

# 光学系・撮像過程・信号処理の工夫による 光学センシング技術\*

Image Sensing Techniques by Devising Optics, Focus, and Sampling

向川康博\*\* 長原 一\*\*\* 平林 晃\*\*\*\*

Yasuhiro MUKAIGAWA, Hajime NAGAHARA and Akira HIRABAYASHI

## Key words

computational photography, catadioptric sensor, aperture and focus, point spread function, compressive sensing

## 1. はじめに

カメラはシーンの視覚情報を得るための機器として広く利用されている。最近のデジタルカメラは解像度・階調・S/N比・色再現性などの基本性能が大幅に向上しており、一般的な画像解析のためであれば、すでに十分な性能もっているといつてよい。

一方で、カメラは進化を続け、空間分解能だけでなく、時間分解能を向上させたハイスピードカメラや、波長分解能を向上させたマルチスペクトラルカメラなどの特殊カメラの開発も盛んである。今後、カメラはどのように進化していくのか、あるいはどのように進化させていく必要があるのだろうか。一般用途カメラの性能が成熟した今、カメラありきを前提として画像解析するのではなく、光学センシング技術を見直し、さらなる新展開を模索することも重要となってきている。

一般にカメラを高機能化する場合、像が歪まないようにレンズを設計するのが基本である。また、レンズを通過した光線は、撮像面にきれいに結像するのが望ましい(芸術用途では自然な歪も好まれる)。さらに、撮像面に結像

したシーンの像は、できるだけ損失なく記録すべきである。この基本方針は、古くは銀塩カメラを利用していた時代から、最新のデジタルカメラになっても変わっていない。

一方、撮像面で計測した情報を計算機で自在に処理できるようになってきてからは、この基本方針を根底から変えることも可能となった。例えば、光線をわざと曲げて像を歪ませたり、像をわざとぼかしたり、あえて全てのデータを計測しないという、従来とは逆の発想でカメラを高機能化・多機能化・効率化しようという考え方である。

本稿では、カメラでシーンの視覚情報を画像として記録する過程を図1に示すように、(1)光線の入射、(2)撮像面上に結像、(3)サンプリングの3ステップに分けて考え、各ステップにおける具体的な工夫について紹介する。

## 2. 光線の入射の工夫

### 2.1 オプティクスによる光線の加工

カメラは、レンズに届いた光線の情報を記録する装置と見なすことができる。撮影の際に、レンズの前に何らかのオプティクスを配置すれば、光線を加工して記録することが可能となる。例えば、鏡を配置すると光線は曲げられ、液晶を配置すると光線は部分的に減衰されて記録される。本章では、このようなカメラとオプティクスの組合せによって、カメラを多機能化・高性能化する方法を紹介する。



\*原稿受付 平成23年9月26日

\*\*大阪大学産業科学研究所(大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1)

\*\*\*九州大学大学院システム科学研究科(福岡県福岡市西区元岡744)

\*\*\*\*山口大学大学院医学系研究科(山口県宇部市常盤台2-16-1)

向川康博

1997年筑波大学大学院博士課程修了。岡山大学助手、筑波大学講師、大阪大学助教授を経て、2007年大阪大学准教授。2009年マサチューセッツ工科大学客員准教授。コンピュータビジョンの研究に従事。博士(工学)。

長原 一

2001年大阪大学大学院博士課程修了。同年日本学術振興会研究員、2003年大阪大学助手。2007年コロンビア大学客員研究員を経て、2010年九州大学准教授。コンピュータビジョンの研究に従事。博士(工学)。

平林 晃

1995年東京工業大学大学院修士課程修了。同大学助手、山口大学講師、山口大学助教授を経て、2007年山口大学准教授。2004年スイス連邦工科大学ローザンヌ校招聘准教授。2009年インペリアルカレッジロンドン客員准教授。標準化理論の研究に従事。博士(工学)。

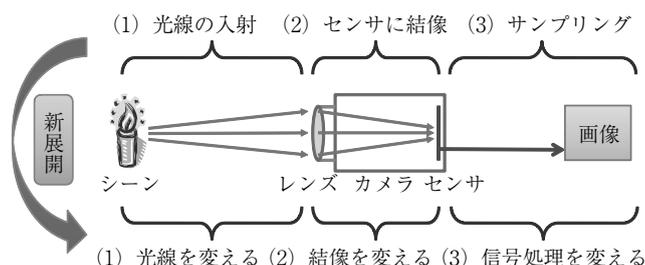


図1 カメラによる撮影過程と新たな工夫

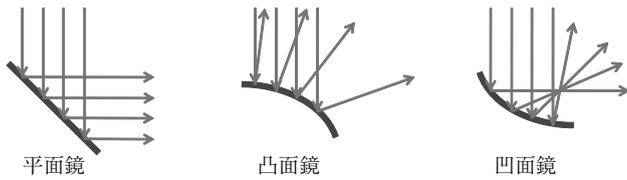


図2 鏡の形状による反射の違い

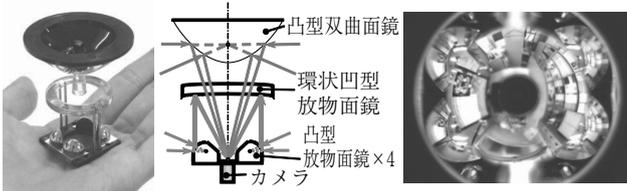


図3 複眼全方位センサ<sup>1)</sup>

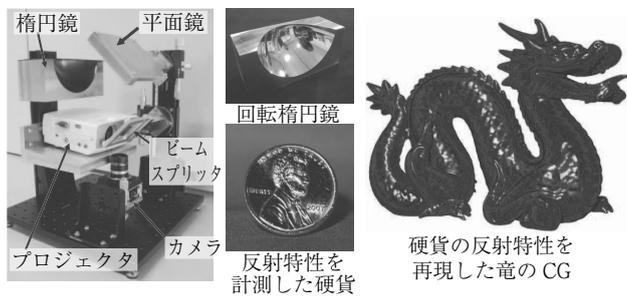


図4 楕円鏡を用いた反射特製の計測<sup>2)</sup>

## 2.2 カメラと鏡の組合せ

レンズの前に鏡を配置すると、鏡で曲げられた光線を記録することになるが、結果としてカメラの多機能化が実現できる。鏡はその表面形状によって、図2に示すように凸面鏡・凹面鏡・平面鏡に大別することができる。以下、鏡の形状ごとに具体例を紹介する。

### 2.2.1 凸面鏡

カメラに凸面鏡を組み合わせることで、機械的な回転を伴わずに、全周360度を一度に撮影することができる。さらに、図3のように複数の凸面鏡を用いた複眼全方位センサ<sup>1)</sup>は、複数視点からの全方位映像を取得でき、かつステレオ視のように距離推定も可能となることから、装着型のライフログセンサやロボットの視覚などに応用されている。

### 2.2.2 凹面鏡

前項の凸面鏡の場合は1点から全方位を観測するのに対して、凹面鏡の場合は逆に全方位から1点を観測できる。この機能は、物体表面上のある1点を照明したときの、反射光の分布を計測する際に利用できる。図4は楕円鏡を用いた反射特性計測<sup>2)</sup>の例である。楕円鏡を用いることで、物体表面をあらゆる方向から照明し、そのすべての方向への反射光を観測できる。図4のように硬貨の反射特性を計測し、この硬貨と同じ反射特性の竜の画像をレンダリングするなど、CGや表面検査に応用できる技術である。

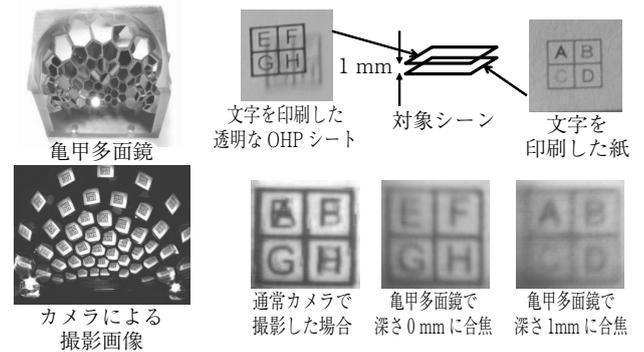


図5 多面体鏡を用いた合成開口<sup>3)</sup>

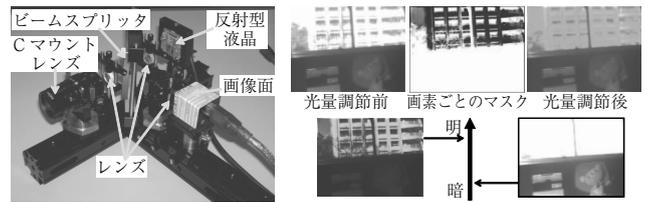


図6 反射型液晶を用いた高ダイナミックレンジ撮影<sup>4)</sup>

### 2.2.3 平面鏡

平面鏡は光線を折り返すため、視点位置を変えることができる。つまり、複数の平面鏡を用いることで、任意位置に多数の仮想カメラを配置することが可能となる。図5は、対象物体を中心とする半球面上に仮想カメラを配置できるように設計された多面体鏡<sup>3)</sup>である。この仮想カメラの合成開口により、被写界深度が極端に浅い撮影が可能となる。図5のように、紙の1mm上に透明シートを置いた場合にも、それぞれの奥行きのみを撮影することができる。

### 2.3 カメラと液晶の組合せ

カメラに液晶を組み合わせることで、画素ごとに減衰量を変えることができ、高ダイナミックレンジ撮影に利用できる。すなわち、光量を飽和させるような明るい領域は大きく減衰させ、逆に暗い領域は減衰させずに計測できる。減衰量は既知であるので元の光量も推定できる。図6は反射型液晶を用いた高ダイナミックレンジ撮影<sup>4)</sup>の例であり、暗い室内と明るい屋外が同時に撮影できている。

### 2.4 さまざまなオプティクスの利用

本章では、カメラに鏡や液晶を組み合わせた研究事例を紹介した。他にもマイクロレンズアレイ、偏光素子、DMD、プリズムなどのさまざまなオプティクスを組み合わせることで、カメラをさらに多機能化・高性能化できる可能性がある。

## 3. 結像の工夫

### 3.1 ぼけ広がり関数の符号化

カメラの結像の状態は、ぼけ広がり関数 (PSF) として表され、この関数の周波数特性がカメラという撮像システ

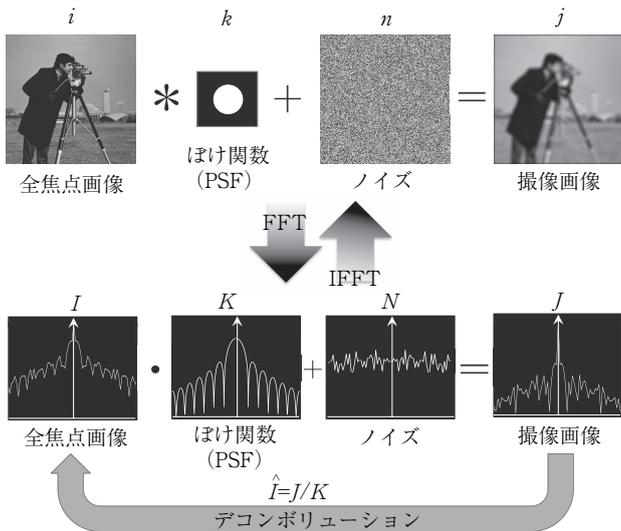


図7 撮像過程とデコンボリューション

ムの伝達特性を示すことが知られている。従来のカメラの光学系は、フォーカスを合わせた合焦点面でのみの特性を考慮して設計されてきた。しかしながら、PSFは物体の奥行きに依存するため、すべての奥行きで最適化できないこと、またレンズ収差など物理的制限により、焦点面においてもぼけを完全に排除できないという問題もっていた。画像の撮像過程は、図7のようにコンボリューションによりモデル化できる。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、 $\hat{I}$ を逆フーリエ変換することで、全焦点画像 $i$ を復元することができる。これをデコンボリューションと呼ぶ。デコンボリューションでは、観測画像のフーリエ変換をPSFカーネルのフーリエ変換 $K$ で割ることになるが、もし、 $K$ 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。つまり、どのようなPSFで画像を撮影するかが、画像処理後の最終結果に大きく依存する。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も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かった。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符号化撮像が提案されている。符号化撮像では、どのようにぼかすかで撮像性能を向上させようとする点や撮像画像そのものでなく後処理を前提として画質を考える点が、従来のレンズ設計とは大きく異なる。さらに詳しい解説については、解説論文および書籍<sup>5)6)</sup>を参照いただきたい。

### 3.2 絞りの符号化 (Coded Aperture)

通常のカメラの絞りは円形であるのに対して、図8に示すように、レンズを分解してその絞り位置にマスクパターンを切り取った厚紙や印刷したフォトマスクを物理的に差し込むことで、PSFを符号化する手法がある。理想的な幾何光学下では、絞りの形状は画像上のPSFの形状と等価であるため、絞りパターンにより直接、撮像関数を制

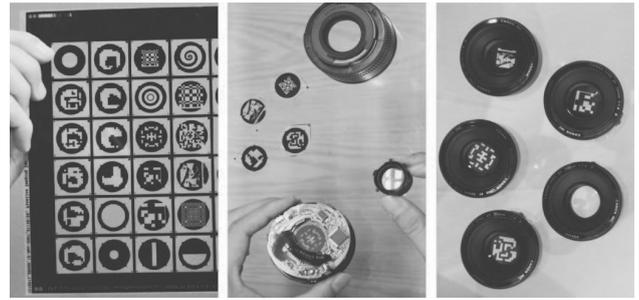


図8 符号化絞りの実装

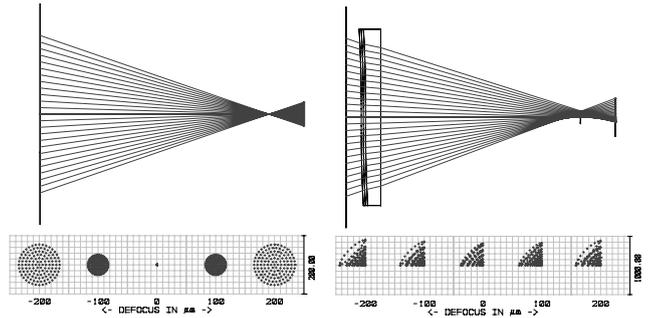


図9 通常のレンズとウェーブフロントコーディング

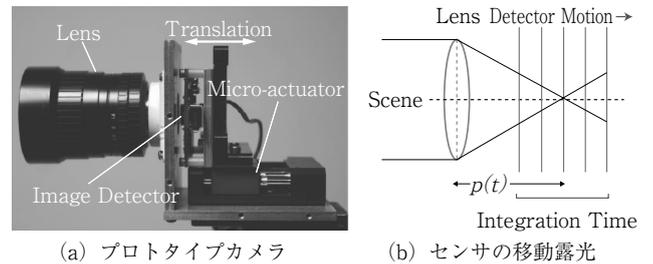


図10 フォーカススイープ

御できる。ぼけ復元の安定化のため、ゼロ交差のない広帯域な周波数特性をもたらし絞り形状が提案されている<sup>7)8)</sup>。

### 3.3 波面の符号化 (Wavefront Coding)

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。それに対してウェーブフロントコーディング<sup>9)</sup>では、カメラのレンズの絞りの位置に位相板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。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として撮像される。すなわち、PSFが奥行き不変であることから奥行き情報がなくとも単一のPSFを用いてデコンボリューションにより全焦点画像を生成できる。

### 3.4 焦点の符号化 (Focus Sweep)

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<sup>10)</sup>がある。図10に示

す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、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、図 10 (b) で示されるように、露光中に撮像センサの位置  $p(t)$  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。このようにして撮影された画像は、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と同様に奥行き情報なしに全焦点画像を復元できる。

#### 4. サンプリングの工夫：圧縮センシング

##### 4.1 従来技術と圧縮センシング

本章ではサンプリングについての工夫を述べる。通常の信号処理では、例えば一千万画素の CCD がある場合、10 メガの画素値を一旦は獲得し、それを JPEG などによって数メガに圧縮して、得られた情報だけを保存しておく。そして、必要な場合には復号により、もとの 10 メガの画像を再生できる。ここで注意すべきことは、半分以上破棄した情報からであっても、視覚的にほぼ遜色のない画像を再生できるということである。したがって、もとの画像に含まれていたほとんどの情報は必要ないものであったということになる。そうであるならば、この本質的な情報のみを直接サンプリングできれば、10 メガサンプリングが必要なくなる。これは重要である。なぜなら、X 線 CT では被曝量を減らすことができ、MRI では測定時間を短縮できるからである。また、一般のカメラ画像では、現有の画素数以上のセンシングが可能になる。果たしてこのような事が可能なのであろうか？ この疑問に答える理論が、2005 年ごろ以降に急速に発展してきた圧縮センシングである<sup>11)</sup>。

##### 4.2 基底追跡法： $l_1$ ノルムの最小化

圧縮センシングでは観測対象は通常は離散ベクトル  $x$  である。その次元を  $K$  で表す。  $x$  を行列  $A$  で観測し、  $N$  個の観測結果からなるベクトル  $d$  を得る： $d = Ax$ 。簡単のため観測雑音は考えない。  $d$  から  $x$  を求める問題は、  $N \geq K$  であれば容易に解決できる。逆に、  $N < K$  の場合には、観測条件を満たす  $x$  は一意ではない。その集合から解を一意に定めるために、観測条件  $d = Ax$  を満たす  $x$  の中で  $l_1$  ノルムを最小にするベクトルを求めるという問題を考える。ここで  $l_1$  ノルムとは、ベクトルの各要素の絶対値の和である。この問題は基底追跡法 (Basis Pursuit) と呼ばれている。この問題の解  $x^*$  は一般に  $x$  とは異なる。しかし、  $x$  がスパースベクトルであり、  $A$  が零空間特性や制限付き等長条件を満たしていれば、  $x^*$  が  $x$  に完全に一致するのである<sup>12)</sup>。ここで、スパースベクトルとは、成分のほとんどが 0 で少数の主要成分のみが非零であるベクトルである。非零の要素数を  $J$  で表す。スパース性は JPEG などの圧縮手法の根本原理となっており、比較的現実に即した前提条件といえる。

##### 4.3 ランダムセンシング

基底追跡法によってスパースベクトルを完全再構成する

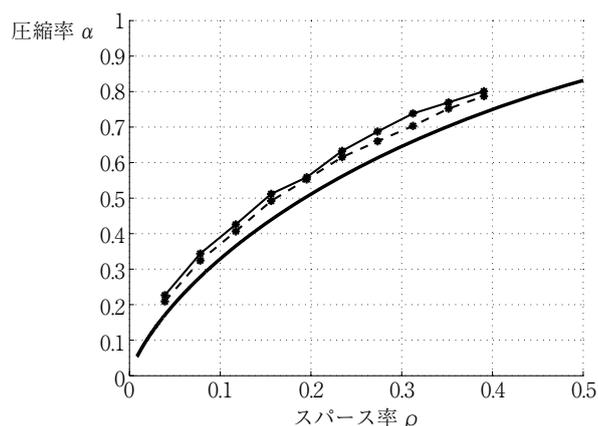


図 11 スパース率  $\rho$  に対する圧縮率  $\alpha$  の理論値

ためには条件が必要であることを述べた。しかし、これらの条件を一般の行列に対して評価することは難しい。そこで通常は、条件に対する漸近的挙動が解明されている乱数行列がよく用いられる。具体的には、平均 0、分散  $1/N$  である正規分布によって生成された行列である。このような行列を用いることは不思議な話であるが、直感的には、乱数行列には数値がまんべんなく配置されており、その結果、スパースな情報を取りこぼさずに観測できるのである。

では、観測数をどの程度まで圧縮できるのか。非零要素数  $J$  および観測数  $N$  をベクトルの次元  $K$  で割った値をそれぞれスパース率および圧縮率と呼び、  $\rho$  および  $\alpha$  で表す。これらの比を一定に保ったまま  $K$  を無限大に発散させた場合、  $\rho$  に対して  $\alpha$  をどこまで小さくできるかが解明されている<sup>13)</sup>。それが図 11 に太い実線で示したグラフである。例えば、  $\rho = 0.2$  である場合には  $\alpha = 0.5$  である。すなわち、およそ 50% の圧縮率を実現できるのである。ただし、この値は観測対象ベクトルの次元が非常に大きい場合である。現実的な大きさ、例えば 256 次元の場合では、筆者の実験によると、理論値に 0.08 程度の値を可算すれば実現できることがわかっている (図 11 の細い実線)。すなわち、0.58 程度の圧縮率を実現できることになる。512 次元の場合も同図に破線で示す。これらの値は JPEG などに比べて決して良いものではない。しかし、JPEG は非可逆であるが、基底追跡法では完全再構成、すなわち可逆になっている。したがって、近似的な再構成を行えば、より効率のよい圧縮を実現できるのである。

以上、圧縮センシングに関して概論を述べたが、理論的に非常に興味深く、かつ多くの問題への応用が始められており、今後のさらなる展開が期待される。最後に、凸最適化問題を解くための MATLAB 用パッケージ cvx を紹介したい<sup>14)</sup>。これを利用すれば圧縮センシングを簡単に実現できる。ぜひ、圧縮センシングの世界を体感していただきたい。

## 5. ま と め

本稿では、新しい光学センシング技術の例をいくつか紹介した。(1) 光線の入射, (2) 撮像面上に結像, (3) サンプリングの3ステップごとに分けて解説したが, これらを組み合わせることも考えられる。例えば, (1) + (3) として効率的に圧縮センシングを行うための最適な光学系や, (2) + (3) として効率的に符号化撮影をするための圧縮センシングなどが考えられる。このような新しい発想の光学センシング技術は, まだまだ発展途上であり, 今後の進展が楽しみな研究分野である。

## 参 考 文 献

- 1) 東はるか, 向川康博, 八木康史: 装着型全方位監視に向けた複眼全方位センサによる動物体検出, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), (2007).
- 2) 向川康博, 角野皓平, 八木康史: 楕円鏡とプロジェクタを用いたBRDF計測のための照明の多重化, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), (2007).
- 3) 田川聖一, 向川康博, 金宰完, ラメシュラスカル, 松下康之, 八木康史: 亀甲多面鏡を用いた半球状共焦点撮影, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), (2010).
- 4) 万波秀年, 佐川立昌, 向川康博, 越後富夫, 八木康史: 反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの提案, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), (2006).
- 5) 長原一, チュートリアルシリーズ: 符号化撮像, 情処研報, **CVIM-171**, 14 (2010) 1-9.
- 6) 八木康史, 斎藤英雄編: コンピュータビジョン最先端ガイド4, アドコムメディア.
- 7) 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).
- 8) C. Zhou and S.K. Nayar: What Are Good Apertures for Defocus Deblurring?, IEEE International Conference on Computational Photography, Apr., (2009).
- 9) E. Dowski and W. Cathey: Extended Depth of Field through Wave-front Coding, Journal of the Optical Society of America A, **34**, 11 (1995) 1859-1866.
- 10) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. Nayar: Flexible Depth of Field Photography, European Conference on Computer Vision, (2008).
- 11) E. Candes and M. Wakin: An Introduction to Compressive Sampling, IEEE Signal Processing Magazine, **25**, 2 (2008) 21-30.
- 12) 平林晃, Compressed Sensing~基本原理と最新研究動向~, 電子情報通信学会信号処理研究会技術研究報告, **109**, 112 (2009) 55-60.
- 13) D.L. Donoho, A. Malekib and A. Montanari: Message-passing Algorithms for Compressed Sensing, PNAS, **106**, 45 (2009) 18914-18919.
- 14) <http://cvxr.com/cvx/>