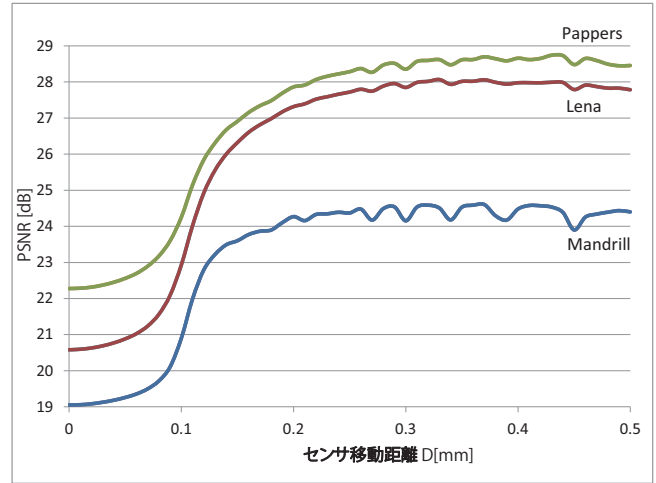


図 12 従来法

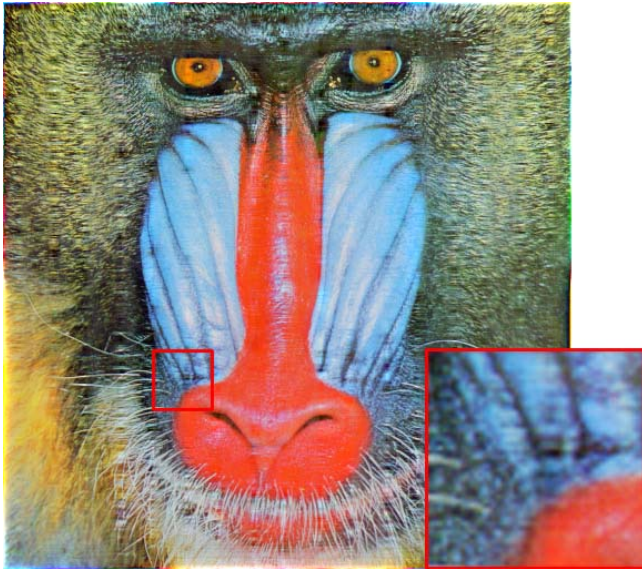
3.3 レンズシミュレーターによる評価実験

レンズシミュレーターを使って，提案法と従来法のそれぞれの画像を生成し復元することで，2つの手法における全焦点画像の生成精度を比較評価した．本評価では，図 13, 図 14, 図 15 に示す 3 枚の画像に対して図 7 に示すサイン形状と矩形形状を持たせて評価を行った．提案法の評価においては，中心位置 $u_c = 100mm$ ，撮像面 $p = 20mm$ ，焦点距離 $f_1 = 60mm$ ， $f_2 = 60mm$ ，絞りの大きさ $a = 10mm$ とした．テキスト画像とセンサの解像度は $0.0385mm/pixel$ で 512×512 の大きさである．

作成した積算画像を IPSF によりぼけを除去し原画像との PSNR を計算したグラフが，図 9, 図 10, 図 11 である．グラフの横軸はカメラ移動距離 $D(=sT)$ であり，縦軸は復元画像の PSNR である．グラフより， $D = 15$ から $D = 30$ くらいの間には PSNR のピークがあることがわかる．撮像物体の振幅が $\alpha = 5mm$ となっているため， $D = 10$ 以上の移動量がなければ，積算画像に撮像物の合焦点が含まれないため， $D = 10$ を超えたあたりから PSNR が急激に上昇している．逆に移動範囲を大きくしすぎると，ぼけの影響が大きくなり，PSNR が伸びない．以上の結果より，本手法は物体の奥行き深さの 1.5 倍から 3 倍程度の範囲でカメラを移動させれば良好な結果が得られることが分かった．

次に，従来法の通常のレンズでセンサを移動させながら撮影を行う方法との比較を行う．従来法では，中心位置 $u_c = 750mm$ ，撮像面 $p = 12.5mm$ ，焦点距離 $f = 50mm$ とし，ぼけの大きさが提案法と同じになるように絞りと物体の奥行き振幅の調整を行った．従来法との比較評価は，矩形形状でのみ行い，その結果を図 12 に示す．PSNR を比較すると，すべての画像で提案手法の方が高い数値が得られており，よりぼけの少ない正確な画像が復元できていることがわかる．

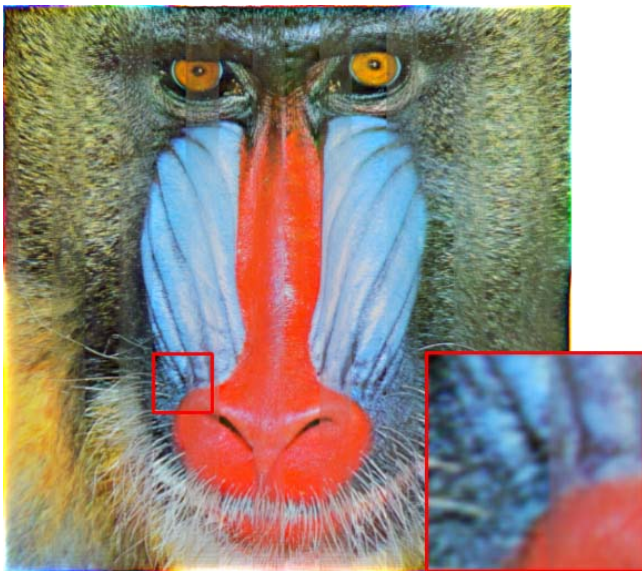
また，各グラフの PSNR がピーク値での復元結果画像を図 13, 図 14, 図 15 に示す．従来法では，奥行き違



(a) 提案法



(a) 提案法



(b) 従来法



(b) 従来法

図 13 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Mandrill]

図 14 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Lena]

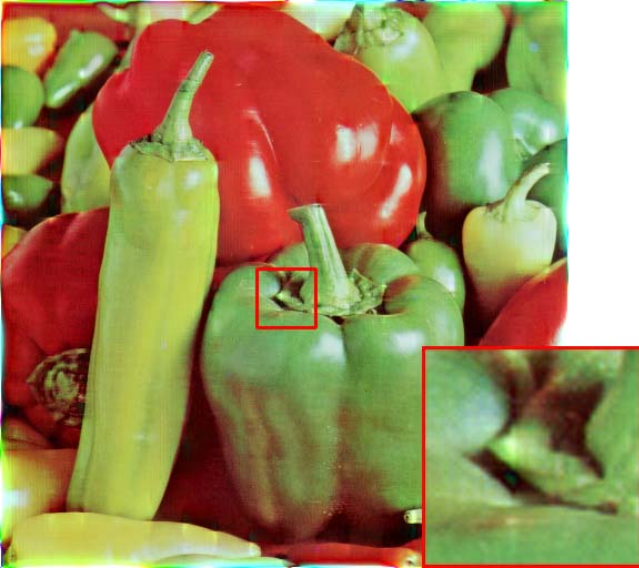
いがうっすら短冊模様となって現れているのが確認できるが、本手法においては、ほとんど確認できないレベルになっている。テレセントリックレンズを使うことで、奥行き変化による、画像の歪みが発生しないためだと考えられる。また、提案法では、全体的にシャープになっており、ぼけの復元が効果的に行えていることが確認できる。

テレセントリックレンズにおいては、レンズの大きさを超える対象物を撮影することが出来ないが、通常のレンズでは、画角を広くすることで広い範囲の撮影が可能となる。よって、本手法は小さい物体の撮影に向き、従来法は遠くの物体を撮影するのに向く。通常のレンズでも、遠くの物体を撮影することで、入射光が平行光に近くなり、像の拡大縮小による効果を少なくすることが可能である。

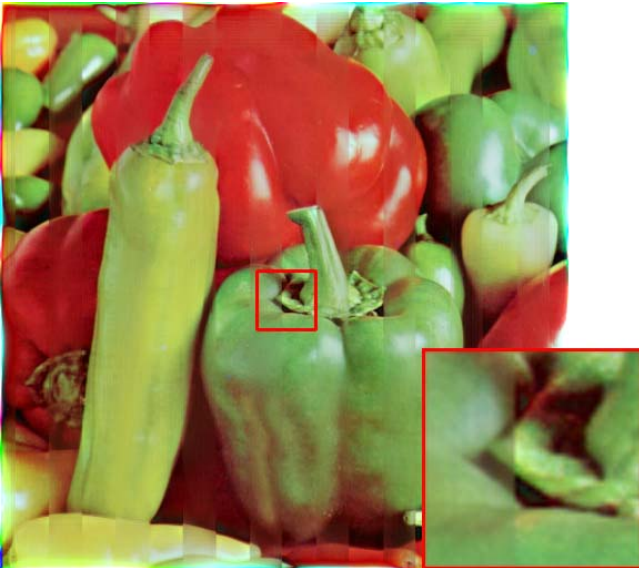
4. 実画像実験

実際のカメラとレンズを使って、撮影されたものからぼけの復元実験を行った。xy 移動ステージ上に、撮像物体を配置し、カメラを固定して撮影を行った。実験では、物体を動かしているが、カメラを動かして撮影した状況と変わらない。 $s = 60\text{mm/sec}$, $T = 1\text{sec}$ にて物体を 60mm の距離だけ手前から奥へ移動させた。使用したテレセントリックレンズは、光学倍率 $0.17\times$, $W.D = 113\text{mm}$, 被写界深度 11mm , 実効 $F = 4$ の C マウントレンズである。また、使用したカメラは、 $1/2''$ CMOS, 130 万画素の単板カラーカメラである。図 16 は実際の撮影での様子である。

図 17, 図 18, 図 19 は撮影画像と、その復元画像である。これらの撮像物は、奥行きが 30mm から 40mm の幅



(a) 提案法



(b) 従来法

図 15 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Peppers]

があり、今回の実験で用いたレンズの被写界深度 11mm を超えているため、通常の撮影では全てに焦点のあった画像を撮影することが出来ない。しかし、提案手法による復元結果では、どの画像も綺麗な全焦点画像が得られていることが確認できる。

5. ま と め

本稿では、テレセントリックレンズを用いて、露光時間中にカメラを移動させて撮影することで、単一画像から全焦点画像を生成する手法を提案した。まず、カメラを光軸に平行に移動することで奥行き不変 PSF が得られることを示した。次にレンズシミュレーターを使って生成した画像から、全焦点画像の復元を行い、センサ面を移動させる従来法と比較して、その有効性を示した。

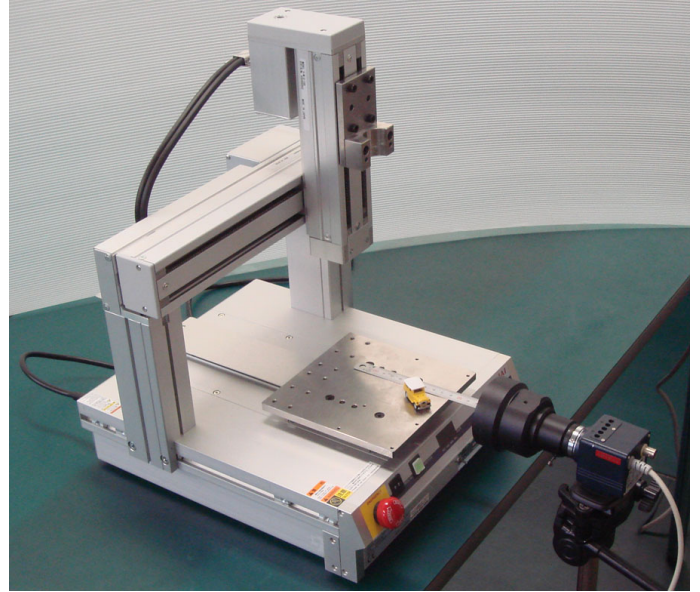


図 16 実画像実験の様子

また、実画像実験において xy ステージ上にある撮像物体を移動させながら撮影することで、特殊なカメラを用いずに、高精度な全焦点画像が得られることを示した。

文 献

- [1] 長原 一, "チュートリアルシリーズ: 符号化撮像", 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM-171, No. 14, pp.1-9, 2010.
- [2] A. Veeraraphavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin: Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture defocusing, *ACM Transaction Graphics*, 2007.
- [3] Hajime Nagahara, Sujit Kuthirummal, Changyin Zhou, and Shree K. Nayar : Flexible Depth of Field Photography, *Proc. European Conf. Computer Vision (ECCV2008)*, No. LNCS 5305, pp.60-73, Oct, 2008.
- [4] A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand, and W. T. Freeman: Motion-Invariant Photography, *SIGGRAPH, ACM Transaction on Graphics*, 2008.
- [5] 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 D-II, Vol. J82-D-II No.11, pp.1912-1920, 1999.
- [6] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin : Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluted Shutter. *ACM Transactions on Graphics* 25, pp.795-804, 2006.
- [7] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, P. Hanrahan: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, *Stanford Tech Report CTR 2005-02*, 2005.
- [8] Q. Shan, J. Jia, A. Agarwala: High-quality Motion Deblurring from a Single Image, *ACM Transactions on Graphics* 27, No.3, Article 73, 2008.
- [9] 田村 秀行: "コンピュータ画像処理", オーム社出版局, pp.117-123, 2002.



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 17 実画像実験: 画像 [Car]



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 18 実画像実験: 画像 [Mouse1]



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 19 実画像実験: 画像 [Mouse2]