

# Computational Photographyと 未来のデジタルカメラ

## =Lytroの動作原理とアルゴリズム=

京都産業大学 蚁野 浩

### 1. はじめに

最初の実用的なカメラは、四角い箱の側面にレンズを装着したカメラ・オブスクラと呼ばれる道具である。西暦1500年代には、これが絵画の補助具として利用されていた。これは光像を人手で記録するカメラであった。1820年代に、光の像を化学的に定着させることができになると、銀塩写真カメラは大きく発展し、写真産業や映画産業を産み出した<sup>(1)</sup>。また、1900年代の前半に発明された電子式撮像機はテレビ産業と共に発展した。現在、これらのカメラ技術は、デジタルカメラに収斂したと言える。500年に及ぶカメラ技術の進化と進歩を、デジタルカメラがどのように継続していくのだろうか。

一般には、デジタルカメラは成熟商品であり、技術開発の余地はそれほど多くないと考えられている。一方、デジタルカメラにとって変わる写真技術も見当たらない。したがって、デジタルカメラ技術は、これから比較的長い時間をかけて、熟成していくのだと思われる。本稿では、このようなことを背景に、デジタルカメラの未来とComputational Photography (CP) の関係を論じる。

### 2. デジタルカメラの歴史

世界初のデジタルカメラは、米国コダック社が開発した1975年の試作品である。世界初の市販品は、1988年の富士写真フィルム（当時）の製品である。しかし、当時のデジタルカメラは、記録枚数・画像サイズ・用

途のいずれも不十分で、全く広まらなかった。

1995年はインターネット元年とも呼ばれ、パソコンなどのデジタル家電が急速に普及を始める年である。その頃の性能は、画像サイズがVGA (640×480画素) 程度、記録枚数が数十枚であった。フィルム写真より画質は悪いが、画像をパソコンに取り込んで文書化することや、メールに添付するという用途によって、急速に広まった。その後、画像センサの画素数競争に火が付き、画質が飛躍的に改善された。気がつくと、フィルム写真との画質差はなくなり、2004年に、販売台数でフィルムカメラを上回った。

今日では、純粋なデジタルカメラが約1億台/年、スマートフォンなどのカメラも入れると10億台以上のデジタルカメラが販売されている。また、SDカードなどのメディアに記録できる写真の枚数は数千枚になる。これらのことから、デジタルカメラによって、だれでも・どこで・好きなだけの写真を撮影することが可能になったと言える。

### 3. デジタルカメラの画像処理と Computational Photography

デジタルカメラの内部処理は、ほとんどデジタル処理である。カメラ内部で行われる代表的な画像処理は、デモザイク、ノイズ除去、階調補正、ボケ・ぶれの補正、顔検出などの画像認識、色補正、画像・映像の圧縮である。これらは高度な画像処理ではあるが、CPではない。これらは、従来からのカメラ画像処理が発展したものであるか、あるいは、一般的な画像処理・認識技術がデジタルカメラに組み込まれたものであ

る。

CPはレンズと画像センサで構成される撮像部に、デジタルカメラには見られない特徴が存在する。そのため、画像センサの出力である生画像の性質が、デジタルカメラと大きく異なる。しかし、現在のところ、CPを特徴づける普遍的な原理が存在するというわけではない。このような性質をもつ具体的な提案手法の集まりをCPと呼んでいるにすぎない<sup>(2)</sup>。

4章から説明するLytro<sup>(3)(4)</sup>のようなライトフィールドカメラは代表的なCPの1つである。他のCPとして、波面コード化法による被写界深度の拡大<sup>(5)</sup>や、符号化露光によるボケ・ぶれ画像の補正が良く知られている<sup>(6)</sup>。符号化露光は、手ぶれ写真のようにボケ・ぶれが生じた写真画像を、画像復元処理によって補正する技術である。通常のボケ・ぶれ画像は、元画像に含まれていた高周波成分が失われるため、ウィナーフィルタなどで画像復元を行っても、十分な効果を得ることが難しい。一方、撮影時の露光状態をチャープ信号やM系列などで変調することで、ボケ・ぶれ画像に高周波成分を残すことができる。このような画像は、驚くほど鮮明な画像に復元することができる。

#### 4. Lytroのハードウェアと動作原理

Lytroは細長い独特なデザインであるが、それを構成する部品は、一点を除いて、コンパクト型デジタルカメラと同じである。唯一の違いは、画像センサの表面に直径10画素のマイクロレンズが配列状に装着されていることである。図1にLytroの画像センサ部の拡

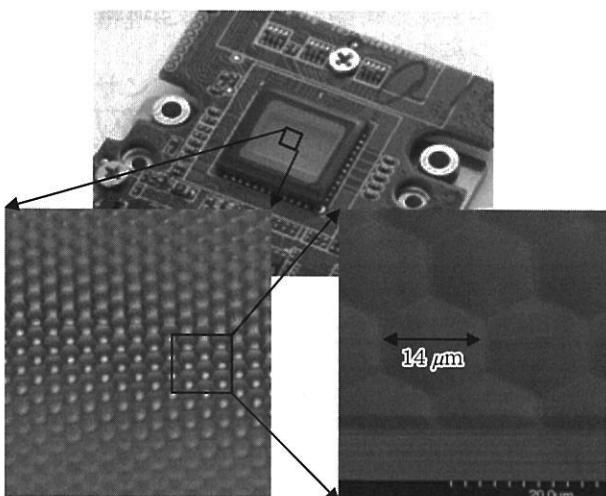


図1 画像センサ部の拡大写真

(出典：日経BP社、豊通エレクトロニクス ヴァン・パートナーズ)

大写真を示す。画像センサはデジタルカメラ用CMOSセンサであり、その画素ピッチは1.4 μmである。画像センサをハニカム構造のマイクロレンズが覆っている。そのピッチは14 μmである。画像センサの3,280×3,280画素の領域が330×380個のレンズによってカバーされており、1つのマイクロレンズの直径はおおむね10画素分である。

マイクロレンズは保護ガラスと一体化しており、図2のように、画像センサ上に若干の空間をおいて配置されている。保護ガラスの上面側が平坦で、底面側がマイクロレンズアレイになっている。保護ガラスとマイクロレンズアレイの厚さは約430 μmである。また、画像センサ表面にはペイヤー型のカラーフィルタアレイが配置されている。

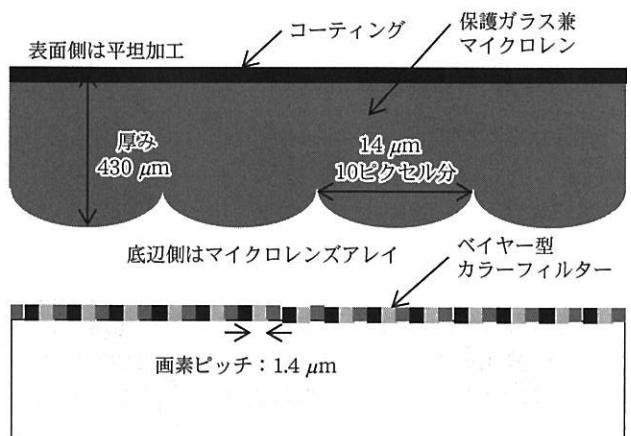


図2 画像センサ部の断面  
(出典：豊通エレクトロニクス ヴァン・パートナーズの資料を基に作成)

図3に画像センサとマイクロレンズアレイの位置関係を示す。これらは、完全には整列していない。カメラの筐体ごとにずれと傾きが異なる。これは、マイクロレンズを画像センサに装着するときに生じる、機械的な誤差が原因であると思われる。

図4にLytroで取得される生画像の一部とその部分拡大を示す。生画像にはマイクロレンズアレイの構造が強く反映されている。拡大画像に見られる円構造が1つのマイクロレンズに対応する。その直径が約10画素であることを、この画像からも確認することができる。円構造内部のそれぞれの画素が、後述するように、一本の光線に対応する。マイクロレンズの境界付近に位置する画素は暗くなっている、その領域では光線の取得が難しいことを示す。

画像センサ部と主レンズによってライトフィールド(光線集合)が取得される様子を図5に示す。図にお

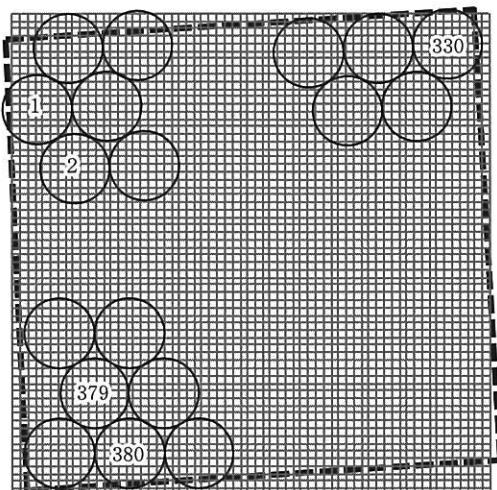


図3 画像センサとマイクロレンズアレイの配置

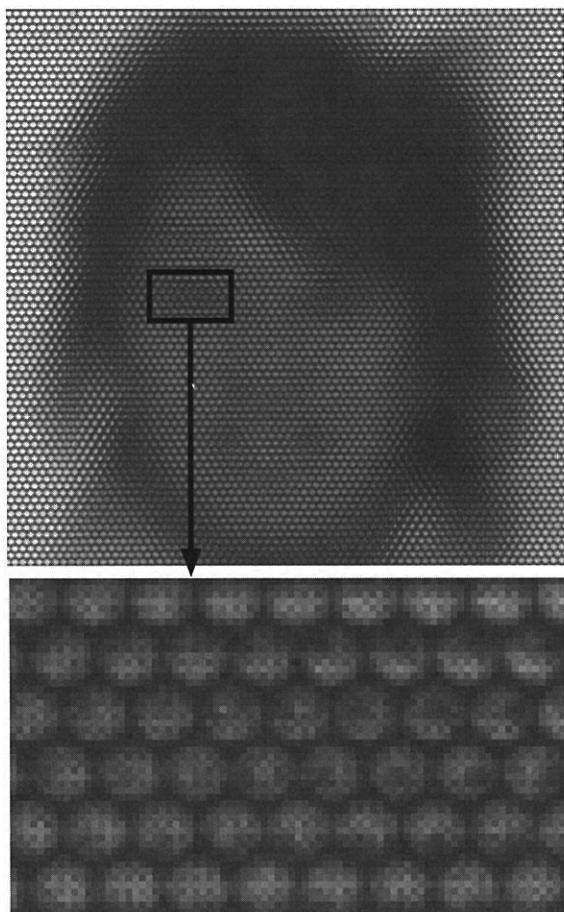


図4 生画像の一部とその部分拡大

いて、Aの位置にある被写体が主レンズによってマイクロレンズアレイの位置に焦点を結ぶとする。このとき、被写体から発してマイクロレンズに到達した光線

は、その下に位置する画素によって方向と明るさが記録される。1つのマイクロレンズに対応する全ての画素を平均化することで、Aの位置に焦点を合わせた粗い写真画像が生成される。これは、マイクロレンズアレイの位置に仮想撮像面を置いた画像を生成したことになる。

図5で、Bの位置にある灰色マークに注目すると、この位置を通過する3本の光線は、異なるマイクロレンズを介して画像センサに記録される。それらの画素値を平均化すると、Bに焦点を合わせた写真画像の画素を生成できる。これは、Bの位置に焦点を合わせるとAの像がぼけるという現象を、ライトフィールドを用いて計算したことに相当する。また、3本の光線が交わる位置に仮想撮像面を置いたことに相当する。

図5のマイクロレンズがカバーする3つの画素で、最も下に位置する画素に対応する光線を主レンズまで追跡すると、部分開口1と記述した領域に達する。したがって、これらの画素だけで生成される画像は、部分開口1を通過した光線による像である。同様に、マイクロレンズがカバーする画素で、最も上に位置する画素だけで生成される画像は、部分開口2を通過した光線による像である。このようにマイクロレンズがN個の画素をカバーするとき、マイクロレンズに対して同じ位置にある画素を配列してできるN個の小画像は、主レンズをN個の部分開口に分割して取得されるN個のステレオ画像群を形成する。

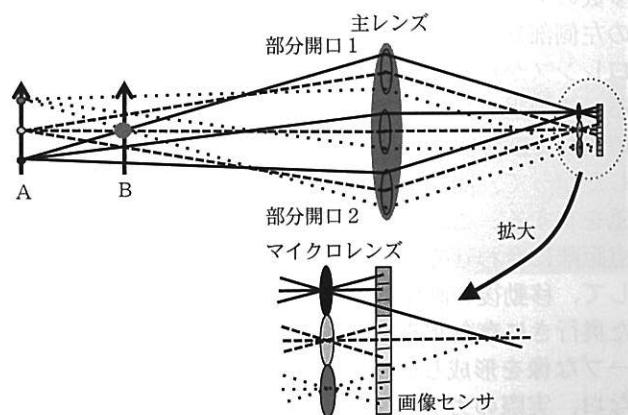


図5 ライトフィールドの取得

## 5. ライトフィールドのレンダリング

Lytroが取得する生画像であるライトフィールドから、最終の写真画像を生成するプロセスをライトフィ

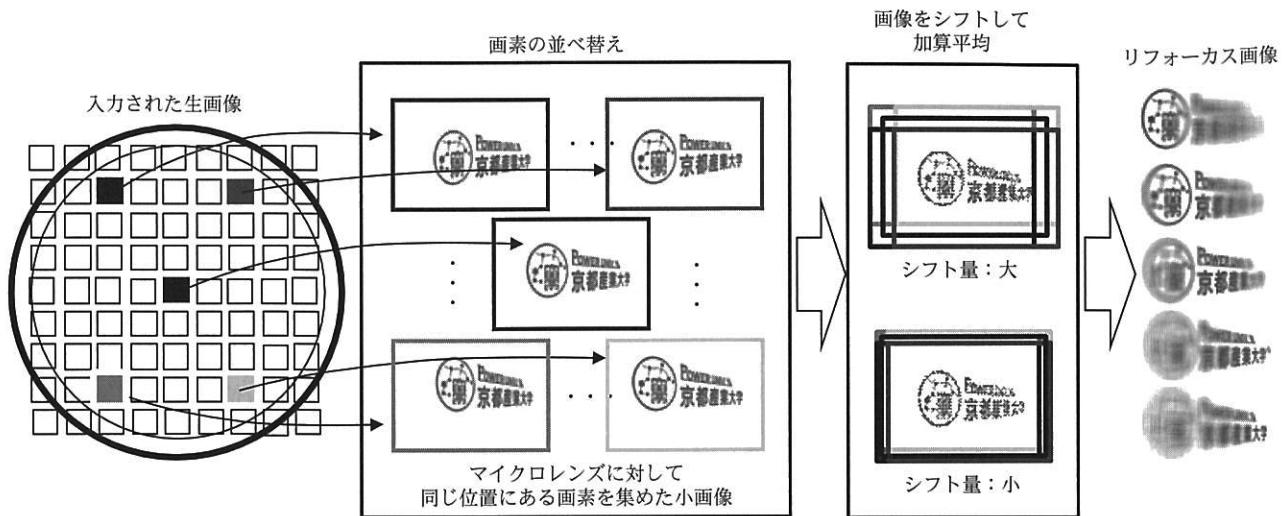


図6 ステレオ画像群への分解とそのシフト加算によるレンダリング

ールドレンダリングと呼ぶ。ここでは、2種類のレンダリング手法を説明する。第一の方法は、レンダリングする焦点距離に応じて、N個のステレオ画像を適量平行移動させた後、それらを平均化する方法である。これをシフト加算法と呼ぶことにする。第二の方法は、取得した光線を、適当な焦点距離に設定した仮想画像面に投影する方法である。これを光線束投影法と呼ぶことにする。

シフト加算によるレンダリングを説明する。4章述べたように、Lytroが取得するライトフィールドを多数のステレオ画像群に分解することができる。図6の左側部分がその様子を説明している。全てのマイクロレンズから同じ位置にある画素を抽出して再配列する。このようにして構成された小画像群は、主レンズの異なる部分開口から被写体を観察した画像群である。したがって、開口位置と被写体までの距離に応じた視差を有する。これらのステレオ画像群を、仮想的な焦点距離に合わせて、適切な量だけ平行移動させる。そして、移動後の画像群を加算平均する。移動量に応じた奥行きに存在する被写体は像の位置が合うのでシャープな像を形成し、そうでない被写体の像はぼける。なお、実際のカメラでピントを前後させた場合には、焦点が合う位置が変わることだけでなく、像の大きさが若干変化する。ここでは、この効果は考慮していない。

加算シフトによるレンダリングアルゴリズムは、単純で計算コストが小さい。しかし、最終画像の画素数はマイクロレンズの画素数と等しくなるので、通常のデジタルカメラで撮影した画像と比較すると、非常に小さいものになる。また、マイクロレンズと生画像の画素の位置関係は、マイクロレンズごとに微妙に異なる。

したがって、画素の再配列において、画素値の補間が必要になる。その結果、最終画像の解像度を少し劣化させてしまう。

次に、より望ましい画像を生成する光線束投影法について説明する。図7の上部に、画像センサとマイクロレンズアレイによって光線を取得する様子を、より詳しく示した。4章では、画像センサの各画素が一本の光線を取得するように説明したが、正確には、ある程度の幅を持つ光線束が取得される。光線束投影によるレンダリングは、図7の下部に示すように、取得された光線束を、設定した焦点距離にある仮想画像面に投影する手法である。

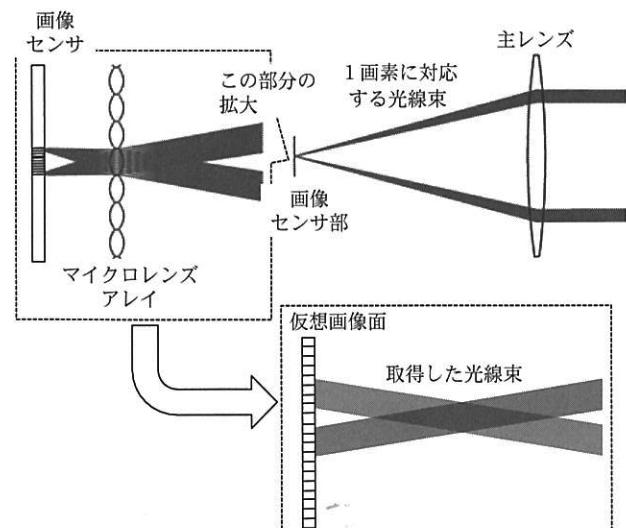


図7 光線束の投影によるレンダリング

図8に、シフト加算法と光線束投影によるレンダリング画像の比較を示す。図8(a)はサンプル画像の全体である。図中の前方参照領域はLytroから30 cm程度、後方参照領域は2 m程度の距離にある。(b)と(c)を比較することで、光線束投影によるレンダリング画像の解像度が高いことがわかる。なお、この実験を含めて、Lytroの出力ファイルを解析するためにオープンソースのlfptool<sup>(7)</sup>を利用した。lfptoolを参考に作成した、Lytroの出力ファイルを解析するmatlabコードが筆者のWebサイト<sup>(8)</sup>にあるので、参考にしていただきたい。

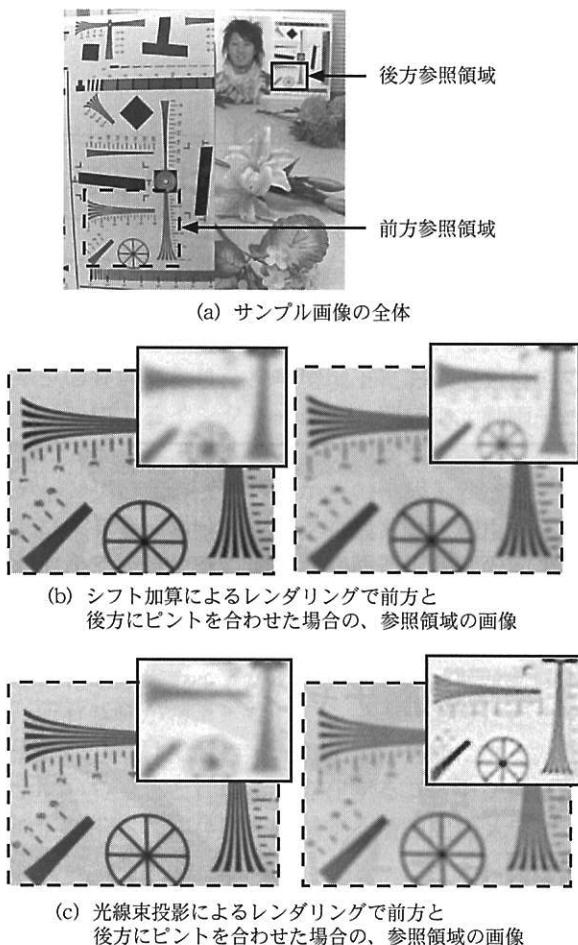


図8 レンダリング画像の比較

## 6. Lytroの課題

最も大きな課題は、最終画像の画素数が小さいことである。1つのマイクロレンズが直径10画素程度をカバーしていることから、通常のデジタルカメラと比較して、縦横の画素数が10分の1程度になる。また、

Lytroは画像センサの画素のかなりの割合を利用できていない。Lytroの画像センサは3,280×3,280画素で、マイクロレンズアレイは330×380であるから、マイクロレンズアレイあたりの画素数は85.8画素になる。一方、図4を観察すると、マイクロレンズあたりの有効な画素数は50個程度である。したがって、40%以上の画素が利用されていないと思われる。

マイクロレンズの境界に位置する画素は無駄になっているが、マイクロレンズの周辺に位置する画素は記録する光線の質が悪くなっている。図9は、マイクロレンズに対して5ヶ所の画素から構成される小画像を示したものである。この原稿では画質を詳細に確認することは難しいが、1-3の画像は鮮明で明るい。それに比べて、1-1の画像は全体に赤みがかり、モアレやノイズが見られる。光量も少ない。3-3の画像は全体に青みがかり、1-1と同様にモアレやノイズによる画質の劣化がある。

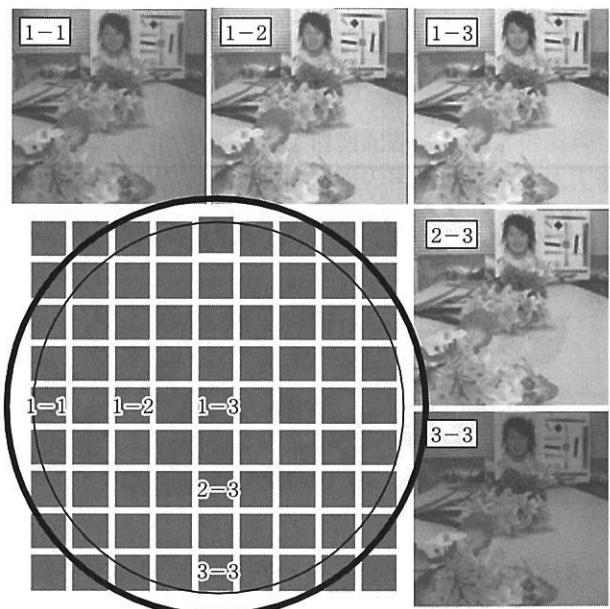


図9 画素位置による光線状態の比較

Lytroの特徴であるリフォーカス機能を楽しむためには、Lytroに慣れる必要がある。Lytroの主レンズは直径が25 mm程度で、画像センサは4.6 mm×4.6 mm程度である。このサイズのレンズと画像センサでぼけ味を楽しむためには、通常の構図の中に、極端な近景（マクロ撮影）を入れるなどの工夫が必要である。そのため、通常の写真撮影ではLytroを生かしきれない。

Lytroは、筐体ごとに、さまざまなキャリブレーションを行っていると思われる。最も重要なキャリブレーションは、画像センサとマイクロレンズアレイのアライメントである。これを正確に合わせなければ、高画質なレンダリングはできない。

## 7. おわりに

Lytroは未来的なカメラであるが、1990年前後のデジタルカメラがそうであったように、画質が不十分である、画像データが扱い難い、用途がそれほど魅力的でない、という課題がある。したがって、このままの性能で、一般ユーザーに広まる製品ではない。しかし、光像の記録から光線の記録への変化は、デジタルカメラの正当な進化である。したがって、ある程度の熟成期間を経て、デジタルカメラの1つの代表的カテゴリとして市場を形成する可能性が高い。

### 〈参考文献〉

(1) 神立尚紀：“図解 カメラの歴史”，ブルーバックス、講談社（2012）

- (2) 日浦慎作：“コンピュテーションナルフォトグラフィ”，電子情報通信学会誌、Vol.95、No.9、pp.823-828（2012）
- (3) <http://www.lytro.com/>
- (4) 蚊野浩・他：“<Lytro徹底解剖>光線情報を使って焦点自在にハードもソフトも独自品の塊”，日経エレクトロニクス、2012-8-20、pp.42-47（2012）
- (5) 小松進一：“Wavefront codingによる被写界深度の拡大”，情処研究報告、CVIM、2010-CVIM-174(5)、pp.1-8（2010）
- (6) 長原一：“符号化撮像”，情報処理学会研究報告、Vol.2010-CVIM-171、No.14、pp.1-9（2010）
- (7) <https://github.com/nrpatel/lfptools>
- (8) <http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/study.html>

### 【筆者紹介】

#### 蚊野 浩

京都産業大学 コンピュータ理工学部 教授  
〒603-8555 京都市北区上賀茂本山  
TEL : 075-705-3259  
E-mail : kano@cse.kyoto-su.ac.jp