

# ライトフィールドカメラによる三次元計測：原理・現状・将来

蚊野 浩

京都産業大学コンピュータ理工学部

## 1. はじめに

通常のデジタルカメラは、カメラに入射する光をレンズの働きによって光の像に変換し、それをデジタルデータとして記録する装置である。ライトフィールドカメラは、カメラに入射する光を光線に分解し、光線の集合をデジタルデータとして記録する。記録された光線集合をライトフィールドとよぶ。そして、光線集合に対する計算によって写真画像を生成する。例えば、撮影後の後処理によって任意の位置にピントを合わせた画像を生成することが可能である 2)3)。このように、ライトフィールドカメラは光線集合の記録と、光線集合に対する計算処理の2つの要素から構成される。光線集合に対する計算は、概ね、レンズによる光像の生成をコンピュータシミュレーションすることである。

光線集合を用いた計算によって、被写体までの距離を求めることもできる。その計算原理は、結局、受動ステレオ計測に帰着される。この解説では、最初に受動ステレオの原理と多眼ステレオによる三次元計測を説明する。ついで、ライトフィールドカメラと多眼ステレオの関係を解説する。また、三次元計測装置として用いられるライトフィールドカメラの例を解説し、最後に、将来の可能性を述べる。

## 2. 多眼ステレオによる三次元計測

多眼ステレオ（マルチビューステレオと呼ばれることも多い）は、航空測量の分野で実用化されている。これによって、災害現場を撮影した多数の写真から地形の立体モデルを迅速に作成することが可能になっている。多眼ステレオの基礎になっている技術は2眼の受動ステレオである。富士重工が実用化した安全運転システム EyeSight は、2眼の受動ステレオで前方障害物までの距離を測定することがシステムの基本技術である。ライトフィールドカメラによる3次元計測も、原理を解き明かせば、受動ステレオ計測に帰着される。この章では、受動ステレオと多眼ステレオの原理を簡単に説明する。

図1を用いて受動ステレオの原理を説明する。焦点距離  $f$  の2台のカメラを、基線長  $B$  の間隔で配置する。この時、2枚の被写体像には、距離  $z$  に応じた位置のずれ  $d$  が生じる。位置ずれ量を視差とよび、 $z=Bf/d$  の関係がある。したがって、被写体距離は視差に反比例し、視差がゼロであれば被写体は無限遠に存在する。受動ステレオ計測では、図1のように撮影した2枚の被写体像から対応点を推定し、距離・位置・形状を計算する。

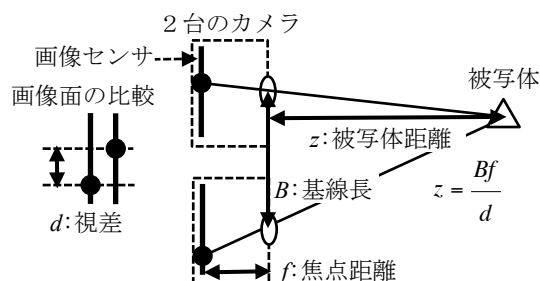


図1 受動ステレオ法

受動ステレオで、3台以上のカメラを用いるものを多眼ステレオとよぶ。多眼ステレオの極限として、図2のように、カメラを縦横に規則的に配置した装置を考えることができる。このような装置をカメラアレイ 5)とよぶ。多眼ステレオは2眼ステレオの集合体であるから、受動ステレオの原理を用いて被写体までの距離・位置・形状を測定することが可能である。このとき、多数のステレオペアから得る距離の手がかりを統合することで、測定結果の精度と信頼性を向上させることができる。その代表的な手法がマルチベースライン法 4)である。受動ステレオとマルチベースライン法の詳細な説明は、文献 1)などに記述されているので、そちらを参照していただきたい。

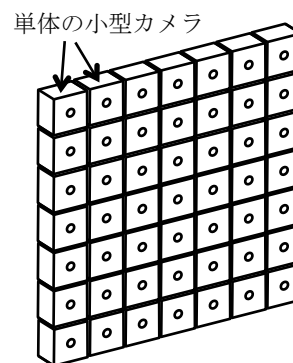


図2 小型カメラを縦横に規則的に配置したカメラアレイ

以上の説明では、特性が同じカメラをそれらの画像センサー面が同じ平面上に並ぶように配置した。このような構成を平行ステレオとよび、距離を計算する式が単純になる。一般に、個々のカメラの特性やカメラ配置は平行ステレオにならないが、平行化(rectification)と呼ばれる前処理を施すことで、平行ステレオで撮影した画像に変換することが可能である。

### 3. ライトフィールドカメラの原理と 多眼ステレオとの関係

市販されているライトフィールドカメラに、米国 Lytro 社の製品とドイツ Raytrix 社の製品がある。3章では、これらの技術と多眼ステレオの関係を説明する。

#### 3.1 Lytro カメラの原理

通常のデジタルカメラと比較すると、Lytro カメラの構造上の特徴は画像センサの直前にマイクロレンズアレイが配置されていることである。図 3 に Lytro 第一世代機の撮像部の拡大写真を示す。画像センサ自身はデジタルカメラ用 CMOS センサであり、その画素ピッチは  $1.4\mu\text{m}$  である。画像センサ表面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  $14\mu\text{m}$  である。画像センサの  $3280\times 3280$  画素の領域が  $330\times 380$  個のレンズによってカバーされており、一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、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  $430\mu\text{m}$  である。また、CMOS センサ表面にはベイヤー型のカラーフィルタアレイが配置されている。Lytro 社は、このように構成される撮像部を、ライトフィールドセンサーとよんでいる。

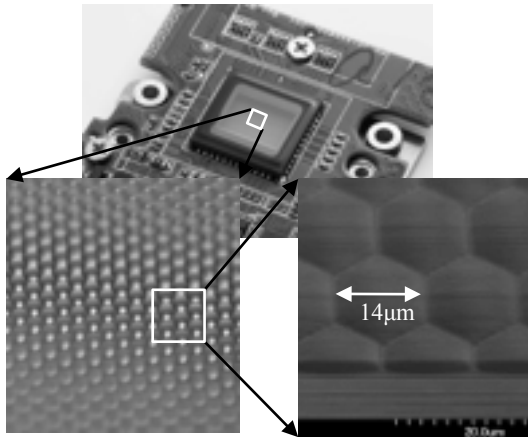


図 3 Lytro 第一世代機の撮像部の拡大写真  
(日経 BP 社, 豊通エレクトロニクス ヴァン・パートナーズ)

2014 年に発表された Lytro の第二世代機 Illum は、画像センサの画素数とマイクロレンズアレイのレンズ数が第一世代機よりも増加している。画素数は  $7728\times 5368$  画素、マイクロレンズ数は  $540\times 434$  個である。画像センサの画素ピッチは  $1.4\mu\text{m}$  で、第一世代機と同じである。一つのマイクロレンズの直径は 14.3 画素分である。

図 4 に Lytro Illum が記録する生画像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一つのマイクロレンズに対

応する。その直径が 14.3 画素であることを、この画像から確認することができる。円構造内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おり、その領域では光線の取得が難しいことを示す。画像センサの表面にベイヤー配列の RGB 色フィルタが配置されているため、画素の濃淡は RGB いずれかの強度値に対応する。



図 4 Lytro Illum の生画像とその一部の拡大

撮像部と主レンズによってライトフィールドを記録する様子を図 5(a)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。一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 の位置にピントを合わせた粗い写真画像が生成される。これは、図 5(b)で、計算上の撮像面（仮想撮像面）をマイクロレンズアレイの位置に置いた画像を計算したことに相当する。

図 5(a)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ことは、B にピントを合わせた写真画像の画素を生成することで

ある。これは、B の位置にピントを合わせると 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。このときの仮想撮像面は、図 5(b)で 3 本の光線が交わった位置になる。同様の手順で任意の距離にピントを合わせた画像を計算することが可能であり、この機能をリフォーカスとよぶ。

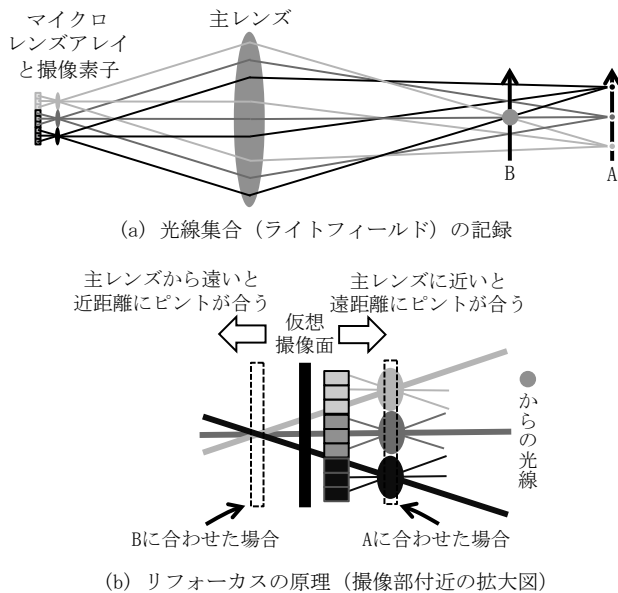


図 5 ライトフィールドの記録とリフォーカスの原理

### 3.2 Lytro カメラと多眼ステレオの関係

図 5 において、マイクロレンズがカバーする 3 つの画素の中で、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、主レンズの上部に達する。したがって、これらの画素だけを再配列して生成される画像は、主レンズ上部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を再配列して生成される画像は、主レンズ下部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だけ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。それぞれの小画像は、主レンズの一部分を通過した光線による被写体像であるため、サブアパチャー画像とよばれる。

Lytro Illum は一つのマイクロレンズが、約 150 画素をカバーする。したがって、撮像素子部は 150 画素の超微小カメラを  $540 \times 434$  個配列したカメラアレイのように見える。しかし、上で述べたマイクロレンズと主レンズの働きにより、実際には、 $540 \times 434$  画素の小画像を撮影する微小カメラが、主レンズ口径上に 150 個配置されたカメラアレイと考えるのが適切である。このようにして Lytro Illum の生画像を、150 台のカメラで構成される多眼ステレオシステムで撮影した 150 枚の画像と同等の画像セットに変換することができる。この画像集合に多眼ステレオのアルゴリズムを適用して、3 次元

計測が可能になる。

参考のために、カメラアレイで撮影した画像群からリフォーカス画像を生成する手順を説明する。まず、入力された画像上で、ピントを合わせる被写体を指示する。次いで、多眼受動ステレオのアルゴリズムを用いてその被写体の視差を計算する。以下、図 6 に示すように、画像群を視差に応じて平行移動し、重ね合わせ、全ての画像を平均化することでリフォーカス画像を得る。視差が大きければ手前にピントが合い、視差が小さければ奥にピントが合ったリフォーカス画像が生成される。

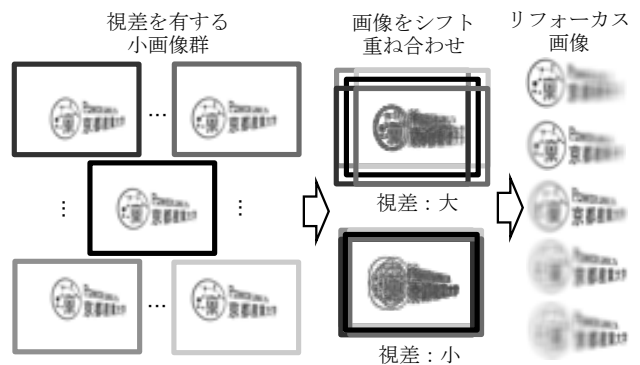


図 6 多眼ステレオ画像を用いたリフォーカス

### 3.3 Raytrix カメラの原理と多眼ステレオとの関係

Lytro とは少し異なるライトフィールドカメラに Raytrix 社の製品がある。Raytrix 社は、自社のライトフィールドカメラを Focused Plenoptic Camera と呼んでいる。ここで Plenoptic は「すべての光」を意味する言葉であり、ライトフィールドカメラをプレノプティックカメラとよぶこともある。

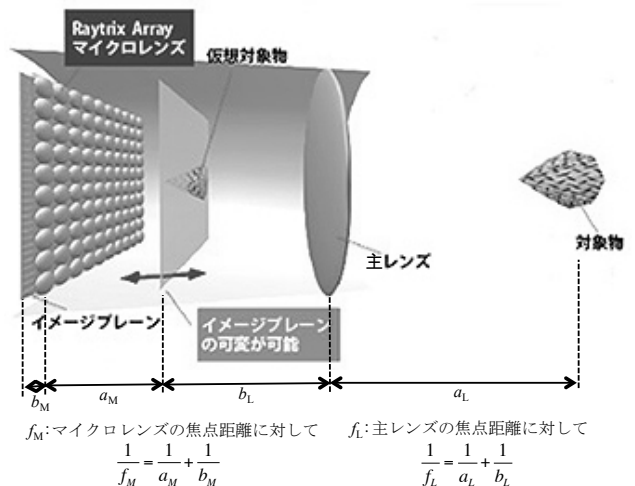


図 7 Raytrix カメラの原理

(アルゴ/Raytrix 社提供の図に追記)

図 7 を用いて、Raytrix カメラの原理を説明する。Raytrix カメラの構成は、Lytro と類似しているが、主レンズとマイクロレンズアレイの位置関係が少し異なる。Lytro では、主レンズによる像が形成される位置にマイクロレンズアレイを配置する (図 5(a))。それに対して Raytrix は、主レンズとマイク

ロレンズアレイの間隔が少し広い。それらの位置関係を正確に記述すると次のようになる。被写体から主レンズまでの距離を  $a_L$ 、主レンズから被写体像までの距離を  $b_L$ 、主レンズの焦点距離を  $f_L$  とし、被写体像からマイクロレンズアレイまでの距離を  $a_M$ 、マイクロレンズアレイから撮像素子までの距離を  $b_M$ 、マイクロレンズの焦点距離を  $f_M$  としたとき、式(3.1)が成り立つように配置する。この式からわかるように、Raytrix カメラは、主レンズの像（図7の仮想対象物）を、マイクロレンズアレイと撮像素子で構成する多数の微小カメラで再撮影する構成である。

$$\frac{1}{f_L} = \frac{1}{a_L} + \frac{1}{b_L}, \quad \frac{1}{f_M} = \frac{1}{a_M} + \frac{1}{b_M} \quad \dots (3.1)$$

図8にRaytrixカメラの生画像とその一部を拡大したものを示す。Lytroと同様にマクロレンズアレイの構造を強く反映した生画像である。Lytroカメラと比較すると、マイクロレンズごとの微小画像の様子は異なる。Raytrixカメラの場合、それらは被写体のごく一部を観察した画像になっている。そして、隣接するマイクロレンズごとに微小画像の観察する領域が少しずつずれている。被写体上のある特定の点に注目すると、その点は3つ、あるいは4つのマイクロレンズで観察されていることがわかる。

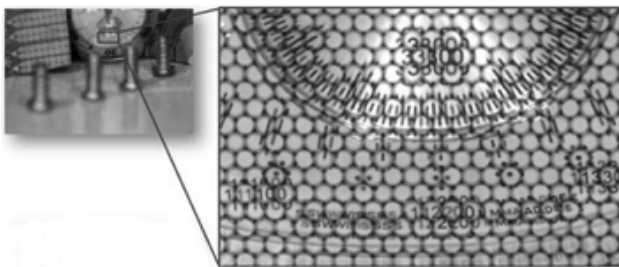


図8 Raytrixカメラの生画像とその一部の拡大  
(アルゴ/Raytrix社提供)

図8の生画像から、通常の写真画像を生成する処理は、次のようになる。

- ① マイクロレンズに対応した直径23画素の微小画像を個別の画像に分ける。
- ② 隣接する微小画像をずらせながら重ね合わせて平均化することで、一枚の画像に合成する。

ここで、ずらせる量（視差）を全ての微小画像で同じに設定すれば、特定の被写体にピントが合った画像になる。ずらせる量を、微小画像ごとにその部分の被写体に応じた視差に設定すれば、全焦点画像になる。この処理手順で、図8の生画像から生成した写真画像を図9に示す。Raytrixカメラの生画像から再構成した写真画像は、Lytroカメラよりのものよりも高解像度になる。なお、Raytrixカメラの場合、ピントが合わない位置での写真画像に、不自然なアーチファクト（模様）が発生する。



図9 Raytrixカメラの生画像から再構成した写真画像  
(アルゴ/Raytrix社提供)

Raytrix R29の画像センサは6576×4384画素である。マイクロレンズの直径は23画素分、マイクロレンズアレイのレンズ数は286×220=62,920個である。したがって、このRaytrixカメラは、画像センサの直径が23画素の微小カメラを、286×220個、図2のように敷き詰めて、主レンズの撮影範囲を観察するように構成した多眼ステレオカメラと、ほぼ同じものであると言える。

### 3.4 多眼ステレオとしてのLytroとRaytrixの比較

Lytro IllumとRaytrix R29を、それらと等価な多眼ステレオカメラに換算して比較したものを表1に示す。

表1 多眼ステレオ換算のLytroとRaytrixの比較

	Lytro Illum	Raytrix R29
要素カメラの画像	540×434画素	直径23画素の円
要素カメラ数	150台	286×220台
最大基線長	主レンズの有効径	被写体の縦・横の長さ

Lytro Illumを多眼ステレオカメラ換算した場合、最も長い基線長が主レンズの有効径の長さ程度になる。この直径内部に約150個の小型カメラを配置した構成である。受動ステレオ計測の基線長がレンズの有効径程度では、通常的情景を撮影した場合、高精度な三次元計測は難しい。

一方Raytrixは、対象物を縮小撮影した仮想対象物をカメラアレイで再撮影するという構成である。R29を多眼ステレオに換算すると、被写体の縦横をカバーする平面上に286×220台のカメラを配置した構成になる。ただし、それぞれのカメラの画像面は直径23画素の円である。Raytrixカメラは、被写体の大きさに対して長い基線長をとることができるので、測定精度を高めることができる。



#### 4. Raytrix カメラによる三次元計測の例

Lytro カメラを用いて高精度に距離画像を計算する研究例もあるが 6), 三次元計測には Raytrix カメラが適していると考えられる. 4 章では, Raytrix カメラによる計測例を示し, その性能を確認する.

図 10 は電子部品の撮影例である. Raytrix の生画像を処理することで, 通常のカメラよりも被写界深度が深い画像を生成することができる. また, 実寸の測定値を出力することができる. Raytrix カメラの測定精度は明確ではないが, 同社の Web サイトには, 被写界深度に対して 1% という記述がある.

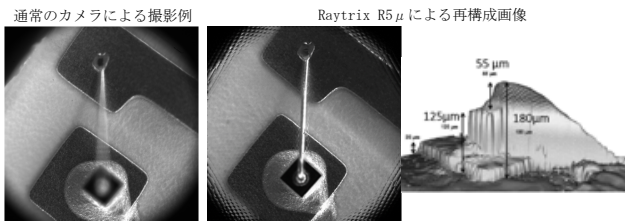


図 10 Raytrix カメラによる撮影例 1  
(アルゴ/Raytrix 社提供)

図 11 に MEMS 部品を測定した例を示す. この図からも良好に三次元計測できていることがわかる.

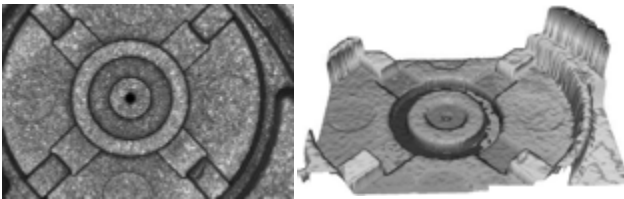


図 11 Raytrix カメラによる撮影例 2  
(アルゴ/Raytrix 社提供)

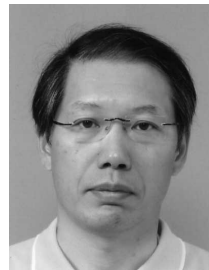
#### 5. ライトフィールドカメラによる 三次元計測の将来

ライトフィールドカメラによる三次元計測は研究段階にある. その計測原理は受動ステレオであるから, 受動ステレオが実用化されている領域に適用することが考えられる. 例えば, 自動車の距離センサとしてステレオカメラが利用されているので, それを 1 台の Raytrix カメラで代替できる可能性がある.

図 10 や図 11 のような電子部品や精密部品の三次元計測は, 受動ステレオではなく, 能動ステレオが利用されている. その理由は能動ステレオが高精度で, 模様が存在しない物体表面にも適用できるからである. したがって, ライトフィールドカメラとパターン光照明の組み合わせによって, 精密部品の三次元計測に利用できる可能性がある.

#### 参考文献

- 1) デジタル画像処理[改訂新版]編集委員会: "デジタル画像処理 [改訂新版]", CG-ARTS 協会, (2015).
- 2) R. Ng: "Digital light field photography", Dissertation of Stanford University, (July 2006).
- 3) 蚊野 浩: "ライトフィールドカメラ Lytro の動作原理とアルゴリズム", 日本学術振興会, 光エレクトロニクス第 130 委員会, 「光の日」公開シンポジウム講演予稿集, pp.1-6, (2013).
- 4) 奥富 正敏, 金出 武雄: "複数の基線長を利用したステレオマッチング", 電子情報通信学会誌, Vol. J75-D-II, No. 8, pp.1317-1327 (1992).
- 5) B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz and M. Levoy: "High performance imaging using large camera arrays", ACM Trans. Graphics, Vol. 24, No. 3, pp.767-776 (July 2005).
- 6) N. Sabater, et al., "Accurate Disparity Estimation for Plenoptic Images," Computer Vision –ECCV2014 Workshops, Proceedings, Part II, pp.548-560, 2015.



蚊野 浩

1984 年京都大学大学院情報工学専攻修了. 同年三洋電機株式会社入社. カラー記録装置, 画像処理技術, コンピュータビジョン技術などの技術開発に従事. 2010 年京都産業大学コンピュータ理工学部教授. 工学博士.