

コンピュータショナルフォトグラフィ

長原 一†

カメラは、3次元シーンから発せられるライトフィールドを2次元画像に射影する装置であり、射影像の輝度はレンズや露光時間による積分輝度として得られる。コンピュータショナルフォトグラフィは、光学系やセンサの露光制御によりこの積分関数を符号化することで、従来の画像処理やコンピュータビジョンで困難であった問題の解決や大幅な性能向上を実現する。

キーワード：コンピュータショナルフォトグラフィ，符号化撮像，符号化開口，フォーカススweep，圧縮センシング

1. まえがき

カメラは、3次元シーンから発せられた反射光の輝度を2次元画像として記録する装置である。現在のカメラは、単体のデジタルカメラにとどまらず、PCやスマートフォン等の機器に搭載され日常にあふれている。さらには、車やIoT機器などにも応用が広がり写真を撮るという応用以外にも制御や認識のためのセンサとしての応用も広がっている。しかしながら、カメラの光学系や射影幾何、サンプリング方法などの基本的しくみは、従来からほとんど変化していない。従来のカメラは、人に見せる画像取得を目的としていることから、その光学系はセンサ上に綺麗な集光像をつくるように設計されている。つまり、従来のレンズ設計は、フォーカス時にぼけ広がり関数 (PSF) がデルタ関数に近づくように最適化されてきた。また、現在の撮像センサの露光タイミングや露光時間は、間隔一定のナイキストサンプリングに基づいて設計されている。しかしながら、画像処理やコンピュータビジョンの入力装置としてカメラを捉えた場合、センサ像は単なる中間情報にすぎず、この画質を最適化してカメラを設計するのが最適であるとは限らない。

これに対してコンピュータショナルフォトグラフィでは、カメラのPSFやセンサの露光関数を符号化することで、符号化画像を撮影する。この符号化画像は、視覚的にはぼけて見えるが、シーンの奥行き推定や解像度向上のための情報が符号化されて埋め込まれている。これを計算機を用いた後処理により、推定や復元を行うことで従来のカメラの限界を超えた性能を実現する。つまり、コンピュータショナルフォトグラフィは、後処理を前提にしてカメラの撮像システムを設計するハードウェアとソフトウェアの融合ア

† 大阪大学

"Computational Photography" by Hajime Nagahara (Osaka University, Osaka)

プローチであると考えることができる。

本稿では、コンピュータショナルフォトグラフィのコンセプトおよびカメラの光学系やセンサを制御することによりどのように符号化画像が得られるかを解説する。さらに、実際の事例を紹介することで、コンピュータショナルフォトグラフィがぼけ復元や奥行き推定、高解像度高フレームレート撮像などの応用をどのように実現するかを示す。

2. カメラの光学系と符号化

カメラは、3次元のシーンを2次元の画像として射影する装置である。初期のピンホールカメラやコンピュータビジョンで用いられる射影モデルは、レンズの中心を通る主光線のみをモデル化している。しかしながら、実際のカメラはレンズを持ち、図1に示すようにレンズ開口に入射する複数の光線を取り込み、これをセンサ上に集光することでピンホールカメラと比べて明るい射影像を得ている。シーンを縦横無尽に行き交う光線群はライトフィールドと呼ばれ、その光線群の輝度は $L(u, v, x, y, t)$ で表されるとする。ここでは、一般的な4次元ライトフィールドをモデル化したTwo-plane表現¹⁾に時間 t を加えた5次元関数として表した。Two-plane表現では、図1に示すように任意の光線を距離 d だけ離れた (u, v) 座標面と (x, y) 座標面の2つの平面の交差点の座標 (u, v, x, y) で表すライトフィールド表

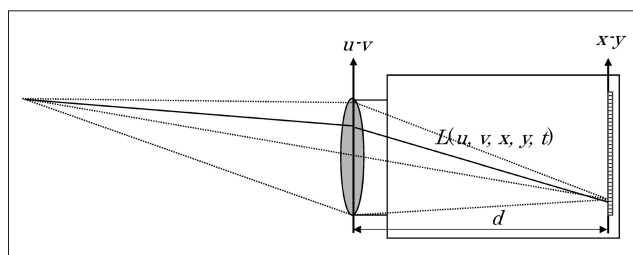


図1 ライトフィールドのカメラによる積分計測

現で、本稿では (u, v) はカメラのレンズ開口位置、 (x, y) はセンサ面に一致させている。カメラは図1に示すようにレンズ開口 (u, v) を通り抜けるすべての光線を、ある一定時間 Δt で積分した輝度を2次元画像の輝度として取得する。つまりカメラは5次元ライトフィールド $L(u, v, x, y, t)$ を2次元情報 $I(x, y)$ に積分により縮退射影する装置とみなせ、次式のように一般化できる。

$$I(x, y) = \iiint T(u, v, t) \cdot L(u, v, x, y, t) du dv dt$$

ここで $T(u, v, t)$ がレンズやセンサの露光による積分時の重み関数であり、一般的なカメラではレンズ開口領域一定、露光時間一定の矩形関数として表現される。コンピュータショナルフォトグラフィでは、この関数 $T(u, v, t)$ を設計することで、入射ライトフィールドを光線毎に重み付積分し、符号化画像を得る。実際にはこの関数 $T(u, v, t)$ の符号化は、レンズの開口形状、レンズとセンサ距離、センサの露光パターンなどのハードウェアの制御によって実現される。以降の章では、具体的にどのようなハードウェアを用いてどのように $T(u, v, t)$ を符号化し、どのような問題を解決しているかを具体的事例を用いて説明する。

3. レンズ開口位置での符号化

カメラの絞りは、一般にカメラの開口数 (F 値) を変化させることで画像の明るさや被写界深度を調整するために用いられる。通常のカメラの絞りは円形または円形に近似した多角形の羽絞りである。それに対して、符号化開口 (Coded aperture) では、この開口位置に図2左に示すような光学マスクを挿入⁵⁾ したり、Liquid Crystal Display (LCD)²⁾ や図2右に示すような Liquid Crystal on Silicon



図2 符号化開口の実装例 (左：フォトマスク、右：LCoS)

(LCoS)³⁾ といった能動光学素子を絞りに配置することで、開口形状をユニークに制御する。符号化開口は、このような光学マスクにより図1の (u, v) 座標を通る入射ライトフィールドの光線の輝度に重みをかける。理想的な幾何光学下では、開口の形状は画像上のPSFの形状と等価であるため、絞りのパターンにより、直接光学系の周波数特性 (Modulated transfer function) を制御できる。例として図3に、通常の円形開口と Levin⁴⁾、Zhou⁵⁾ のパターンによるPSFの周波数特性の違いを示す。この図から円形開口に対して、Levinのパターンはより大きなゼロ交差の谷をもち、Zhouのパターンは平坦な周波数特性であることが理解できる。このように、所望の周波数特性の開口パターンを用いて画像を撮像することで、ぼけ復元や奥行き推定など目的に応じて撮像画像の周波数特性を制御できる。

3.1 符号化開口によるぼけ復元

この符号化開口の応用としてデコンボリューションによるぼけ復元結果を図4に示す。ぼけ復元に最適化された開口パターン⁶⁾ の例として図4(c), (d), (e)にVeeraraghavan⁶⁾ と Zhou⁵⁾ のパターンを、また比較として図4(a), (b)に通常の円形開口と Depth from Defocus (DFD) 最適化開口であ

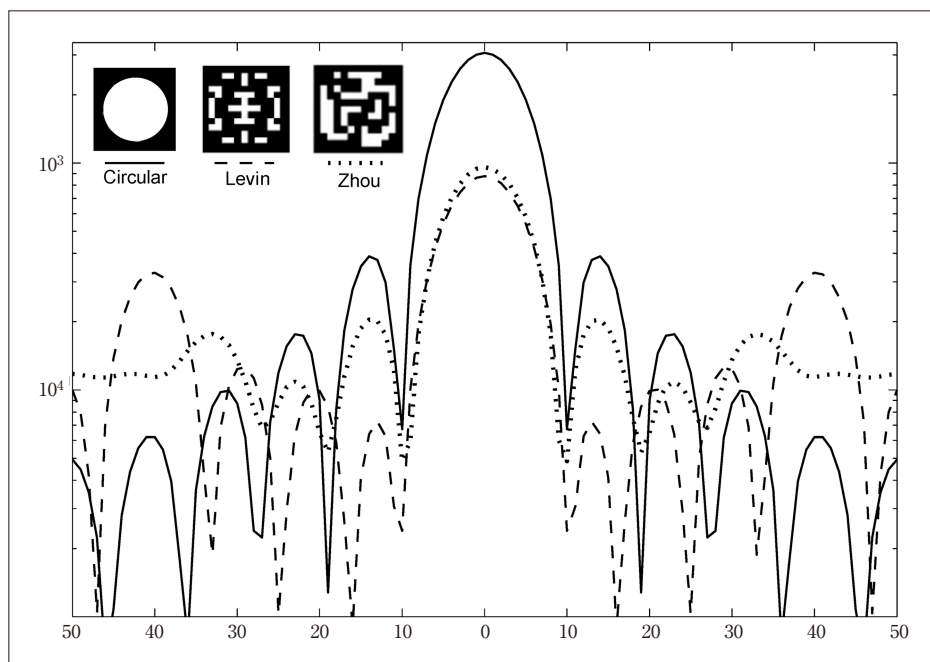


図3 異なる符号化開口による周波数特性

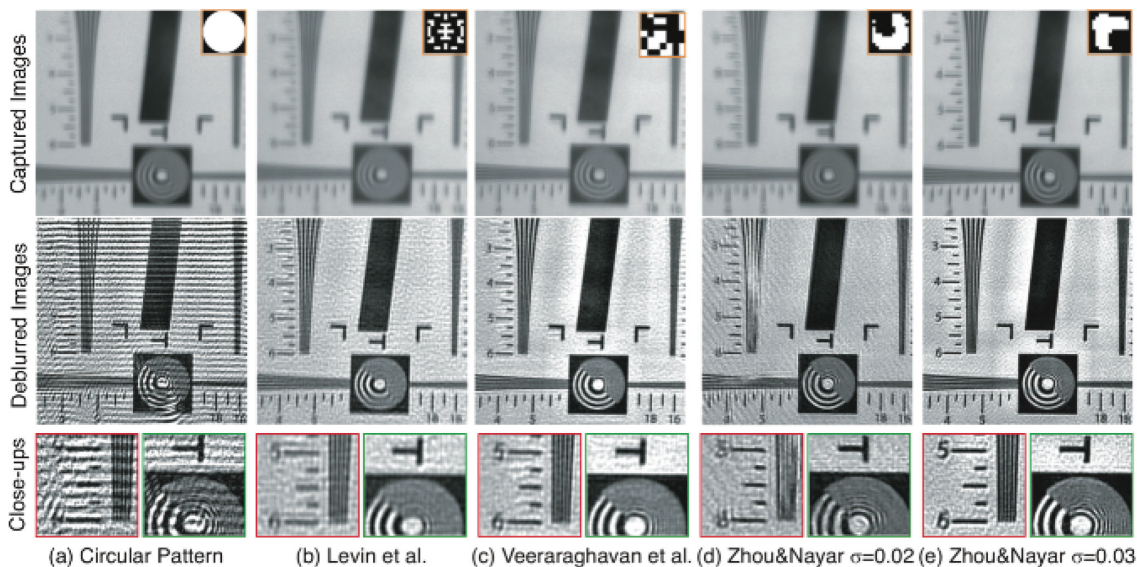


図4 異なる符号化開口を用いたぼけ復元結果

るLevin⁴⁾も比較としてを示した。図4には、上段に各開口で撮影された撮影画像を、中段にデコンボリューション処理後のぼけ復元画像、下段にぼけ復元画像の画質の違いがわかりやすいように一部拡大画像を比較として示した。なお、この比較において、撮影のためのカメラとして図2右に示した能動絞りカメラ³⁾を用いて開口パターンのみを切り替えることで各入力画像を撮影した。すなわち、パターン以外の光学系や撮像センサ、露光などの設定は完全同一である。図4(a)より通常の円形開口では、ぼけ復元画像に激しい縞状のアーチファクトやリングングが現れていることがわかる。また、図4(b)のLevinのパターンは、ぼけ復元を意図して設計されていないため、復元性能が甘くぼけた印象となっている。これらに対して、図4(c), (d), (e)では、広帯域な特性であるぼけ復元を狙った符号化開口の特性から、エッジなどの高周波数情報が復元されており、シャープで高コントラストな画像が復元されている。これらの中でも、図4(e)のZhou $\sigma=0.03$ のパターンが視覚的に最適な復元画質であることから、このカメラではノイズの標準偏差 $\sigma=0.03$ に最適化したパターンが最適であることがわかる。

3.2 符号化開口による奥行き推定

画像の奥行きぼけは、対象物体がレンズのフォーカス位置より外れることにより生じるため、逆に画像からぼけの度合いを推定することができれば、ぼけから対象の奥行きを推定することができる。この手法はDFD⁷⁾⁸⁾とよばれ、一般的にぼけ復元と奥行き推定の同時推定問題として解かれる。3.1節で述べたようにぼけ復元では、広帯域のPSF特性が好ましい。一方で、奥行きぼけからのシーンの奥行き推定するためには、逆に図3のLevinのパターン⁴⁾のよ

うにゼロ交差が多く含まれるPSF特性が好ましい。このように、ぼけ復元と奥行き推定のための符号化開口の周波数特性は相反しているため、単一の符号化開口では最適化を両立できない。これに対してZhou⁹⁾らは、2枚の符号化開口のペアを最適化により求めることで、奥行き復元と全焦点画像の復元を両立した符号化開口を提案した。この符号化開口の周波数特性は、一方ではゼロ交差を含み距離の違いによるアーチファクトを増強するが、両者の周波数特性を合わせると広帯域となるような特性となる。この符号化開口ペアを用いて撮像した2枚の画像を用いてぼけ復元と奥行き推定を行った結果を図5に示す。同図に通常の円形開口で撮像した画像を用いた結果を比較として示した。撮影には、図2右に示した能動絞りカメラ³⁾を用いた。この図より、円形開口に対して、Zhouらの提案した符号化開口ペアが安定した奥行き推定とぼけ復元が実現できていることがわかる。特に、比較の円形開口では、推定された奥行きが大きく間違っており、その結果復元画像も間違ったPSFで復元されたため画像がぼけていることが視認できる。

4. レンズとセンサ距離の符号化

3章で述べた符号化開口は、入射光を符号化開口により遮ることで符号化しているため、結果として画像が暗くなることから撮像画像のSN比が悪いという問題がある。デコンボリューションを用いたぼけ復元画像の復元は、高周波情報を強調することからノイズも強調される。すなわち、符号化開口はぼけ復元や奥行き推定性能の向上をもたらすが、一方でSNを悪化させるため、ぼけ復元画質や奥行き推定の性能向上にトレードオフが存在する。これに対してフォーカススイープは、カメラのフォーカス制御を用いて

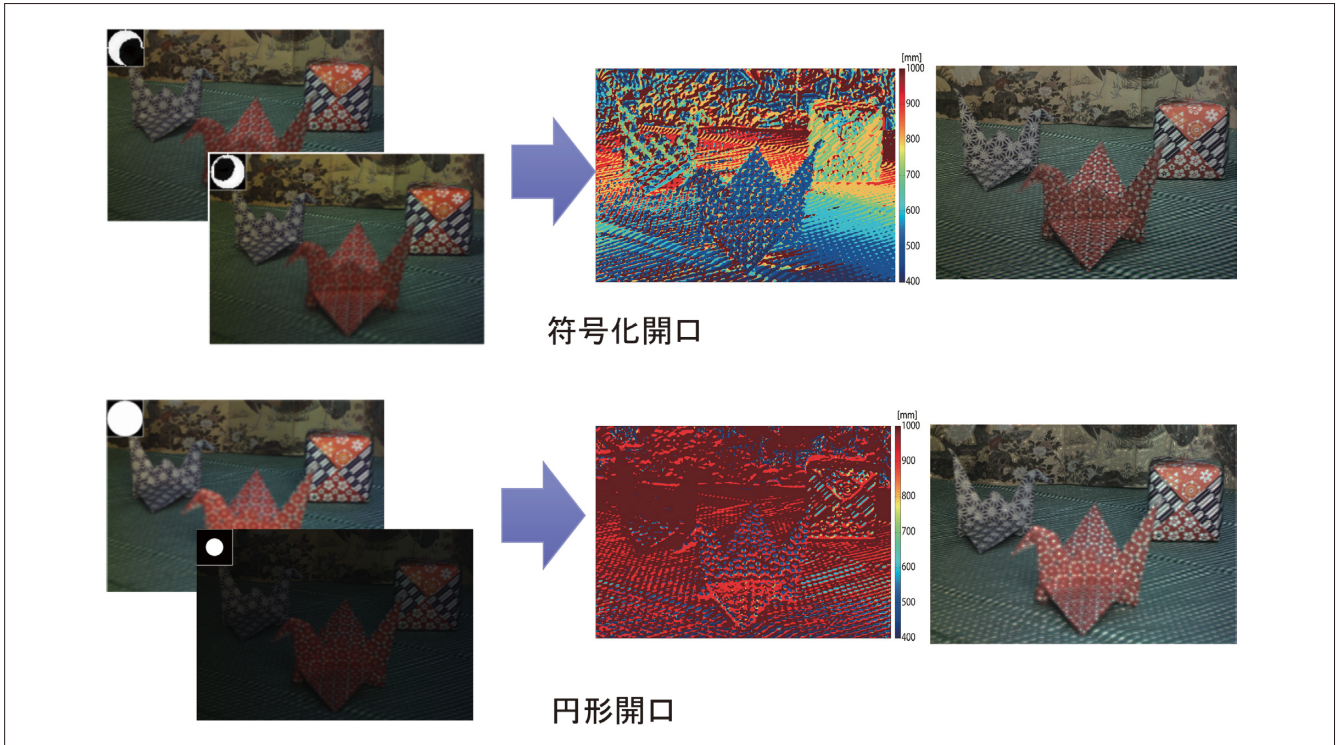


図5 符号化開口と円形開口のDFD結果の比較

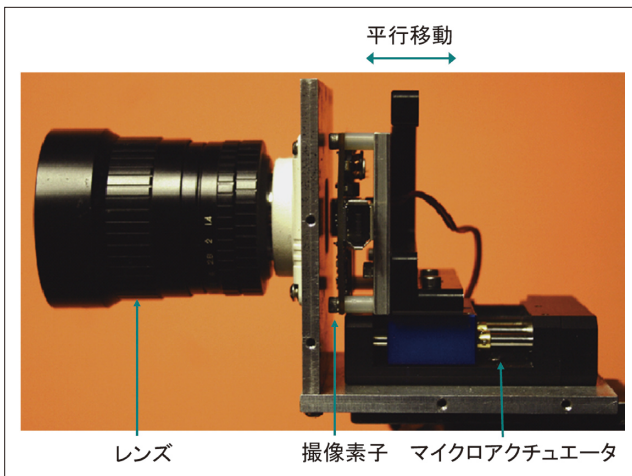


図6 フィーカススイープカメラ

PSF符号化することからこの光量低下の制限をうけない。フォーカススイープでは、図1の d で表されるレンズとセンサの距離を変化させ、その結果としてライトフィールドの (u, v) 座標と (x, y) 座標のマッピング関係を制御することで符号化を行う。図6に試作のフォーカススイープカメラを示す。このフォーカススイープカメラは、レンズと撮像素子、リニアアクチュエータで構成され、1枚の画像の露光時間中に撮像素子を前後に移動させながら撮像する。図6の試作では、センサ移動によりフォーカススイープを実現しているが、レンズの焦点距離を変化させることでも同様に実現できる。

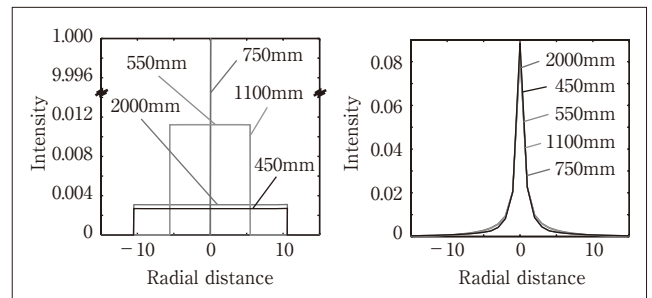
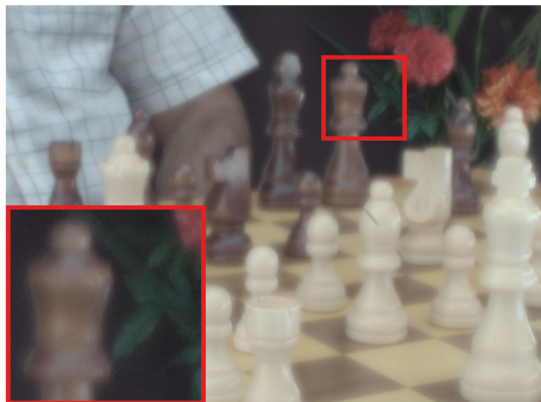


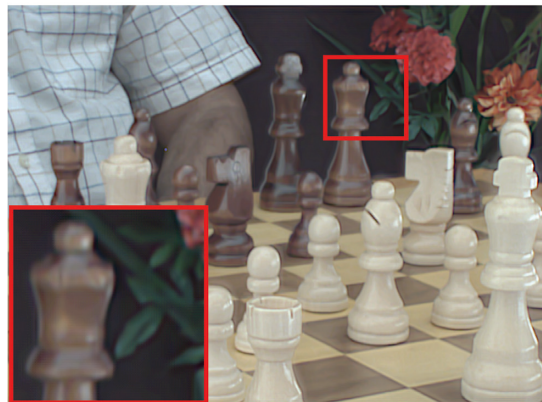
図7 通常のカメラとフォーカススイープのPSF特性
(左：通常カメラのPSF, 右：フォーカススイープカメラのPSF)

4.1 フォーカススイープによる被写界深度拡張

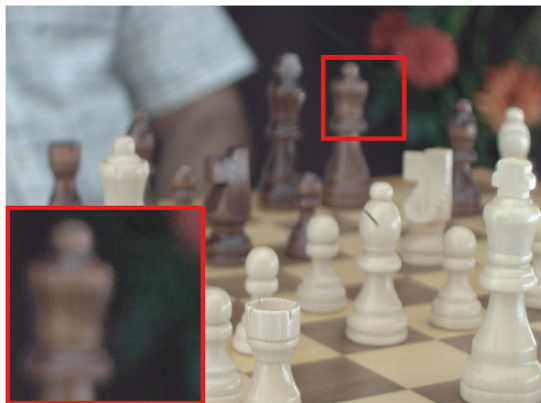
フォーカススイープで撮影される画像は、露光中に撮像センサの位置を変化させながら各点での画像を多重露光することになる。図7に、通常カメラのPSFフォーカススイープカメラのPSFの形状を5段階の異なる奥行きにおいて示した。通常カメラのPSFは対象の奥行きに応じて大きく形状が変化するのに対してフォーカススイープカメラのPSFでは、対象の奥行きに対してその形状が不変であることがわかる。つまり、フォーカススイープによる撮像画像はばけているが、PSFが奥行き不変であることから単一のカーネルによるデコンボリューションにより、シーンの奥行き情報なしに全焦点画像を復元できる。また、このフォーカススイープのPSFは周波数特性が広帯域であることから、復元性能も高い。図8にフォーカススイープカメラで撮像された画像とデコンボリューション画像を示す。



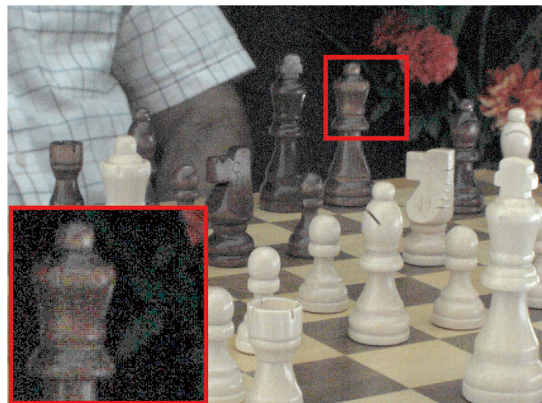
撮像画像($f/1.4$, $T=0.36$ s)



EDOF 画像



通常カメラの画像
($f/1.4$, $T=0.36$ s, Near Focus)



通常カメラの画像
($f/8$, $T=0.36$ s, Near Focus)

図8 フォーカススイープによる被写界深度拡張

同図に絞りを開放 ($f/1.4$) して撮像した画像と焦点深度を広げるために絞りを絞って ($f/8$) 撮像した画像を比較として示した。図8左上に示すように、フォーカススイープによる撮像画像は、ぼけた画像であるが、図7右に示したように奥行き不変であることから、奥行きによらず画像上で同じようなぼけ方をしていることがわかる。図8右上に、撮像画像を単一のPSFでデコンボリューション処理した結果画像を示す。通常撮像では、図8左下のように絞りを開放すると明るくノイズの少ない画像が撮れるが被写界深度が狭いため、前方のチェス駒のみ焦点が合っているがそれ以外がぼけていることがわかる。一方で、絞りを絞ると被写界深度が広くなり図8右下のようにシーンすべてに合焦するが、小さい絞りが入射光を制限するため、画像のSN比が悪い。それに対して図8の右上図の画像は、画像のSN比を保ったまま大きい被写界深度をぼけ復元により実現している。すなわち、従来撮像では被写界深度またはSN比のトレードオフがあったが、フォーカススイープとデコンボリューションを組み合わせることで、広い被写界深度とSN比を両立できた。このように符号化撮像とぼけ復元を組み合わせることで、物理的に不可能だった絞り開放での被写界深度の拡大を実現した。

4.2 フォーカススイープによる奥行き推定

フォーカススイープのスイープ区間を前半分と後半分に分割することでDFDの安定化を実現するハーフスイープと呼ぶ手法を提案した¹⁰⁾。ハーフスイープでは、3.2節で述べた符号化開口ペアと同様に単一のPSFでは、奥行き復元に向くゼロ交差を多く含むPSF特性、両方の合成PSFの特性は全区間のフォーカススイープPSFと同様に奥行き不変で広帯域となることからぼけ復元に向くという特性を持つ。つまり、フォーカススイープ中に2枚の画像を撮影することで、3.2節と同様にDFDに最適なPSFをフォーカススイープにより実現した。

図9にハーフスイープと通常のDFDの結果を示した。どちらの手法も同じシーンに対して2枚の画像を撮影した。通常のDFDでは、シーンの一番遠い物体に焦点が合った画像とシーンの一番近い物体にあった画像の2枚を入力画像としている。それに対して、フォーカススイープでは、シーンの遠景から近景に移動している最中に2枚の画像を撮影する点だけが異なり、フォーカス範囲やシーン、復元アルゴリズムなどは完全に同じである。それにも係わらず、ハーフスイープの方が通常のDFDに比べて安定した復元結果が得られている(図9左中の点線部)。また、画像復元

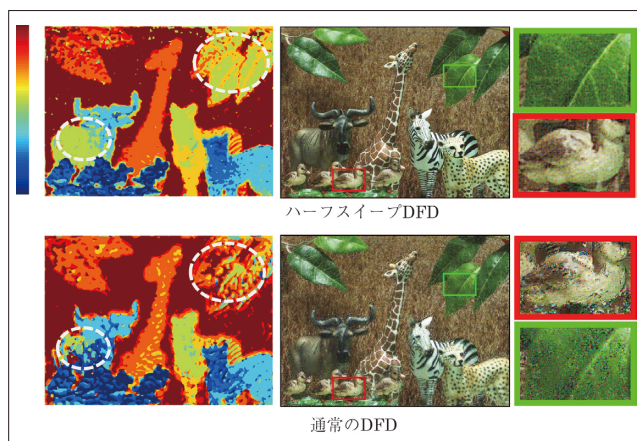


図9 ハーフスイープDFDと通常のDFDの比較

結果も奥行き推定が不安定な場所で通常のDFDではアーチファクトが見受けられるが、ハーフスイープではその改善が見られた。

5. センサ位置での符号化

一般的なカメラに用いられるセンサは、グローバルシャッタと呼ばれる電子シャッタを持つ。グローバルシャッタでは、センサのすべての画素が同期して露光開始や終了を行うことで、ある瞬間の画像を一枚の静止画として記録し、これを高速に繰り返すことで、静止画の連続として動画を撮影する。また、近年のCMOS画像センサ、特に静止画用のセンサとしてローリングシャッタを採用するセンサも一般的になっている。ローリングシャッタは、画像の行読み出しタイミングと露光が同期しているシャッタ方式で、行毎に順次露光される。そのため、画像の上部と下部では、異なる時間の画像であるため、動画撮影において像が歪むという欠点を持つが、回路が簡略であるためフォトダイオードの面積を最大限にとれ、感度が高いという利点がある。これらの一般的なセンサは、いずれもナイキストサンプリングに基づく均等サンプリングを前提としているため、すべての画素は均等な間隔でサンプリングされ、時間的にも均等な時間間隔でサンプリングされることを前提に設計されている。つまり、従来のセンサの露光時間やタイミングは、このような前提やセンサ設計の制限により予め固定されており、自由な設定変更や制御が難しかった。

一方で、近年の高解像度化や高速撮像の限界から、ナイキストサンプリングではなく、圧縮センシングの応用のためのランダム露光可能なセンサが出現している。また、Time-of-Flight (TOF) 型デプスセンサなどに代表される高機能センシングのために、さまざまなCMOSセンサが提案されている。これらに代表される新しい撮像センサは、これまで固定的であった露光制御をより自由に設定できたり¹¹⁾、マルチタップと呼ばれる複数電荷蓄積¹²⁾を可能とする。

5.1 擬似ランダム露光CMOSセンサを用いた圧縮ビデオセンシング

空間解像度と時間解像度の間のトレードオフはイメージセンサの普遍的な問題である。これに対し、ランダムな空間のサンプリングとスパース復元を用いた圧縮センシング手法が近年盛んに研究されている¹³⁾。これら手法は高時間解像度なシーン撮像を実現しているものの、ランダムな露光を実現できるイメージセンサは商用に現状存在しない。そのため、従来の研究ではシミュレーションのみか、もしくは光学変調素子と通常のイメージセンサを組み合わせ、擬似的ランダム露光を実現して手法の有用性を確認していた。

筆者らはピクセルごとに異なる露光タイミングを設定できるCMOSイメージセンサデザイン¹¹⁾と、これを用いた擬似ランダム露光を実現する手法を提案した¹⁴⁾。作成した試作機(図10)はすべてのピクセルに、通常のCMOSセンサにはない露光開始信号を8列毎に、露光終了信号を8行毎に共有して持つ。これにより 8×8 ピクセルのブロックに異なる露光時間を設定できる。試作機の構造の模式図を図11に示した。図11に示すように、試作のセンサは露光制御線の制約から、完全なランダム露光はできない。このようなハードウェア上の制約の下に最適な露光パターンを設計するのは困難である。そこで、Yoshidaら¹⁵⁾はDeep learningのエンコーダ・デコーダネットワーク学習の枠組みを用いて、最適露光パターンとフレーム復元のデコーダの同時学習を行った。実験では1フレームの間に16回の時間露光パターン切り替えによって得られた静止画から16フレームを復元した。図12に学習で求めた最適パターンにより符号化露光した入力画像と学習により得られたデコーダにより復元した16フレームのうち3フレームを例として示した。提案手法により、低時間解像度で撮像し、撮像後の計算処理により高フレームレートなシーンの動き情報が復元できていることが確認できた。

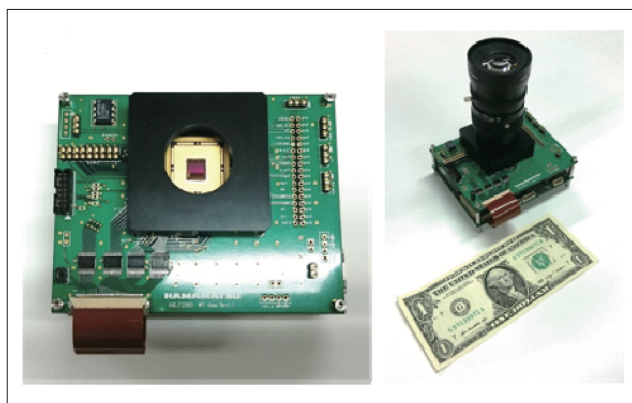


図10 擬似ランダム露光CMOSイメージセンサ試作機

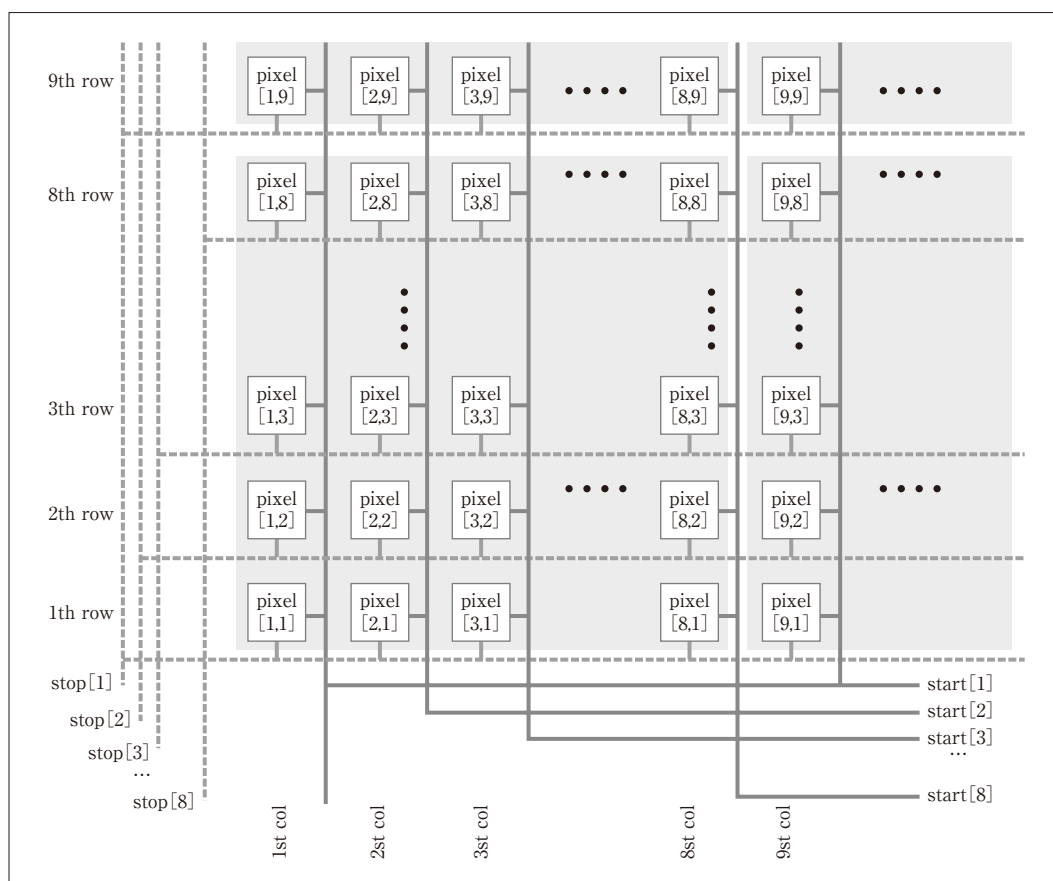
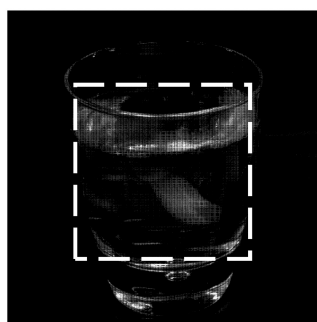
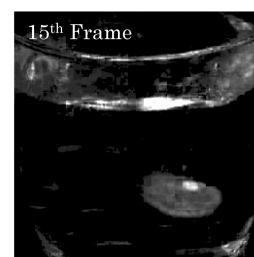
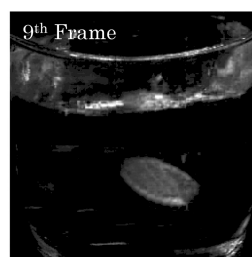
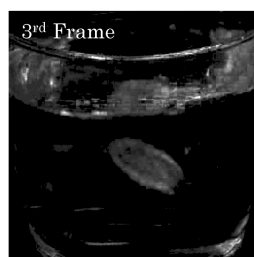


図11 試作センサの構造模式図



撮影した符号化露光画像



復元した高時空間解像度動画

図12 撮影画像と復元フレーム例

5.2 マルチタップCMOSセンサを用いた 動的照度差ステレオ

画像から3次元情報を計測する手法は数多く提案されているが、中でも1つのイメージセンサと複数の光源を用いて3次元形状を計測する照度差ステレオ法¹⁶⁾は被写体の詳細な形状を法線ベクトルとして計測することができる。しかし照度差ステレオ法は計測に複数枚の画像が必要であるため、対象が動いたり、形状が変化するような動的シーンに用いることができなかった。筆者らは、Hanら¹²⁾が提案

したマルチタップCMOSイメージセンサを用い、動的シーンでも法線ベクトルを推定できる照度差ステレオ法について提案した¹⁷⁾。

マルチタップCMOSイメージセンサは図13に示したとおり1ピクセルあたり4つのゲート(G1~G3, GD)と3つのフローティングディフュージョン(FD1~FD3)を備えており、各ゲートのOnとOffを切り替えることで電荷を蓄積するFDを切り替えることができる。そのためマルチタップCMOSイメージセンサは図14下段に示したように、

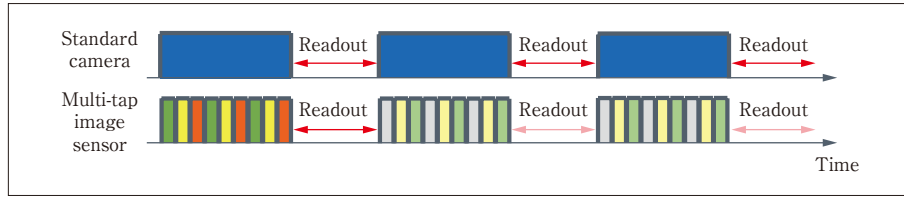


図14 通常カメラとマルチタップの露光パターン

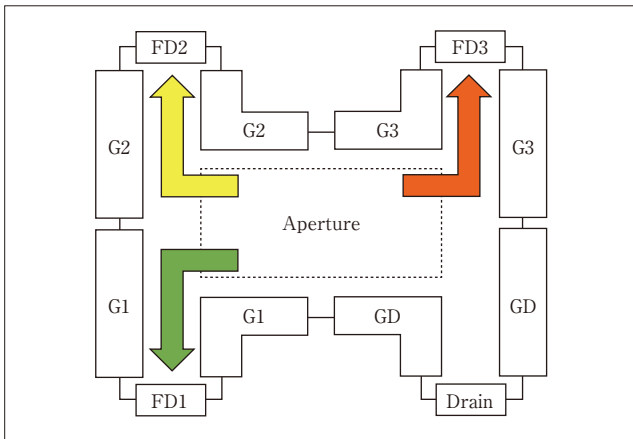


図13 マルチタップセンサ (3 tap) の画素構造

イメージセンサの露光を時分割し短い露光を何度も繰り返して撮影することが可能である。各FDから読み出される画像は小さい露光のそれぞれ対応するFDに蓄積された電荷の和であり、撮影できる3枚の画像の時間差は小さい露光1つに相当し、全体の露光時間に対してこれが十分に小さいと見なせる時、3つのFDから読み出される3枚の画像の時間差を無視することができる。筆者らは照度差ステレオ法による計測を行うため、異なる方向から光が当たるように配置した光源をイメージセンサのゲート信号と同期させた。図15に試作した動的フォトメトリックステレオカメラの外観を示す。これにより異なる方向から光を当てた画像をほぼ同時に撮影することができ、それらの画像に対し照度差ステレオ法¹⁶⁾に適用し動的シーンであっても法線ベクトルの推定を可能にした¹⁷⁾。

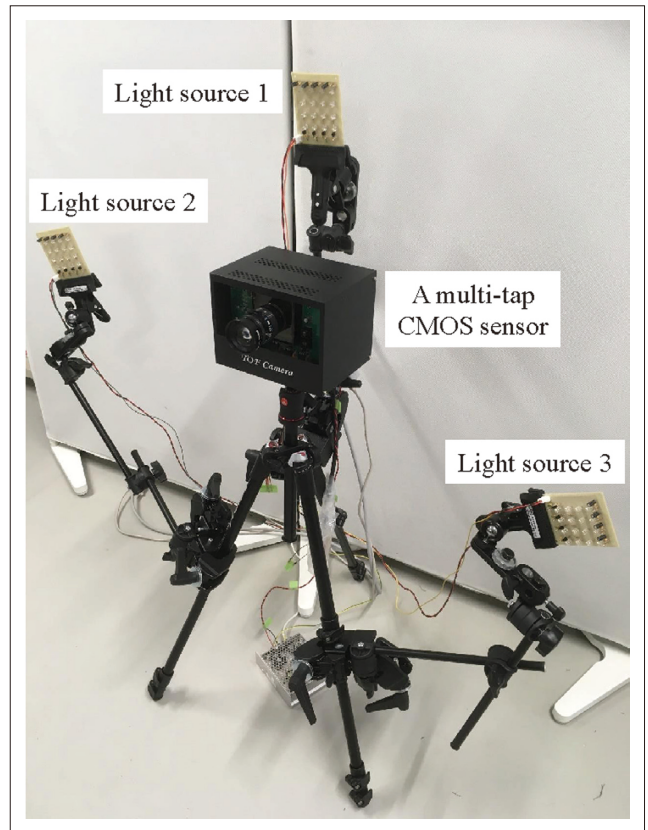


図15 試作動的フォトメトリックステレオカメラ

図16に落下するボールを撮影した画像を示す。図16(a)～(c)は通常のカメラ撮影した画像で、イメージセンサの露光に対してシーンの変化が高速であるため物体がずれて撮影されている。そのため、異なる対応点により復元され

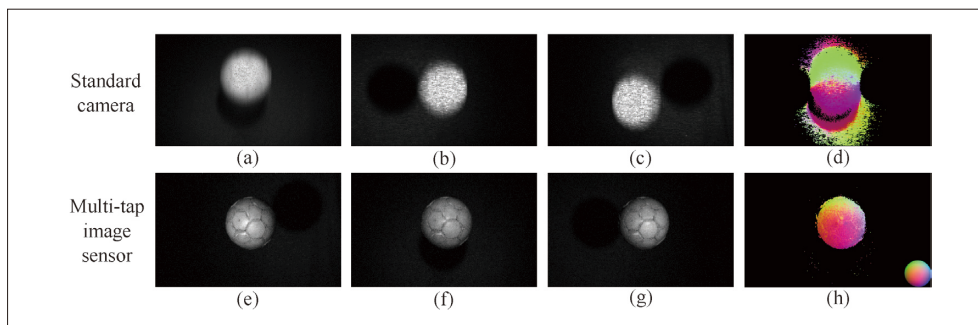


図16 通常カメラと提案システムによる計測と復元結果の比較

ることから図16 (d) に示すように法線が間違っ推定された。それに対して、本稿で提案するシステムで撮影した画像(図16 (e) ~ (g))ではずれなく撮影することができており、図16 (h) に示したとおり被写体の法線ベクトルが正しく推定できている。

6. むすび

本稿では、ハードウェアとソフトウェアを融合したコンピュータショナルフォトグラフィについて解説した。応用問題に特化した最適なカメラ撮像を考えるために、カメラの絞り、フォーカス、センサの露光関数を制御し、カメラのライトフィールド積分関数を符号化することで、従来のカメラ画像に対して容易に性能向上が可能であることを示した。スマートフォンなど現在のカメラは高性能のプロセッサと一緒に搭載されていることから、画像の後処理が容易になっている。今こそコンピュータショナルフォトグラフィが求めるハードウェアとソフトウェアの融合による問題解決が実用できる時期に来ている。(2019年2月12日受付)

〔文 献〕

- 1) M. Levoy: "Light fields and computational imaging", Computer, **39**, 8, pp.46-55 (Aug. 2006)
- 2) C.K. Liang and T.H. Lin and B.Y. Wong and C. Liu and H. Chen: "Programmable Aperture Photography: Multiplexed Light Field Acquisition", ACM Transactions on Graphics, **27**, 3 (2008)
- 3) H. Nagahara, C. Zhou, T. Watanabe, H. Ishiguro, S. Nayar: "Programmable Aperture Camera Using LCoS", Proc. European Conf. Computer Vision, LNCS6316, pp.337-350 (2010)
- 4) A. Levin, R. Fergus, F. Durand and W. Freeman: "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture", ACM Transactions on Graphics, **3** (2007)
- 5) C. Zhou and S. Nayar: "What are Good Apertures for Defocus Deblurring?", Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus, IEEE International Conference on Computational Photography (2009)
- 6) 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)
- 7) A.P. Pentland: "A new sense for depth of field", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **9**, 4, pp.523-531 (1987)
- 8) M. Subbarao and S. Surya: "Depth from defocus: A spatial domain approach", International Journal of Computer Vision, **13**, 3, pp.271-294 (1994)
- 9) C. Zhou, S. Lin and S. Nayar: "Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus", IEEE International Conference on Computer Vision (2009)
- 10) S. Matsui, H. Nagahara, R. Taniguchi: "Half-Sweep Imaging for Depth from Defocus", Image Vision Computing, **32**, 11, pp.954-964, Nov. 2014)
- 11) 浜松ホトニクス: "個体撮像装置", 特開2015-216594 (2015)
- 12) S.M. Han, T. Takasawa, K. Yasutomi, S. Aoyama, K. Kagawa. And S. Kawahito: "A Time-of-Flight Range Image Sensor with Background Canceling Lock-in Pixels Based on Lateral Electric Field Charge Modulation", IEEE Journal of the Electron Devices Society, **3**, 3, pp.267-275 (2015)
- 13) Y. Hitomi, J. Gu, M. Gupta, T. Mitsunaga and S.K. Nayar: "Video from a Single Coded Exposure Photograph using a Learned Over-Complete Dictionary", Int. Conf. Computer Vision (2011)
- 14) T. Sonoda, H. Nagahara, K. Endo, Y. Sugiyama and R. Taniguchi: "High-Speed Imaging using CMOS Image Sensor with Quasi Pixel-Wise Exposure", Int. Conf. Computational Photography (2016)
- 15) M. Yoshida, A. Torii, M. Okutomi, K. Endo, Y. Sugiyama, R. Taniguchi, H. Nagahara: "Joint optimization for compressive video sensing and reconstruction under hardware constraints", European Conference on Computer Vision (Sep. 2018)
- 16) R.J. Woodham: "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", Optical Engineering, **19**, 1, pp.139-144 (1980)
- 17) T. Yoda, H. Nagahara, R. Taniguchi, K. Kagawa, K. Yasutomi and S. Kawahito: "The Dynamic Photometric Stereo Method Using a Multi-Tap CMOS Image Sensor", MDPI Sensors, **18**, 3 (Mar. 2018)



ながはら はじめ
長原 一 2001年、大阪大学大学院基礎工学部博士課程修了。同年、日本学術振興会研究員として同研究科に所属。2003年より、大阪大学大学院基礎工学研究科助手。2007年、同大学研究科助教。2010年、九州大学大学院システム情報科学研究院准教授。2005年、フランスピカルディ大学客員助教授。2007年～2008年、2016～2017年、アメリカコロンビア大学客員研究員。2017年より、大阪大学データリテリフロンティア機構教授。コンピュータショナルフォトグラフィ、コンピュータビジョンの研究に従事。ACM VRST 2003 Honorable Mention Award, 2012年情報処理学会長尾真記念特別賞, ICCP 2016 Best Paper Runners-up Award, 2016年度画像センシング技術研究会高木賞などを受賞。博士(工学)。