

# 能動絞りカメラによるモーションブラーの速度不変符号化

園田 聡葵<sup>1,a)</sup> 長原 一<sup>1,b)</sup> 谷口 倫一郎<sup>1,c)</sup>

概要：カメラで画像を撮像するとき、被写体やカメラの動きによって画像にはモーションブラー（動きボケ）が表れる。このモーションブラーは、物体の動きの速度に依存するため、その復元は従来より困難な問題であった。本研究では、カメラの絞りの形状を高速に切り替えることができる能動絞りカメラにより、モーションブラーの符号化を行う。能動絞りの開口位置を移動させることで仮想的に等加速度のカメラ運動を生成することで、モーションブラー PSF を物体の速度に対して不変にすることができる。これにより、シーン中の物体の速度や PSF の推定の必要なくモーションブラー画像の復元を行うことができる。本文では、能動絞りカメラによるカメラ運動や PSF 生成のモデル化を行う。また、実際の能動カメラのプロトタイプを用いてモーションブラーの動き不変符号化と画像復元を実証した。

キーワード：モーションブラー，能動絞り，符号化撮像，コンピューショナルフォトグラフィ

## 1. はじめに

カメラで画像を撮影するとき、撮影者の意図に反する「失敗」写真を作り出す原因として、モーションブラー（動きボケ）がある。モーションブラーとは、動いている物体を撮影するときや、撮影者の手のブレなどによって生じるボケのことである。モーションブラーは、撮影対象の動きやシーンの躍動感を表現するために作画的に用いられることもあるが、一般的には、画像の鮮明さを失わせ、情報量を落とすので、クリアな画像を得るためには避けるべき問題である。

モーションブラーの抑制を目的として、従来より様々な研究が行われてきた。最も単純なモーションブラーの解決法として、カメラの露光時間を短くすることが挙げられる。通常のカメラでは、撮影しない間撮像センサはシャッターで覆われており、光は入らない。撮影者が撮影ボタンを押すと、シャッターが開き、ある一定時間撮像センサが光を取り込んで、その後シャッターが閉じる。このシャッターが開いている間撮像センサが光を取り込む時間を露光時間と呼ぶ。露光時間を短くすれば、撮影時に被写体が動く距離が小さくなり、モーションブラーは小さくなる。しかしこの方法では入射光量も小さくなるので、撮像画像は SN 比が低下する。

手ブレによって発生するモーションブラー抑制に関しては、近年のカメラに多く搭載されているレンズシフトによる手ブレ補正装置が挙げられる [1]。レンズシフトでは加速度センサから得られたカメラの動きに基づき、その動きを相殺するようにレンズを動かすことで、手ブレによるモーションブラーを防止している。ただし、この装置は被写体の動きによって発生するモーションブラーには対応できない。

一方で、モーションブラーによりボケた画像をデコンボリューションにより、復元しようとするアプローチが長年研究されている [2]。しかしながら、モーションブラーは、物体の運動毎に異なるため、デコンボリューションによるモーションブラー除去には、対象毎に PSF も同時に推定する必要がある。これに対して、単一の画像 [3], [4], [5], [6] や複数の画像 [7], [8], [9] により PSF の推定とボケ復元を実現する手法が提案されている。ただし、通常のカメラのモーションブラーの PSF は、そのフーリエスペクトルにゼロ交差を多く含む。これは、ボケによる画像劣化により特定の周波数情報を失うことを表し、デコンボリューションを用いても本質的にボケ画像を復元できないことを示している。これに対して、カメラの光学系を工夫することで、モーションブラー PSF の特性そのものを制御することで、ボケ復元や PSF の推定を容易にしようとする符号化撮像が近年様々な方法で提案されている [10]。

Raskar ら [11] は、一枚の画像の撮像中にサブシャッターを切ることでモーションブラー PSF の周波数特性を広帯域化し、安定した復元を実現する符号化露光を提案した。

<sup>1</sup> 九州大学  
Kyushu University

a) sonoda@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

b) nagahara@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

c) rin@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

符号化露光において、得られる PSF は被写体の速度に依存するため、モーションブラーの復元には被写体の速度や移動の方向を撮像画像から推定する必要がある。Agrawal ら [12] は、符号化露光のパターンを改良することで、PSF の広帯域化とともに被写体の運動推定を容易にした。ただし符号化露光はサブシャッターを切り入射光を遮ることで符号化しているため、撮像画像の SN 比的には不利である。

Levin ら [13] は、露光中に画像センサを被写体の動きに沿った方向に等加速度運動させることで、広帯域かつモーションブラーが被写体の速度に非依存になる、動き不変撮像という手法を提案した。即ち、この手法では PSF の形状が運動によらないため、異なる動きの被写体がシーン中に存在しても、被写体の速度推定や領域推定なしにモーションブラーの除去が可能となる。また、動き不変撮像では符号化露光とは異なりシャッターを開放したまま PSF を符号化できるため、SN 比の観点において有利である。しかしながら、この手法では被写体の動きが 1 次元の等速直線運動に制限されるため、被写体の 2 次元平面の動きには対応できない。またカメラの等加速度運動の実現のため、機械的な機構を必要とする。基本的に、このような機械的な機構は、摩擦などによる機器自体の経年劣化が問題となり実用性に乏しい。

Cho ら [14] は、前述の動き不変撮像の拡張として、カメラをイメージセンサ平面に平行に 2 軸に等加速度直線運動させて撮像した 2 枚の画像を用いることで、PSF の広帯域化を、2 次元運動に拡張する手法を提案した。ただし、この方法では被写体の動きに対する PSF の不変性は崩れているので、撮像画像から被写体の動きの推定を行う必要はある。また坂東ら [15] も画像センサを円運動させることで、Cho らの手法と同様に PSF の広帯域化を任意の 2 次元平面上の動きに拡張した。

本研究では、能動絞りカメラ [16] を用いて動き不変撮像を実現し、対象の動きに依存しないモーションブラー除去を行う手法を提案する。本研究で用いる能動絞りカメラは、カメラの絞りに反射型液晶素子 LCoS を用いることで電気信号により任意の形状の絞りを切り替えて撮像することが可能である。このカメラでは能動絞りの開口位置を変化させることで、光学的にカメラの撮影視点を移動させることができる。即ち、従来手法のようにカメラや撮像センサそのものを機械的に運動させなくとも、光学的に動き不変撮像が実現できる。これにより動き不変撮像によるモーションブラー除去の実現性や実用性を向上できる。

本文では、能動絞りによる光学的なカメラ運動をモデル化し、動き不変撮像に必要な絞り開口位置の運動を明らかにする。得られた絞り開口位置に基づいて生成した絞りパターンを用いて実験を行い、実際に実機を用いて、動き不変撮像の応用で運動の異なる被写体を含むシーンのモーションブラーが除去できることを示す。

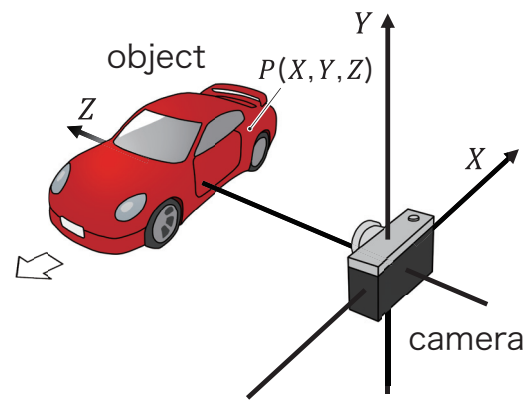


図 1 カメラとシーンの座標系

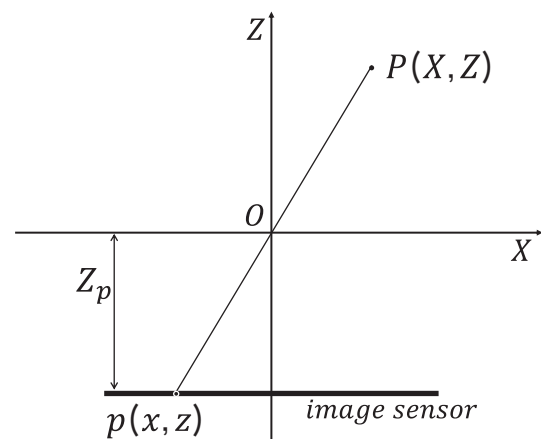


図 2 通常のカメラの射影幾何

## 2. 能動絞りカメラを用いた動き不変撮像

通常のカメラを用いると、異なる方向や速度で移動する被写体は長さも形状も異なるモーションブラーとして撮像される。これらのモーションブラーを除去するためには、一般的には被写体の運動を個々に推定しなければならない。それに対して Levin ら [13] は、カメラを等加速度で平行移動させながら撮像することでモーションブラー PSF が被写体の動きにかかわらずほぼ同じ形状となる動き不変撮像をカメラ運動により実現した。この動き不変性により、モーションブラーを含む撮像画像から単一の PSF でデコンボリューションすることで、全ての被写体のモーションブラーが除去できる。本研究では、Levin らの動き不変撮像をカメラ運動に代わり、能動絞りによる符号化によって実現する。本章では、2.1 節で動き不変撮像を説明する。次に、2.2 節で能動絞りによるカメラ運動との実現と、このカメラで実現されるモーションブラー PSF のモデル化を行う。

## 2.1 動き不変撮像

被写体の動きによって生じるモーションブラーのボケ広がり関数 (PSF) をモデル化するために、まずカメラの撮像モデルを考える。図 1 に示すように、カメラのレンズ中心は世界座標の原点にあり、光軸は  $z$  軸に沿っているものと仮定する。また、シーンの任意の点を  $P(X, Y, Z)$  と定義する。簡単のため、シーン中の点  $P(X, Y, Z)$  が、画像の点  $p(x, y)$  に射影される関係を  $X-Z$  平面について表すと、図 2 のように表せる。このとき、ピンホールカメラモデルにより、シーン中の点  $P(X, Z)$  は、画像平面 ( $Z = -Z_p$ ) 上の点  $p(x)$  に射影され、

$$x = \alpha X, \quad \alpha = \frac{-Z_p}{Z}, \quad (1)$$

と表される。ここで、点  $P(X, Z)$  は、シーン中の動物体上の点であり、 $X$  軸に平行に  $X(t)$  で移動すると考える。また、カメラも同様に  $X$  軸に平行に  $X_c(t)$  で移動するとすると、 $P$  の画像中の射影点  $p(x)$  の座標の時間変化  $x(t)$  は次のように表される。

$$x(t) = \alpha(X(t) - X_c(t)). \quad (2)$$

カメラは、画像センサ上のそれぞれの画素が露光時間中に受け取る光量の合計として画像を撮影する。つまり、移動物体から生じるモーションブラーの PSF は、画像上の射影点  $p(x(t))$  の移動軌跡として求められ、次式のように表される。

$$\phi(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \delta(x - x(t)) dt. \quad (3)$$

ここで  $\delta(x)$  はディラックのデルタ関数で、 $2T(t = [-T, T])$  は、カメラの露光時間である。

ここで、物体の移動  $X(t)$  を等速直線運動、カメラは静止している ( $X_c(t) = 0$ ) と仮定すると式 4 のように表され、その射影は、式 2 より式 5 のように表される。

$$X(t) = st + X(0). \quad (4)$$

$$x(t) = \alpha(st + X(0)) = \alpha st + x(0). \quad (5)$$

ここで  $s$  は物体の移動速度、 $X(0)$  は  $t = 0$  時の物体上の点  $P$ 、 $x(0) = \alpha X(0)$  はその画像面での対応点  $p$  の対応を表し、PSF の基準座標となる。PSF は画像中の場所に依存しないと仮定すると、基準座標  $x(0)$  は無視できることから、新たに PSF の座標系を、

$$x'(t) = x(t) - x(0), \quad (6)$$

と定義すると、図 3-a に示されるような傾き  $1/\alpha v$  の直線として表される。その結果、等速直線運動をする物体の PSF は、式 3 および式 5 より次のように表される。

$$\phi(x') = \begin{cases} \frac{1}{2T\alpha s}, & \text{if } -\alpha s T < x' < \alpha s T \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

この様に、等速直線運動の PSF は図 4-a に示すようなピルボックス関数として観測される。この式や図 4-a に示されるように、通常のカメラに現れるモーションブラーの PSF は物体の移動速度  $s$  に依存することが分かる。

次に、カメラも平行移動すると仮定すると、射影点  $p$  の軌跡は同様に、

$$x'(t) = \alpha(st - vt) = \alpha(s - v)t, \quad (8)$$

と書ける。ここで、 $v$  はカメラの移動速度を示す。この式より、物体の見かけの速度は、物体の速度  $s$  とカメラの速度  $v$  の差として表され、図 3-b のように  $x'(t)$  軌跡の傾きを制御できる。すなわち、カメラの移動によりモーションブラー PSF を式 9 のように符号化できる。

$$\phi(x') = \begin{cases} \frac{1}{2T\alpha(s-v)}, & \text{if } -\alpha(s-v)T < x' < \alpha(s-v)T \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

具体的には、物体の移動速度とカメラの移動速度が同じとき ( $s = v$ )、図 4-b に示すように、式 9 はデルタ関数となるため、特定の速度の物体のボケを回避することができる。ただし、図 4-b から分かるように、カメラの速度と異なる物体は、静止物体も含めてボケをもち、モーションブラーの速度依存は依然として残る。

これに対して、カメラに放物運動を用いると射影点  $p$  の軌跡は次のようにモデル化できる。

$$x'(t) = \alpha(st - at^2). \quad (10)$$

式 10 より、図 3-c に示されるように、射影点  $p$  は放物線の軌跡を示す。その結果、式 10 および式 3 より、その PSF は次式のように表される。

$$\phi(x') = \frac{\lambda(x')}{2T\sqrt{\alpha^2 s^2 - 4\alpha a x'}}, \quad (11)$$

$$\lambda(x') = \begin{cases} 2, & \frac{\alpha s^2}{4a} \leq x' < \alpha^2(aT^2 - sT) \\ 1, & \alpha^2(aT^2 - sT) < x' < \alpha^2(aT^2 + sT) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

その結果、図 4-c に示すように、得られる PSF の形状は物体の速度  $s$  に依存せず、ほぼ同様の形状となる。このことから、単一の PSF により異なるモーションブラーをデコンボリューションにより復元できる [13]。

## 2.2 能動絞りによるカメラ運動の実現とモーションブラー PSF のモデル化

カメラの絞りの中心は、射影幾何における射影中心であるため、この絞りの位置を変化させることで射影変化を実現できる。本研究では、能動絞りカメラの絞りパターンを時間的に変化させることにより、絞り位置を時間的に移動し、動き不変撮像に必要なカメラ運動を仮想的に実現する。

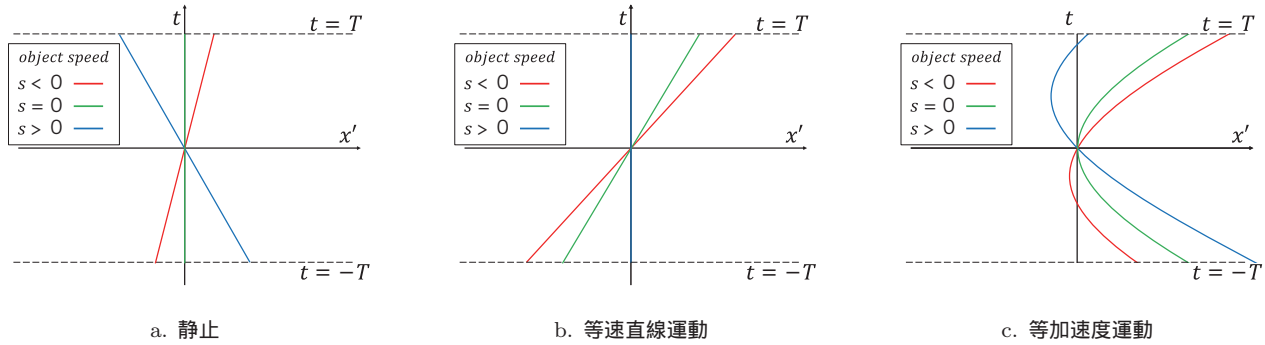


図 3 カメラの運動による射影点の軌跡

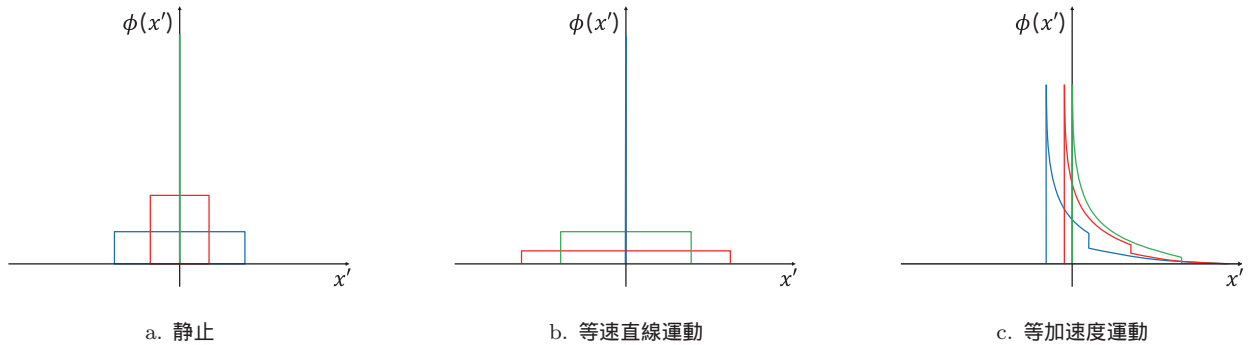


図 4 カメラの運動によるモーションブラー PSF

図 5 に能動絞りカメラの射影幾何を示す．前節と同様に簡単のため，図 5 は  $X - Z$  空間について示しており，シーン中の任意の点を  $P(X, Z)$ ，絞りを  $Z = 0$  の平面，画像面 ( $Z = -Z_p$ ) 上の点を  $p(x)$  として示している．ここでレンズの焦点距離を  $f$  とすると，点  $P$  の集光点  $Q$  の距離  $Z_q$  はガウスのレンズ則により次の様な関係で表される．

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_q}. \quad (12)$$

ここで，図 5 のように，絞りをピンホールで位置を  $A(X_a, 0)$  と設定すると，点  $P$  から発せられた光線は，絞り位置  $A$  を通りレンズの屈折を受けてレンズの集光点  $Q$  に向かい，画像上の点  $p$  として射影される．この射影点  $p$  の射影の関係は次式のようにモデル化できる．

$$x(t) = \alpha X(t) - \beta X_a(t), \quad (13)$$

$$\beta = Z_p \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_p} \right).$$

式 2 と式 13 より，能動絞りカメラの射影において，物体の動きは通常のカメラと同様であるが，カメラと絞りでは移動量が異なることが分かる．具体的には，式 13 と式 2 より，次式のような比で絞りに等加速度運動を設定することで，通常の動き不変撮像と同様に式 11 に示した動き不変 PSF を完全に再現することができる．

$$X_a(t) = \frac{\alpha}{\beta} X_c(t) = \frac{\alpha}{\beta} at^2. \quad (14)$$

ただし，式 13 と式 12 より，レンズ焦点と撮像面の距離が

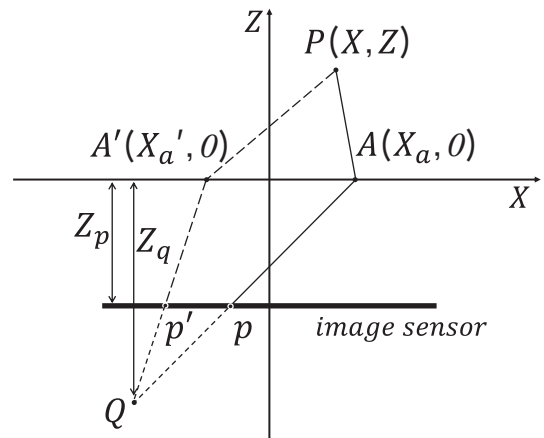


図 5 能動絞りによる仮想カメラ移動モデル

同じ ( $Z_p = Z_q$ ) 場合は，係数  $\beta$  が 0 となることから，絞りによる視差が生まれないことに注意されたい．

実際のカメラにおいて絞りの形状は，図 5 のようなピンホールではなく，有限の開口半径  $D$  をもつ．絞りの開口半径  $D$  を大きくすると画像は明るくなるが， $L_a$  の幅を持つ絞り表示部に表現できる開口位置の最大位置差  $\Delta X_a$  が小さくなり (式 15)，表現可能な最大加速度が制限される．

$$\Delta X_a = L_a - 2D. \quad (15)$$

また，開口半径  $D$  に比例してレンズで生じる静的 PSF の半径  $d$  は大きくなる．この関係を図 6 に示す．画像の射影点  $p$  に現れる静的 PSF の半径  $d$  は，次の様にモデル化で

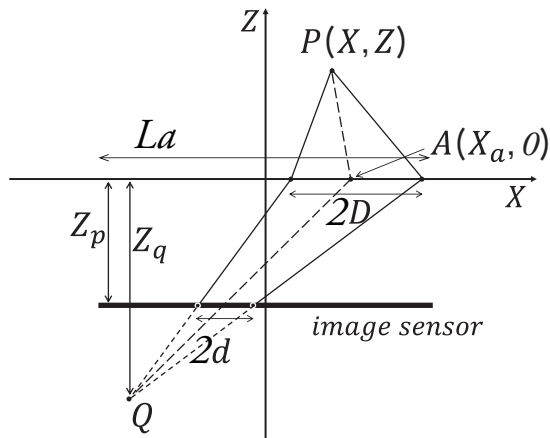


図 6 能動絞りとの静的 PSF の関係

きる。

$$d = -Z_p \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_p} \right) D = -\beta D. \quad (16)$$

ここで、式 13 および式 16 より、絞りにより仮想カメラの運動を大きく設定したいときには、画像の静的 PSF の半径  $d$  も必然的に大きくなるのがわかる。この様にして得られる半径  $d$  の静的 PSF を  $\psi(x, y)$  とすると、実際に得られるモーションブラー関数は次式のように、この静的 PSF 関数と式 11 で表される時間 PSF 関数のたたみ込みで表される。

$$\Phi(x, y) = \phi(x) * \psi(x, y). \quad (17)$$

ぼけ復元のためのデコンボリューションにはこの  $\Phi(x, y)$  を復元のための PSF として用いる。

### 3. シミュレーションによる検討と最適化

#### 3.1 物体の速度とカメラ運動の検討

式 11 に示すように、本研究で提案した速度不変 PSF の形状は、物体の速度  $s$  とカメラの等加速度運動の加速度  $a$  をパラメータとして変化する。つまり、モーションブラーをもたらすシーン中の物体の速度の多様性(実際には対応できる最大速度)により、PSF の不変性や復元画像の画質は符号化に必要なカメラモーションの加速度  $a$  に依存すると思われる。ここでは、この物体の速度  $s$  とカメラの加速度  $a$  と復元画質の関係をシミュレーション実験により検証した。実験では、任意の自然画像 30 枚を理想のシーン画像として用いた。実験では、画像中での物体の速度  $\alpha s$  を 0-50 pixels/s, カメラの加速度の画像空間換算  $\alpha a$  を { 8, 16, 32, 64, 128 } の 5 通りに設定して、仮想的に動きのある物体を含むシーンを符号化撮像した画像を生成した。シミュレーション符号化撮像画像に、ノイズとして平均 0 で標準偏差 0.001 のガウスノイズを添加した。このようにし

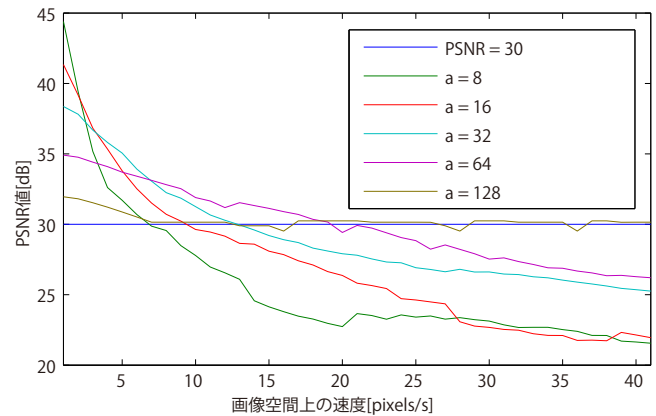


図 7 異なるカメラ加速度設定における物体の速度と PSNR の関係

て得られたシミュレーション符号化撮像画像を、速度不変性を仮定して物体の速度  $s = 0$  時の PSF でデコンボリューションを行いぼけ復元を行った。復元画像の画質や不変性は PSNR を用いて評価した。図 7 に、画像中での物体の速度  $\alpha s$  に対する PSNR の変化をグラフとして示した。このグラフは使用した 30 種類の画像の PSNR の平均をプロットしている。

図 7 より、画像中のカメラ運動の加速度  $\alpha a$  は、画像中の物体の速度  $\alpha s$  が小さい場合は PSNR が高いが、速度が大きくなるにつれて急激に PSNR が悪化しているのがわかる。逆に加速度  $\alpha a$  が大きくなると、PSNR のピークは下がるが速度に対する悪化の傾きが緩くなっているのがわかる。これは、 $\alpha a$  が大きい方がモーションブラー PSF の不変性が大きくなり、より広い範囲の物体の速度まで対応できることが示されている。ただし、 $\alpha a$  が大きくなるとカメラの運動をもたらすぼけが大きくなることから、PSNR のピーク性能が下がるというトレードオフの関係がある。つまり、想定するシーン中の物体の最大速度に合わせて  $\alpha a$  を設定することとなる。具体的には、ここで要求画質を 30dB と仮定しそれ以上は視覚的には判断できないとすると、図 7 の 30dB ラインとプロットの交点、モーションブラーの不変性を実現できる物体の最大速度であると実験的に求める事ができる。

#### 3.2 絞りの大きさや焦点距離の検討

実際のカメラの絞りにはピンホールではなく有限の開口の絞りを用いる。絞り半径  $D$  の大きさは入射光量の観点から復元画質に影響し、静止 PSF 半径  $d$  は復元対象のボケ半径に関係するので、復元画質にもまた影響する。両者とも最終的な復元画質に影響し、そのサイズは  $D$  は大きく、 $d$  は小さくなるのが望ましい。式 16 に示したように、 $d$  は  $D$  に比例するので、小さな  $d$  と大きな  $D$  は両立しない。最適な静止 PSF 半径(もしくは絞り半径か焦点距離)と加速度の設定を調べるため、復元画質との関係をシミュレーション実験により検証した。実験では任意の自然画像 30

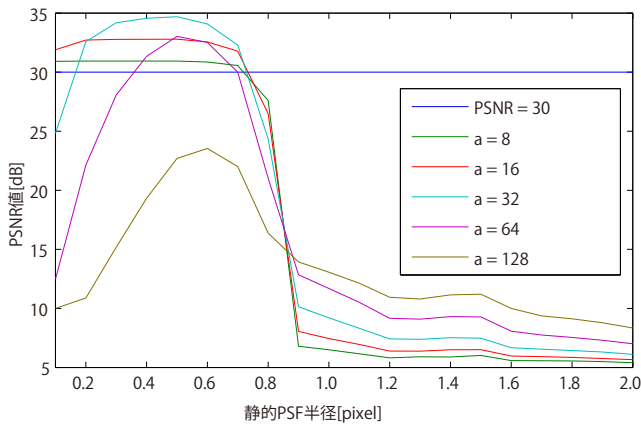


図 8 異なるカメラ加速度設定における最小静止 PSF の半径と PSNR の関係

枚を理想のシーン画像として用いた。撮像の際生じる静止 PSF は、半径  $d$  のピルボックス関数を用いて生成した。ここで  $d$  は、0.1-2.0 pixels の範囲内を 0.1 pixel 刻みで設定した。更に、画像中の物体の速度は常に 5pixels/s に設定してシミュレーションモーションブラー画像を生成した。絞り半径が 10 pixels のときに生じるノイズが平均 0、標準偏差 0.001 のガウスノイズだとして、絞り半径  $D$  に対し添加するガウスノイズの標準偏差に  $(\frac{10}{D})^2(0.001)$  を用いた。このようにして得られたシミュレーションぼけ画像を、同じ加速度、同じ静止 PSF 半径、画像中の物体の速度  $s = 0$  の PSF でデコンボリューションを行いぼけ復元を行った。復元画像の画質の評価には PSNR を用いた。また、画像空間上のカメラ加速度には { 8, 16, 32, 64, 128 } の 5 種類を用いた。図 8 に静止 PSF 半径  $d$  に対する PSNR の変化をグラフとして示した。このグラフは使用した 30 種類の画像の PSNR の平均をプロットしている。図 8 より、全ての加速度曲線は  $d = 0.9$  pixels で急激に PSNR が落ち込んでいる。静止 PSF 半径が大きくなるほど絞り半径も伴って大きくなるので SN 比はよくなっていくはずだが、それ以上に周波数空間上の高周波成分が減衰が大きく画質に影響していることがわかる。

具体的にここで要求画質を 30dB と仮定すると、図 8 の 30dB ラインを超える加速度と静止 PSF 半径の組合せが最適な設定であると考えられる。よって、PSNR 曲線と 30dB ラインの交点から、動き不変性を実現する最適な速度が実験的に得られる。

#### 4. 実験

図 9 に示す能動絞りカメラの試作機 [16] を用いて、実シーンにおいてモーションブラーの符号化撮像を行った。また、この試作機により撮影された符号化画像を用いてモーションブラーの復元を行った。試作機のスペックを表 1 に示す。

実験に用いた対象のシーンは、図 10 に示すような、電池

表 1 試作機のスペック

Image resolution	1280 × 960
Image acquisition frame rate	15fps
Aperture resolution	1280 × 1024
Aperture frame rate	365fps
Minimum F-number	2.8
FOV	46 °
Actual aperture contrast	372:1
Light transmittance	16.49 %
Focal distance	24.8mm

で駆動する電車の玩具を用いた。この電車を図 11 に示すように対象から 2.5m の距離で真横から撮影した。この撮影環境において、電車は画像面換算で速度 0.51 pixels/ms の等速直線運動として現れる。カメラの露光時間を 45 ms と設定したので、通常の撮影では図 11 から分かるように約 23 pixels のモーションブラーとして現れる。この実験に使用した試作カメラの能動絞りの最短表示時間は 2.741 ms であることから、露光中に表示できる絞りパターンは 16 枚になる。絞り表示部の横幅 1280 pixels に対し、表示する円形絞りの直径  $2D$  を 289 pixels、レンズの焦点面  $Z_q$  を 24.9 mm に設定した。これらの条件から、画像換算で  $1.2425 \text{ pixels/ms}^2$  の等加速度運動によりモーションブラーを符号化する。

この符号化撮像により得られた画像を図 12 に示す。図 12 では、モーションブラーの符号化により静止した背景も等速度運動中の電車も一緒にボケている。デコンボリューションに用いる PSF は、静止した点光源を事前に撮影することにより得られた計測 PSF を用いた。図 13 に、撮像画像 (図 12) をこの単一の計測 PSF でデコンボリューションした結果を示す。この結果より、図 11 の通常撮像の結果と比較して、エッジがはっきりしておりモーションブラーがデコンボリューションにより除去できていることがわかる。また、モーションブラーの速度不変性から、速度推定やセグメンテーションの必要なく、静止した背景に関しても同様に復元できていることがわかる。一方で、露光時間を短縮することによる通常のモーションブラー抑制撮像とも比較した。ここでは、物体の運動からモーションブラーが生じない最大の露光時間として露光時間を 4 ms に変更して撮像した。この短時間露光画像を図 14 に示す。短時間露光画像 (図 14) では、モーションブラーは抑制できているが入射光量が露光時間に伴い  $\frac{1}{10}$  以下に落ちているので暗い画像として撮像され、色の階調も落ちている。

#### 5. まとめ

本研究では能動絞りカメラを用いて動き不変撮像を実現し、機械的な機構を用いず、かつ対象の動きに依存しないモーションブラー除去を行う手法を提案した。本文では、能動絞りによる光学的なカメラ運動をモデル化し、動き不



図 9 能動絞りカメラ試作機



図 10 実験シーン

変撮像に必要な絞り開口位置の運動を明らかにした。また、動き不変撮像の際、モーションブラーを生む被写体の速度  $s$  と等加速度運動するカメラの加速度  $a$  と復元画質の関係をシミュレーション実験により検証し、モーションブラーの不変性を実現できるパラメータの組合せについて調べた。次いで動き不変撮像を能動絞りカメラで実行するとき、復元画質に大きく影響する絞りの大きさと絞り開口位置の加速度と復元画質の関係もシミュレーション実験により検証し、用いるべき絞りの大きさを調べた。更に実際の能動絞りカメラの試作機を使用して、運動の異なる被写体を含む実験シーンのモーションブラーの動き不変符号化と画像復元を実証した。

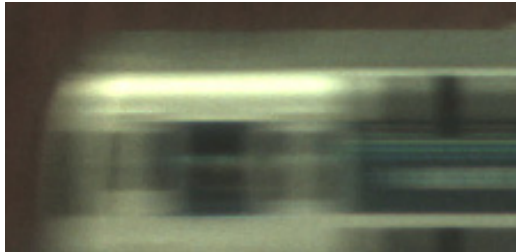
#### 参考文献

- [1] Canon, “EF Lens Work III, The Eyes of EOS”, Canon Inc. Lens Product Group.
- [2] P. Jansson, “Deconvolution of Image and Spectra”, Academic Press, 2nd edition, 1997.
- [3] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S. T. Roweis, and W. T. Freeman, “Removing camera shake from a single photograph”, ACM Trans. Graph., 25(3):787-794, 2006.
- [4] N. Joshi, R. Szeliski, and D. Kriegman, “PSF estimation using sharp edge prediction”, Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, June 2008.
- [5] Q. Shan, J. Jia, and A. Agarwala, “High-quality motion deblurring from a single image”, ACM Trans. Graph.,

- 27(3):1-10, 2008.
- [6] L. Yuan, J. Sun, L. Quan, and H.-Y. Shum, “Progressive interscale and intra-scale non-blind image deconvolution”, ACM Trans. Graph., 27(3):1-10, 2008.
- [7] M. Ben-ezra, AND S. K. Nayar, “Motion-based motion deblurring”, IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligence 2004.
- [8] L. Yuan, J. Sun, L. Quan, and H.-Y. Shum, “Image deblurring with blurred/noisy image pairs”, ACM Trans. Graph., 26(3):1, 2007.
- [9] L. Bar, B. Berkels, G. Sapiro, M. Rump, “A variational framework for simultaneous motion estimation and restoration of motion-blurred video”, Int. Conf. Computer Vision, 2007.
- [10] 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, 1-9, Mar. 2010.
- [11] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin, “Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter”, ACM Trans. Graph., 25(3):795-804, 2006.
- [12] A. Agrawal, Y. Xu, “Coded Exposure Deblurring: Optimized Codes for PSF Estimation and Invertibility”, IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2009.
- [13] A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand, W. T. Freeman, “Motion-Invariant Photography”, ACM Trans. Graph. 27, 3 August, 71, 2008.
- [14] T. S. Cho, A. Levin, F. Durand, W. T. Freeman, “Motion blur removal with orthogonal parabolic exposures”, Int. Conf. Computational Photography, 2010.
- [15] Y. Bando, B. Y. Chen, T. Nishita, “Motion Deblurring from a Single Image using Circular Sensor Motion”, Pacific Graphics, vol.30, No.7, 2011.
- [16] Hajime Nagahara and Changyin Zhou and Takuya Watanabe and Hiroshi Ishiguro and Shree Nayar, “Programmable Aperture Camera Using LCoS”, Proc. European Conf. Computer Vision (ECCV2010), No. LNCS6316, 337-350, Sep, 2010.



(a) 全体画像



(b) 運動している被写体の拡大画像



(c) 静止している被写体の拡大画像

図 11 通常撮像で得られた画像



(a) 全体画像

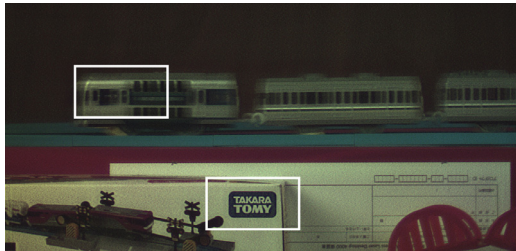


(b) 運動している被写体の拡大画像

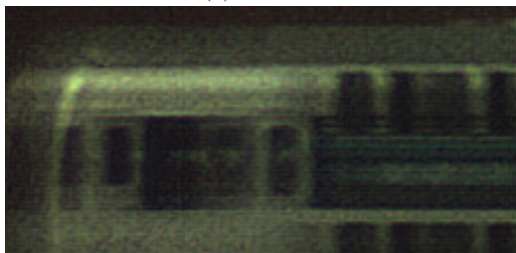


(c) 静止している被写体の拡大画像

図 12 動き不変撮像で全体がボケた画像



(a) 全体画像

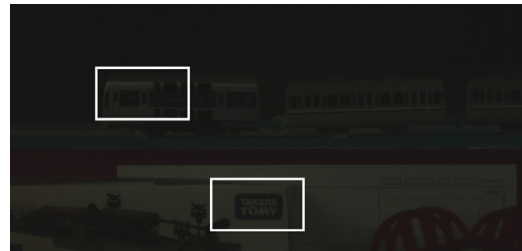


(b) 運動している被写体の拡大画像

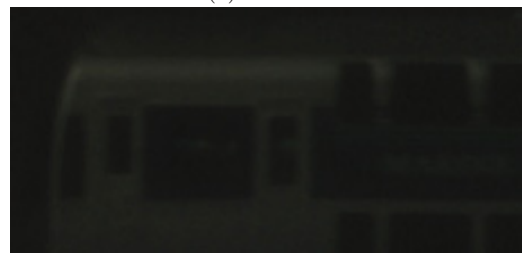


(c) 静止している被写体の拡大画像

図 13 デコンボリューション後画像



(a) 全体画像



(b) 運動している被写体の拡大画像



(c) 静止している被写体の拡大画像

図 14 短時間露光撮像によるモーションブレイ抑制画像