



基
応
般

コンピューテーショナル フォトグラフィ

坂東 洋介

(株) 東芝 半導体研究開発センター デジタルメディア SoC 技術開発部

コンピューテーショナルフォトグラフィとは

カメラと写真術（フォトグラフィ）はデジタル化した後も基本思想は銀塩時代のままである。銀塩時代の既成概念を抜け出して、撮影した後にピントが変更できるカメラや曲がり角の先が見えるカメラは作れないのだろうか？ これらの一見突拍子もないほどに従来のカメラの限界を打ち破る撮像を可能にする技術がコンピューテーショナルフォトグラフィである。光学・エレクトロニクスなどのハードウェア技術と、コンピュータグラフィックス・ビジョンなどのソフトウェア技術を巧妙に組み合わせることで、どちらか一方だけでは実現できない新たな撮像および画像生成を可能にする本技術分野について基本概念と各種事例を解説し、今後の展望を述べる。

なお、本分野をより幅広く概観するには文献 1), 4) ~ 6) を参照するとよい。また、スタンフォード大学の Marc Levoy 教授、コロンビア大学の Shree Nayar 教授、MIT メディアラボの Ramesh Raskar 教授、日本では広島市立大学の日浦慎作教授が本分野の研究において著名であり、彼らの Web サイトが良い情報への入口となるだろう。

■ コンピューテーショナルフォトグラフィの位置付け

コンピューテーショナルフォトグラフィとは、名前が表す通り、コンピュータによる計算が本質的な役割を果たす画像の撮影、生成、表示法を指し、コンピュータグラフィックスおよびコンピュータビジョン

の学会を中心として近年目覚ましい発展を遂げている。計算を伴う撮像という考え方自体は実のところ新しいものではなく、たとえば CT スキャンにおいて X 線観測値から人体の断面図を復元するには計算が必須である。ただし、従来であればこのような撮影法は医療や天文など特定用途向けに高価な装置を伴って行われるものだった。ところが、近年のデジタルカメラ、コンピュータ、インターネットの発展により、誰もが写真を電子的に撮影し、処理し、共有することができるようになった。このように、より一般的な意味での「写真」を対象として近年現れたのがコンピューテーショナルフォトグラフィであると言える。コンピューテーショナルフォトグラフィの目標は、従来のカメラの撮像過程をくつがえした撮像手法（ハードウェア）と計算（ソフトウェア）を組み合わせることで従来のカメラの限界を超えることである。図-1 に示すように、写真編集・閲覧に特化した画像処理および複数枚写真の合成などの、通常カメラにより撮影された画像に対するソフトウェア処理中心の技術もコンピューテーショナルフォトグラフィに分類されることがあるが、本稿ではカメラハードウェアの変更・追加を伴う技術について解説する。

■ 従来のカメラとコンピューテーショナルカメラ

図-2 (a) に簡略化した従来のカメラの模式図を示す。シーンをレンズによりイメージセンサ上に結像するという、人間の目を模した作りになっており、イメージセンサで記録される画像はそのまま人間が

見て意味をなすものになっている。

一方、図-2 (b)に示すように、コンピューショナルフォトグラフィにおける「カメラ」はそのような様式化された撮像過程を持たず、目的別に特化した撮像を行う。これを総称的にコンピューショナルカメラと呼ぶ。新たな撮像法が次々と開発されているのですべてを挙げることはできないが、従来のカメラに対して表-1のようなハードウェアの変更・追加が行われる。結果として、撮影される「画像」自体はそのままでは人間の目に意味をなさないか、意味をなしたとしても写真として美しくないものになるが、そのデータにはシーンの付加情報（奥行きや反射特性など）が含まれている。言い換えれば、与えられた目的に沿ったシーンの付加情報を、巧みな撮像過程により符号化して、イメージセンサで画像として記録するのである。コンピューショナルフォトグラフィにおける「計算」とは、この符号化された「画像」からその付加情報および人間の目に

意味のある写真を復元すること、または付加情報を利用しながらより「良い」写真を生成することである。

表-2にコンピューショナルフォトグラフィにより得られる付加情報もしくは効果の代表的なものをまとめる。表-2の中にはコンピュータグラフィクス・コンピュータビジョン・画像処理の分野に既存の項目も多いが、通常の画像のみからこれらの機能・効果を達成するのはいまだに非常に難しい問題であり制限された条件でしか成功しないことが多い。撮像過程から見直すことでこれらの問題にブレイクスルーを起こすのがコンピューショナルフォトグラフィの狙いである。

各種事例紹介

本章ではコンピューショナルフォトグラフィの具体例を紹介する。まずはじめに、コンピューショナルフォトグラフィの中で大きな割合を占めるライトフィールドフォトグラフィについて説明する。

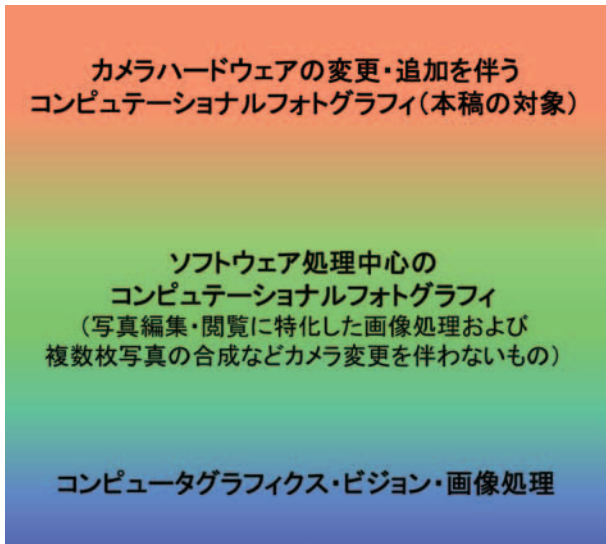


図-1 コンピューショナルフォトグラフィ分野の位置づけ

光学部品	レンズ、レンズアレイ、カラーフィルタ、ミラー、プリズム、ビームスプリッタ、パターンマスク
可動部品	シャッター、絞り、アクチュエータ、モーター
センサ	イメージセンサ、加速度センサ、ジャイロ
光源	フラッシュ、LEDアレイ、プロジェクタ、レーザー

表-1 コンピューショナルカメラにおいて変更・追加されるハードウェア例

シーン情報取得	奥行き取得、材質反射特性取得
画像認識・編集	前景抽出、輪郭抽出
画質改善	手ブレ除去、被写体ブレ除去、焦点ボケ除去、反射/グレア除去、レンズ汚れ除去、遮蔽物除去
高性能撮影	高ダイナミックレンジ(HDR)撮影、高速撮影、高解像度撮影(超解像)、高感度撮影、多波長撮影、広角撮影
新規撮影機能	撮影後ピント変更(リフォーカス)、視線上にない物体の撮影
新規応用	小型光学タグ、携帯視力診断

表-2 コンピューショナルフォトグラフィの代表的な機能・効果

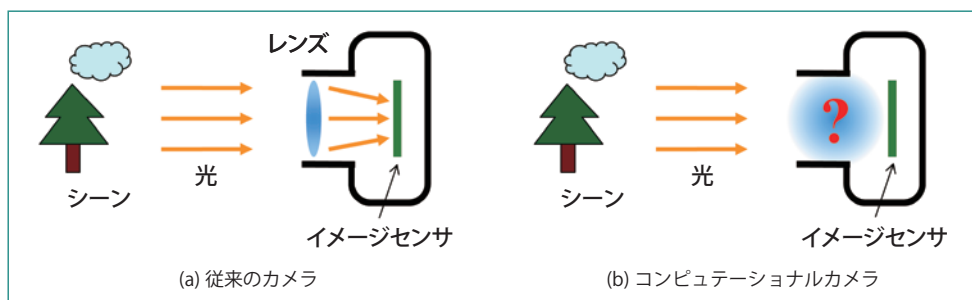


図-2 従来のカメラとコンピューショナルカメラ

次に、その他のコンピュータショナルカメラ事例について、表-1に示したハードウェアの変更・追加という観点でまとめる。最後に、コンピュータショナルフォトグラフィは撮像を主な対象としてきたが、それ以外の分野へと裾野を広げ始めているので、それらの事例を紹介する。

■ ライトフィールドフォトグラフィ

ライトフィールド²⁾とは、遮蔽物のない空間中を飛び交う光線の間である(図-3)。2つの仮想平面(図では xy 平面と uv 平面)を仮定すると、各光線は両平面との交点 (x, y) , (u, v) を決めればただ1つに定まるため、ライトフィールドは4次元データであることが分かる。ここで xy 平面を描画ス

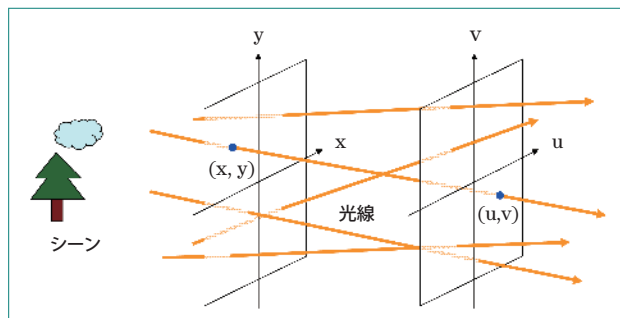


図-3 ライトフィールド

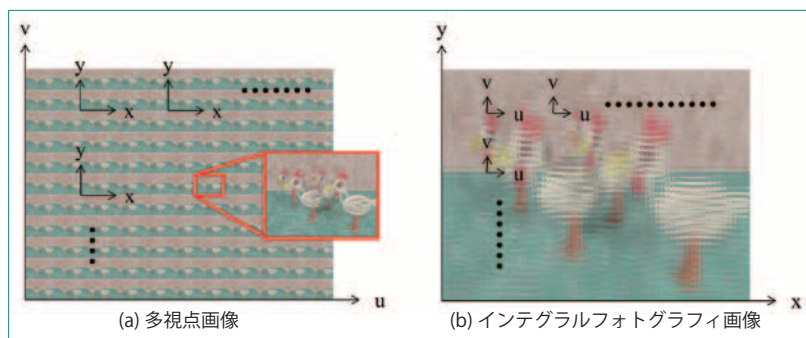


図-4 4次元ライトフィールドの2次元平面へのマッピング

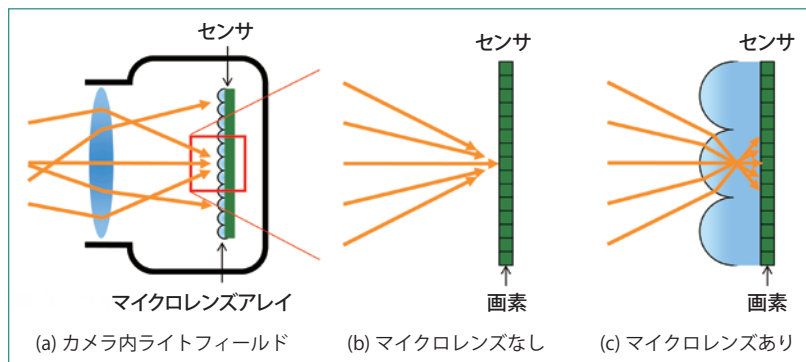


図-5 ライトフィールドカメラ

リーン, uv 平面を視点と考えると、ライトフィールドとは異なる視点から見た画像の集まり、すなわち多視点画像と見なせる(図-4(a))。2005年にNgは、「写真」とは、ライトフィールドにせん断処理をかけてから xy 平面に射影(uv 方向に積分)したものであることを示した³⁾。ライトフィールドと写真との関係が数式により定式化されたのである。ここで、せん断の度合いがピントの合う奥行きに対応する。

Ngらは、図-5(a)のようにイメージセンサの上にマイクロレンズアレイを敷くことによってカメラに入射するライトフィールドを取得し、上述の関係式を適用し、任意の奥行きにピントの合った写真を実際に生成した。これが撮影後のピント変更を可能にするリフォーカスと呼ばれる技術である。マイクロレンズによるライトフィールドの取得自体は新しい技術ではなく、原理は1900年代から知られており、インテグラルフォトグラフィやプレノプティック(plenoptic)カメラなどの別名がある。図-5(a)に示したように、カメラ内部のレンズとセンサの間には、レンズによって屈折された外界のライトフィールドが構成されている。通常のカメ

ラでは図-5(b)のようにレンズ面からセンサ上の1点に集まるすべての光線が積分されてしまうことにより次元が落ちて2次元の写真が記録される。一方、ライトフィールドカメラは図-5(c)のように、異なる方向から入射する光線をセンサ上のマイクロレンズにより異なる画素に導くことでライトフィールドを記録する。すなわち、4次元ライトフィールドデータを図-4(b)のように2次元平面に「符号化」してセンサで記録するのである。画素を並べ換えれば図-4(a)の多視点画像が復元できる。

ライトフィールドの取得方法はほかに、カメラを移動させながら写真を複数撮影する方法、カメラ

を多数並べる方法 (カメラアレイ), レンズアレイを用いる方法 (Tanida ら, TOMBO), パターンマスクをセンサに装着する方法 (Veeraraghavan ら, dappled photography) がある.

ライトフィールドフォトグラフィはリフォーカスのほかにも, 視点の変更, 奥行き取得 (Adelson ら, single lens stereo), 動画の手ブレ除去 (Smith ら, light field video stabilization), 超解像 (Bishop ら, light field superresolution), グレア除去 (Raskar ら, glare aware photography) などさまざまな機能を実現するコンピューショナルフォトグラフィの中核概念である. また, 後述する 3D ディスプレイや小型光学タグなど撮像以外の用途にもライトフィールドの考えが用いられている.

■ その他のコンピューショナルカメラ

前節ではセンサ上にマイクロレンズアレイを装着するというカメラ変更によりライトフィールドを取得し, それを処理することで撮影後のピント変更という機能が実現されることを見た. 本節ではほかにもどのようなハードウェア変更・追加があるのか, それによりどのようなソフトウェア処理 (計算) が可能になるのかをいくつか見てゆく.

シャッターの変更 (図-6 (a)) : Raskar らは撮影中にシャッターを擬似乱数に基づいて開け閉めする撮影方式 (coded exposure) を提案した. これにより被写体が動いているときにも画像の高周波成分が維持され, 高画質な被写体ブレ除去が可能になる.

レンズの絞りの変更 (図-6 (b)) : Veeraraghavan らと Levin らは, レンズの絞り部分を擬似乱数に基づいた 2 次元パターンにする撮影方式 (coded aperture) を提案した. これによりピントの外れた奥行きでも画像の高周波成分が維持され, 高画質な焦点ボケ除去が可能になる. 筆者らは色フィルタを挿入して奥行きに依存した色ズレを伴う画像を撮影し, 1 枚の画像から奥行き取得と前景領域の抽出を行った (color-filtered aperture).

イメージセンサの移動 (図-6 (c)) : Levin らは, 撮影中にセンサを水平方向に等加速度運動させることで, 水平に動く物体は速度によらずすべて同じように被写体ブレする撮影法 (motion-invariant photography) を提案した. 結果として, 物体ごとにボケ推定することなく画像全体を既知のボケ量にて一括ボケ除去できる. Nagahara らはセンサを奥行き方向に移動させることで, すべての奥行きを同じように焦点ボケさせたり (そのため奥行き推定せ

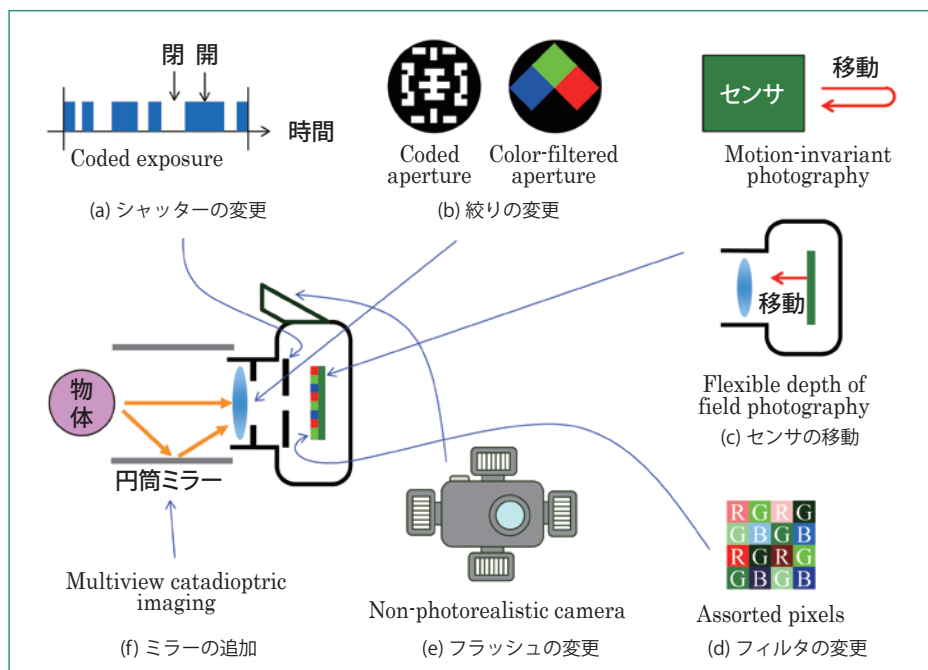


図-6 コンピューショナルカメラの例

ずに焦点ボケ除去が可能), 複数の奥行きにピントを合わせたり, 斜めの面にピントを合わせたりと柔軟に被写界深度を操作できる撮影法 (flexible depth of field photography) を提案した。

イメージセンサ上のフィルタの変更 (図-6 (d)) : 通常, イメージセンサには赤緑青のフィルタがモザイク状に配置されてカラー画像が撮影できるようになっている。Nayar と Narasimhan はこれを拡張し, 光の透過度 (濃さ) の異なるフィルタをモザイク状に配置することで高ダイナミックレンジ画像の取得を可能にした (assorted pixels)。

フラッシュの変更 (図-6 (e)) : Raskar らはカメラの上下左右に4つフラッシュを搭載して4枚写真を撮影し, フラッシュの影を使って物体の輪郭線を抽出し, 輪郭強調した画像を生成した (non-photorealistic camera)。通常の画像にエッジ検出をかけるだけでは物体表面上のテクスチャも抽出されるが, 本手法によれば物体輪郭のみを抽出できる。

ミラーの追加 (図-6 (f)) : Kuthirummal と Nayar はカメラの前に円筒または円錐状の鏡を配置することで, テクスチャ付きの3次元物体形状を取得する手法 (multiview catadioptric imaging) を提案した。物体がカメラに直接見える像と鏡に反射されて見える像との2経路で観測されるため三角法で距離が推定できる。

レーザーとストリークカメラの利用 (図-7) : Raskar の率いる研究チームは毎秒1兆フレーム (trillion fps) に近い超高速撮影を実現した。Web

サイトの動画を参照されたい。光が1フレームに1mm 足らずしか進まないで, 光の軌跡を見ることができる。これはフェムト (10^{-15}) 秒単位でパルスを出せるレーザー光源でシーンを照らし, ピコ (10^{-12}) 秒単位で光を捉えるカメラにより撮影を行っている。カメラは図-7 (a) のように入射光を光電陰極により電子に変換した後に電場をかけて誘導し, 先に入ってきた光を上, 後から入ってきた光を下に振り分けることで時間をセンサの縦座標にマップするストリークカメラと呼ばれるものである。センサの縦方向の画素を時間解像度に使うため, 縦に撮影方向を変えながら何度も撮影する必要がある。また, フェムト秒のレーザーで照らされたシーンは非常に暗いため何百万回も同じシーンを撮影して信号レベルを上げる必要がある。これらのことから, 現在は実験室で繰り返し可能なシーンのみを撮影することができる。また, 図-7 (b) のように直接反射光よりも遅く返ってくる3回反射光が区別できるので曲がり角の先を「見る」 (looking around the corner) ことができる。

■ 撮像以外への展開

コンピュータショナルフォトグラフィの範囲が撮像以外の分野へも広がりつつある。現在顕著な傾向は, ライトフィールドの概念を表示に適用しようというものである。事例をいくつか紹介する。

裸眼3Dディスプレイは, 端的に言うとライトフィールド表示機である。Lanman らは, LCD パネルを複数枚重ね, 表示したいライトフィールドデータに基づいて最適化したパターンを各LCDに表示することで高発光効率かつ再現性の高い裸眼3D表示を可能にした (HR3D, polarization fields)。関連して, Hirsch らは, 3D表示は行わないが, 時分割により1フレームおきに前述のライトフィールド取得方法の1つ dappled photography と同様のパターンマスクをLCDに表示し, LCDの裏側から外界のライトフィールドを撮影する

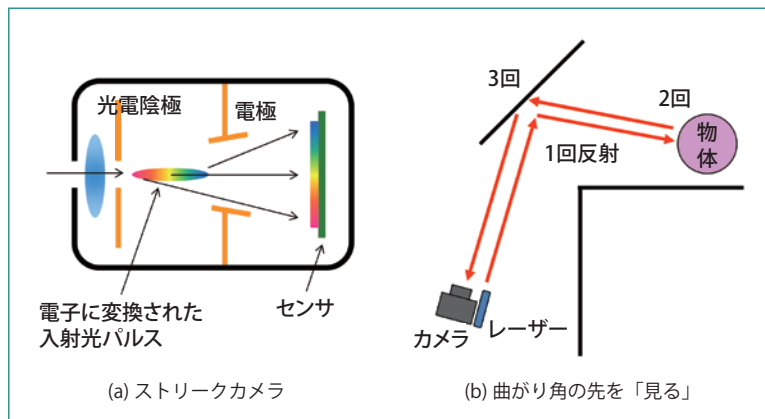


図-7 超高速撮影法とその応用例

ことで、画面に触らずとも少し浮かせたところからジェスチャ入力可能なスクリーン (BiDi screen) を提案した。

Mohan らは、2次元バーコードをLED光源とレンズを用いて3mm程度の小さな穴から射出する小型光学タグ Bokode を提案した。人間の目には小さな穴にはしか見えないが、カメラで焦点ボケさせて撮影するとパターンが見える。QRコード等に比べて、人間の目には無意味なタグ情報を目立たなくすることができる。

Pamplona らは携帯電話の画面にアイピースを含むアタッチメントを取り付けることで、人間の目に向けて直接ライトフィールドを射出できる NETRA と呼ぶ安価な視力診断システムを提案した。視力に依存してピントが合ったり合わなかったりするパターンを提示することができるため、ユーザのフィードバックに基づいて視力が判定できる。同様の原理を発展して白内障検査システム (CATRA) も提案された。

まとめと今後の展望

コンピューショナルフォトグラフィはコンピュータによる計算が本質的な役割を果たす画像の撮影、生成、表示法である。本稿では特にコンピューショナルカメラ、すなわちハードウェアの変更・追加によって従来のカメラとは異なる撮像を行う技術分野に力点を置いて説明した。撮像過程を工夫することでシーンの付加情報を符号化してイメージセンサで画像データとして取得し、計算によってその情報と画像を復元するという、ハードウェアとソフトウェアの巧妙な組合せが鍵となる。コンピューショナルフォトグラフィは、他分野で既知の課題に大きな前進をもたらすだけでなく、撮影後のピント変更や曲がり角の先を見るなど新しい問題設定を生み出しているほか、小型光学タグや携帯電話による視力診断など、新しい応用をも生み出している。

コンピュータグラフィクスおよびコンピュータビジョンの学会を主な舞台としてきた本分野にも2009年からIEEEの専門国際会議 International

Conference on Computational Photography が発足した。また、本分野が撮像だけでなく表示にも適用され始めていることを見たが、今後もコンピューショナルフォトグラフィはますます適用範囲を拡大していくとともに、より人々の身近なものになっていくであろう。すでにライトフィールドカメラはRaytrix社により2010年に製品化されているほか、Lytro社は2012年に民生向けに出荷を開始した。Pelican Imaging社は携帯電話向けのカメラアレイを開発中であるし、EyeNetra社は前述の携帯視力診断を商用化しようとしている。また、Adamsらによりプログラム可能なコンピューショナルカメラのプラットフォームが提供されているほか (Frankencamera)、AppleのApp Storeに代表されるように誰もがソフトウェアを公開できる環境が整いつつある (iPhoneユーザはLevoy教授による無償アプリSynthCamを試されるとよい)。カメラハードウェアの変更・追加はまだ敷居が高いのが現状であるが、3Dプリンタのコストが下がり、P板.comなどのオンラインでのカスタムハードウェア注文・製造サービスが進んでくれば、個人がコンピューショナルカメラを作って公開する日もそう遠くはないと考えられる。

参考文献

- 1) Bimber, O. (guest editor) : Special Issue on Computational Photography, IEEE Computer, Vol.39, No.8 (2006).
- 2) Levoy, M. and Hanrahan, P. : Light Field Rendering, Proc. ACM SIGGRAPH 96, pp.31-42 (1996).
- 3) Ng, R. : Fourier Slice Photography, ACM Transactions on Graphics, Vol.24, No.3, pp.735-744 (2005).
- 4) Raskar, R., Tumblin, J., Mohan, A., Agrawal, A. and Li, Y. : Computational Photography, Proc. Eurographics STAR, pp.1-20 (2006).
- 5) Raskar, R. and Tumblin, J. : Computational Photography : Mastering New Techniques for Lenses, Lighting, and Sensors, A K Peters (2012).
- 6) Wetzstein, G., Ihrke, I., Lanman, D. and Heidrich, W. : Computational Plenoptic Imaging, Proc. Eurographics STAR, pp.25-48 (2011).

(2012年2月22日受付)

坂東 洋介 (正会員) yosuke1.bando@toshiba.co.jp

(株) 東芝半導体研究開発センター主務, MIT Media Lab 客員研究員, 2001年東大理学部卒業, 2003年情報理工学系研究科修了, 2010年博士号 (情報理工学) 取得, 画像電子学会会員。