

被写体の動きに影響を受けにくいモーショントラッカー除去 Motion Deblurring with Motion-Insensitive Reconstruction Quality

坂東 洋介^{*,†}
Yosuke Bando^{*,†}

陳 炳宇[‡]
Bing-Yu Chen[‡]

西田 友是[†]
Tomoyuki Nishita[†]

* (株)東芝

† 東京大学

‡ 国立台湾大学

* TOSHIBA Corporation

† The University of Tokyo

‡ National Taiwan University

1. はじめに

写真撮影においてモーショントラッカーは、静止画で被写体の動きを表現する有用な手段である一方で、撮影者の意図に反して画像の鮮明さを失わせ、「失敗」写真を作り出す原因でもある。モーショントラッカーは画像の高周波成分を減衰させるため、その除去は高周波成分の増幅を意味し、ノイズの増加やリングングと呼ばれる縞状のアーティファクトを伴う[5]。この現象は被写体の動きが速いほど顕著になる。

本論文は、露光中に画像センサを撮像面に平行に円運動させることで、モーショントラッカーによる画像の高周波成分の減衰の程度を、被写体の動く方向と速さに非依存にできることを示す。ただし物体の動きは撮像面に平行な等速直線運動であるものとし、速さには上限があるものとする。これにより、シーン内に異なる方向に異なる速さで動く物体が複数あるときでも、特定の物体だけが大きくボケるのを防ぎ、画像の全ての領域で高周波成分を同程度に維持することができる。我々は円運動の時空間中での軌跡を周波数解析することによって上記観察に理論的な裏付けを与える。また、シミュレーションと実際に撮影した写真を用いて効果を示す。

2. 関連研究

モーショントラッカーは露光時間を減らせば低減できるがそれだけ入射光量が減るのでノイズの影響が大きくなる。高速カメラも同様の問題をかかえており、一般にシーンは明るく照らされている必要がある。近年のカメラは手ブレ補正装置を備えており、加速度センサから得たカメラの動きを相殺するようにレンズまたは画像センサを動かすが、被写体のモーショントラッカーに対しては効果がない。Ben-Ezraらはカメラに低解像度のビデオを取り付けてカメラの動きを画像的に取得し、手ブレの除去を行った[3]。

Raskarらは露光中にシャッターを開け閉めすることでモーショントラッカーによる高周波成分の減衰を防ぐ方法を提案した[10]。Agrawalらはシャッターの開け閉めのパターンを変更してボケの推定をも行えるようにし

た[1]。これらの coded exposure と呼ばれる手法では、被写体の動きが速いほど高周波成分が減衰するという傾向自体は通常のカメラと変わらない。

Levinらは物体の動きが一次元（例えば水平）の等速運動であれば、露光中に画像センサを水平に等加速度運動させることで、モーショントラッカーを動きに非依存(motion-invariant)にできること、および異なる物体の速さに対して周波数成分が均等に配分されることを示した[6]。本論文はLevinらの手法における物体の動きを、撮像面に平行な二次元面内の等速直線運動に拡張する。ただしモーショントラッカー自体を二次元面内の物体の動きに対して非依存にすることはできないので、モーショントラッカーによる高周波成分の減衰が動きによらず同程度にできることを示す。

他の目的で画像センサを動かした報告もいくつかあるので挙げておく。Ben-Ezraらはフレーム間にサブピクセル単位で画像センサを動かすことで動画の超解像を行った[4]。Mohanらはレンズと画像センサを動かして、焦点ボケのように振舞うモーショントラッカーを実現した[8]。Nagaharaらは画像センサを光軸方向に動かして焦点ボケを奥行きに非依存にした[9]。

3. 円運動する画像センサによる撮像

本節は提案する画像センサの動きとその効果の説明に注力し、理論的根拠と解析を4節にゆずる。

本論文が提案する画像センサの運動のさせ方を図1(a)に示す。撮影方向に垂直な平面内で画像センサの姿勢を維持したまま（傾けることなく）、露光時間 $t \in [-T, +T]$ 中に一定の角速度 $\omega (= \pi/T)$ で1回転させる。回転半径を R とすると、画像センサは円周上を一定の速さ $R\omega$ で移動することになり、これが扱える物体の速さの最大値 S_{max} に相当する。これは画像中での値 [pixels/sec] であり、実際の物体の速さの最大値はカメラの光学系と物体のカメラからの距離によって決まる。露光時間 $2T$ と扱いたい最大の速さ S_{max} が与えられれば、最適な回転半径は $R = S_{max}T/\pi$ と求まる。撮像面を xy 平面にとり、時間軸 t をとると、円運動の時空間中の軌跡は図1(b)に示す螺旋（赤線部）になる。

図2に点光源を異なる方向と速さで動かしたときに観測されるモーションブラー、すなわち point-spread function (PSF)のシミュレーション画像を示す。一段目は静止カメラでの観測である。二段目にこれらのパワースペクトル（周波数成分の大きさ）を示す。物体が速くなるにつれ急激に高周波成分が減衰することが分かる。三段目は coded exposure カメラでの観測である。シャッターを閉めている間は光が入らず PSF が途切れる。これにより四段目に示すようにパワースペクトルが広帯域となる。しかし、物体が速いほど高周波成分が減衰する傾向は残る。五段目は motion-invariant カメラでの観測である。水平方向の物体の動きに対しては同様の PSF となり（完全に同一ではない[6]）、六段目に示すようにそのパワースペクトルは広帯域となる。ただし物体の動きが水平からずれるにつれて縦方向の周波数成分が欠損することが分かる。七段目は円運動カメラでの観測であり、八段目がそのパワースペクトルである。分布は異なるものの、動きの方向と速さによらずに同程度の高周波成分を維持することが分かる。

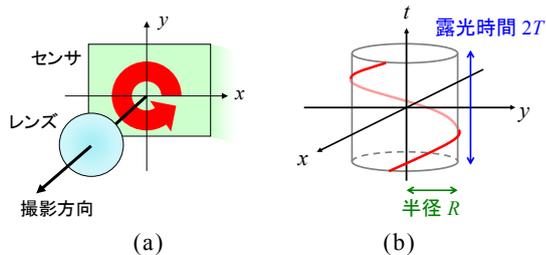
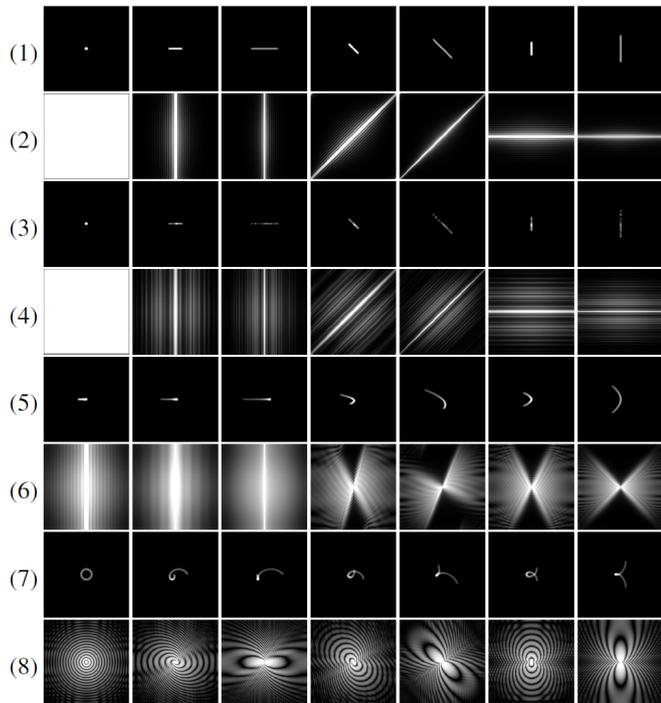


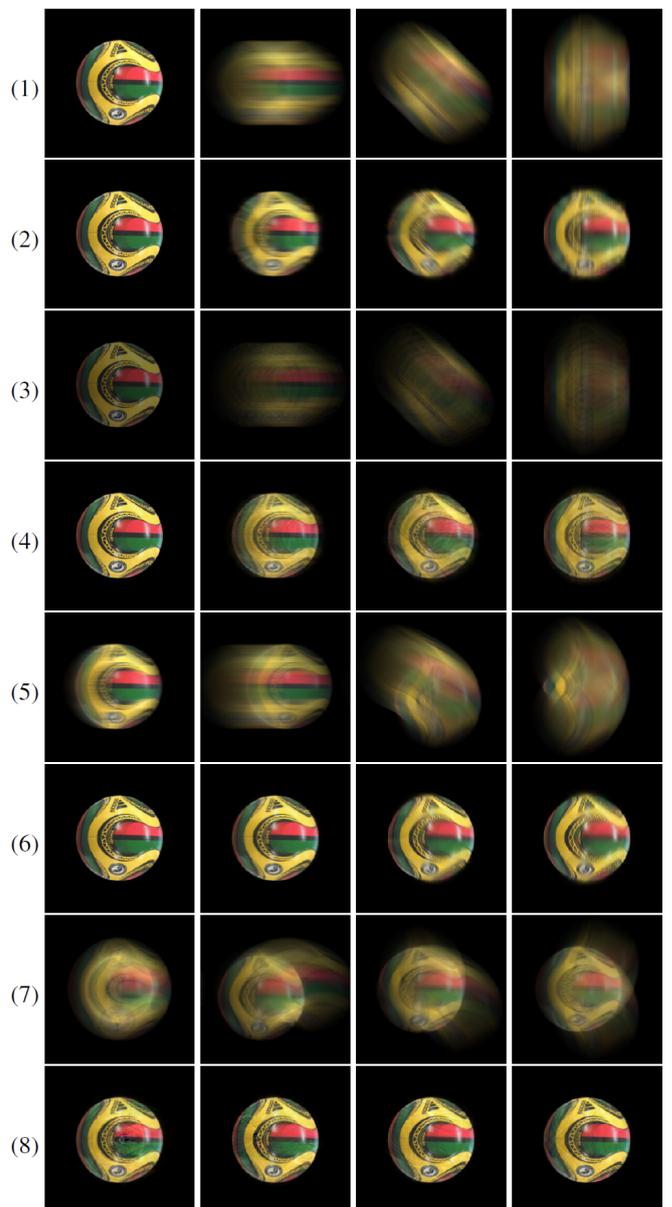
図 1: 画像センサの円運動と時空間中の軌跡



静止 水平(遅) 水平(速) 斜め(遅) 斜め(速) 垂直(遅) 垂直(速)

図 2: 等速運動する光源のモーションブラーPSF とその周波数成分の大きさ（パワースペクトル）

これらパワースペクトルの分布がモーションブラー除去に及ぼす影響を、図3にシミュレーションで示す。一段目は静止カメラでの観測である。二段目に示したモーションブラー除去結果を見ると、動く物体は大きく劣化している。三段目は coded exposure カメラでの観測である。露光中にシャッターを閉めるため画像は暗くなるが、高周波成分の減衰を低減した分、四段目に示した復元結果は静止カメラより良い。五段目は motion-invariant カメラでの観測である。六段目に示したように、水平方向の動きに対しては非常に良い復元結果を与えるが、動きが水平からずれるにつれて画像の縦方向の詳細が復元できなくなることが分かる。七段目は円運動カメラでの観測であり、八段目に示したようにどの動きに対しても同程度の良好な結果を得た。



静止 水平 斜め 垂直

図 3: モーションブラーのシミュレーション画像とその逆畳み込み結果（ボールは回転しないと仮定）

4. 周波数解析

Levin らは画像センサの等加速度運動 (xt 時空間中の放物線 $x = at^2$ となる) がモーションブラーPSFを一次元の物体運動に非依存にできる唯一の動きであることを示した[6]。この結果から即座に次の系が導かれる。

系 1: PSF を二次元面内の物体運動に非依存にできる画像センサの動きは存在しない。

証明: そのような動きがあったと仮定すると、それは x 軸に平行な物体の動きに非依存であるから、 xt 時空間における放物線 $x = at^2$ でなければならない。ところが、これは yt 時空間における放物線ではないので、 y 軸に平行な物体の動きに非依存でない。矛盾。証明終。

よって、PSF を二次元面内の物体の動きに非依存にすることはできないが、どの動きに対しても周波数成分を均等に配分するような画像センサの動きを考えることはできる。ここでまず、一次元の場合についてなぜ画像センサの等加速度運動が最適となるかを直感的に説明する。一次元の場合、考慮すべき速さの範囲は図 4(a)に示すように $[-S_{max}, +S_{max}]$ であるが、これは速さ $-S_{max}$ から開始して $+S_{max}$ まで加速することで全範囲を覆うことができる。これにより全ての速さを露光中に一瞬ずつ捕らえることができる。これを二次元に拡張すると、考慮すべき速度 (速さ+方向) の範囲は図 4(b)に緑の領域で示す円盤となる。これを有限の画像センサの動きで覆うことはできないので、我々は図 4(b)に青線で示した、円盤の外周 (つまり速度 s_x, s_y 平面中の円) のみをなぞることとする。これは画像センサを一定の角速度で円運動 (xy 平面中の円) させることで実現できる。円盤の外周のみをなぞる理由を以下に示す。

1. 理論的解析が容易である。三次元 xyt 時空間の完全な解析は困難であるが、我々は円運動の周波数特性について以降の節に述べるいくつかの知見を得た。
2. 外周のみをなぞることで、図 4(b)に示す速度円の内部に相当する物体の動きにもある程度均等に周波数成分を配分できることが示せる。
3. カメラへの実装が容易である。

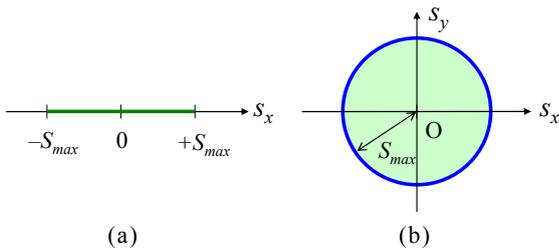


図 4: 考慮すべき速度範囲。(a)一次元の場合。(b)二次元の場合。

4.1. 周波数成分の均等配分

Levin らは画像センサの等加速度運動が一次元の物体の動きに対して周波数成分を均等配分することをも示した[6]。ここで Levin らの均等配分の議論を二次元の物体の動きに拡張して説明する。

画像センサの動きを xyt 時空間中で考える。

$$p(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)) & \text{for } t \in [-T, +T] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{x} = (x, y)$, $\mathbf{m}(t)$ は時刻 t での画像センサ位置、 T は露光時間 (の半分)、 $\delta(\cdot)$ はデルタ関数である。式(1)の三次元フーリエ変換は

$$P(\mathbf{f}, f_t) = \int_{\Omega} \int_{-T}^{+T} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)) e^{-2\pi i(\mathbf{f} \cdot \mathbf{x} + f_t t)} dt d\mathbf{x} \quad (2)$$

となる。ここで $\mathbf{f} = (f_x, f_y)$ は二次元の空間周波数、 f_t は時間周波数、 Ω は xy 平面全体を張る。

ここで、速度 \mathbf{v} で動く物体のモーションブラーPSFの二次元フーリエ変換は、原点を通る平面 $f_t = -\mathbf{v} \cdot \mathbf{f}$ に沿った $P(\mathbf{f}, f_t)$ の断面であることが示せる (証明は紙面の制限で割愛)。よって、物体の速さに上限 S_{max} がある場合、この断面が通過し得る三次元 $f_x f_y f_t$ 周波数領域中の範囲は図 5(a)に示す円錐の外側 $|f_t| \leq S_{max} |\mathbf{f}|$ (水色で示した領域) となる。よって、速さ S_{max} 以下の物体のモーションブラーPSF が大きなパワースペクトルを持つためには、この円錐外において $P(\mathbf{f}, f_t)$ が大きければよい。しかし、任意の空間周波数 \mathbf{c} において、 f_t 軸に平行な直線 (図 5(a)の赤と緑の線) 上に割り当てられる値は $\int |P(\mathbf{c}, f_t)|^2 df_t = 2T$ と総和が決まっている[6]。よって、PSF のパワースペクトルが物体の速度に依存しないためには、この直線上の円錐外の部分 (赤い線分) に均等に値を割り当てる必要がある。次節で画像センサの円運動がこの性質を概ね満たすことを示す。

4.2. 円運動のパワースペクトル

円運動 $\mathbf{m}(t) = (R \cos \omega t, R \sin \omega t)$ の時空間中での軌跡 (図 1(b)に示す螺旋) の三次元フーリエ変換を計算する。 R は半径、 ω は角速度である。式(2)を t について積分すると、被積分関数は $|\mathbf{x}| = R$ と $t = \mathbf{m}^{-1}(\mathbf{x})$ のときのみ値を持つので、以下を得る。

$$P(\mathbf{f}, f_t) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{R\omega} \delta(|\mathbf{x}| - R) e^{-2\pi i \mathbf{f} \cdot \mathbf{m}^{-1}(\mathbf{x})} \right) e^{-2\pi i \mathbf{f} \cdot \mathbf{x}} d\mathbf{x} \quad (3)$$

ここでヤコビアン $|d\mathbf{m}(t)/dt| = R\omega$ が分母に導入された。これを $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$ として極座標 (r, θ) を用いて書き直すと、

$$P(\mathbf{f}, f_t) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{R\omega} \delta(r - R) e^{-2\pi i \mathbf{f} \cdot \theta / \omega} \right) e^{-2\pi i \mathbf{f} \cdot \mathbf{x}} d\mathbf{x} \quad (4)$$

となる。一般の場合には式(4)の積分は困難であるが、 $k = 2\pi f_l/\omega$ が整数となる離散的な f_l 軸の断面（図 5(b)参照）に注目すると積分ができて[12]、下式が得られる。

$$|P(\mathbf{f}, f_l)|^2 = 4\pi^2 \frac{1}{\omega^2} J_k^2(2\pi R|\mathbf{f}|) \quad (5)$$

ここで $J_k(r)$ は k 次の第一種ベッセル関数である[13]。いくつかの k についてそのグラフを図 5(d)に示す。

まず、式(5)の分布が図 5(a)に示す円錐内部では値が小さいことを示す。これは割り当て可能な総和 $2T$ を無駄にしていないことを意味する。簡単な計算により円錐内部では $2\pi R|\mathbf{f}| < k$ となることが示せる。図 5(d)の特には $k = 10$ と 20 の場合に顕著なように、ベッセル関数は最初の極大値に近づくまで値が小さい。そして、最初の極大値は $r = k + 0.808618k^{1/3} > k$ 付近にあることが知られている[13]。よって $|J_k(r)|$ は $r < k$ において小さく、円錐内部では値が小さいことが示せた。

次に、式(5)の分布が f_l 軸方向に沿って均等であることを示す。十分大きな $r \gg k^2$ に対してベッセル関数は以下の式で近似できる。

$$J_k(r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi r}} \cos\left(r - \frac{k\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

これを用いると式(5)は以下のように書ける。

$$|P(\mathbf{f}, f_l)|^2 \approx \frac{\pi}{4} \frac{T}{S_{max}|\mathbf{f}|} \cos^2\left(2\pi R|\mathbf{f}| - \frac{k\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (7)$$

式(7)は、十分に大きい任意の空間周波数 \mathbf{f} に対して、

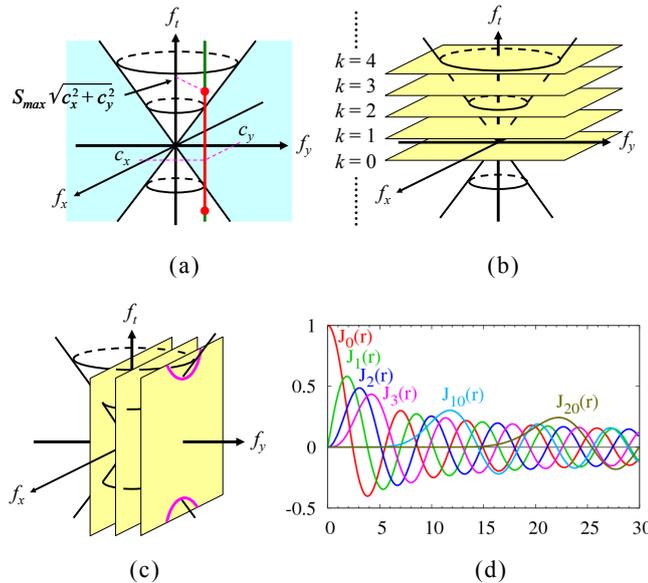


図 5: 三次元 $f_x f_y f_l$ 周波数領域。(a) 速度 S_{max} 以下の物体のモーションブラー-PSF に対応する領域（水色部分）。(b) f_l 軸に垂直な断面。(c) f_y 軸に垂直な断面。円錐との交線を紫で示した。(d) 第一種ベッセル関数 $J_k(r)$ の、いくつかの k に対するグラフ。横軸が r 、縦軸が関数値。

$|P(\mathbf{f}, f_l)|^2$ が、時間周波数 f_l に依存しない振幅 $(\pi/4)(T/S_{max}|\mathbf{f}|)$ を持つ波であることを示している。よって、波打ってはいるが、式(5)は f_l 方向について概ね均等な分布であることが示せた。

上述の議論を確認するため、図 6 に数値的に計算した螺旋のパワースペクトルを示す。合わせて、静止カメラ、coded exposure カメラ、motion-invariant カメラの時空間中の軌跡のパワースペクトルも示す。三次元のパワースペクトルを、図 5(c)に示す 3 枚の f_y 軸の断面で図 6(b-d)に示した。紫の線は最大の速さ S_{max} に対応する円錐との交線であり、 $f_y \neq 0$ においては双曲線となる。提案法以外のカメラは y 方向へ動かないので、パワースペクトルは f_y 方向に変化しない。そのため、motion-invariant カメラは水平方向の物体の動きに対応する $f_y = 0$ の断面ではほぼ最適に周波数成分を配分しているが、その他の場合には均等配分ができていない。提案法は全ての場合に周波数成分を概ね均等に配分していることが分かる。

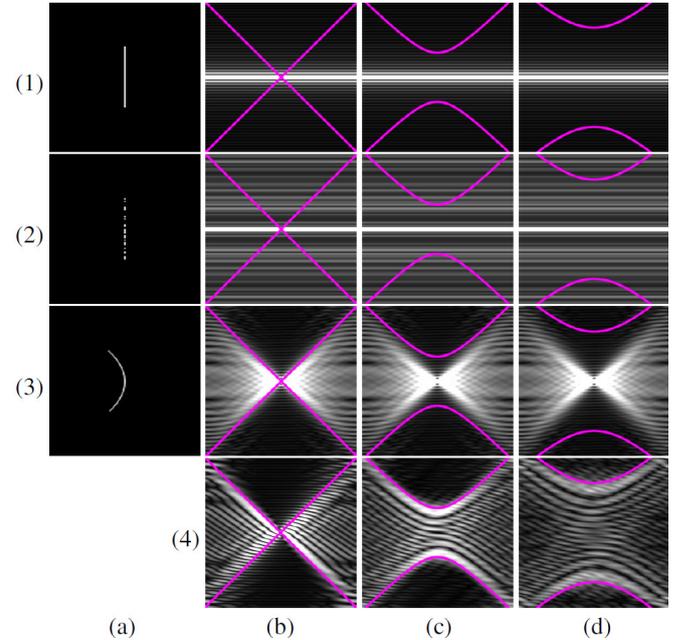


図 6: 時空間中での画像センサの軌跡とその三次元パワースペクトルの二次元断面。上段から順に(1)静止カメラ。(2)Coded exposure カメラ。(3)Motion-invariant カメラ。(4)提案法。左から順に(a)時空間中の軌跡。 xt 平面で示した。提案法の軌跡は図 1(b)参照。(b) $f_y = 0$ の断面。(c)(d) $f_y \neq 0$ の断面。

5. 実験と結果

レンズからの距離と姿勢を維持しながら画像センサを円運動させるのは研究の試作段階としては技術的課題が多いので、我々はカメラを筐体ごと円運動させて実験を行った。円運動のさせ方は二通り試した。ひとつは図 7(a)に示すようにカメラを機械的に平行移動させるものである。回転半径は $R = 1.1\text{cm}$ 、露光時間は

$2T = 1.0$ 秒とした。カメラ全体を平行移動すると、物体の最大の速さ S_{max} は画像中ではなく実際の値となり（上記設定の場合およそ 7cm/sec ）、PSF のサイズは物体の奥行きに依存する（遠い物体はカメラの運動に影響を受けない）。そのため、この試作機は物体がカメラから 50cm 以内にあるときのみ使用した。図 7(b) に 50cm の距離にある静止物体の PSF を示す。機械的精度の問題で、カメラの円運動中に光軸が少し傾くため、静止物体の PSF はカメラから遠いほど円から逸脱してゆく。その意味でもこの試作機は遠いシーンには適用できない。 50cm より遠いシーンに対しては、我々はカメラを手で円運動させた。少し練習をすれば、無意識に撮影方向を少し回転（歳差運動）させ、PSF のサイズを物体の奥行きに大きく依存しないようにできる。ただしカメラの運動は毎回異なるので、我々はレーザーポインタでシーンの背景を照らして静止物体の PSF を取得した。その例を図 7(c) に示す。

モーションブラー除去では、上述のように取得した静止物体の PSF から異なる物体の動きに対応する PSF を生成し、撮影画像から手作業で切り出した各領域に各 PSF による逆畳み込みを適用した。物体の速度は速さを 10pixels/sec 刻み、方向を 10° 刻みに離散化した。考慮する最大の速さを $S_{max} = 100$ とした場合、総計 360 枚のモーションブラー除去候補画像が生成されることになる。我々はこの中から見た目に最も良い画像を選択した。候補画像の生成には計算負荷の軽い Wiener フィルタ [2] を用い、 512×512 画素の入力画像から 360 枚の候補画像を生成するのに Intel Pentium 4 3.2GHz マシンで約 4 分かかった。画像選択の作業量を軽減するため、多くの画素値が逆畳み込みの結果 $[0, 1]$ の範囲を大きく超えた場合、誤った PSF での逆畳み込みから生じたリングングであるとしてその候補画像を自動的に破棄した。最終的なモーションブラー除去画像の生成には Richardson-Lucy 逆畳み込み法 [7, 11] を使用し、その結果を撮影画像の背景にスムーズに合成した。

図 8 と 9 は試作機を用いての結果である。図 8(a) が静止カメラの撮影画像、図 8(b) が円運動カメラの撮影画像である。それぞれのモーションブラー除去結果を図 8(c)(d) に示す。円運動カメラの撮影画像に逆畳み込みを適用した方が、より詳細が復元されている。

図 9 は複数の物体が異なる動きをしている例である。図 9(b) の画像に捉えられたハイライトの軌跡が、円運動カメラから観測した物体の動きをよく表している。ボールが回転しているため等速運動の仮定が成り立たず、それがビリヤード玉に描かれた白い円とその中の数字の周辺でアーティファクトとなって現れているが、玉の輪郭は復元された。

図 10 はひとつの物体が部分ごとに異なる動きをしている例である。被写体はカメラから 1m の距離にあ

り、この例ではカメラを手で円運動させた。静止物体の PSF は図 7(c) に示した。この例では領域の切り出し方が自明でないため、図 10(c) に各領域を赤、青、緑の線でそれぞれ囲って示す。各領域を逆畳み込みした後に境界をスムーズに接合するため、領域は少し重ねて指定した。図 10(d) に示すように、異なる動きが重なっている部分（特に顔の周辺）でアーティファクトが出ているが、服のシワなどの詳細が復元された。

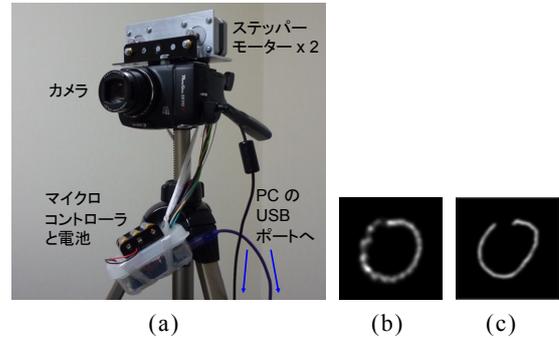


図7: 試作カメラと静止物体のPSF

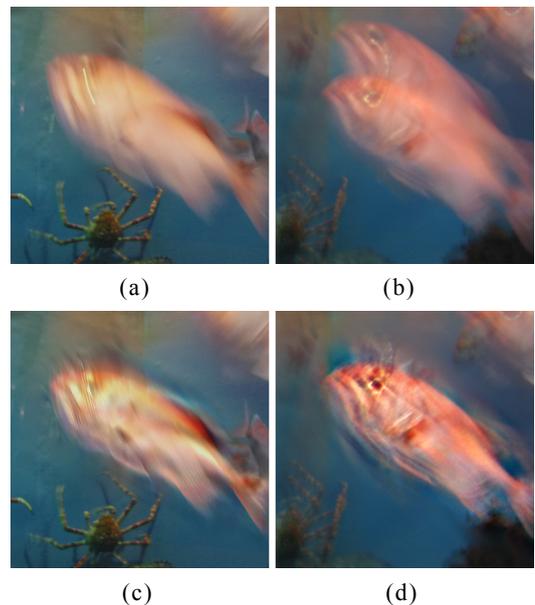


図 8: 水族館の魚への適用例。(a)静止カメラの撮影画像。(b)円運動カメラの撮影画像。(c)(a)の逆畳み込み結果。(d)(b)の逆畳み込み結果。

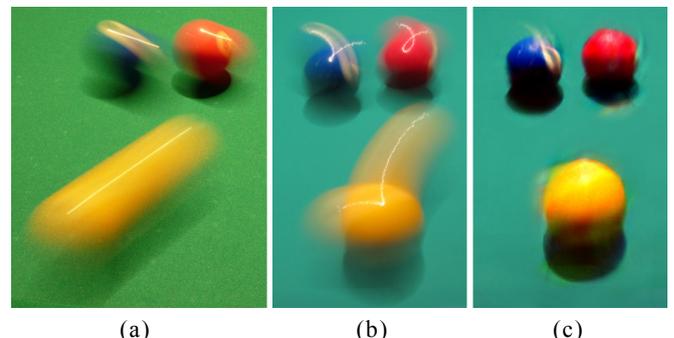


図 9: ビリヤード玉への適用例。(a)静止カメラの撮影画像。(b)円運動カメラの撮影画像。(c)(b)の逆畳み込み結果。

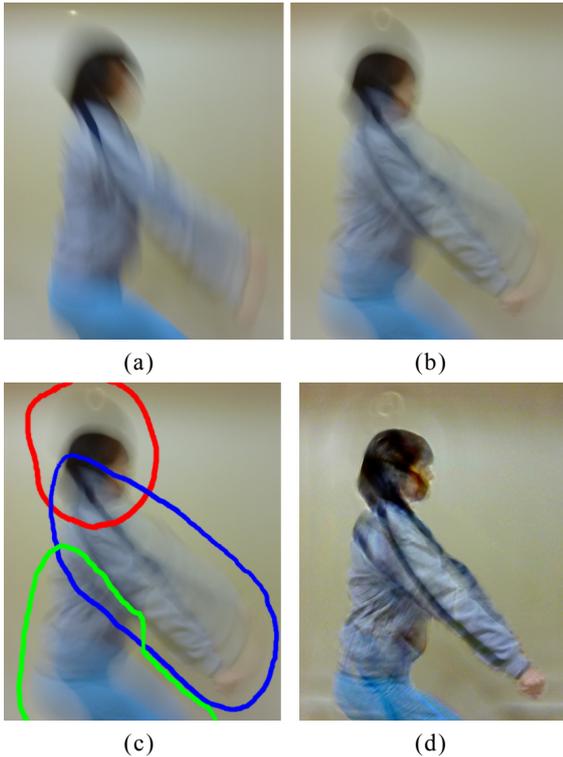


図 10: 屈伸動作する人物への適用例。(a)静止カメラの撮影画像。(b)円運動カメラの撮影画像。(c)ユーザ指定の領域分割。(d)モーションブラー除去結果。

6. まとめ

露光中に画像センサを円運動させることで、モーションブラーによる画像の高周波成分の減衰の程度を、被写体の動く方向と速さに非依存にできることを示した。また、円運動の時空間中での軌跡を周波数解析することによって理論的な裏付けを示した。実験はカメラ筐体全体を動かすことで行ったが、提案法は手ブレ補正のための既存のカメラハードウェア機構を用いて実現できると考えられる。

提案法は画像の撮影時に高周波成分の減衰を防ぐことができるが、それ以外のモーションブラー除去に関わる課題、すなわち画像の動きごとの領域分割とPSF推定にはユーザ介入を仮定している。これらの解決を今後の課題としたい。

また、提案法には静止物体もモーションブラーを伴って撮影されてしまうという欠点がある。これは図4(b)に示した速度円の内部をサンプリングすることで軽減できると考えられる。最も簡単な方法は速度円の外周に加えて原点をサンプリングすることであり、これは露光時間の何割かは画像センサを静止させることに対応する。その他にも画像センサの動かし方には様々な変化形が考えられる。今後検討したい。

謝辞

貴重な助言をくださった苗村健准教授（東京大学）と井口雄介博士(NEC)、および撮影に協力くださった堀内沙織氏(NHKメディアテクノロジー)に感謝します。

参考文献

- [1] A. Agrawal, Y. Xu. “Coded exposure deblurring: optimized codes for PSF estimation and invertibility.” Proc. CVPR, pp.1-8, 2009.
- [2] M. R. Banham, A. K. Katsaggelos. “Digital image restoration.” IEEE Signal Processing Magazine, Vol.14, No.2, pp.24-41, 1997.
- [3] M. Ben-Ezra, S. K. Nayar. “Motion-based motion deblurring.” IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.26, No.6, pp.689-698, 2004.
- [4] M. Ben-Ezra, A. Zomet, S. K. Nayar. “Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts.” IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.27, No.6, pp.977-987, 2005.
- [5] J. Biemond, R. L. Lagendijk, R. M. Mersereau. “Iterative methods for image deblurring.” Proceedings of the IEEE, Vol.78, No.5, pp.856-883, 1990.
- [6] A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand, W. T. Freeman. “Motion-invariant photography.” ACM Trans. Gr., Vol.27, No.3, pp.71:1-71:9, 2008.
- [7] L. B. Lucy. “An iterative technique for the rectification of observed distributions.” The Astronomical Journal, Vol.79, No.6, pp.745-754, 1974.
- [8] A. Mohan, D. Lanman, S. Hiura, R. Raskar. “Image destablization: programmable defocus using lens and sensor motion.” Proc. Int. Conf. Computational Photography, 2009.
- [9] H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, S. K. Nayar. “Flexible depth of field photography.” Proc. ECCV, pp.60-73, 2008.
- [10] R. Raskar, A. Agrawal, J. Tumblin. “Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter.” ACM Trans. Gr., Vol.25, No.3, pp.795-804, 2006.
- [11] W. H. Richardson. “Bayesian-based iterative method of image restoration.” Journal of the Optical Society of America, Vol.62, No.1, pp.55-59, 1972.
- [12] E. M. Stein, G. Weiss. “Introduction to Fourier analysis on Euclidean spaces.” Princeton University Press, 1971.
- [13] G. N. Watson. “A treatise on the theory of Bessel functions.” Cambridge University Press, 1922.