

ライトフィールドカメラ Lytro の原理

京都産業大学 コンピュータ理工学部 蚊野 浩

1. はじめに

カメラが撮影する一枚の写真画像は2次元情報である。写真画像の元になっているものはレンズに入射する光であるが、これを光線に分解すると、4次元に分布していることがわかる。ライトフィールドカメラ Lytro は4次元分布する光線（ライトフィールド）を記録し、ライトフィールドに対する計算処理によって、写真画像を生成する。これは、レンズと撮像素子が写真画像を生成するプロセスをコンピュータ処理によってシミュレーションすることに相当する。普通のカメラでは、レンズを前後に移動させてピントを合わせたり、絞りを変えてぼけ具合に変化をつけたりする。それに対して、Lytro では、同様のことをコンピュータの計算によって実現できる。本講演では、これが可能になる原理を説明する。

2. マイクロレンズアレイを用いたライトフィールドの入力

Lytro は、マイクロレンズアレイと画像センサを用いて、レンズに入射する光を光線に分解して記録する。その光線記録部の分解写真を図1に示す。光線は通常の CMOS 画像センサに記録される。その表面にマイクロレンズアレイが配置され、これがレンズに入射する光を光線に分解する。マイクロレンズアレイは、直径 $14\mu\text{m}$ の微小レンズが規則的に配列したガラス板状の光学部品である。

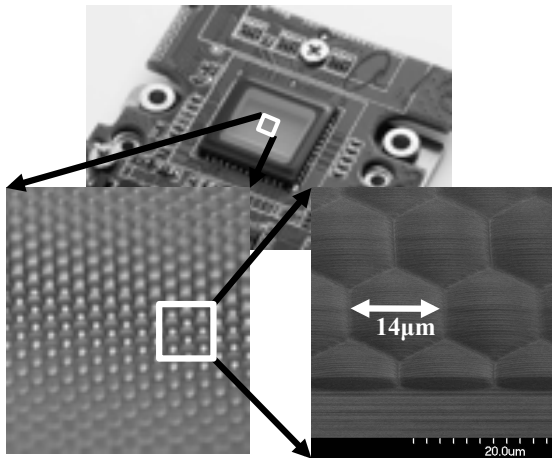


図1 ライトフィールドを入力する撮像部（写真：日経 BP 社 豊通エレクトロニクス ヴァン・パートナーズ）

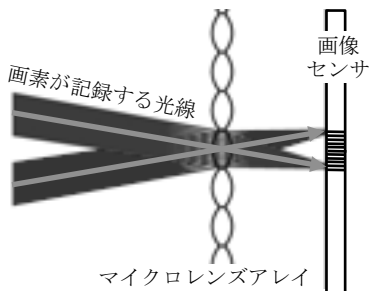


図2 画素が記録する光線

画像センサとマイクロレンズが光線を記録する様子を図2に示す。画像センサとマイクロレンズアレイの間隔はマイクロレンズの焦点距離に等しいため、画素に集光される光は平行光束である。したがって、一つ一つの画素は画素位置とマイクロレンズの中心を結ぶ光線を記録していると言える。

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。画像センサは 3280×3280 画素、画素ピッチは $1.4\mu\text{m}$ である。マイクロレンズの直径は10画素分であり、 330×380 個のレンズがハニカム構造で配列している。各画素が一本の光線を記録するので、全体で1,076万本（ $=3280 \times 3280$ ）の光線を記録できる。

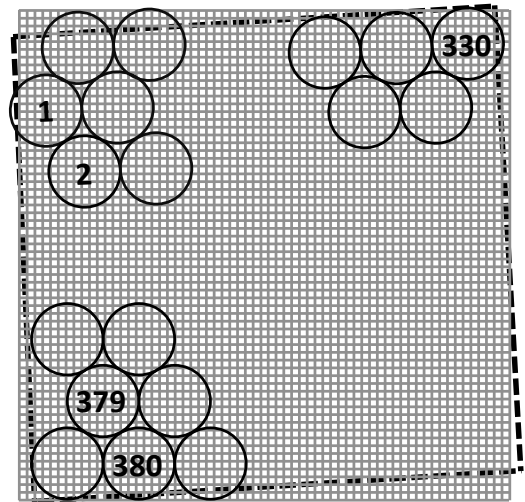


図3 画像センサとマイクロレンズアレイのアラインメント

図4に画像センサが記録する生の光線データの例を示す。この生データにはマイクロレンズアレイの構造が強く反映される。図右の円構造がマイクロレンズの構造に対応し、その直径が10画素であることも確認できる。画像センサの表面にはベイヤー型カラーフィルタアレイが配置されているため、この画像はカラーフィルタアレイ画像でもある。

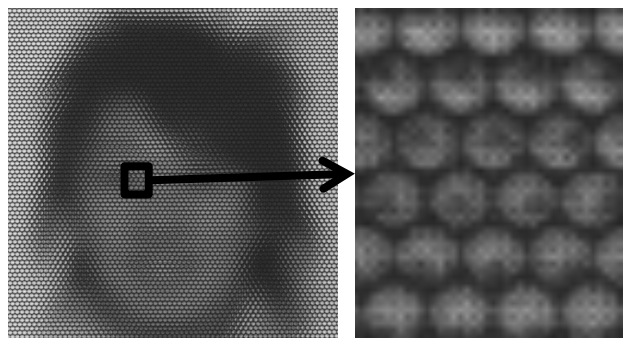


図4 画像センサが記録する生データの一部分

3. ライトフィールドによる像の形成

被写体から発する光線がライトフィールドカメラに記録される様子を図5上に示す。図において、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A上の一点から発する3本の光線は同じマイクロレンズの位置で集まる。そして、マイクロレンズを通過してその下にある画素によって光線の明るさが記録される。一つのマイクロレンズがカバー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、仮想的な撮像面を置いたときに形成される像を計算したことになる。

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、図5下で、異なるマイクロレンズを通過した光線が交わる位置に仮想的な撮像面を置いたときに形成される像を計算したことになる。

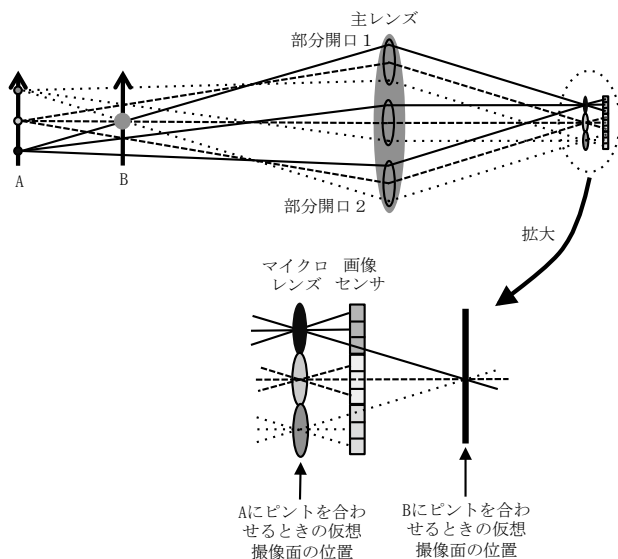


図5 ライトフィールドの記録と像の形成

4. 4次元光線空間と写真画像のレンダリング

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再配列してできる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。

Lytroの場合、一つのマイクロレンズがカバーする画素数は85.8画素 ($3280 \times 3280 / (330 \times 380)$) である。マイクロレンズとマイクロレンズの境界に位置する画素は、図4右のように光線の記録が難しいことを考慮すると、光線を記録できている画素はマイクロレンズあたり60画素程度になる。従って、Lytroはレンズの有効口径内の60箇所から、 330×380 本の光線を同時撮影するカメラであるということもできる。レンズの有効口径という2次元空間の各箇所、2次元構造の光線をサンプリングすることから、全体として、4次元の光線空間をサンプリングしていることがわかる。

図6左側の処理は、画像センサが撮影する生データから、マイクロレンズに対して同じ位置にある画素を再配列することで、多くのステレオ画像（互いに視差がある画像）を生成する様子を示す。画像間の視差量は、被写体までの距離によって異なる。この図では、手前にある被写体は視差が大きく、奥にある被写体は視差が小さい。図6右側は、これらのステレオ画像を適切に平行移動して重ね合わせている。移動量が大きければ、手前の被写体の位置が正確に重なり、移動量が小さければ、奥の被写体の位置が正確に重なる。このように重ね合わせた複数の画像を加算平均すると、移動量に応じて、さまざまな位置にピントが合った画像を生成することができる。これが、4次元光線情報を用いてリフォーカス画像を生成する一つの方法である。

多数のステレオ画像を用いることで、リフォーカス画像だけでなく、さまざまな画像を生成することができる。その例として、立体ディスプレイを用いて両眼立体視するための左眼画像・右目画像（通常のステレオ画像）や、全ての奥行きにピントがあった全焦点画像がある。また、60組のステレオ画像をマルチベースラ

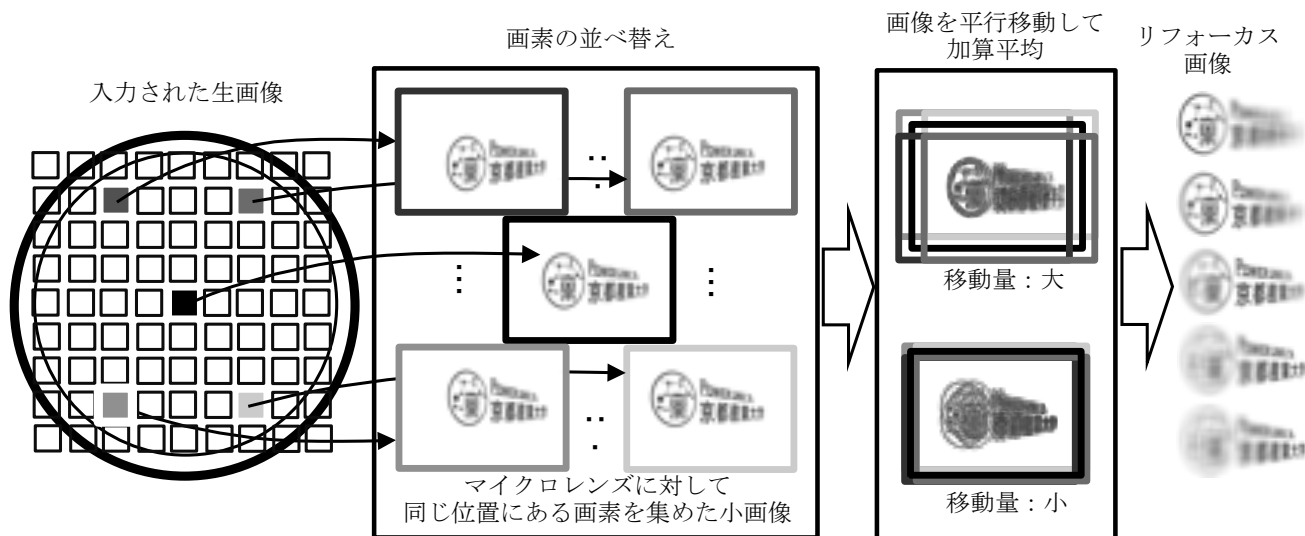


図6 ステレオ画像群への分解とそれを平行移動して加算平均することによるリフォーカス処理

インスタレオ処理することで、デプス画像を生成することも可能である。さらに、全焦点画像とデプス画像を用いることで、被写体の奥行きに応じたばけ具体の調整が可能になる。例えば、普通のカメラであればレンズの絞りを変えることで被写界深度を調整するが、ライトフィールドカメラでは、デプス画像を用いて、全焦点画像を適応的に平滑化することで類似の効果を得ることができる。この機能のように、光線に対する幾何光学的な計算だけでなく、一般的な画像処理との組合せによって実現可能なものも多い。

5. 第一世代機と Illum の比較

ここまでは 2012 年に製品化された Lytro の第一世代機について述べた。2014 年に第二世代機である Illum が製品化された。図 7 に Illum と 第一世代機の外観写真を示す。



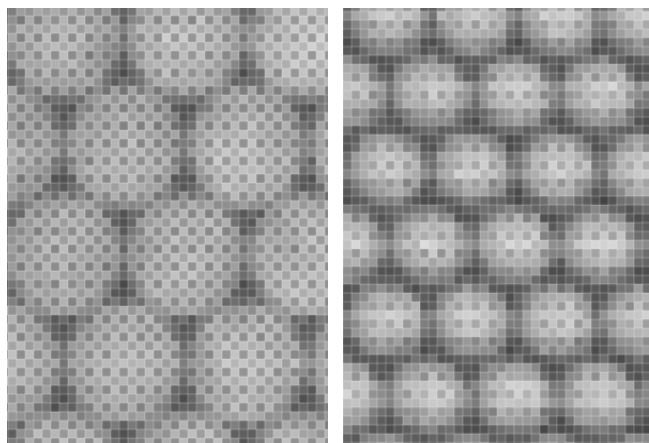
図 7 Lytro Illum と第一世代機

Illum はライトフィールドカメラとしての基本性能が格段に向上している。光線を記録する主要部品である画像センサとマイクロレンズ、および出力 2D 画像の比較を表 1 に示す。両者の画像センサを比較すると、セルサイズは $1.4\mu\text{m} \times 1.4\mu\text{m}$ で同じであるが、画素数が 1066 万画素から 4148 万画素へと、おおむね 4 倍に増加している。従って、記録される光線数も 1066 万本から 4148 万本に増加する。マイクロレンズアレイのレンズ数を比較すると、12.5 万個から 23.4 万個へと、おおむね 2 倍に増加している。マイクロレンズの直径は 40%程度大きくなり、マイクロレンズ一つあたりの画素数は 85.8 個から 177.4 個へと、2 倍程度大きくなっている。これは、奥行き解像度が 2 倍になったことに相当する。また、出力画像の画素数も 4 倍になった。

表 1 Illum と第一世代機の比較

画像センサの画素数	3280×3280 1076万画素	7728×5368 4148万画素
画像センサの面積	4.59mm×4.59mm 21.1mm ²	10.82mm×7.52mm 81.4mm ²
画素ピッチ	1.4μm	1.4μm
マイクロレンズアレイ	330×380 12.5万個	540×433 23.4万個
マイクロレンズの直径	14μm 10画素分	20.0μm 14.3画素分
出力2D画像サイズ	1080×1080	2450×1634

図 8 に Illum と第一世代機の画像センサが記録した生データの比較を示す。Illum のマイクロレンズは直径が 14.3 画素になったため、それに応じて円構造が大きくなっている。それだけでなく、2 つ画像を比較すると、マイクロレンズの境界にあり光線の記録が難しい画素の数が、Illum では第一世代機よりも少なくなっているように見える。それは、マイクロレンズの加工精度が向上したことが主な要因であろう。また、マイクロレンズの直径が大きくなったことにより、レンズ境界線に位置する画素の割合も減っている。



Illum の生データ

第一世代機の生データ

図 8 Illum と第一世代機の生データの比較

6. まとめ

Lytro がライトフィールドを記録する原理と、ライトフィールドを用いて写真画像を生成する原理を説明した。また、第二世代機である Illum と第一世代機について、ライトフィールドを記録する画像センサとマイクロレンズアレイの仕様、生データの簡単な比較を行った。