

日浦慎作

Abstract

長い歴史を持つ写真フィルムは、今やすっかり半導体撮像素子に置き換えられてしまった。しかしレンズが光学的な像を形作り、撮像素子はそれを忠実に記録するという役割分担は今も不変である。それに対しコンピュータショナルフォトグラフィでは、光学像はあくまで未完成な中間生成物であり、その後の情報処理によって初めて画像が完成する。これにより従来のカメラでは不可能であった様々な機能や性能をカメラに付与することが可能となる。本稿では基礎的なコンセプトを解説し、併せて最新の研究事例を紹介する。

キーワード：コンピュータショナルフォトグラフィ、ライトフィールド、符号化撮像

1. はじめに

カメラにおいて、像を形成する主役はレンズである。「写真はレンズで決まる」といわれ、従来のフィルム、現在の半導体撮像素子が担うのはレンズが作る像の忠実な記録である。もっとも現在のデジタルカメラでは、レンズの欠点を補ったり、写真の見た目をより良くするために画像処理が行われているが、画像の形成そのものに深く関わるものではない。それでは、情報処理が画像形成に対し、更に深く関与することは可能なのか？それを可能とする光学系とはどのようなものか？更には、情報処理技術はどのような新しい機能や性能をカメラに付与できるのか？このような問いに対して答えようとする新たな研究領域をコンピュータショナルフォトグラフィと呼び、近年多くの研究成果のみならず、このコンセプトを応用した製品も出現しつつある。そこで本稿ではコンピュータショナルフォトグラフィの基礎的な考え方と近年の研究事例を紹介し、今後の発展を展望したい。

2. コンピュータショナルフォトグラフィとは

ここ10年ですっかり銀塩カメラを置き換えたディジ

タルカメラを特徴付けるのは、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更に撮像素子の出力信号に対して画像処理が行われるが、写真を形作るというカメラの基本的な機能に限って言えば、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直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らない。レンズはシャープで美しい像を形成する主役であり、出来上がる写真は、その像の良し悪しによってほとんど決まってしまう。例えばピント合わせはシャッターを押す前に必ず終えておかねばならない。

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が分かる。撮像素子によって記録された情報は、

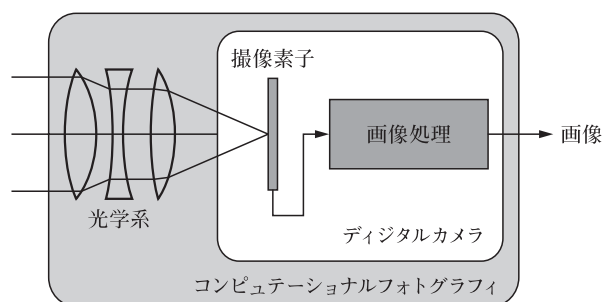


図1 コンピュータショナルフォトグラフィが変えようとする範囲 光学系は入射する光線を二次元分布へと変換し、それを計算機が処理することで画像が得られる。

日浦慎作 正員 広島市立大学大学院情報科学研究科知能工学専攻
Shinsaku HIURA, Member (Graduate School of Information Sciences, Hiroshima
City University, Hiroshima-shi, 731-3194 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.95 No.9 pp.823-828 2012年9月
©電子情報通信学会 2012

その後の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光学像は、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既に、手ぶれや色調の補正、雑音低減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、わい曲収差は度外視した設計とし、画像処理によってそのわい曲を除去するようなことも行われている。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。つまり、「レンズが形成する光学像を撮像素子が記録する」という狭い考え方から脱却し、「レンズへ入射する光線から、光学系と演算による2段階の情報処理を介し、所望の画像を形作る」という発想へ移行することが新たなカメラのあり方を考える基礎となっており、それがコンピュータショナルフォトグラフィ研究を推し進める動機となっている。

3. 光線の記録とその利用

前述のように、コンピュータショナルフォトグラフィについて考えるには、レンズにより像へと変換される前の、カメラへ入射する光線について考える必要がある。そこでまず、三次元空間を飛び交う光線について述べ、次に従来のカメラがそれをどのように画像として記録しているのかについて考えていくこととする。

カメラが置かれた実環境は図2に示すように、光源からの光や、それが物体により反射された光により縦横無尽に埋め尽くされている。このとき、被写体が置かれた三次元空間を埋める光線は以下の変数を用いて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三つのパラメータ (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 (θ, ϕ) となる。更に光の波長 λ と時刻 t のパラメータを加えることで、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呼び、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（光線空間）と呼ぶ。

次に、カメラによる光線の記録について考える。環境を埋める光線のうちごく一部がカメラのレンズへ飛び込み、カメラはそれを画像として出力する。このとき、カメラが記録する画像とは、プレノプティック関数の7変数のうち方位に関する2変数 (θ, ϕ) の分布である。ほかにも、カメラの各画素には赤・青・緑のカラーフィルタが備わっており、また複数画像を連写するならば波長 λ と時刻 t に関する分布を得ることもできるが、光線の通過位置 (X, Y, Z) に関する情報は失われてしまう。なぜなら図2に示すように、並行光を1点に集めることこそがレンズの働きであり、画素位置 (x, y) はその平行光の向きだけに対応するからである。つまり、ある画素に到達した光が、レンズの中心付近を通ったものか、それともレンズの縁を通過してきたものかを区別することはできない。

3.1 ライトフィールドカメラ

それでは、通常のカメラとは異なり、光線の通過位置の分布も記録する装置は可能であろうか。そのような装置の一つとして、図3(a)に示すようにカメラを多数並べたカメラアレーがある。画素 a と b は方位の異なる光線を捕らえるのに対し、画素 a と c は並行であるが通過位置の異なる光線をそれぞれ記録する。もう一つの方法としては、通常のカメラのように単一のメインレンズを備えるが、図3(b)のように撮像素子の直前にマイクロレンズアレーを設置するものである。この方式では、画素 a と b は並行ではあるが通過位置の異なる入射光線を記録し、それに対し方位の異なる光線は別のマイクロレンズの背後の画素 c と d によって捕えられる。こ

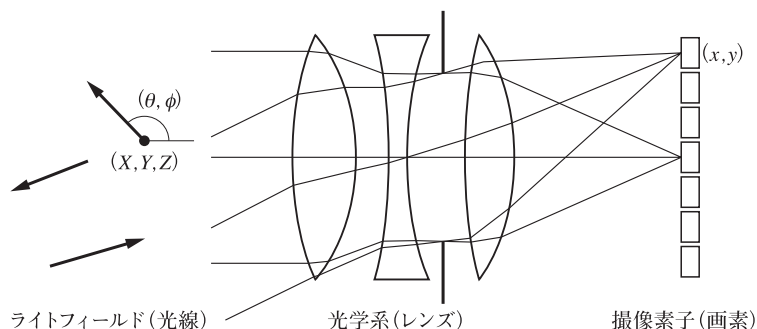
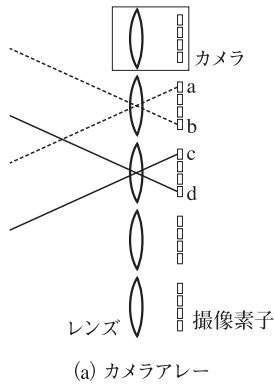
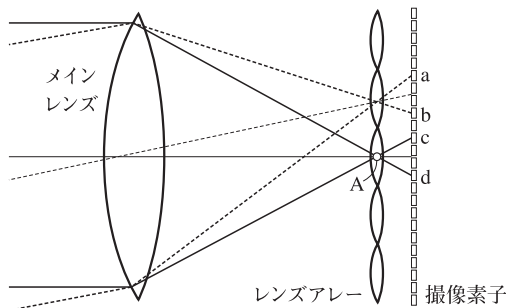


図2 ライトフィールドとカメラの関係 カメラは空間を飛び交う光線のうちごく一部を内部へ取り込み、その方位情報を画像として記録し、光線の通過位置情報は捨ててしまう。



(a) カメラアレー



(b) マイクロレンズアレー方式

図3 ライトフィールドカメラの構成 カメラを多数並べたカメラアレー方式(a)と、撮像素子の直前にマイクロレンズアレーを設置した方式(b)がある。

のように方式(a)と(b)では光線の通過位置と向きとの関係が異なっているが、共通しているのは、多数の画素により光線の方位と通過位置を分担して取り込む点である。なお、事後的にピント合わせができるカメラとして話題を呼び、本年3月から出荷が開始された Lytro 社のライトフィールドカメラ⁽¹⁾は図3(b)の構造に基づくものである。

3.2 リフォーカス

ライトフィールドカメラの用途として最近注目を集めているものとして、リフォーカスと呼ばれる事後的なピントの合わせ直しが挙げられる。この原理を図4に示す。ライトフィールドカメラは、ある平面へ入射する光線の通過位置と方位を取り込み記録する。これを光線再生型立体ディスプレイ（ディスプレイ上の各点において、観測方位ごとに異なる輝度を提示できるディスプレイ）により表示し、再び同じ位置と方位の光線を全て再生したとき、もしカメラとディスプレイが十分高精細であるならば、観察者は被写体を直接視認しているときと同じ体験ができるはずである。なぜなら、光線再生型立体ディスプレイが提示するのは実物が生じるライトフィールドと全く同一となり、それはちょうど、窓ガラスの向こうの風景を見ているようなものだからである。そこで例えば観察者がカメラを手を持ち、ディスプレイ

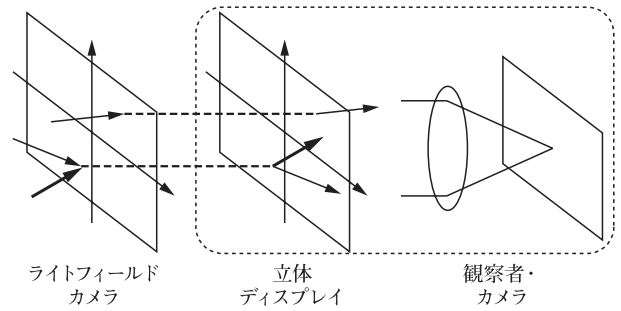


図4 ライトフィールドカメラによるシーン再撮影の原理 点線内を計算機内部で行うことにより、事後的なピント合わせなどシーンの仮想的な再撮影が可能となる。



(a) 手前の物体に合焦

(b) 背景に合焦

図5 画像列からのリフォーカスの例⁽²⁾ 視点が僅かに異なる5枚の画像から補間などを経て生成した。

を撮影すれば、ディスプレイの表示領域を逸脱しない範囲で自由にピントや視点を変えながら再撮影を行うことができる。リフォーカスはこのような作業のうち、ディスプレイによる表示とカメラによる再撮影（図4の点線内）を計算機シミュレーションにより行うものと考えればよい。

古くからイメージベーストレンダリング分野ではこの考え方にに基づき、主に視点の変更（自由視点映像）について研究が行われてきた。このときはライトフィールドカメラの大きさが十分大きい必要があり、図3(a)のカメラアレーが広く用いられてきた。一方、リフォーカスには Lytro のように図3(b)のマイクロレンズアレー方式のカメラが用いられることが多い。また筆者らは、手持ちカメラで連射した複数の写真から、コンピュータビジョンの技術を用いてカメラの位置や姿勢を特定し、それに基づきリフォーカスを行う研究を行った⁽²⁾（図5）。

4. 光線の積分と符号化撮像

カメラにおける光の記録については、もう一つ、光の積分に関する特性が関係する。先に述べたように、レン

ズは様々な位置を通過する並行光を1点に集める。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
はできない。なぜなら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、カメラには何も映
らなくなってしまうからである。同様に撮像素子の各画
素にも一定の面積があり、それゆえ一つの画素が捕える
光の方位 (θ, ϕ) は一定の幅を持つ。時刻のパラメータ 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 λ については各画素の分光感度が対応し、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、七つのパラメータについて
それぞれ、ある範囲の値を積分した値を出力する。

カメラを使うときの様々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、その間
の像の動きによってぶれが生じる。これと同様に、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ヨナル
フォトグラフィ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
撮像と呼ぶ。

4.1 積分による情報の損失

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 の全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が持つ情報の一部が失われ
る。

図6に、その積分の様子を模式的に表す。もし積分区
間の幅にちょうど整数個の周期が収まる信号があると、

その信号に関する情報は積分によって失われる。図では
同じ周期で振幅や位相の異なる正弦波を表しているが、
これら全ての信号が積分によりゼロになるため、元の信
号の振幅や位相が不明となる。

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。そこでコンピュータシヨナルフォトグラフィで
は符号化撮像法といい、一様な積分の代わりに図6の右
下にあるような符号化した重みを付けた積分を行う。
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。

4.2 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呼ぶ。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、それでは露光量
が不足してしまう。そこで符号化露光では露光時間中に
シャッターの開閉を何度も繰り返す。論文(3)では高速
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を用いている。このカメ
ラにより実現されたぶれ画像の復元結果を図7に示す。
図のうち(a)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。その画像を元にぶ
れ除去の演算を施した結果 (下段) には一定間隔ごとのし
ま模様が現れている。これは、露光時間中にちょうど
このしま模様の間隔だけ機関車の模型が移動し、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、(b)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7にはそれぞれの露光時間のグラフの下に、その露
光によって生じる空間周波数特性が示されている。横方
向のぶれは画像の横方向の畳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。(a)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

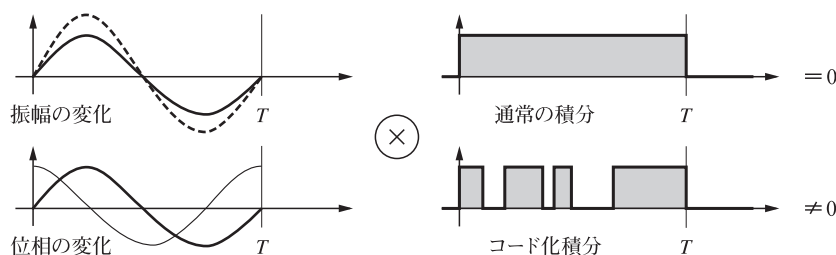
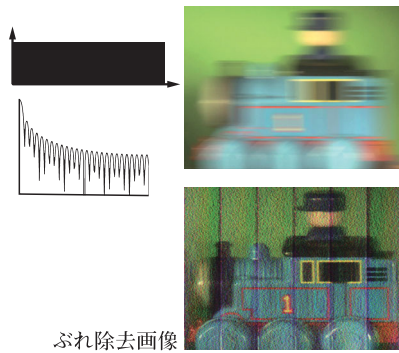
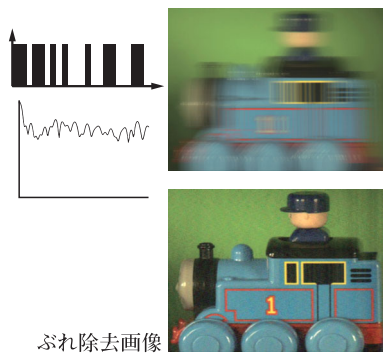


図6 積分による情報の損失 積分区間にちょうど整数個の周期が収まる正弦波は、
積分により、その位相や振幅に関する情報が失われてしまう。



(a) 通常の露光



(b) 符号化露光

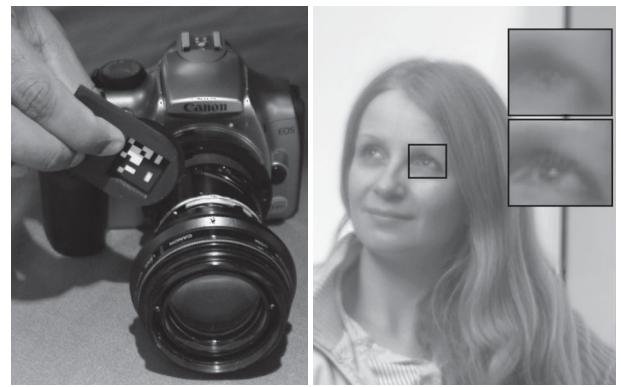
図7 符号化露光の例⁽³⁾ 通常のカメラではシャッターが開いてから閉じるまでの間連続して露光が行われるため、移動物体のぶれを安定に除去することができない。それに対して符号化露光を行うと原画像の情報が良好に残存するため、より精度良く原画像を復元することができる。

れ、空間周波数特性には多数の谷が生じている。この部分では原信号の推定が不安定となり、雑音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分かる。

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は露光量を十分確保でき、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。

4.3 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符号化露光と同様の考え方はプレノプティック関数の全ての変数について適用することができる。これを光線の通過位置のパラメータ (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



(a) 符号化開口を施したカメラ (b) ぼけ除去の例

図8 符号化開口の例⁽⁴⁾ 絞り部分に光を部分的に遮断するマスクを挿入することで、ピント外れによるぼけの除去処理を安定化することができる。

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に変形し、それにより情報の損失を防ぐことができる。

図8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⁽⁴⁾。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分かる。また筆者らは、一度の撮影で合焦距離が異なる3枚の画像を同時に撮影できる「多重フォーカスカメラ」に符号化開口を組み合わせることで、シーンの奥行きマップとぼけ除去画像を得る手法を提案した⁽⁵⁾。

この符号化開口の考え方は、レンズによる結像を用いることができない X 線天文学の分野で発明されたものである⁽⁶⁾。また同様に、波長領域における符号化はアダマール変換分光法⁽⁷⁾として古くから研究されている。

4.4 画素形状の符号化

空間 (X, Y, Z) 、波長 λ 、時刻 t に関する符号化は、上記のようにそれぞれ研究が進んでいる。となると、残りは方位 (θ, ϕ) の符号化ということになる。これは、各画素の受光感度分布の形状の符号化に相当する。筆者らは最近、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方法について研究している⁽⁸⁾。超解像処理においては、画素形状に起因する画像情報の損失が問題となっている。しかし各画素の受光領域を単に小さくするとその分露光量が減少し、雑音が増大してしまう。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(図9)。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、重ね合わせながら解像度を向上させるマルチ

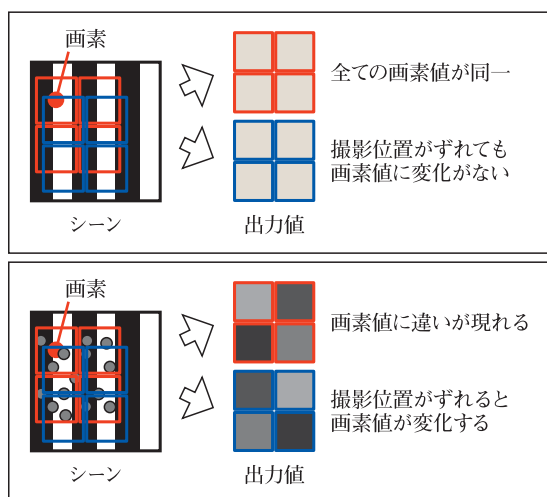
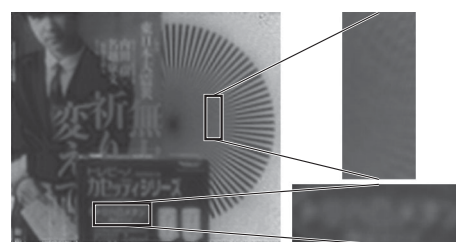


図9 画素形状の符号化とその効果 各画素の受光感度の幅と一致する周期のしま模様に関する情報は、通常のカメラでは完全に失われるが、画素に黒色粉末を散布するなどして画素形状を符号化することで原画像に関する情報を得ることができるようになる。

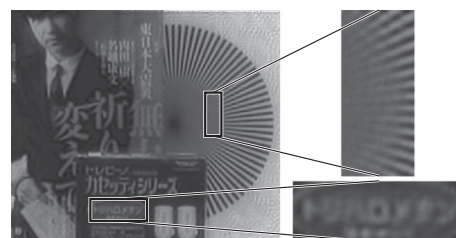
フレーム超解像処理を行うことによって図10のように解像度の向上効果が得られることを確認した。画素形状をランダムにコード化する方法として筆者らは、撮像素子上に微小な黒色粉末を散布する方法を用いたが、もちろん製造段階で画素形状を様々に変化させることも可能である。

5. おわりに

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捉えることで、従来のカメラとは異なる機能や特性を持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ミュレーション分野の研究はまだ緒にたばかりである。また収差が十分に取り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、これからの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切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ミュレーション技術の技術が、これからの課題であろう。



(a) 市販のままのカメラ



(b) 画素形状を符号化

図10 20枚の入力画像からの超解像結果 上段は市販の状態のままのカメラを用いた結果で、下段は黒色粉末を散布することにより画素形状を符号化したときの結果。

文 献

- (1) Lytro, <http://www.lytro.com>
- (2) N. Kusumoto, S. Hiura, and K. Sato, "Uncalibrated synthetic aperture for defocus control," CVPR2009, pp. 2552-2559, 2009.
- (3) R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin, "Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter," Proc. SIGGRAPH2006, pp. 795-804, 2006.
- (4) A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin, "Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing," Proc. SIGGRAPH2007, no. 69, 2007.
- (5) S. Hiura and T. Matsuyama, "Depth measurement by the multi-focus camera," CVPR '98, pp. 953-959, 1998.
- (6) E.E. Fenimore, "Coded aperture imaging: predicted performance of uniformly redundant arrays," Appl. Opt., vol. 17, no. 12, pp. 3562-3570, 1978.
- (7) E.D. Nelson and M.L. Fredman, "Hadamard spectroscopy," J. Opt. Soc. Am., vol. 60, no. 12, pp. 1664-1669, 1970.
- (8) T. Sasao, S. Hiura, and K. Sato, "Coded pixels: Random coding of pixel shape for super-resolution," Int. Conf. on Computer Vision Theory and Applications, pp. 168-175, 2012.

(平成24年4月23日受付 平成24年5月22日最終受付)



ひうら しんぞう
日浦 慎作 (正員)

1997 阪大大学院博士課程了。京大リサーチアソシエイト、阪大准教授、MIT メディアラボ客員准教授を経て広島市大大学院情報科学研究科教授。三次元画像計測とその応用、コンピュータシミュレーション分野等の研究に従事。博士(工学)。