論文

IPSFに基づく動きぼけと奥行きぼけの同時復元

Motion and Depth Deblurring Using Integrated PSF

小林 丈之^{†,††}, 内藤 遼介[†], 坂上文彦[†], 正会員 佐藤 淳[†]Takeyuki Kobayashi^{†,††}, Ryosuke Naito[†], Fumihiko Sakaue[†] and Jun Sato[†]

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、奥行きぼけや動きぼけの復元を行う研究が進みつつある。特に、コンピュータショナルフォトグラフィの研究の進展により、被写体の奥行きが一定でない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により、画像中での物体の動きの方向や大きさによらず PSF がほぼ不変となることを示し、この性質を用いることで物体の動きの方向や大きさに依らず動きぼけの復元が可能であることを示す。この撮像方法では、任意の奥行きを持つ物体の奥行きぼけ復元が可能であることがすでに知られている。一方、提案法では任意の奥行きに存在する任意の動きを持つ物体の奥行きぼけと動きぼけを同時に復元することが可能である。実画像実験を行うとともに、レンズシミュレータを用いてぼけ復元精度を定量的に評価することで、提案法の有用性を示す。

キーワード：符号化撮像, PSF, ぼけ復元, 動きぼけ, 全焦点画像

1. ま え が き

カメラにより被写体にピントを合わせるとき、被写体前後においてピントが合う範囲を被写界深度と呼び、被写界深度外に被写体があるとき、撮影画像中においてぼけが発生する。このとき、ぼけの存在する画像からぼけの無い画像を推定する処理をぼけの復元と呼び、これまでに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) の畳み込みであることを利用し、ぼけ画像に対して PSF の逆関数をかけ、デコンボリューションを行うことで復元を行う。このとき、PSF は物体面上の各点の奥行きに依存するため、異なる奥行きにピントの合った複数枚の画像を用いたり、Light Field を取得することで奥行きぼけの復元を行う手法が多数提案されてきた^{1)~3)}。これらの手法では、ぼけの除去や任意の奥行きぼけの生成が可能である反面、複数枚の画像の取得が必要であり、このため時分割での撮影や光路分割による撮影などを行う必要があった。

これに対して、近年コンピュータショナルフォトグラフィの分野において、一枚の撮影画像のみからぼけ復元が可能な符号化撮像法⁴⁾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 defocus⁵⁾⁶⁾ による奥行き推定問題を、カメラの撮像時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

たな手法である。ぼけ関数の符号化のために、Veeraraghavan ら⁷⁾ は最適化による探索により符号化絞りパターンを求めた。理想的なレンズのぼけ関数は、絞り形状そのものである。そこで Veeraraghavan らは、絞り形状そのもののフーリエスペクトルの最小値を評価関数とし、これを最大化することで、PSF の周波数特性のゼロ交差を避けたデコンボリューションに適した広帯域の絞りパターンを探索した。また長原ら⁸⁾ は、露光時間中に撮像素子を前後に移動させることで、物体の奥行きに依らず PSF が一定となる奥行き不変 PSF が得られることを示し、これを用いることで物体の奥行きに依らず全焦点画像を生成する手法を提案した。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る、既存のカメラを用いて実現することはできない。

一方、カメラの露光中に物体が運動することによって生ずる動きぼけに関しても、符号化撮像に基づくぼけ復元法が研究されつつある。Raskar ら⁹⁾ は、露光中のシャッタの開閉を符号化することで動きぼけを安定的に復元する手法を提案した。しかしこの方法ではシャッタを符号化することで撮像素子に入る光量が減少するため、耐ノイズ性が劣化する問題がある。また、Raskar らの手法では、画像中における物体の運動方向と運動速度を何らかの方法で事前に推定しておく必要があった。これに対して Levin ら¹⁰⁾ は、カメラを露光中に放物運動させることで、動きぼけの PSF が運動の大きさに依らず不変となることを示し、この性質を用いることで物体の速度に依らず動きぼけの復元が可能であることを示した。しかし、Levin らの手法においても

2014年3月17日受付, 2014年5月26日再受付, 2014年6月23日採録

[†]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, TEL 052-735-7138)

^{††}株式会社 ATA

(〒444-0802 岡崎市美合町字小豆坂 30 番地, TEL 0564-54-7910)

画像中における物体の運動方向は事前に何らかの方法で推定しておく必要があり、カメラの放物運動の方向を物体の運動方向と一致させる必要があった。一方、坂東ら¹¹⁾は、露光中に撮像素子を撮像面に平行な面上で円運動させることで、物体の動きぼけを復元する手法を提案した。この方法では、PSFの周波数分布の特徴から、ぼけPSFの推定が可能だが、画像中に異なる動きのPSFが混在する場合には、領域の分割と画像再合成が必要となる。

動きぼけと奥行きぼけの復元を同時に行う方法としては、Znamenskiy ら¹²⁾とBando ら¹³⁾が、フォーカススweepによる手法でぼけの同時復元が可能なることを示した。しかし、これらは一定方向の等速運動による動きぼけに限定されており、複雑な動きのぼけ復元に関しては考慮されていない。そこで本稿では、画像中において物体が様々な方向へ様々な大きさで運動する複雑な動きぼけが復元可能なることを示し、撮像物を回転や拡大・縮小させる実験によりその有効性を示す。特に、同時復元可能な条件として、物体の運動する瞬間の速度に着目し、同時復元可能な物体の運動速度とカメラの運動速度との関係を明らかにする。また実画像実験では特殊な装置を使わず、一般的な撮影機器を利用することで本手法の有効性を示す。

2. レンズモデル

本稿では、簡単のため、まず初めに光軸方向に光学系を移動させても像の大きさが変化しないテレセントリックレンズ系を用いて動き不変性を考え、その後これを一般化し通常の透視投影に基づくレンズ系における動き不変PSFについて考える。テレセントリックレンズを用いることで、フォーカススweepによる像の拡大縮小の発生が抑えられるため、撮像面に投影された物体の動きと奥行きぼけを独立に考えることが可能となる。

通常の撮像系では、レンズから物体までの距離を変えたり、レンズから撮像素子までの距離を変えたりと、撮影される像の大きさが変化する。これに対して、物体を光軸に沿って移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を物体側テレセントリックレンズと呼び、撮像面を光軸に沿って移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を像側テレセントリックレンズと呼ぶ。また物体と撮像面の両方を移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を両側テレセントリックレンズと呼ぶ。本節では、図1に示す両側テレセントリックレンズに基づいて説明する。

今、焦点距離が f_1 のレンズ(Lens 1)と焦点距離が f_2 のレンズ(Lens 2)があるとき、図1に示すように、これら2つのレンズの焦点位置に絞りが来るようにこれらを配置することで、両側テレセントリック光学系を構成することができる。ここで、Lens 1から距離 u の位置にある3次元点を撮像したとき、Lens 1への入射光が、Lens 1からの距離が v_1 でLens 2からの距離が u_2 であるような点Aに集光したとする。また、この光が図1に示すようにLens 2によ

図1 両側テレセントリックレンズのモデル

り集光され、Lens 2からの距離が v_2 である点に集光したとする。このとき2つのレンズに関して次式が成り立つ。

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

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{u_2} + \frac{1}{v_2} \quad (2)$$

また、図1に示す通り、絞りの大きさを a 、絞りを通ってLens 2に入射する光の広がりを c 、最終的に撮像面に結像する光の広がり（ぼけの大きさ）を b 、Lens 2から撮像面までの距離を p とすると、三角形の相似関係より次式が成り立つ。

$$\frac{a}{f_2 + u_2} = \frac{c}{u_2} \quad (3)$$

$$\frac{c}{v_2} = \frac{b}{p - v_2} \quad (4)$$

さらに、図1より明らかなように、2つのレンズ間において次式が成り立つ。

$$v_1 = f_1 + f_2 + u_2 \quad (5)$$

以上より、このレンズ系によって生成されるぼけの大きさ b は次式によって表されることがわかる。

$$b = a \left| \frac{f_2 u}{f_1^2} + \frac{p}{f_2} - \frac{f_2}{f_1} - 1 \right| \quad (6)$$

このとき、ぼけの大きさ b が1画素の大きさを超えると画像にぼけが生じ、逆に1画素以下の大きさであればぼけは生じない。

図1より明らかなように、テレセントリックレンズ系では、カメラ内において撮像面を光軸方向に移動させLens 2と撮像面との距離 p を変化させると、撮像面上における投影点の投影中心位置は変化しないが、ぼけの大きさ b は変化する。また、カメラ全体を光軸方向に動かして3次元点までの距離 u を変化させた場合には、この点の撮像面上における投影中心位置は変化しない。しかし、開口を通過してLens 2に入射する光の広がり c は変化的ることから、ぼけの大きさ b は距離 u に応じて変化する。このようにテレセントリックレンズ系では、物体までの距離 u やカメラ内における撮像面位置 p を変化させると、各投影点の投影中心

図 2 ぼけ範囲の時間的な推移

位置は変化せず、ぼけの大きさのみが変化する。

3. IPSF

次に、ある一定時間露光し、この露光中にカメラや撮像面を移動させたときに得られる PSF について考える。このように一定時間積分して得られる PSF を長原ら⁸⁾は IPSF(Integrated PSF) と呼んだ。

ある 3 次元点が撮像面上において点 $\mathbf{m} = [u, v]^T$ に投影されたとする。このとき、投影像が一定の広がり (ぼけ) を持って撮像面に投影されたとすると、撮像面上において点 $\mathbf{m}$ から距離 r の位置にある点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ の輝度は、次式に示すピルボックス関数による PSF によって表せる。

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

ここで、 b はぼけの大きさであり、式 (6) に示す通り 3 次元点までの距離 u と撮像面までの距離 p の関数である。また $\Pi(w)$ は次式に示す矩形関数である。

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

式 (7) に示すように、PSF はレンズから 3 次元点までの距離 u によって異なるため、奥行き変化のある一般のシーンでは、撮像点ごとに PSF は異なる。

ここで、カメラの露光時間中に 3 次元点に対するカメラの距離 u 又はレンズに対する撮像面の距離 p を変化させることを考える。このときの 3 次元点の奥行き変化を $u(t)$ とし、撮像素子の距離変化を $p(t)$ とする。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ため、PSF は時間軸上において積分され次式に示す IPSF が得られる。

$$IP(r) = \int_{T_1}^{T_2} P(r, u(t), p(t)) dt \quad (9)$$

ここで、 T_1 は露光開始時刻であり T_2 は露光終了時刻である。したがって露光時間は $T = T_2 - T_1$ である。

例えば、カメラ全体を光軸方向に一定速度 s_u で並進させた場合、カメラと 3 次元点との距離 u は次式により変化する。

$$u(t) = u_0 + s_u t \quad (10)$$

ここで、 u_0 は $t = 0$ におけるカメラと 3 次元点との距離である。 $t = 0$ で合焦するとすると、 u_0 は合焦時におけるカ

メラと 3 次元点との距離である。また、この場合にはぼけ半径の変化速度は一定となるため、この変化速度を s_b とすると、式 (6) は次式のように表せる。

$$b(t) = |2s_b t| \quad (11)$$

このときのぼけの大きさの時間的な変化は図 2 に示す通りとなり、このときの円錐内の領域がぼけ領域、すなわち 3 次元点から入射した光が広がる範囲となる。合焦点を中心に、時刻 $t = -T/2$ から $t = T/2$ まで露光時間中にカメラを光軸方向に移動させると、式 (7)、式 (9)、式 (11) より、IPSF は次式となる。

$$IP(r) = \begin{cases} \frac{2}{\pi s_b^2} \left(\left| \frac{s_b}{r} \right| - \frac{2}{T} \right), & \left| \frac{r}{s_b} \right| < \frac{T}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

これは、図 2 の円錐内において時間積分を計算したものである。条件式により、露光時間中の円錐に含まれない場合は 0 になる。

4. IPSF の動き不変性

本節では、前節で述べた IPSF が一定の条件のもとでは物体の動きの速さや方向に対してほぼ不変となり、この結果、動きの速さや方向に依らず動きぼけの復元が可能となることを示す。

いま、3 次元空間中の物体が運動しているとし、時刻 t における物体上の 3 次元点 $\mathbf{X}(t)$ がカメラ画像中において点 $\mathbf{m}(t) = [u, v]^T$ に投影されたとする。すると、時刻 t におけるぼけ PSF は、画像上の観測点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ の関数として次式のように表せる。

$$P(\mathbf{x}, u, p) = \frac{4}{\pi b(t)^2} \Pi\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)\|}{b(t)}\right) \quad (13)$$

PSF を点 $\mathbf{m}$ からの距離 r の関数としてではなく観測位置 $\mathbf{x}$ の関数として考えるのは、物体の動きがある場合にはぼけの中心位置 $\mathbf{m}(t)$ が移動するためである。この PSF を時間軸上で積分することで、次式に示す IPSF が得られることがわかる。

$$IP(\mathbf{x}) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{4}{\pi b(t)^2} \Pi\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)\|}{b(t)}\right) dt \quad (14)$$

ここで、露光時間中における投影点 $\mathbf{m}(t)$ の運動が⁹、速度 s_m 、方向 $\mathbf{v}$ の等速運動であり、時刻 $t = 0$ において原点を通過するとすると、 $\mathbf{m}(t)$ は次式のように表せる。

$$\mathbf{m}(t) = s_m t \mathbf{v} \quad (15)$$

また、カメラを露光時間中に速度 s_u で光軸方向に等速運動させた¹⁰⁾とすると、ぼけの大きさ b は式 (11) に示すように一定速度 s_b で変化する。したがって IPSF は、式 (11) および式 (15) を式 (14) に代入することで、次式となる¹¹⁾ことがわかる。

$$IP(\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi s_b^2} \left\{ \lambda_0 \left(\frac{1}{|t_0|} - \frac{2}{T} \right) + \lambda_1 \left(\frac{1}{|t_1|} - \frac{2}{T} \right) \right\} \quad (16)$$

図 3 動きの大きさに対する IPSF の変化

図 4 動きの大きさに対する IPSF の誤差の変化

ここで、 $t_0, t_1 (|t_1| > |t_0|)$ は $|\mathbf{x} - s_m t \mathbf{v}|^2 = s_b^2 t^2$ の解であり、また λ_0, λ_1 は条件により以下の値を取る関数である。

$$t_{0,1} = \frac{-s_m \mathbf{x} \cdot \mathbf{v} \pm \sqrt{s_m^2 (\mathbf{x} \cdot \mathbf{v})^2 + |\mathbf{x}|^2 (s_b^2 - s_m^2)}}{s_b^2 - s_m^2} \quad (17)$$

$$\lambda_0 = \begin{cases} 1, & |t_0| < \frac{T}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1, & (|t_1| < \frac{T}{2}) \wedge (t_0 t_1 < 0) \\ -1, & (|t_1| < \frac{T}{2}) \wedge (t_0 t_1 > 0) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

時間軸 t がぼけ円錐の内部に含まれる場合は図 5 の状態となり式 (16) の第一項と第二項の 2 つの積分区間の和となる。一方、時間軸 t が円錐の内部に含まれない場合は図 6 の状態となり、式 (16) の第一項から第二項の積分区間を減算する必要があるため、 $\lambda_1 = -1$ となる。この時の条件として、 t_0 と t_1 の符号が等しくなる。

露光時間が短い場合には、カメラの運動も物体の運動もほぼ等速運動とみなせるため、式 (16) で考えればよい。

図 3 はぼけ半径の変化速度が $s_b = 1$ である場合において、動きの大きさ s_m を様々に変化させたときに得られる点光源の IPSF である。この図より明らかなように、物体が露光中に運動する場合には、得られる IPSF は動きの速度や方向によって変化する。また物体の動きがない場合 ($s_m = 0$) には IPSF は等方性となるが、物体が動く場合 ($s_m \neq 0$) に

図 5 復元可能な IPSF 式

図 6 復元不可能な IPSF 式

図 7 ぼけ範囲の時間的な推移 ($\mu = 0.8$)

図 8 ぼけ範囲の時間的な推移 ($\mu = 1.4$)

図 9 復元可能

図 10 復元不可能

は IPSF は非等方性となることがわかる。さらに重要な点は、ぼけ半径の変化速度 s_b と投影点の運動速度 s_m との速度比に応じて IPSF の性質が大きく異なることである。ここで、次式に示す速度比 μ を考える。

$$\mu = \left| \frac{s_m}{s_b} \right| \quad (20)$$

図 3 より明らかなように、速度比 μ が 1 以下の場合には、IPSF の等方性は概ね保持されるが、速度比 μ が 1 以上になると IPSF はリボン状となり等方性が大きく崩れる。このときのそれぞれの速度比 μ における IPSF と投影点の運動がない場合における IPSF との違いを評価すると図 4 の通りとなる。図 4 の横軸はぼけ半径の変化速度に対する動きの速度比 μ であり、縦軸はそれぞれの速度比 μ における IPSF と物体運動がない場合の IPSF との二乗誤差を表す。この図より、速度比 μ が 1 以下では IPSF はほぼ不変であるのに対して、速度比 μ が 1 を超えると IPSF の不変性は急激に崩れ違いが大きくなることがわかる。以上より、次式に示す条件を満たす物体運動のもとでは、IPSF はほぼ不変であると考えることができる。

$$\mu \leq 1 \quad (21)$$

図 4 より明らかなように、この条件下では、物体運動の大きさや方向によらず、同一の IPSF を持つものとしてぼけの復元処理を行うことが可能である。

次に、速度比 μ が 1 を超えると不変性が急激に低下する原因について考える。IPSF の計算では、露光中のすべての時刻のぼけ PSF が積算されるが、特に合焦する時刻付

近においてはぼけの大きさ b が小さくなることから積算値 $P(\mathbf{x}, u, p)$ が非常に大きくなる．このため，一般に IPSF は合焦点付近においてその値が非常に大きくなり支配的となる．これは，図 3 のいずれの場合においても，画像中央（合焦点）において輝度が非常に高くなっていることからわかる．ここで，物体の画像中における運動速度 s_m がぼけの変化速度 s_b 以下であれば，PSF の時間的な変化は図 7 のようになり，時間軸 (t 軸) はぼけが成す錐の中に存在する．したがって， $x-y$ 平面において考えると，図 9 に示すように合焦点はいずれの時刻においてもぼけ円の中に含まれる．この結果，合焦点近傍での IPSF の形状はほぼ円形状となり，物体の動きがない場合と比べて大きく変化することはない．一方，運動速度 s_m がぼけの変化速度 s_b を超えると，PSF の時間的な変化は図 8 のようになり，時間軸 (t 軸) はぼけが成す錐の外に出てしまう．したがって， $x-y$ 平面において考えると，図 10 に示すように，合焦時刻以外のすべての時刻において合焦点はぼけ円の外に存在することになる．この結果，IPSF は合焦点においてくびれを持つことになり，物体の動きがない場合と比較すると，その形状が大きく変化する．したがって，物体の運動速度 $|s_m|$ が，ぼけ半径の変化速度 $|s_b|$ 以下であれば，IPSF はほぼ同一とみなすことができ，これを超えると IPSF の不変性が急激に崩れることがわかる．

以上の通り，一定の条件下においては，動きの大きさや方向に依らず IPSF はほぼ不変となる．このため，この IPSF を用いて画像をデコンボリューションすることにより，任意の動きの動きぼけを復元することができる．このとき，IPSF は奥行きに対しても不変であることから，奥行きぼけも同時に復元することができる．したがって，先に述べた運動条件下においては，IPSF を用いることで動きぼけと奥行きぼけを同時に復元することが可能である．ただし，合焦位置は 3 次元点の奥行に応じて異なるため，各点ごとに合焦する時刻が異なる．したがって，物体が露光時間中に運動している場合には奥行きに応じて各点の IPSF の中心（合焦点）が移動する．この結果，ぼけ復元画像中において物体の像が奥行きに応じて運動方向に伸び縮みする．しかし，文字を判読したい場合などにおいては，このような像の伸び縮みは大きな問題とはならない．

5. 一般レンズにおける動き不変性

これまでの，簡単のため平行投影を行うテレセントリックレンズ系に基づいて考えたが，次に奥行きに応じて結像位置が変化する一般の透視投影のレンズ系における動き不変性について考える．

図 11 に示すように，透視投影のレンズ系では物体までの距離 u や撮像面の位置 p に応じて結像位置が変化する．したがって提案法において露光中にカメラや撮像面を光軸方向に移動させると，この間に像の位置が変化する．これは，画像中心から周辺に向けて（あるいは周辺から中心に

図 11 透視投影のレンズ

向けて）投影像が放射状に運動することに等しい．提案法では，画像中における像の動きの速度がぼけの変化速度以下であればぼけ復元が行えるのであった．したがって，このような奥行き変化によって生ずる像の動きも含めて画像中での動きの速度がぼけの変化速度以下であれば IPSF の不変性が保持され，動きぼけと奥行きぼけを同時に復元することができる．

今，物体までの距離 u や撮像面の位置 p を変化させたことによって生ずる投影点の動きが画像面上において方向 $\mathbf{u}$ ，速度 s_z であるとする．このとき，画像中における投影点の動きは，カメラや撮像面を光軸方向に動かしたことによって生ずる動き $s_z \mathbf{u}$ と 3 次元点自身の運動によって生ずる動き $s_m \mathbf{v}$ を合成したものとなる．これを次式のようにその大きさ s_a と方向 $\mathbf{w}$ によって表すことにする．

$$s_a \mathbf{w} = s_m \mathbf{v} + s_z \mathbf{u} \quad (22)$$

ここで，速度比 μ を次式のように定義する．

$$\mu = \left| \frac{s_a}{s_b} \right| \quad (23)$$

すると，次式の条件が各時刻において満たされるとき，合焦点は常にぼけ円内に存在することになる．

$$\mu \leq 1 \quad (24)$$

したがって，一般のレンズ系においては，式 (24) が露光時間中において満たされていれば，物体の動きの大きさ，動きの方向，奥行きによらず，動きぼけと奥行きぼけの同時復元が可能となる．

6. シミュレーション実験

6.1 レンズシミュレータによる評価実験

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，定量的な評価を行うことが難しい．そこで本稿では，任意の 3 次元物体のレンズによるぼけ画像が生成可能なレンズシミュレータを構築し，これにより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った．本シミュレータは，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．ただし理想的なレンズであるとし，収差や周辺光

図 12 従来法 (Levin らの手法) による動きぼけ復元結果: 左から順に, IPSF, 撮影画像, ぼけ復元画像。

図 13 提案法による動きぼけ復元結果: 左から順に, IPSF, 撮影画像, ぼけ復元画像

量低下等については無視する。本実験では, ぼけ関数をピルボックスとし, 2,200 時刻の画像から積算画像を生成した。撮像物体には, 画像がテキストチャとして貼り付けられており, このテキストチャ画像を真値 (ぼけなし画像) とすることで復元画像の定量的な評価を行った。

本評価では, Levin ら¹⁰⁾の運動ぼけ復元法を従来法とし, レンズシミュレータを用いて提案法と従来法における運動物体の撮影画像を生成しぼけ復元することで, これら二つの手法における運動ぼけの復元精度を比較評価した。対象物体は英数字が印字された平面物体とし, ぼけ復元後の文字の視認性と PSNR により評価を行った。提案法では, 合焦距離を中心にカメラを前後に 11 mm 移動させた。また, 焦点距離 $f_1 = 60$ mm, $f_2 = 60$ mm, 絞りの大きさ $a = 10$ mm とした。従来法 (Levin らの手法) では, 合焦距離においてカメラを水平横方向に放物線状の速度分布で運動させた。どちらの手法においても, センサの解像度は 128×128 と

し, 各画素の輝度 (0~255) に対して標準偏差 $\sigma = 0.1$ のガウシアン輝度ノイズを印加した。対象物体の運動パターンは, (a) 停止, (b) 横移動, (c) 縦移動, (d) 斜め移動, (e) 回転, (f) 拡大縮小の 6 種類とした。回転と拡大縮小は, 画像中心を基準としている。

図 12 (a) から (f) に, これら 6 種類の運動パターンにおける従来法 (Levin らの手法) によるぼけ復元結果を, また図 13 (a) から (f) に提案法による復元結果をそれぞれ示す。左列の画像はそれぞれの運動における画像中の 9 箇所位置での IPSF であり, 赤矢印は物体運動を示している。中央列は撮影画像, 右列はぼけ復元結果である。それぞれにおける μ の最大値は, (b) および (c) は 0.46, (d) は 0.65, (e) は 0.98, (f) は 0.86 であった。なお, 本稿におけるデコンボリューションは, すべてウィナー・フィルタ (Wiener filter) を用いて行った。

図 12 の従来法ではカメラを横方向に放物運動している

図 14 ぼけ復元画像

ため、対象物体の運動が横方向である (b) では良好な結果が得られているが、他の運動に関してはぼけの復元が適切に行えていないことがわかる。この結果より、Levin らの手法ではカメラの運動方向が物体の運動方向とうまく一致している場合には高いぼけ復元効果があるが、これらの方向が異なる場合や曲線運動を行う物体の場合には適切にぼけ復元が行えないことがわかる。また全体的にリングングが発生しているが、これは提案法のぼけの大きさと従来法の放物運動の大きさを同等にしたためと考えられる。放物運動を大きくすればリングングが改善されるが画面端の影響を受けるために復元できるエリアが制限されてしまう。

一方、図 13 の提案法では、すべての運動において良好なぼけ復元画像が得られており、真値との PSNR においても、従来法より良い結果が得られている。これらの結果より、提案法では物体の運動速度がぼけの変化速度以下であれば、運動の方向や大きさによらず適切に動きぼけを復元できることがわかる。特に拡大縮小や回転といった動きは、撮影画像の位置で異なる PSF となるため、従来の方法では復元が困難であった (図 12 (e),(f) 左列)。これに対して、提案法では運動の瞬間速度が条件を満たせば PSF が撮影画像の位置によらずほぼ不変となっていることが確認できる (図 13 (e),(f) 左列)。

次に、提案法において物体の運動速度を様々に変化させた場合における動きぼけ復元の精度を評価する。図 14 は、速度比を変化させた場合におけるぼけ復元画像である。(a), (b), (c) は速度比 μ がそれぞれ 0, 0.5, 0.9 の場合であるが、いずれにおいても良好にぼけ復元でき、すべての文字の判読が可能である。一方、(d), (e), (f) は速度比 μ がそれぞれ 1.1, 1.5, 2.0 の場合であるが、これらにおいては復元が正しく行えていないことがわかる。これらの結果より、速度比が 1 以下であれば提案法は有効であることが確認できる。

また図 15 のグラフは、速度比 μ を 0 から 2 まで変化させた場合におけるぼけ復元画像のぼけなし画像に対する PSNR を求めた結果を示す。横軸は速度比 μ であり、縦軸はぼけなし画像 (復元画像の真値) に対する PSNR と

図 15 ぼけ復元画像の PSNR と SSIM

図 16 実画像実験で用いた撮像系

SSIM である。この結果より、速度比が小さい場合には高い PSNR が得られており、ほぼ正確にぼけ復元が行えていることがわかる。一方、速度比が大きくなるに連れて PSNR が減少しており、また SSIM の値が $\mu = 1$ 付近で大きく下がっていることから、提案法の有効範囲が速度比 1 以下であることがわかる。Kodama ら¹⁴⁾の解析において、高周波成分では非常に良い性能を示すものの、低周波成分では一定の歪みが生じることが示されている。つまり、 $\mu < 1$ の条件下では本実験のような文字の視認性を考えた場合、テキストに強く関わる高周波成分が効果的に復元できていると考えられる。

7. 実画像実験

次に、実際のカメラにおいてテレセントリックレンズを用いて撮影された画像から動きぼけの復元を行った結果を示す。本実験では図 16 に示すように、電動ステージと回転台を用いて物体とカメラとの相対運動を生成し撮影を行った。物体の運動は、横方向 (水平方向) への並進運動、縦方向 (垂直方向) への並進運動、およびカメラ光軸に対して垂直な面上での回転運動の 3 種類とした。提案法ではカメラを光軸方向に $s_u = 300$ mm/sec で移動させ、 $T = 0.5$ sec 間開口して IPSF 画像を撮影し、ぼけ復元を行った。比較のため、Levin らの手法¹⁰⁾も電動ステージを用いて実装し評価を行った。Levin らの手法では、カメラを放物線状に速度変化させながら横方向に移動させて IPSF 画像を撮影し、ぼけ復元を行った。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 mm、被写界深度 11 mm、実効 $F = 4$ の C マウントレンズである。また、使用したカ

図 17 実画像実験 (横運動するマウス)

図 18 実画像実験 (縦運動する車)

図 19 実画像実験 (回転運動する文字)

図 20 透視レンズ系におけるぼけ復元結果 [歩行者]

メラは、1/2" CCD、64 万画素の単板カラーカメラである。

図 17、図 18、図 19 は撮影画像と、その復元画像である。それぞれにおいて、(a) はカメラを固定して通常撮影した画像であり、(b) は (a) の状態から撮像物が動いている状態を撮影した画像、(c) は従来法 (Levin らの手法) によりぼけ復元を行った結果、(d) は提案法で撮影した画像、(e) は (d) より IPSF を用いてぼけ復元を行った結果である。これらの撮像物は、30 mm くらいの大きさでありカメラの被写界深度 11 mm を超えているため、通常の撮影ではすべてに焦点のあった画像を撮影することはできない。また、(b) より明らかなように、通常撮影では動きぼけも発

生していることがわかる。図 17 の横運動では、(c) の従来法で動きぼけの除去ができていたが、物体に奥行があるため奥行ぼけは除去できずに残っていることがわかる。図 18 の縦運動と図 19 の回転運動では、(c) の従来法では復元ができない。これは、従来法 (Levin らの手法) においてはカメラの運動方向と対象物体の運動方向とが一致している必要があるためである。一方、提案法のぼけ復元後の画像 (e) では、いずれの運動においてもぼけの除去が適切にできていることが確認できる。これは、提案法では運動の大きさの条件さえ満たされていれば動きの方向には依らずにぼけ復元が行えるためである。さらに、(a) で確認できる奥

行ぼけに関しても同時に復元が行えていることがわかる。

次に、一般の透視レンズを装着したカメラにおける提案法による実験結果を示す。一般のレンズ系では、光軸方向へのカメラ移動や撮像面の移動を行うと、結像位置が移動するが、このような場合であっても画像中での動きの大きさが式 (24) の条件を満たせば提案法により動きぼけの復元が行える。そこで、透視レンズ系において、露光中に撮像面の位置を $x-y$ ステージを用いて光軸方向に移動させ IPSF 画像を取得した。得られた IPSF 画像より動きぼけを復元した結果を図 20 に示す。(a) は IPSF 画像の取得に用いた撮影システムの様子である。カメラは 130 万画素であり、レンズは $f=4.4\text{mm}$, $F=1.6$ のものを用いた。また、露光時間は 100msec とし、撮像面の移動速度は 2mm/sec とした。(b) は室内を歩いている人物を撮影した IPSF 画像である。カメラから人物までの距離は約 3.5m であった。(c) は (b) の IPSF 画像より動きぼけを復元した結果である。また、(d) は同じ露光時間で通常のカメラによって撮影した画像である。(d) より、人の手や足などが異なる方向に異なる大きさで運動しており、従来法では動きぼけの復元が難しいことがわかる。これに対して、提案法では (c) に示すように、手の運動も足の運動も良好にぼけ復元できていることがわかる。以上の結果より、一般のレンズ系においても、提案法を用いることで任意の運動のぼけ復元が可能であることがわかる。

8. む す び

本稿では、露光時間中にカメラを移動させて撮影することで、単一画像から動きぼけと奥行きぼけを同時に復元し全焦点画像を生成する手法を提案した。特に、カメラを光軸方向に移動することで動き不変 PSF が得られることを示し、この動き不変性を用いることで全焦点画像が生成できることを示した。本稿では、簡単のためまず平行投影を行う光学系において動き不変 PSF の解析を行い、次にこれを一般化して透視投影光学系の下でのほぼ動き不変の PSF について考えた。特に、動きぼけと奥行きぼけの瞬間的な速度におけるぼけ除去可能条件を明らかにした。また、実画像実験により、回転や拡大・縮小といった様々な運動が存在する状況下において、テレセントリックレンズおよび一般の透視投影レンズを用いて動きぼけ復元を行い、従来法と比較することで提案法の有効性を示した。

〔文 献〕

- 1) K.Kodama, H.Mo, and A.Kubota: "Simple and fast all-in-focus image reconstruction based on three-dimensional/two-dimensional transform and filtering", IEEE ICASSP2007, 1, pp.769-772 (2007)
- 2) 児玉 和也, 久保田 彰: "単一のレンズ系からの多様なボケ味の生成", 映像情報メディア学会誌, **65**, 3, pp.372-381 (2011)
- 3) A.Levin and F.Durand: "Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior", IEEE CVPR2010, pp.1831-1838 (2010)
- 4) 長原 一: "チュートリアルシリーズ: 符号化撮像", 情報学研報, **CVIM-171**, 14, pp.1-9 (2010)

- 5) A.P. Pentland: "A New Sense for Depth of Field", IEEE Trans. PAMI, **9**, 4, pp.523-531 (1987)
- 6) M. Subbarao and G. Surya: "Depth from Defocus: A spatial domain approach", International Journal of Computer Vision, **13**, 3, pp.271-294 (1994)
- 7) 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 (2007)
- 8) Hajime Nagahara, Sujit Kuthirummal, Changyin Zhou, and Shree K. Nayar: "Flexible Depth of Field Photography", Proc. European Conf. Computer Vision, LNCS 5305, pp.60-73 (Oct. 2008)
- 9) R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin: "Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter". ACM Trans. Graphics **25**, pp.795-804 (2006)
- 10) A. Levin, P. Sand, T.S. Cho, F. Durand, and W.T. Freeman: "Motion-Invariant Photography", SIGGRAPH, ACM Trans. Graphics (2008)
- 11) Yosuke Bando, Bing-Yu Chen, and Tomoyuki Nishita: "Motion Deblurring from a Single Image using Circular Sensor Motion", Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics 2011), **30**, 7, pp. 1869-1878 (2011)
- 12) Dmitry Znamenskiy, Harold Schmeitz, and Remco Muijs: "Motion invariant imaging by means of focal sweep". IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp. 91-92 (2011)
- 13) Yosuke Bando, Henry Holtzman, and Ramesh Raskar: "Near-Invariant Blur for Depth and 2D Motion via Time-Varying Light Field Analysis". ACM Transactions on Graphics, **32**, 2, Article 13, (April. 2013)
- 14) Kazuya Kodama and Akira Kubota: "Efficient Reconstruction of All-in-Focus Images Through Shifted Pinholes from Multi-Focus Images for Dense Light Field Synthesis and Rendering". IEEE Transactions on Image Processing, **22**, 11, pp. 4407-4421 (2013)

こばやし たけゆき
小林 丈之 1998 年, 名古屋工業大学工学部卒業。2000 年, 名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。現在, 名古屋工業大学工学部博士後期課程に在籍, 及び (株)ATA 勤務。画像処理検査装置の研究開発に従事。

ないとう りょうすけ
内藤 遼介 2011 年, 名古屋工業大学工学部卒業。現在, 同大学大学院修士課程に在籍。符号化撮像に関する研究に従事。

さかうえ ふみひこ
坂上 文彦 2003 年, 岡山大学大学院博士前期課程了。2006 年, 同大学院博士後期課程了。2006 年, より名古屋工業大学助手。2007 年, より名古屋工業大学助教。2010 年, より米国カーネギーメロン大学客員研究員。コンピュータビジョンの研究を行っている。工博。

さとう じゅん
佐藤 淳 1984 年, 名古屋工業大学工学部卒業。1996 年, ケンブリッジ大大学院博士課程了。同年ケンブリッジ大・工・助手。1998 年, 名古屋工業大学工学部助教授。2004 年より同大学大学院情報工学専攻・教授。この間に, ATR 人間情報通信研究所客員研究員など。コンピュータビジョン, 視覚誘導, 視覚的ユーザインタフェースの研究に従事。博士 (PhD)。著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学—」(コロナ社) など。BMVC'94 最優秀科学論文賞, BMVC'97 最優秀科学論文賞, 第 5 回画像センシングシンポジウム論文賞など受賞。正会員。