

符号化撮像

長原 一^{†1}

最近、コンピュータシヨナルフォトグラフィの一分野として、符号化撮像法が盛んに議論されてきている。符号化撮像では、従来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 (PSF) を符号化することでより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、符号化絞りや光学系の工夫などカメラ自体に手を加えることから、符号化撮像はハードウェアとソフトウェアの融合手法であるといえる。このチュートリアルでは、符号化手法の概要や特徴、さらに応用のためのハードウェアやソフトウェア実装法に関して解説する。

Coded Imaging

HAJIME NAGAHARA^{†1}

Recently, a coded imaging is getting popular as one of computational photography research area. The coded imaging is a new combined approach with hardware and software for capturing an image. It realizes to make blur restoration or depth from focus problems much stable by controlling a point spread function (PSF). The coded imaging is realized by some modification of camera optics such as a coded aperture or sensor motion etc. I will explain about characteristics of various coded imaging methods and implementations of hardware and software of them.

1. はじめに

カメラは、3次元のシーンを2次元の画像として写し取る(射影)道具である。初期のカメラは、ピンホールカメラとよばれ、暗箱にかけられた小穴を通る主光線のみを画像とし

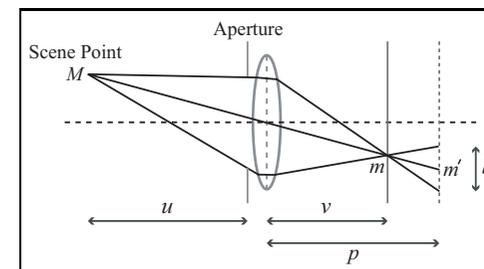


図1 レンズカメラの撮像モデル

て射影していた。得られる画像の明るさはこの穴の開口に比例し、ピンホールカメラでは、開口を広げると明るさは増すが、その反面、画像のぼけも大きくなるため、明るさと画像の精細さはトレードオフの関係にあった。その後、ピンホールの代わりにレンズがカメラに用いられるようになり、精細さを保ちながら開口を広げることが可能となった。図1にレンズカメラの光学モデルを示す。焦点距離 f のレンズにより距離 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、前後にずれると下記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。

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

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。すなわち、レンズを用いると明るい画像が得られるが、ぼけを生じない領域は被写界深度 (Depth of Field) と呼ばれる距離 v の面付近の領域に限られるため、奥行きの大いシーンに対してはシーンすべてにフォーカスした画像を撮像することはできなかった。さらに近年のデジタルカメラの小型化や高精細化に伴う撮像素子のピクセルサイズの微細化により、この被写界深度はさらに減少してきている。一般に被写界深度を大きくするためには、レンズの開口(絞り)を絞ることが行われる。しかし、現在の微細化された撮像素子では、画像のSN比を維持するため、入射光を減少させる絞りによる被写界深度の拡大は現

^{†1} 大阪大学
Osaka University

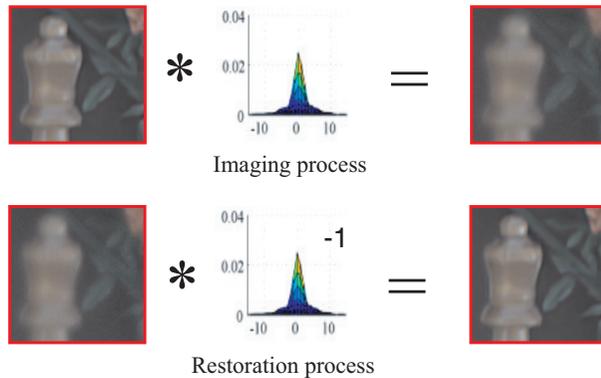


図 2 撮像過程と復元過程

実的ではない。このような問題から、ぼけた画像から全焦点画像を復元しようとする試みが数多く行われてきた。

カメラにより撮像される画像は、レンズや絞りというカメラ光学による劣化過程の出力であると見なすことができる。このカメラによる劣化過程は、一般ぼけ関数 (PSF) として表され、撮像画像 j は、式 3 の様に理想のシーン画像 (全焦点画像) i のコンボリューションとして表される。

$$j = k * i + n \quad (3)$$

ここで k は PSF を、 n はノイズを表す。デコンボリューションによる全焦点画像の復元は、図 2 に示す様な劣化画像 j から i を求める逆変換であると考えることができる。ここで式 3 のフーリエ変換は次の様に表される。

$$J = K \cdot I + N \quad (4)$$

もし、PSF の逆関数 K^{-1} が既知であるなら、全焦点画像の周波数画像 \hat{I} を求めることができる。

$$\hat{I} = \frac{J}{K} = I + \frac{N}{K} \quad (5)$$

そして、 \hat{I} を逆フーリエ変換することで、全焦点画像 \hat{i} を復元することができる。しかしながら、式 5 より分かるように、もし PSF 関数のフーリエ変換 K の一部にゼロまたは小さい値を含めば、その推定周波数画像 \hat{I} は、発散もしくは不安定な解となる。また、式 5 の右項が示すように、除算により画像のノイズが強調される。その結果、復元画像 \hat{i} には、強

いリングングやノイズなど大きなアーティファクトが生じる。これらを抑制する方法として様々なデコンボリューション手法が提案されている。これについての詳細は 6 章で説明する。

一般に、画像のデコンボリューションに必要な PSF は、光学では OTF (Optical transfer function) と呼ばれ、カメラのレンズや絞り形状により決定されることが知られている。一般的な円形絞りのカメラの場合、その PSF の周波数分布に多くのゼロ交差を持つことが知られており、安定した全焦点画像の復元には向かない。そこで、カメラのレンズや絞り形状など光学系を工夫し、PSF 形状やその周波数特性をコントロールすることで、復元性能を向上させようとする方法が数多く提案されてきた。本論文ではこれをぼけ関数の符号化と呼ぶ。

2. ぼけ関数の符号化

従来より天文学を中心に、複雑なパターンのマスクが符号化撮像に用いられてきた。その代表的なものに、MURA コード¹⁾がある。MURA コードで撮像される画像の PSF の周波数特性はフラットで広帯域であるため、デコンボリューションによる画像のぼけ復元が安定に行える。MURA は X 線や γ 線撮像のための符号化絞りとして提案されたが、Veeraraghavan ら²⁾は、可視光を撮像する通常のレンズカメラに最適化した広帯域な符号化絞りを提案した。また、Zhou ら³⁾は、画像のノイズレベルに応じた最適化絞りの設計手法を提案した。

天文学においては、撮影対象は遠方であるため、その PSF は画像全体でほとんど変化しない。しかしながら、通常のカメラ撮影においては、シーン中の撮影物体の奥行きは様々でその奥行きが画像中の物体ごとに異なる。デコンボリューションは、PSF が既知であることが前提で、異なった PSF によりデコンボリューションを行うと、全焦点画像復元どころか逆に画像を改悪する結果となる。そのため、一般的なシーンの撮像では、デコンボリューションのために画像の部分ごとの PSF が必要であり、それはシーン中の奥行き推定と等価である。シーンの奥行きを画像のぼけより推定する方法は Depth from defocus (DFD) と呼ばれ、従来より数々の手法が提案されている^{4),5)}。符号化絞りをを用いた DFD は、初期には日浦ら⁶⁾により提案され、複数のピンホールの符号化絞りが DFD 推定をロバストに行えることを示した。一般的な円形絞りをを用いた DFD では、画像中のぼけがシーンそのものからなのか奥行きぼけによる結果からなのか判別できないという曖昧性をもつ。符号化絞りをを用いるとぼけ形状が奥行きに対して大きく変化するため、1 枚の画像からでも DFD による奥行き推定が可能となる。Levin ら⁷⁾は、MURA や Veeraraghavan らのゼロ交差を避けた符号化絞りとは逆に、積極的にゼロ交差を PSF に持たせ、奥行きの違いによるぼ

けの周波数特性を差別化することで、奥行き推定にロバストな符号化絞りを提案した。しかし、ゼロ交差を持つ PSF を用いたデコンボリューションは、推定画像に大きなアーティファクトを生じるため、強力な正則化を用いたデコンボリューション手法も同時に提案されている¹⁸⁾。

先に述べた様に、一般的なシーンの撮像では、デコンボリューションによる全焦点画像の推定と DFD による奥行き推定の両方の性能が要求される。しかしながら、デコンボリューションにはゼロ交差を避け、またロバストな DFD にはゼロ交差を持つ PSF が望ましいため、単一の符号化絞りではそれらを両立することができない。そこで Zhou ら⁸⁾ は、2つの符号化絞りを複合して用いることで、ロバストな奥行き推定と安定したデコンボリューションを実現する符号化絞りペアを最適化により求める手法を提案した。

符号化絞りは、絞り形状により入射光を遮る働きをするため、画像の SNR の観点からは不利な撮像手法である。そこで、レンズレット⁹⁾ や位相板¹⁰⁾⁻¹²⁾、センサを運動させる¹³⁾ことで、絞り開口をあけたまま PSF を制御する方法も提案されている。特にウェーブフロントコーディング¹⁰⁾⁻¹²⁾ とフォーカススイープ¹³⁾ は、PSF を奥行きパラメータに対して不変にすることで、奥行き推定を必要とせずに全焦点画像を復元できる。

一方で、奥行きぼけだけでなく、対象の動きによるモーションブラーの回復にも符号化撮像が用いられている。これらは、符号化露光¹⁴⁾ やカメラの運動¹⁵⁾ を用いることで、焦点変化ではなく空間方向に現れるぼけを符号化している。

以上、図 3 にそれらの符号化絞り特徴と応用分野をまとめて示す。また、以降の章において個々の符号の生成手法や特徴について紹介する。

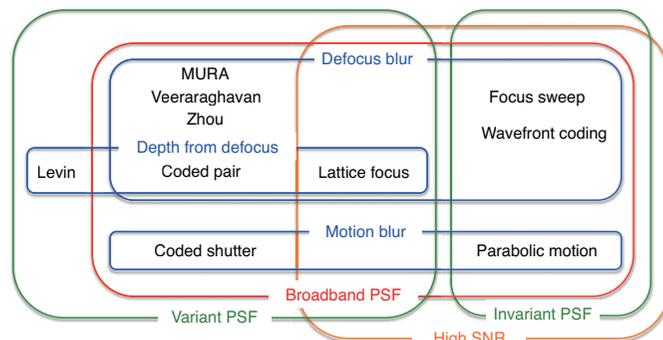


図 3 各符号化撮像手法の特徴



図 4 符号化絞り³⁾

3. 絞りによる符号化

カメラの絞りは、カメラの開口 (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。通常カメラの絞りは円形であるが、符号化絞り (Coded Aperture) を用いた符号化撮像では、この絞りに図 4 に示すようにマスクパターンを差し込むことで画像の PSF を制御する方法である。この章では、様々な絞りパターンとその生成手法を紹介する。



(a) MURA (b) Veeraraghavan (c) Zhou (d) Levin (e) Coded pair

図 5 様々な符号化絞りパターン^{3),8)}

3.1 Modified Uniformity Redundant Arrays (MURA)

絞り形状を符号化する撮像法は、そもそも天文学において盛んに提案されてきた。天文観測で用いる電波望遠鏡で扱う X 線や γ 線などの短波長の電磁波は、屈折しにくいのでレンズによる結像が難しい。そのため、レンズのない望遠鏡の絞りとして、複雑なパターンのマスクが用いられた。その代表的なものが MURA コード¹⁾ であり、式 6 で示すように数式モデルで生成されるパターンである。

$$A = \{A_{i,j}\}_{i,j=0}^{p-1}, \quad p^2 = 4m + 1, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } i = 0, \\ 1 & \text{if } j = 0, i \neq 0, \\ 1 & \text{if } Q_i Q_j = +1, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

where,

$$Q_i = \begin{cases} +1 & \text{if } i \text{ is a quadratic residue modulo } p, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

このモデルに基づき生成した、 17×17 の MURA パターンを例として図 5-a に示す。この絞りで撮像された PSF の周波数特性は、フラットでゼロ交差を持たず広帯域であるという特徴をもつ。しかしながら、レンズを用いた可視光線の撮像系においては、必ずしも最適な絞りととはならない。

3.2 ぼけ復元最適化絞り

ぼけ復元性能を狙った符号化絞りには、図 5-b,c などがある。これらの絞り形状は、図 4 の右図に示す様に、周波数特性のゼロ交差を避け、高周波数情報をできるだけ通過させようとする広帯域を狙って最適化された結果として得られたパターンである。

Veeraraphavan ら²⁾ は、可視光を用いたレンズ光学を持つ通常のカメラにおいては、MURA は最適な広帯域絞りではないことを指摘し、最適化探索手法により図 5-b のパターンを求めた。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。

また、図 5-c に示す Zhou らのパターン³⁾ は、デコンボリューション後の復元画像と真の全焦点画像の距離を評価関数として求められた。デコンボリューションの結果は、ノイズと真の画像の分布により大きく結果が異なるため、対象画像の仮定として自然画像の周波数分布が $1/f$ に従うという事前知識を用いた評価関数を定義した。この評価関数は、式 7 のように表され、撮像画像が分散 σ^2 のノイズを持つという仮定の下で、そのノイズがデコンボリューションカーネル K によってどの程度強調されるかという指標となっている。

$$R(K) = \sum_{\nu, \omega} \frac{\sigma^2}{|K(\nu, \omega)|^2 + \sigma^2/S(\nu, \omega)} \quad (7)$$

ここで、 S は自然画像の周波数分布であり、論文では複数の自然画像の周波数分布の平均として求められている。最適な符号化絞り形状は、式 7 を最小化するパターンを探索することで、画像のノイズレベルに対して最適なデコンボリューションカーネルとして求まる。実際に Zhou らは、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて探索することで、図 5-c を求めた。これは、 $\sigma = 0.001$ の場合の最適解で、 σ の値が変われば最適絞りパターンは異なる。

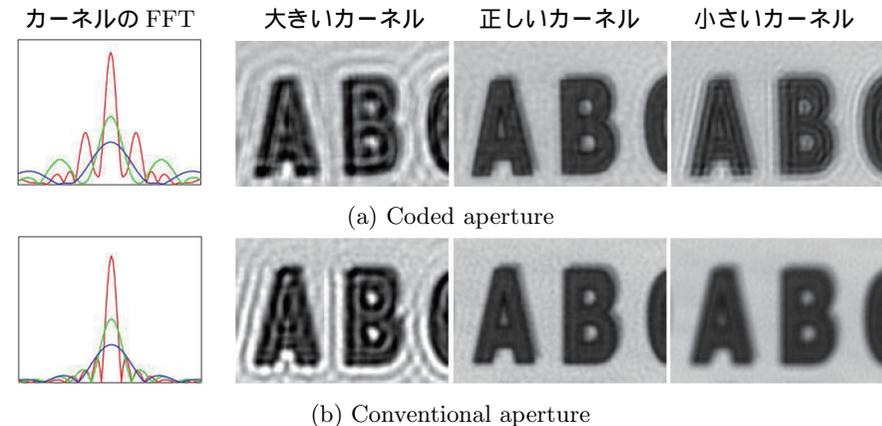


図 6 符号化絞りと円形絞りでの復元画像の比較

3.2.1 DFD 最適化絞り⁷⁾

カメラの被写界深度には制限があるため、焦点位置から離れた奥行き物体は画像中でぼけを生じる。このぼけの大きさは式 1,2 に示す様にカメラから対象までの距離に依存するため、ぼけを計ることで逆にシーンの奥行きを推定することができる。これは Depth from defocus (DFD) と呼ばれ、図 5-d は、DFD での奥行き推定を安定に行うためのパターンとして提案された。一般の円形絞りをを用いた DFD の場合の PSF は、図 6-b に示すように対象の奥行き変化、すなわちカーネルのサイズ変化に伴う周波数特性の変化は緩やかである。つまり逆に、このスケール変化に対して過敏に変化する図 6-a のようなカーネルを設計す

れば、異なるカーネルでのデコンボリューションによるアーティファクトにより生じる誤差が大きくなり、奥行きを安定に差別化できる。Levin らは、この様な奥行き変化の大きい符号化絞りの探索基準として、奥行きの異なるぼけ関数間の KL ダイバージェンスとして式 8 のように定義した。

$$D_{KL}(K^{d^*}, K^d) = \sum_{\nu, \omega} \left(\frac{\sigma^{d^*}(\nu, \omega)}{\sigma^d(\nu, \omega)} - \log \left(\frac{\sigma^{d^*}(\nu, \omega)}{\sigma^d(\nu, \omega)} \right) \right) \quad (8)$$

$$\sigma(\nu, \omega) = |K(\nu, \omega)|^2 (\alpha |D_x(\nu, \omega)|^2 + \alpha |D_y(\nu, \omega)|^2)^{-1} + N^2$$

ここで、 D_x と D_y は、微分フィルタ $d_x = [1, -1]$ と $d_y[1, -1]^T$ のフーリエ変換を表している。実際に Levin らは、ランダムに生成した、 13×13 のバイナリパターンを、8 段階の奥行き差を想定してリスケールを行い、すべての奥行き組み合わせの KL ダイバージェンスを計算してその最小値を最大化することで、図 5-d を求めた。

3.3 ぼけと DFD 復元最適化ペア絞り⁸⁾

ここまでの章で紹介したように、ぼけ復元のための広帯域の絞りと DFD のための絞りの周波数特性は相反しているため、最適化を両立できない。しかしながら、符号化絞りによるぼけ復元では、基本的に復元のためのカーネルサイズを決定するために、距離を推定する必要がある。すなわち、距離が安定に求まらなければ、全焦点画像も安定には求まらず、距離復元のための絞りでは、ゼロ交差の問題から安定に全焦点画像が求まらないというジレンマがあった。これに対して Zhou⁸⁾ らは、二枚の符号化絞りを最適化することにより、奥行き復元と全焦点画像の復元を両立した符号化絞りペアを提案している。この絞りの周波数特性は、図 7 に示すように、一方の絞りではゼロ交差を含み距離の違いによるアーティ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。実際には、式 9 の評価関数を最小化するパターンを遺伝的アルゴリズムにより探索することで、図 5-e を求めた。

$$R(K_1, K_2 | d^*, \sigma) = \min_{d \in D/d^*} \sum_{\nu, \omega} \left(\frac{A |K_1^d(\nu, \omega) \cdot K_2^{d^*}(\nu, \omega) - K_2^d(\nu, \omega) \cdot K_1^{d^*}(\nu, \omega)|^2}{\sum_i |K_i^d(\nu, \omega)|^2 + C} \right. \\ \left. + \sigma^2 \frac{\sum_i |K_i^{d^*}(\nu, \omega)|^2 - \sum_i |K_i^d(\nu, \omega)|^2}{\sum_i |K_i^d(\nu, \omega)|^2 + C} \right) \quad (9)$$

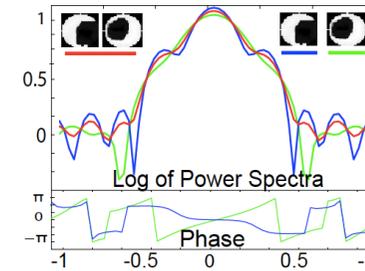
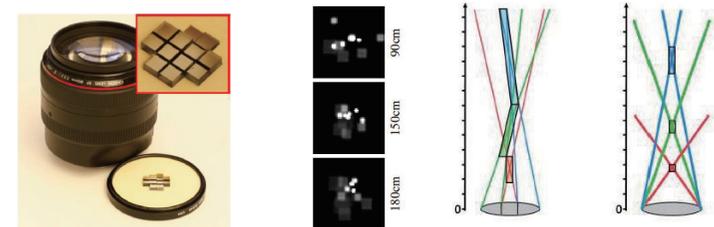


図 7 符号化絞りペアの PSF 周波数特性

4. レンズなどを用いた符号化

4.1 ラティスフォーカスレンズ⁹⁾

絞りを符号化することは、すなわち入射光を絞りで制限していることに他ならず、結果として画像の SN 比が減少するという問題がある。ラティスフォーカスでは、図 8-a に示すように、レンズの中心に複数のレンズを配置することで、カメラの絞りを開けたまま PSF の符号化を行う手法である。デコンボリューションによる奥行きぼけの復元では、対象の奥行きが異なっても、各々の奥行きのぼけ関数の周波数特性が広帯域であることが望まれる。Levin らは、これをライトフィールドの周波数解析により理論的に解析し、想定する奥行き範囲で復元性能の上限値を与える PSF 特性を求めることで、最適なレンズを設計した。その結果、具体的には図 8 に示されるように、広帯域の PSF を実現するために、4.3 章のフォーカススイープカメラが、焦点距離を変えながら異なる PSF を時間的に統合する (図



(a) ラティスフォーカスレンズ (b) PSF (c) 空間重畳 (d) 時間重畳

図 8 ラティスフォーカスカメラ

8-d) のに対して、ラティスフォーカスレンズでは、絞りを空間方向に分割し、焦点距離の異なるレンズで得られる PSF を空間統合 (図 8-c) している。ただし、得られる PSF は、図 8-b に示すように奥行き不変ではないため、奥行き推定が必要で画像の復元結果もこれに依存する。

4.2 ウェーブフロントコーディング

通常のカメラのレンズでは、図 9-a に示すように主光線と副光線が単一距離の一点で交わる (集光する) ように設計されている。そのため、対象の距離に応じてこの点が移動するため、単一の撮像面では距離の異なる対象は大きく異なったぼけサイズで撮像される。従って、デコンボリューションのための PSF が、対象の奥行きにより大きく異なることから、DFD により奥行きを復元する必要があった。Doski ら¹⁰⁾ は、カメラのレンズの絞り位置に位相板 (Optical phase plate) とよばれる光学素子を挿入し、図 9-b に示すように主光線と副光線の交差位置を意図的にずらすことで、対象の奥行きによらないぼけの発生を実現した。この結果、通常のレンズとは異なり、どの奥行きでも集光しないが、そのぼけは“金太郎あめ”のようにすべての奥行きにおいて同じような PSF で撮像されることとなる。すなわち、奥行き情報がなくとも PSF が奥行き不変であることから単一のカーネルでデコンボリューションによって全焦点画像を生成できる。さらに、PSF の周波数特性が広帯域であるため復元性能が高いという利点も併せ持つ。このような奥行き不変 PSF を発生する位相板の形状は式 10 のような 3 次関数で表される。

$$\phi(x, y) = \alpha(x^3 + y^3) \quad (10)$$

同様の不変 PSF を得るために他にも様々な位相板が提案されている。小松ら¹¹⁾ は、位相板の分布関数を式 11 で表されるようなべき級数で定義し、その展開係数を最適化アルゴリズムで求めることで最適位相板形状を求めた。

$$\phi(x, y) = \sum_{n=0}^k \left(\sum_{m=0}^n C_{nm} x^m y^{n-m} \right) \quad (11)$$

これにより、Doski らの 3 次位相板の問題点である PSF の横ずれによる画像劣化を抑制する。さらに、George ら¹²⁾ は、レンズの絞り位置に位相板を置くのではなく、レンズそのものを位相板として動作させることで、不変 PSF を実現する対数非球面レンズの設計方法を提案した。

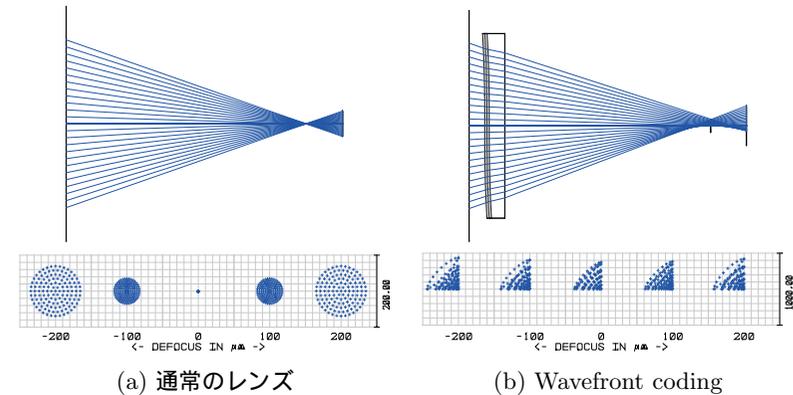


図 9 通常レンズと Wavefront coding での集光と PSF の比較

4.3 フォーカススイープ¹³⁾

奥行き不変 PSF を得る方法として、センサを移動させながら撮像するフォーカススイープカメラがある。このフォーカススイープカメラは、図 10-a に示す様に、レンズと撮像素子、リニアアクチュエータで構成され、一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。すなわち、露光中に式 2 の p が時間的に変化しながら撮像されるため、このカメラの撮像画像は、異なるぼけ半径 $b(t)$ で撮像される画像を重畳した画像として得られる。図 10 は、通常カメラとフォーカススイープカメラの PSF をピルボックスモデルを用いて表したものである。図 10-b に示すように、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。それに対して図 10-c に示すように、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。そのため、撮像画像はぼけているが、PSF が奥行き不変であることからウェーブフロントコーディング同様、シーンの奥行き情報なしに単一のカーネルでデコンボリューションすることにより全焦点画像を復元できる。また、この PSF は広帯域であることから、復元性能も高い。スイープを実現する方法として、長原ら¹³⁾ は撮像素子を移動させたが、レンズの焦点距離を変えることで同様の PSF を実現できるため、通常のオートフォーカス機構などを利用できる。

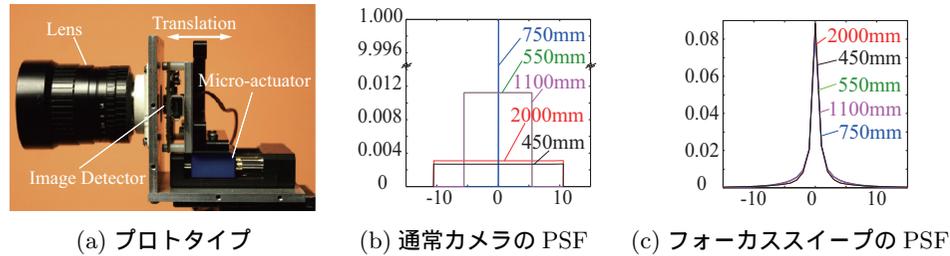


図 10 フォーカススイープカメラ

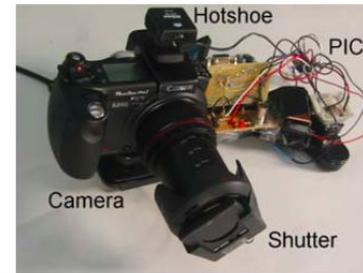


図 11 符号化露光カメラ

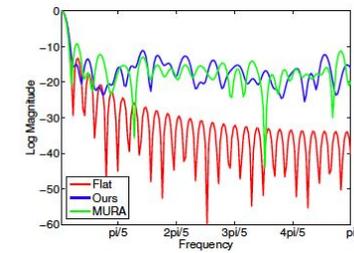


図 12 時間フィルタの DFT

5. モーションブラー復元のための符号化

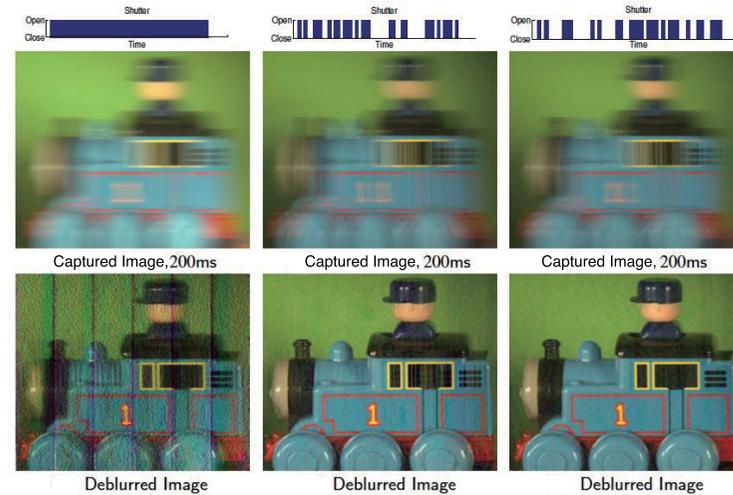
モーションブラーは、撮像中に対象が動くことで生じるぼけのことである。このぼけの PSF は、カメラ本体の光学系による PSF と物体の動きによる時間矩形フィルタのコンボリューションとして表される。時間矩形フィルタは、図 12 に示されるように周波数特性に多くの谷をもつ。その結果、デコンボリューションによるモーションブラー復元は、図 13-a に示すように多くのアーティファクトを生む。そのため、奥行きぼけ復元同様、モーションブラーの復元においても符号化撮像法が提案されている。

5.1 符号化露光¹⁴⁾

モーションブラーの PSF の周波数特性を広帯域化するために、カメラのシャッターを符号化する符号化露光カメラが提案されている。この符号化露光カメラでは、図 11 で示されるように、カメラのレンズの前面に液晶シャッターを取り付けた構成をとる。このカメラは、一枚の画像の露光時間中にシャッターを開閉することで、図 13-b, c に示すように時間露光関数を符号化することができる。このように、符号化された時間露光関数は、図 12 に示すように、通常の矩形露光に対して広帯域でフラットな周波数特性を実現できる。また、彼らは MURA コードに対してさらに最適なコードを探索により求めた。その結果、図 13-c に示すように、通常の矩形シャッターと比較して、安定にモーションブラーの復元を行っている。

5.2 放物運動カメラ¹⁵⁾

Levin らは、カメラを撮像時間中に平行移動させながら画像を撮像することで、モーションブラーを復元する符号化撮像手法を提案した。カメラ運動に放物軌道を用いると、撮像された PSF はすべての運動速度から生じるモーションブラーのたたみ込みとして表される。図 14-b に示すような、異なる方向や速度で移動する物体の軌跡は、通常のカメラで撮像す



(a) 通常のシャッター (b) MURA コード (c) 最適化コード

図 13 モーションブラー画像のデコンボリューション

ると図 14-c で示されるように、当然ながら形状や長さの異なるモーションブラーとして観測される。すなわち、これらのブラーを除去するためには物体の移動速度も推定する必要がある。これに対して、放物運動カメラでは、図 14-d に示すように、シーン中に異なる動きの物体が存在してもその PSF は同じ形状として撮像される。つまり、この PSF の不変性から単一カーネルを用いてコンボリューションすることで、シーンの動き情報なしにモ-

ションブラーを復元できる．本来は，モーション不変 PSF にはセンサの放物平行運動が必要であるが，平行運動を回転運動に近似したプロトタイプカメラ (図 14-a) を用いて実画像でモーションブラーの復元を検証している．

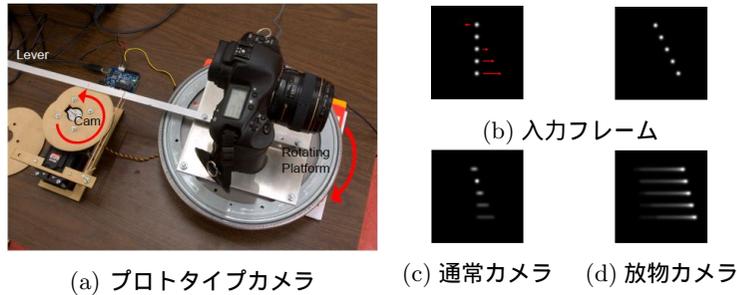


図 14 放物運動カメラ

6. デコンボリューション

符号化絞りの目的は，ぼけた撮像画像 j から焦点の合った理想画像 i を求めることである．式 3 で示したように，撮像は理想画像 i とカメラのぼけ関数 k で表される劣化過程のコンボリューションとしてモデル化でき，デコンボリューションとは，撮像画像 j と劣化過程 k から逆に理想画像 i を復元する問題である．ぼけ関数の特性にもよるが，一般的にこれは劣決定問題であること，また，式 5 に示されているように，単純な逆変換ではノイズを増強するため，安定できれいな推定画像を得るために，様々なデコンボリューション手法が提案されてきた．

古典的なデコンボリューションフィルタとしてウィナーフィルタや Recharadson-Lucy^{16),17)} フィルタがよく用いられる．ウィナーフィルタは，式 5 に示した単純なインバースフィルタに正則化項を付け加えた形となっており，理論的には真の画像と推定画像の最小二乗誤差を最小化するデコンボリューション手法である．このフィルタは周波数空間では式 12 のように表される．

$$\hat{I} = \frac{J \cdot \bar{K}}{|K|^2 + \frac{|N|}{|I|}} = \frac{J \cdot \bar{K}}{|K|^2 + C} \quad (12)$$

ここで， C は画像の周波数分布に対するノイズの比，すなわち画像の SNR の逆数であるが，一般に真の画像分布を得るのは不可能であるため，固定値が設定されることが多い．一般に C は試行錯誤により設定する事となり，デコンボリューション結果はその値に依存する．Matlab では `deconvwnr` として実装されている．これに対して，Recharadson-Lucy フィルタは，デコンボリューションを画像空間での繰り返し最適化問題として解く手法で，式 13 のように表される．

$$f^{t+1} = f^t \cdot k * \frac{g}{f^t * k} \quad (13)$$

Recharadson-Lucy では，ノイズや画像に関する事前知識は推定に必要なが，繰り返し演算のため計算コストが高い．Matlab では，`deconvlucy` として実装されている．

デコンボリューションによるアーティファクトを低減するために画像の事前知識を用いるデコンボリューション手法も提案されている．Zhou らは，文献^{3),8)} において，ウィナーフィルタの画像分布特性に自然画像の分布特性を用いている．自然画像はシーンによらず $1/f$ の周波数特性を持つことが知られている．このことを撮像画像の事前知識としてウィナーフィルタの正則化項に $C = \sigma^2/S$ として設定した．ここで σ^2 は画像ノイズの分散， S が自然画像の周波数分布に対応する．実際には，複数枚の自然画像の周波数分布を平均することで S を求めた．

また，Levin らは，スパースデリバティブプライアと呼ばれる画像の統計知識を正則化に用いたデコンボリューションを提案した¹⁸⁾．一般的な画像では，エッジなど微分値の高い成分は画像中でスパースに分布する．このデコンボリューションでは，式 14 に表されるように，画像全体の微分成分の合計をペナルティとした正則化項を用いている．

$$i = \operatorname{argmin} |j - k * i|^2 + \lambda \sum |\nabla i|^{0.8} \quad (14)$$

デコンボリューションで強調されるノイズをノイズ除去法と組み合わせることで抑制しようとする複手法も提案されている．Dabov ら²⁰⁾ は，ウィナーフィルタと BM3D とよばれるノイズフィルタを組み合わせることで，ノイズの少ない復元手法を提案した．

これらデコンボリューション手法は，センサ特性や PSF など撮像画像の質やマジックパラメータにより大きく結果が異なる．筆者の経験では，広帯域の PSF では，ウィナーフィルタのような線形な変換，ゼロ交差を持つなど PSF 特性が逆変換に向かないものはスパースプライアの様な強力な正則化法のフィルタが視覚的に良好な結果を生むと思われる．こ

に挙げたフィルタはどれも Matlab の Image tool box に搭載されている，または，web 上にサンプル^{19),21)} が公開されているので，各々の問題に試していただきたい．

7. おわりに

本チュートリアルでは，画像処理を前提とした画像撮像法である符号化撮像について取り上げた．近年の小型化や撮像素子の微細化による物理的制約からデジタルカメラが性能向上に行き詰まっていることや，搭載プロセッサの性能向上によりデコンボリューション処理が可能となりつつあることから符号化撮像は今後のカメラ撮像の主流になっていくものと考えられる．従来のカメラの光学系は，撮像面上で画像が集光することを目的として進化してきた．符号化撮像では，むしろ故意に撮像画像をぼかすことで最終的に得られる画像の質や撮像効率を向上させようとしている．これは，カメラの撮像手法のパラダイムシフトであると考えられる．しかしながら，現在の符号化撮像の研究や論文はあくまで，画像処理やイメージベーストレンダリングなどビジュアライゼーション目的の応用に用いられるに過ぎない．今後，符号化撮像における撮像手段から問題解決をしようとする方向性が，画像理解や認識などコンピュータビジョンの応用にさらに広がり，より困難な問題解決に発展していくことを予想し期待する．

参 考 文 献

- 1) S. R. Gottesman and E. E. Fenimore: New family of binary arrays for coded aperture imaging, *Applied optics*, Vol. 28, No. 30, pp.4344–4352, Oct, 1989.
- 2) 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.
- 3) C. Zhou and S. K. Nayar: What are Good Apertures for Defocus Deblurring?, *IEEE International Conference on Computational Photography*, Apr, 2009.
- 4) A. P. Pentland: A new sense for depth from defocus, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 4, pp.523–531, 1987.
- 5) M. Subbarao and S. Surya: Depth from defocus: A spatial domain approach, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 13, No. 3, pp. 271–294, 1994.
- 6) 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*, Vol. J82-D-II, No. 11, pp. 1912–1920, 1999.
- 7) A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. Freeman: Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, *ACM Transactions on Graphics*, no. 3, 2007.
- 8) C. Zhou, S. Lin, and S. Nayar: Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus,

- IEEE International Conference on Computer Vision*, 2009.
- 9) A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand, and W. T. Freeman: 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2009.
- 10) E. Dowski and W. Cathey: Extended depth of field through wave-front coding, *Journal of the Optical Society of America A*, no. 11, pp. 1859–1866, 1995.
- 11) Y. Takahashi and S. Komatsu: Optimized Free-form Phase Mask for Extension of Depth of Field in Wavefront-coded Imaging, *Optical letters*, Vol.33, No. 13, pp. 1515–1517, 2008.
- 12) N. George and W. Chi: Extended depth of field using a logarithmic asphere, *J. Optics A: Pur and Applied Optics*, 2003.
- 13) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. Nayar: Flexible Depth of Field Photography, *European Conference on Computer Vision*, 2008.
- 14) R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin: Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter, *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2006.
- 15) A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand, and W. T. Freeman: Motion-Invariant Photography, *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2008.
- 16) W. Richardson: Bayesian-based iterative method of image restoration, *J. Optical Society of America*, Vol. 62, No. 1, pp.55–59, 1972.
- 17) L. Lucy: An iterative technique for the rectification of observed distributions, *J. Astronomy*, pp.745–754, 1974.
- 18) <http://groups.csail.mit.edu/graphics/CodedAperture/SparseDeconv-LevinEtAl107.pdf>
- 19) <http://groups.csail.mit.edu/graphics/CodedAperture/DeconvolutionCode.html>
- 20) K. Dabov, A. Foi, and K. Egiazarian: Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering, *Proc. SPIE Electronic Imaging*, no. 6812-07, 2008.
- 21) <http://www.cs.tut.fi/foi/GCF-BM3D/>