

# 符号化撮像によるぶれ・ぼけの除去

日 浦 慎 作

## Deblurring by Coded Imaging

Shinsaku HIURA

Coded imaging is one of important technologies in computational photography area to offer new functions and characteristics for digital cameras. In this article, I will explain the technology as a general framework of integration of light rays, then introduce some representative research achievements in recent years.

**Key words:** computational photography, coded imaging, coded aperture, coded exposure

カメラが発明されて以来、カメラが記録する画像とは、レンズの働きにより平面上に形成される光の像であると決まっていた。しかし近年の計算機技術の発展により、レンズが集めた光の像はそのまま鑑賞に堪えうる「画像らしい画像」である必要性がなくなり、画像処理と光学設計の組み合わせにより、従来のカメラでは実現できなかったさまざまな機能が実現できるようになってきた。これをコンピュータショナルフォトグラフィーとよび、近年急速に研究が進展している。本稿ではこのうち、符号化撮像技術とその応用を中心に平易に解説したい。

### 1. コンピュータショナルフォトグラフィーとは

ここ10年ですっかり銀塩カメラを置き換えたデジタルカメラとはどのようなものか。デジタルカメラを特徴づけるのは、レンズが形成した像を電気信号に変換する撮像素子である(図1)。デジタルカメラではさらに撮像素子の出力信号に対して画像処理が行われるが、写真を形作るといふカメラの基本的な機能に限っていえば、デジタルカメラは、従来のフィルムの代わりに電子回路を詰めなおしたものだといえる。それゆえレンズが果たす機能そのものはフィルムカメラと変わりがなく、レンズはシャープで美しい像を形成する主役であり、できあがる写真は、その像の良し悪しによってほとんど決まってしまう。

一方、そのような現状や歴史的経緯を度外視して図1を

眺めると、実はもっと大きな発展の余地が残されていることに気づく。撮像素子の出力はその後に画像処理によって整えられるため、レンズが撮像素子上に形成する像は、その時点では完成している必要がないのである。現在のデジタルカメラでもすでに、手ぶれや色調の補正など画像処理による画質の改善が図られている。また、画像処理を前提としたレンズ性能の最適化、例えばレンズ収差のうち歪曲収差は度外視した設計とし、画像処理によってその歪曲を除去するようなことも行われている。そこでこのような考え方を突き詰めると、最終的には、カメラから美しい像が得られさえすればよく、レンズが形成する像はユーザーには関係のない、カメラ内部の単なる中間表現にすぎないということになる。よって光学系は、光線をどのように二次元平面上に配置・縮約するのが望ましいのかを問い直すところに行き着く。そしてこれこそが、コンピュータショナルフォトグラフィーの発想の源泉であるといえるだろう。

### 2. 光線の記録と符号化撮像

この章では、本題である符号化撮像について述べる前に、まずはカメラによる撮影と光線の関係について再考する。もちろんカメラは、被写体の色や画像を直接記録する装置ではなく、光を記録する装置である。そこで、ここではカメラにおけるぶれやぼけを光線の積分の観点からとらえ、続いて符号化撮像によるその制御について述べる。

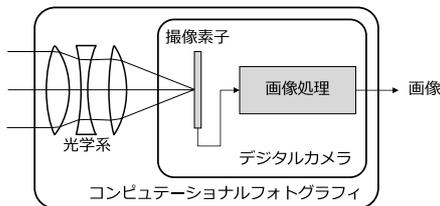


図1 デジタルカメラとコンピュータショナルフォトグラフィー。

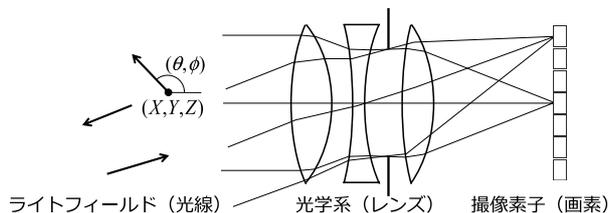


図2 カメラによる光線の記録。

## 2.1 光線の記録と積分

ここでは光線を幾何光学的に取り扱う。このとき、被写体が置かれた三次元空間を埋める光線は次のようなパラメーターで表現することができる。第1は光線が通過する位置で、これは三次元座標の3つのパラメーター  $(X, Y, Z)$  で表す。光線の向きは、その向きを軸とした回転は必要がないので、2パラメーター  $(\theta, \phi)$  となる。さらに光の波長  $\lambda$  と時刻  $t$  のパラメーターを加えることで、三次元空間を満たす光の分布は以下の数式で表すことができることになる。

$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t)$$

この7変数の関数  $P$  をプレノプティック関数とよび、またこのような光線で埋められた三次元空間をライトフィールドという。

次に、カメラによる光線の記録について考える。カメラが置かれた環境は光源から発した光や、それが対象物体表面で反射した光で縦横無尽に埋め尽くされており、その光線のうちごく一部がたまたまカメラのレンズへ入射すると、カメラはそれを画像として出力する。図2に、カメラが光線を記録する様子を模式的に表す。ただしここでは、波長  $\lambda$  と時刻  $t$  は他の幾何学的パラメーター  $(X, Y, Z, \theta, \phi)$  とは性質が違うので省略し、またカメラのピントは無限遠に合っていると仮定する。このとき、レンズはある範囲、つまりレンズの口径内を通過する平行光を撮像素子上の1点に集める。

ここでもし絞りを絞り込んでいくと、通過する光の範囲  $(X, Y, Z)$  は狭まっていくが、それを細くしすぎることはできない。なぜなら、もし絞りを極限まで絞ると、その絞りを通過する光の量がゼロとなり、カメラには何も写らなくなってしまうからである。同様に撮像素子上の画素にも

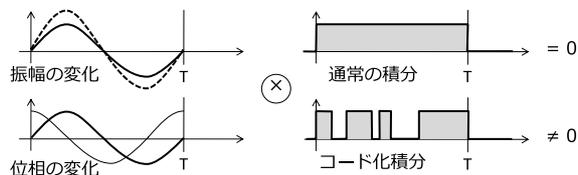


図3 積分による情報の損失とコード化の効果。

一定の面積があり、そのため1つの画素がとらえる光の方位  $(\theta, \phi)$  は一定の幅をもつ。時刻のパラメーター  $t$  については露光時間が対応し、十分な露光を行うためにはカメラのシャッター速度をむやみに速くはできない。波長  $\lambda$  については各画素の分光感度に対応し、分光計のように波長分解能を高めるとやはりカメラの感度が低下する。つまり、カメラはプレノプティック関数  $P$  の値を直接得ることはできず、7つのパラメーターについてそれぞれ、ある範囲の値を積分した値を出力する。さらにいえば、すべてのエネルギー変換型センサーは同様の性質をもつ。

一方、カメラを使うときのさまざまな失敗や画質低下もこの積分によって生じる。もしも露光時間が限りなくゼロに近ければ(シャッター速度が速ければ)、速く動いている物体でも写し止めることができるが、実際には必要な露光量を得るにはある長さの露光時間が必要となり、ぶれが生じる。ぶれとシャッター速度の関係と同様に、被写界深度は絞りに、またカメラの解像度は画素の大きさに関連し、一般にはこれらの関係は単なるトレードオフとして取り扱われている。それに対しコンピュータショナルフォトグラフィーでは、この積分に工夫を施すことで、一定の露光量を確保しながら撮影した画像からぶれやぼけを除去する方法について研究されている。これを符号化撮像とよんでいる

## 2.2 符号化撮像

先に述べたように、カメラは光線を表現するプレノプティック関数  $P$  のすべての変数に関する積分を行う。そして、これらのうち分光感度分布を除いては、積分はその区間にわたって一定の重みで行われる。これにより、元のプレノプティック関数をもつ情報の一部が失われる。

図3に、その積分の様子を模式的に表す。もし積分区間の幅とまったく同じ周期の信号があると、その信号に関する情報は積分によって失われる。図の左上では、同じ周期で振幅の異なる正弦波を実線と点線で表しているが、この両方が積分によりゼロになるため、元の信号の振幅が不明となる。同様に図の左下に示したように、やはり同じ周期であるが位相が異なる信号の位相に関する情報も失われる。フーリエ級数展開の定理により、すべての周期信号は正弦波の重ね合わせによって表現されるが、そのうち積分

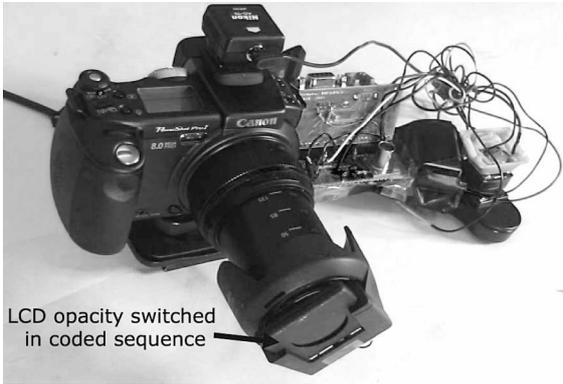


図4 フラッタードシャッターカメラ<sup>1)</sup>。

区間の幅に周期が一致する信号と、その整数倍の周波数の信号はすべて失われてしまうことになる。

このような情報の損失は、撮影中に生じたぶれやぼけを取り除き、元のシャープな画像を復元するときの障害となる。もし撮影時の現象により特定の周波数の信号が2分の1の強度になってしまったとすると、それは後に2倍にすることで復元が可能であるが、失われてしまった場合はどのようにしても復元することはできない。そのため画像からぶれを取り除くデブラー (deblur) とよばれる研究分野では、画像にさまざまな統計的な仮定を設けることにより失われた信号成分を推定することが広く行われているが、そもそもそのような情報損失が起らないことが理想的である。そこでコンピュータショナルフォトグラフィーでは、符号化撮像法といい、一様な積分の代わりに図3の右下にあるような符号化した重みをつけた積分を行う。コードの特性にもよるが、これにより特定の周期の信号の情報が失われることがなくなり、原画像の復元が容易となる。

### 3. 符号化撮像に関する研究例

ここではまず、一次元パラメーターに関する符号化であるため理解されやすい符号化露光について述べたあと、他

のパラメーターに関する符号化の例についても示す。

#### 3.1 符号化露光

積分の符号化による原画像の復元のうち、時間軸に沿った符号化を符号化露光とよぶ。先に述べたように、動いている物体を写し止めるには、一般にシャッター速度を速く、つまり露光時間を短くするが、露光量が不足してしまう。しかし反対に露光時間を長くすると、物体やカメラの動きによりぶれが生じ、原画像に関する情報の一部が失われる。そこで符号化露光では時間軸方向に露光を符号化するが、これは露光時間中にシャッターの開閉を何度も繰り返すことに相当する。論文<sup>1)</sup>では、図4に示すように高速に透過・遮断を変化させられる液晶シャッターをカメラレンズの前面に取り付けた装置が用いられた。なおこのような露光量時間変調の有効性は西らが論文<sup>1)</sup>に先立ち提案しており<sup>2)</sup>、シャッター開閉の代わりに照明の明滅によっても同様に、ぶれ除去に効果があることを示している。

図4のカメラにより実現された、ぶれ画像の復元結果を図5に示す。図のうち左は、従来の露光時間の間シャッターを開け放しにするカメラの例で、機関車の模型が露光時間中に移動することでぶれが生じている。その画像をもとにぶれ除去の演算を施した結果 (下段) には、一定間隔ごとの縞模様が現れている。これは、露光時間中にちょうどこの縞模様の間隔だけ機関車の模型が移動したためであり、この長さに対応した周期の信号の情報が失われているためである。それに対し、右側の符号化露光の例では、ぶれ画像から原画像が良好に復元されており、これは符号化により情報の損失が抑えられたためである。

図5にはそれぞれの露光時間のグラフの下に、その露光によって生じる周波数特性が示されている。露光時間は画像の横方向の畳み込みとして働くため、水平方向の空間周波数成分に対して積として働く。そのため、原画像を復元するには、畳み込みによって生じる空間周波数の変化を補償するように、畳み込みカーネルのフーリエ変換で入力画

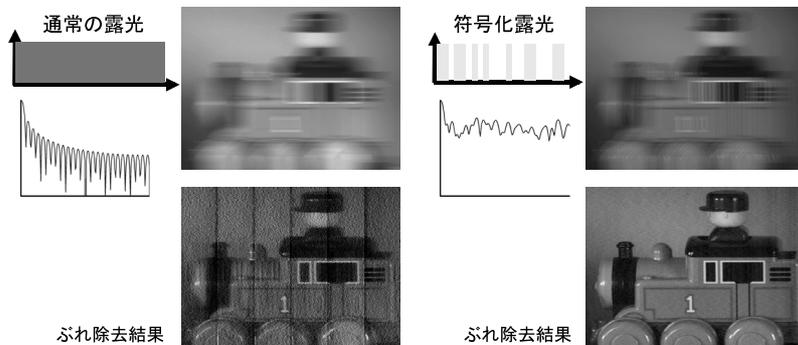


図5 符号化露光によるぶれ画像の復元<sup>1)</sup>。

像のフーリエ変換を除し、ついで逆フーリエ変換を行えばよい。しかし、左の従来型の露光方法では特定の周波数に関する情報が失われ、空間周波数特性には多数の谷が生じている。この部分では割り算の分母が小さな値となるため、計算が不安定となり、ノイズが強調されてしまう。それに対して符号化露光では深い谷が存在せず、情報の損失が抑制されていることがわかる。

このような符号化露光では、シャッターを時折閉じるのだから露光量が減少してしまうということが問題点としてよく指摘される。しかし、符号化露光では、単に露光時間を短縮するよりも露光量を十分確保しつつ、かつ情報の損失を抑えることができるのである。露光量をあえて減らすことで情報の損失を防ぐこの考え方を、この研究を実施した R. Raskar は “less is more” というキャッチフレーズで表現している。

### 3.2 符号化開口

時間軸方向のパラメータ  $t$  に関する符号化である先の例と同じ考え方は、プレノプティック関数のすべての変数について適用することができる。これを位置のパラメータ ( $X, Y, Z$ ) に適用したものが符号化開口である。先に述べたように、レンズはレンズ口径内に飛び込んだ平行光を1点に集める。そこでレンズの絞り付近に光を部分的に遮断するマスクを設置することで符号化ができる。普通、レンズにより画像をぼかすと、点光源は円形に広がり、この円の半径に対応した周期の信号はやはり失われてしまう。そこでマスクの設置により符号化を行うと、点広がり関数が変形し、それにより情報の損失を防ぐことができる。

図6に符号化開口を施したカメラと、それによるぼけ除去の例を示す<sup>3)</sup>。被写体の目の部分を拡大した画像のうち上段は入力画像、下段は逆畳み込み演算によりぼけを除去した結果で、画像がシャープになっていることがわかる。この場合も符号化露光と同様にフーリエ変換に基づく計算が広く用いられるが、ほかにも空間領域における繰り返し演算により元の画像を求める方法も用いられる。

この符号化開口の考え方は、もともとX線天文学の分野

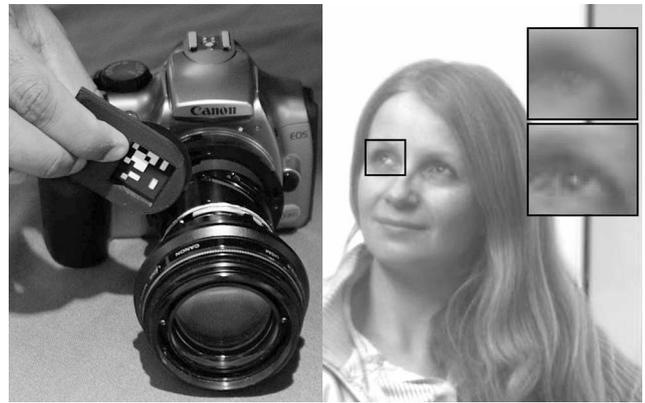


図6 符号化開口によるぼけの除去<sup>3)</sup>。

で発明されたものである。X線は非常に直進性が高く、レンズのように屈折により曲げることが非常に困難である。そこで一般には非常に浅い角度で面に反射させる斜入射鏡が用いられるが、画角が非常に狭い。一方、ピンホールカメラは感度が低いため、ピンホールの代わりに符号化マスクを設置し、得られた画像に対して逆畳み込み演算を行うことにより宇宙からのX線の分布を求める<sup>4)</sup>。ただし、X線天文学の場合、被写体は天体であるため常に無限遠にあると仮定でき、撮像素子上の点像はマスクの大きさに一致する。しかし一般のカメラでは被写体までの距離によって錯乱円径が変化するため、距離の推定が重要である。著者らは、コンピュータショナルフォトグラフィーが注目を集めるようになる10年ほど前に、符号化開口による奥行き推定とぼけ除去の研究を行った<sup>5)</sup>。その装置の模式図を図7に示す。

この装置では、ぼけを含む画像から奥行きを推定するために、ピントの合う距離が互いに異なる画像を同時に3枚取得できるようになっている。そのためにカラーCCDカメラのプリズム部分を改造し、CCDを光軸方向に1mmずつずらすとともに、反射面の多層膜を作り直し、波長にかかわらずすべてのCCDに3分の1ずつの光が到達するようになっている。レンズの前には符号化開口 (coded aperture) が設置され、これによりぼけによる情報の損失を防

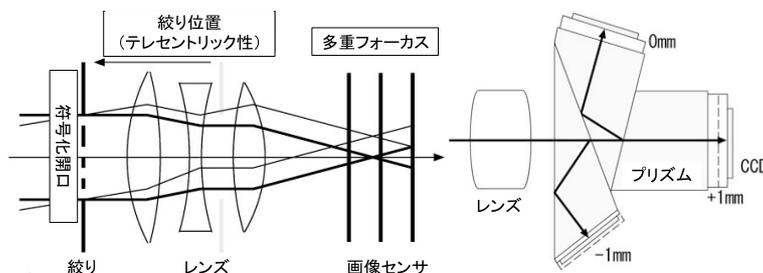


図7 符号化開口によるマルチフォーカスカメラ<sup>9)</sup>。

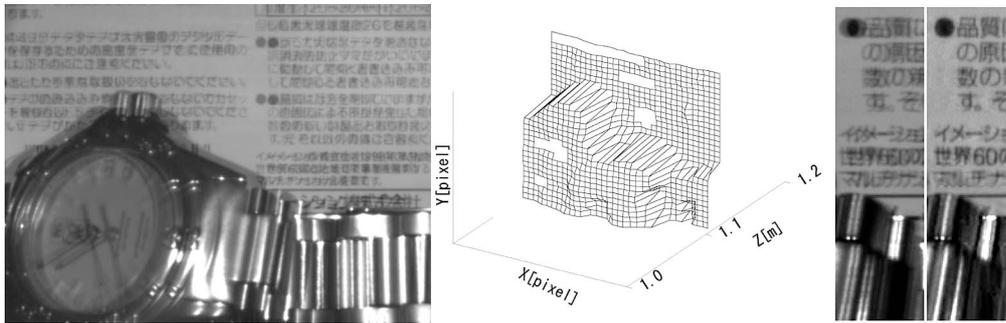


図8 符号化開口による奥行き計測とぼけの除去。

いでいる。画像が大きくぼけると、3つの CCD により得たすべての画像が互いに似通ったなめらかな画像になってしまう、奥行きを推定が不安定になるが、この研究では符号化開口を設けることによりそれを防いでいる。

図8に、この方法により求めたシーンの形状とぼけ除去画像を示す。時計の部分と背景の文字の部分の形状がそれぞれ求められている。また、右端は原画像とぼけ除去画像の一部拡大を示しているが、文字が読める程度にぼけが除去されていることがわかる。

### 3.3 その他の符号化に関する研究

これまで述べたように、符号化露光や符号化開口などの積分の符号化は、もとの一様な積分に比べ情報の損失を防ぐことができるが、それでは他の変数についてはどうだろうか。実は、波長軸入に関する積分では、より古くから分光計測の分野で符号化が用いられている。回折格子等で単一波長のみを取り出し、その光量を測るのではなく、いくつかの波長の組み合わせを計測しておいてから逆変換で分光分布を求める方法がすでに実用化されており、アダマール変換分光法<sup>6)</sup>とよばれている。

空間  $(X, Y, Z)$ 、波長  $\lambda$ 、時刻  $t$  に関する符号化がされると、残りは方位  $(\theta, \phi)$  の符号化ということになる。これは、画素の受光面積の符号化に相当する。われわれは最近、画素をランダムに符号化することで解像度を向上させる効果があることを、シミュレーションにより確認した<sup>7)</sup>。近年のデジタルカメラのように画素を小さくすることで解像度を上げることができるが、その分露光量が減少し、ノイズが増大してしまう。そこで、画素の形を正方形のまま小さくするのではなく、画素の一部への光を遮断して感度の低い領域を作ることにより符号化を行う。カメラまたは被写体が少し動くと、サンプル位置がずれた画像が得られるため、それらを集め、重ねあわせながら解像度を向上させるマルチフレーム超解像処理を行うことによって、図9のように解像度の向上効果が得られることを確認した。画素形状をランダムにコード化する方法と

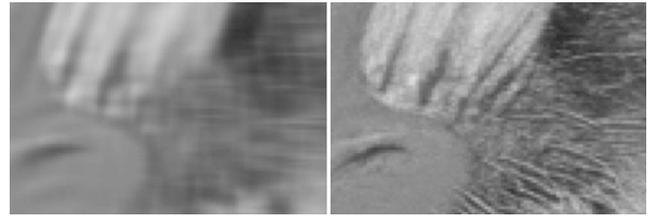


図9 画素形状の符号化による超解像処理の性能向上<sup>7)</sup>。左：正方形の画素による超解像結果、右：ランダムコードによる超解像結果。

しては、製造段階で画素形状をさまざまに変化させる方法のほかに、撮像素子上に微小な黒色粉末を散布する方法が考えられる。

### 3.4 積分の不変量化

先に述べたように、符号化開口によるぼけ除去では、錯乱円径が対象物体までの奥行きにより変化するため、通常、奥行きを同時推定が必要となる。そこで、光学系や撮影方法に工夫を凝らし、対象物体までの奥行きによってぼけの性質ができるだけ変わらないようにする方法が提案されている。ウェーブフロントコーディング (wavefront coding) はそのようなぼけを得ることができる光学系で、レンズにあえて取差を与え、光軸方向の点広がり関数の形状がなるべく変化しないようにする。これにより、被写体までの距離にかかわらず画像全体に対して同じぼけ復元処理を行うことで、結果的にシーン全体にピントがあった画像が得られることになる。

これと同じような効果を生じる装置として、露光中に撮像素子を光軸方向に移動させる装置が考案されている<sup>8)</sup>。露光中にピントが手前から奥へ送られていくため、最終的に得られた画像では、どの部分もピントが合った画像とぼけを含んだ画像が重ね合わされている。これにより、ウェーブフロントコーディングと同様に、画像全体に同じぼけ復元処理を施すことで画像全体にピントが合った画像を得ることができる。図10にその装置の写真を示す。

このように奥行きに依存しない積分について研究されて

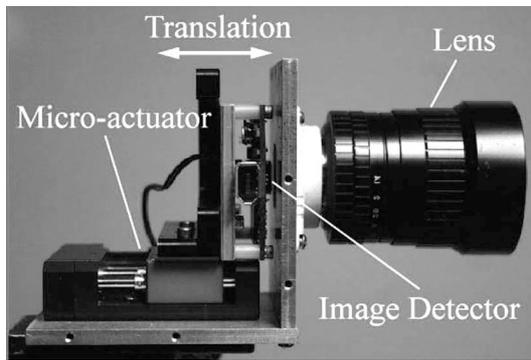


図 10 撮像素子の移動による被写界深度のコントロール<sup>8)</sup>。

いるが、これと同様のことが時間による積分とぶれ除去でも可能である。Levin らは被写体ぶれを除去する際に、カメラをわざと動かして（つまり、わざとぶれを与えることで）被写体のぶれを被写体の動きにかかわらず一定にする、つまりぶれを不変量化し、かつぶれによる情報損失を防ぐことで、ぶれを除去した画像を復元する手法を示している。

光学系が形成した像を忠実に記録する従来型のカメラに対し、符号化撮像では光学系を光線の記録のための符号化装置、画像処理をその復号器としてとらえることで、従来のカメラとは異なる機能や特性をもつカメラの実現が可能であることについて述べた。しかし、コンピュータショナルフォトグラフィー分野の研究はまだ緒についたばかりであり、特に波動光学的、量子光学的な現象については十分な考察が進められているとはいえない。取差が十分に取除かれたレンズや高精度な光学的手ぶれ補正に対し、符号化撮像は回折効果や SN 比の悪化などの問題もあり、これからも従来型のカメラは引き続き広く用いられるだろう。しかし、それらではカバーしきれない分野において、本稿

で紹介したようなコンピュータショナルフォトグラフィー技術をいかにうまく適用していくかが、これからの課題であろう。

## 文 献

- 1) R. Raskar, A. Agrawal and J. Tumblin: "Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter," *International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH) 2006* (Boston, 2006) pp. 795-804.
- 2) K. Nishi and K. Tsuda: "Motion-blurred image restoration based on intensity modulation of LED light," *Proceedings of SICE (The Society of Instrument and Control Engineers) Annual Conference 2005* (Okayama, 2005) pp. 2122-2125.
- 3) A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin: "Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing," *International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH) 2007*, No. 69 (San Diego, 2007).
- 4) E. E. Fenimore: "Coded aperture imaging: predicted performance of uniformly redundant arrays," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 3562-3570.
- 5) S. Hiura and T. Matsuyama: "Depth measurement by the multi-focus camera," *Proceedings of CVPR (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition) '98* (Santa Barbara, 1998) pp. 953-959.
- 6) E. D. Nelson and M. L. Fredman: "Hadamard spectroscopy," *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1970) 1664-1669.
- 7) 笹尾朋貴, 日浦慎作, 佐藤宏介: "超解像のための画素形状のコード化に関する研究", *MIRU 2010 画像の認識・理解シンポジウム論文集* (2010) pp. 1701-1708.
- 8) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. K. Nayar: "Flexible depth of field photography," *European Conference on Computer Vision (ECCV) 2008* (Marseille, 2008).
- 9) A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand and W. T. Freeman: "Motion-invariant photography," *International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH) 2008*, No. 71 (Los Angeles, 2008).

(2010年5月10日受理)