

コンピュータ工学特別研究報告書

題目 ライトフィールドカメラの研究
ー光線情報からの画像再構成ー

学生証番号 144902

氏名 中島 類

提出日 平成 27 年 1 月 23 日

指導教員 蚊野 浩

京都産業大学
コンピュータ工学部

要約

画像処理によって、デジタルカメラで撮影した写真画像を鮮明にしたりぼけを加えたりすることができる。しかし、撮影前に行うピント合わせのように、注目する被写体だけを鮮明にし、それ以外の被写体を自然にぼけさせることは難しい。ライトフィールドカメラはこれを可能にする装置である。このカメラは、レンズに入射した光線を記録し、光線情報を計算することで写真画像を生成する。それによって、撮影後のリフォーカスなどの処理を容易に行うことができる。

本研究では、ライトフィールドカメラが光線情報を記録する仕組みや、写真画像を生成する処理の仕組みを明らかにする。そして、光線処理をソフトウェアで実装することで、撮影現象をコンピュータで計算し、カメラの機能を模擬する。これによって、通常のカメラでは光学的に実現される、絞り調整による被写界深度の制御などを、コンピュータ処理によって実現することを目標とする。また、光線処理で可能なことと不可能なことを明確にする。

開発したプログラムは、光線情報の処理過程にレンズと撮像素子間の距離などのカメラパラメータを設定し、写真画像を生成する。カメラパラメータを様々に変え、画像を生成した結果、ライトフィールドカメラでは、レンズから撮像素子までの距離を変えることによるリフォーカスを、光線処理のみで行うことができた。しかし、レンズの焦点距離を変化させることによる画角制御や、レンズ口径を変化させることによる被写界深度制御は、一部の機能だけが可能であった。画角制御では、ライトフィールドカメラで取得した光線があらかじめ決まっているため、画角を広くすることができなかった。被写界深度制御では、レンズを絞ることにより、被写界深度を浅くすることはできたが、画像端が暗くなった。また、被写界深度を深くすることはできなかった。

目次

1 章 序論	1
2 章 コンピュータショナルフォトグラフィとライトフィールドカメラ	3
2.1 コンピュータショナルフォトグラフィ	3
2.2 ライトフィールドカメラの原理	3
3 章 光線追跡による撮影画像の生成手法	8
3.1 ライトフィールドカメラが記録する光線	8
3.2 光線行列を用いた光線追跡	9
3.3 撮像面での画像生成	11
4 章 実験結果と考察	15
4.1 リフォーカス	15
4.2 画角制御	16
4.3 レンズ口径	17
4.4 考察	18
5 章 結論	20
参考文献	20
謝辞	20
付録 本研究で作成したプログラムの説明	21

1 章 序論

カメラは被写体が発する光をレンズによって集光し、撮像素子表面に光の像を形成する。デジタルカメラでは、撮像素子が光像をデジタル画像に変換する。デジタルカメラを用いることで、写真をコンピュータで容易に処理できるようになった。フィルム写真の加工では、プリントを切り貼りすることで画像を合成し、現像に工夫を加えることで色や明るさを変えていた。デジタル写真では、これらの処理が容易に行えるだけでなく、写真全体の鮮鋭感を調整することや、形を変形させるなども可能である。これらはデジタル画像処理によって可能になった。

デジタル写真に画像処理を施すことで豊富な情報を抽出することができるため、多くの機器にデジタルカメラと同等の機能が搭載されている。画像中から人物や物体を検出する画像処理を使い、自動車を自動停止させることも可能である。しかし、通常のデジタルカメラは三次元シーンを二次元画像に縮退させてしまうため、元のシーンが持つ三次元情報を処理するには特別な工夫が必要である。

デジタルカメラ技術を応用し二次元画像を撮影するだけでなく、三次元情報を取得することが可能な装置が開発されている。例えば Microsoft 社が開発した Kinect は、通常のデジタルカメラの機能に加え、物体までの距離を測るデプスセンサを搭載することで、三次元情報を取得している。Kinect は被写体までの距離をリアルタイムで計測し、それに処理を加えることで被写体の動き情報を獲得する。Kinect はセンサとしての意味合いが強く、写真を楽しむために利用されることは少ない。

本研究の対象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て記録するカメラである。通常のデジタルカメラがレンズの働きによって形成される画像を記録するのに対して、ライトフィールドカメラは画像の元になる光線を記録する。三次元の情景が発する光を光線に分解して記録するため、三次元空間を記録するカメラであるとも言える。これを用いると、取得した光線に対してコンピュータ処理を施すことで、撮影現象をシミュレーションすることができる。これにより、従来カメラよりも豊かな表現を可能にし、写真の楽しみを広げることができる。すなわち、ライトフィールドカメラは、カメラ本来の使い方を損なうことなく、さらに発展させるものである。

本研究は、ライトフィールドカメラの処理内容を明らかにし、これを用いて

可能なこと, 不可能なことを明確にする. 以下, 2 章でコンピュータシヨナルフォトグラフィとライトフィールドカメラについて説明し, 3 章で光線追跡と, それを用いた画像の再構成手法について説明する. 次いで, 4 章でレンズ口径, 焦点距離といったパラメータを変え, 再構成を行う実験と, その結果について説明する. 5 章で結論を述べる.

2章 コンピュータショナルフォトグラフィとライトフィールドカメラ

デジタル写真は、撮像素子の表面に形成される光像に忠実なデジタル画像を生成する技術である。これに対して、最終画像はデジタル写真であるが、カメラに入射する光を記録する段階に特別な工夫を施し、一旦、中間的な表現を取得し、それに高度なコンピュータ処理を施すことで写真画像を得る技術をコンピュータショナルフォトグラフィと呼ぶ。2章では、コンピュータショナルフォトグラフィとその代表的手法であるライトフィールドカメラについて説明する。

2.1 コンピュータショナルフォトグラフィ

デジタルカメラは、それまでフィルムに焼き付けていた光を、撮像素子とよばれる半導体を用いることで、デジタルデータとして扱えるようにした。しかし、得られる写真自体はフィルム時代のものとさほど変わらない。それでも、コンピュータ上で写真データを扱えるようになったことで、写真の色を変化させたり、ノイズを除去したりする画像処理を容易に適用できるようになった。

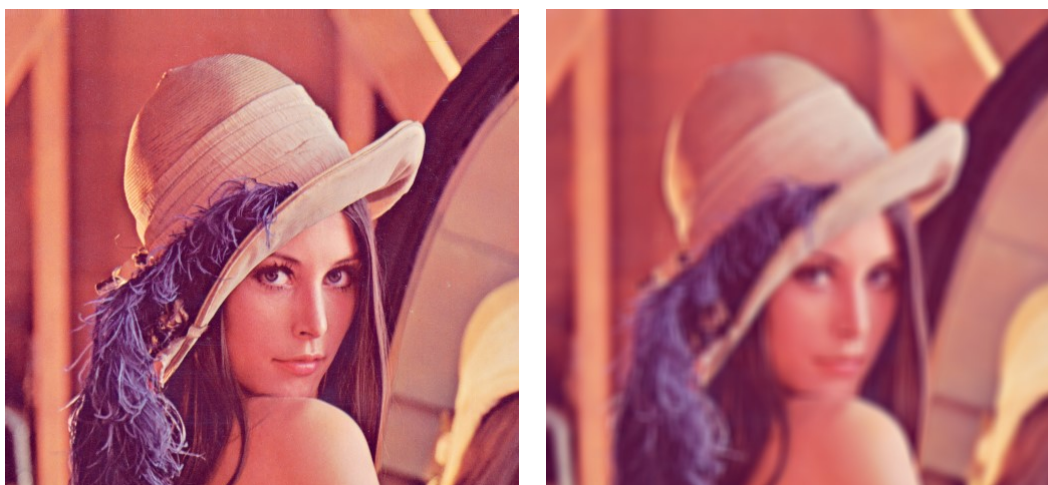
コンピュータショナルフォトグラフィは、カメラに入射する光を記録する段階で、何らかの光学的な前処理を行い、通常の光像よりも豊富な情報を取得する。そして、それに高度な画像処理を施すことで、写真画像を生成する技術である。現状では、コンピュータショナルフォトグラフィに、これといった明確な基準や規格はない [2]。撮影段階での処理は様々であり、例えば、Wavefront コーディングと呼ばれる手法では、撮像レンズの中に位相板と呼ばれる光学素子を挟む。それによって、結像位置で本来シャープな像にぼけを加える。その代わりに、結像位置の前後でぼけの状態を一定に保つようにする。このように若干のぼけが加わった画像を、逆畳み込みフィルタで画像復元することにより、被写界深度が非常に深い撮像系を構築することができる。

2.2 ライトフィールドカメラの原理

本論文ではコンピュータショナルフォトグラフィの一つであるライトフィールドカメラについて述べる。ライトフィールドカメラにおける光を記録する段階での前処理は、レンズに入射する光を光線に分解することである。ライトフ

フィールドカメラは、写真画像の元になる光線を記録することで、カメラによる撮影現象そのものをデジタル化する。つまり、写真撮影をシミュレートし、撮影時のパラメータを変化させることで、最終的な写真画像に変化を与えることが可能になる。

これは、撮影後の写真に変化を与える従来の画像処理とは異なるものである。従来の画像処理による効果は、撮影時における物理現象を考慮した処理ではあるが、その物理現象を忠実に再現しているわけではない。それに対して、ライトフィールドカメラは、撮影におけるレンズと撮像素子の機能をデジタル処理によって実現する。カメラの様々なパラメータを変えた時に、それが写真にどのように反映されるかをシミュレートする。ここでのパラメータは、レンズの口径や撮像素子の位置、サイズなどである。



(a) 元画像

(b) 平滑化後の画像

図 2.1 画像処理による効果

図 2.1 の (a) は何も処理を施していない元画像。(b) は、(a) にガウシアンフィルタによる平滑化処理を施したものである。このように、画像全体をぼかすことは簡単に行うことができる。しかし、この方法では、 F 値が小さいレンズで撮影したような、一部の物体にピントが合っていて、それ以外がぼけている画像を作ることは難しい。それを行うには、何らかの方法で被写体までの距離を推定し、距離に応じて平滑化の度合を制御する必要がある。



図 2.2 ピントが合った写真 [1]

図 2.2 は手前のパンケーキにピントが合った写真である。奥にある食器などはぼけ量が大きく、パンケーキの手前にある白い皿はあまりぼけていない。これが、レンズ口径が大きいカメラでパンケーキにピント合わせを行った結果得られる写真画像である。ピントが合っていない部分のボケ量は、レンズ口径によって変化する。この効果を、従来の画像処理で実現することは容易ではない。

通常のカメラは、ピントが合った被写体の像がシャープになり、その前後にある被写体の像がぼける。そのぼけ具合は、レンズの有効口径と焦点距離の比である F 値によって決まる。レンズを決めて写真撮影を行うと、ピントの合っていない被写体のぼけ具合が決まる。ぼけ具合を変更するには、レンズを変えなければならない。一方、光がレンズに入射し、屈折し、そして画像面に当たるという現象をコンピュータでシミュレートできれば、レンズを変えることなく、コンピュータプログラムのパラメータ値を変えるだけで、レンズを付け変えて撮影した写真を得ることができると考えられる。

ライトフィールドカメラでは、写真撮影の元になる光を光線に分解して記録するために、小型カメラを縦横に並べたり、マイクロレンズアレイを用いたりする。例えば、Lytro 社が開発したライトフィールドカメラの一実装では、撮像素子の前に、マイクロレンズアレイと呼ばれる、微小レンズが規則正しく敷き詰められたものを用いる。また、小型デジタルカメラを縦横にたくさん並べて、同時に写真を撮影する方法もある。本論文では、前者の例について説明する。

図 2.3 にマイクロレンズアレイを装着した撮像素子の例を模式的に示す。格子状のマスキングは撮像素子の画素である。マイクロレンズアレイは撮像素子の

に配置される. Lytro では一つのマイクロレンズが, 9×9 個程度の画素をカバーしている. また, ハニカム構造と呼ばれる配置でレンズが並んでおり, 一段ごとに横方向にずらして配置されている.

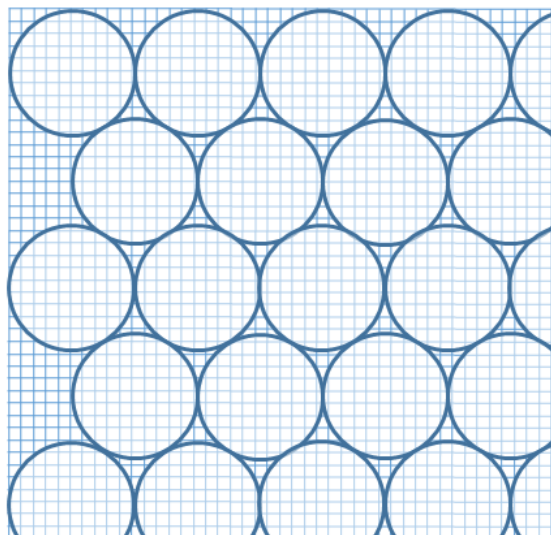
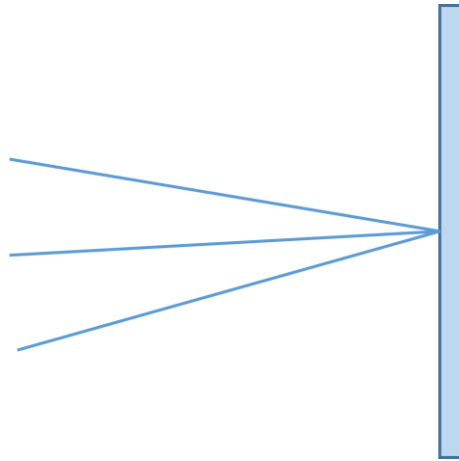
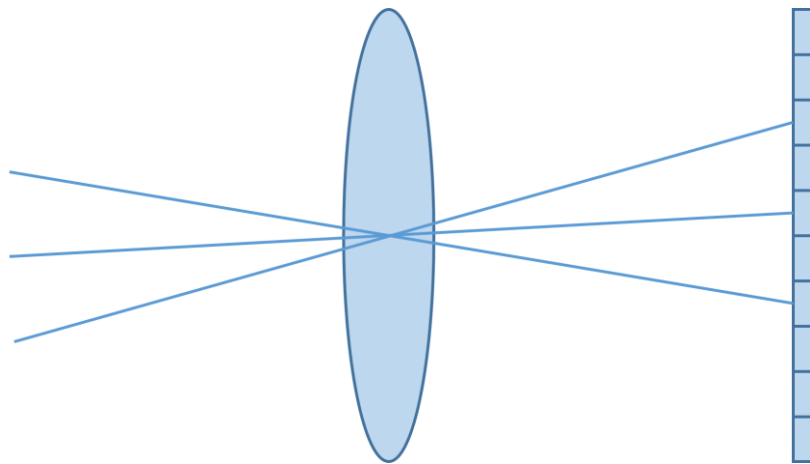


図 2.3 撮像素子とその表面に配置したマイクロレンズアレイの模式図

図 2.4 の (a) に通常のカメラの撮像素子, (b) に撮像素子の前にマイクロレンズを置いた場合, それぞれにおける撮像素子への光線の入射を示す. (a) の撮像素子の一つの画素に注目すると, 通常のカメラでは, その画素にさまざまな方向から光線が入射する. それらが同じ被写体からの光線であれば, 光線の色は同じであり, その画素でシャープな像が形成されている. 一方, 異なる被写体からの光線であれば, 光線の色も異なる. それらが同じ画素に入射することは, 像がぼけていることを意味する.



(a) 通常のカメラ



(b) 撮像素子の前にマイクロレンズを置いた場合

図 2.4 撮像素子への光線の入射

(b) はマイクロレンズへ同じような光線が入射したときの様子である。通常のカメラでは分解されず、一つの画素に入射した光線が、マイクロレンズを通過することで、異なる画素に分かれて記録される。ここでは説明を簡単にするために、光線を三本だけ描いているが、実際は、マイクロレンズがカバーする画素の数だけの光線に分解して記録される。なお、この図では光線を一本の直線のように表現しているが、実際にはある程度の幅を持つ光線束である。このように、撮像素子の直前にマイクロレンズを配置することで、主レンズに入射する光を方向ごとに分解し、方向に応じた光線を画素に記録することができる。

3章 光線追跡による撮影画像の生成手法

3.1 ライトフィールドカメラが記録する光線

三次元空間の光線を，図 3.1 のように，一点 \mathbf{q} と方向ベクトル \mathbf{p} で定義する．これらを 2×3 の行列にまとめて記述する．これを式で表すと式 (3.1)，式 (3.2) になる．

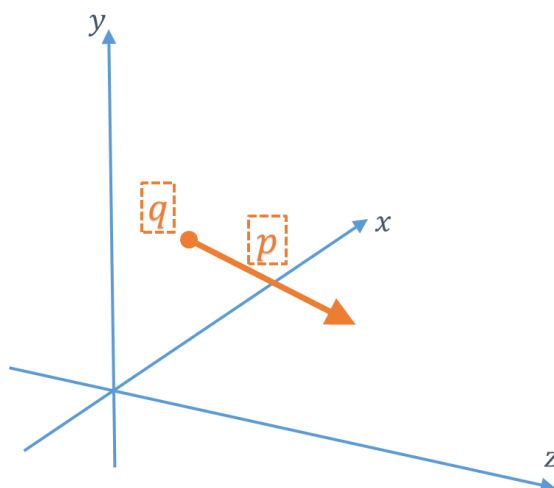


図 3.1 三次元空間上の光線

$$\mathbf{q} = (x_q, y_q, z_q), \mathbf{p} = (x_p, y_p, z_p) \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_q & y_q & z_q \\ x_p & y_p & z_p \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3.2)$$

マイクロレンズを通り，撮像素子の画素に入射した光線は，マイクロレンズの中心と画素を結ぶ直線に対応する．従って，図 3.2 のように，マイクロレンズの中心を \mathbf{o} ，画素の座標を \mathbf{q} とした時， \mathbf{q} から \mathbf{o} に向かう方向ベクトル \mathbf{p} と \mathbf{q} によって一本の光線が定義される．これを式で表すと式 (3.3)，式 (3.4) になる．この計算を，マイクロレンズがカバーする全ての画素に対して行い，これを全てのマイクロレンズに対して行うことで，ライトフィールドカメラが記録する光線集合を得る．

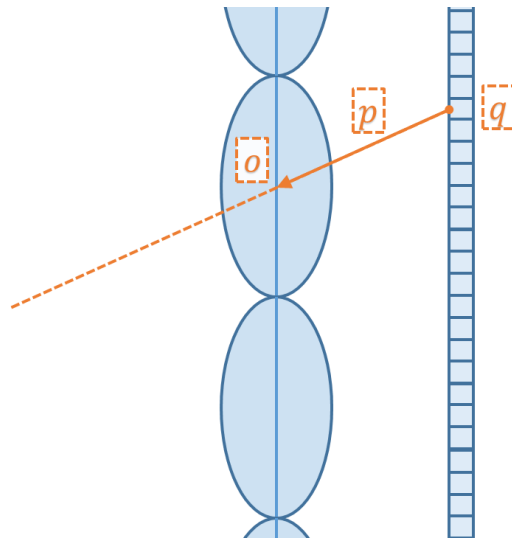


図 3.2 ベクトルの算出

$$\mathbf{q} = (x, y, z), \mathbf{o} = (x', y', z') \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\mathbf{p} = (x' - x, y' - y, z' - z) \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

3.2 光線行列を用いた光線追跡

ライトフィールドカメラで得た光線集合に対して、カメラ内での光線の動きをシミュレートすることで、写真画像を生成する。

まず、光線上の位置の移動について説明する。図 3.3 は、光線上の位置の移動を表している。ここでは、簡単のため、 x 成分を除いた y, z の二次元平面で考える。 \mathbf{q} は二次元平面上の点、 \mathbf{p} は方向ベクトルである。ただし、 \mathbf{p} の z 成分を 1 とし、実質的には直線の傾きを表現するように変形しておく。 t は光線上の点に関する z 軸方向の移動量である。式 (3.5) は光線上の位置の移動を表す式である。 \mathbf{T} は光線行列とよばれる 2×2 の行列で、この場合、光線上を z 軸方向に t 移動することを表す。

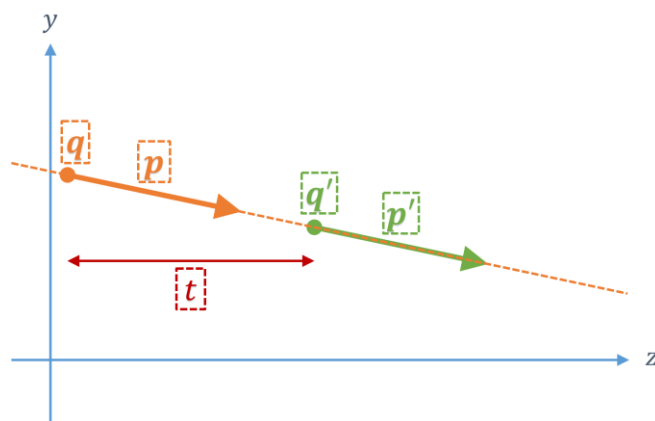


図 3.3 光線の移動

$$\begin{pmatrix} q' \\ p' \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3.5)$$

光線行列を用いると、移動だけでなく、レンズにおける光線の屈折をベクトルと行列の演算で計算することができる。一般に、物理的な屈折現象を計算する場合、スネルの法則を用いる。しかし、レンズで生じる屈折現象に対しては、光線行列を用いることで、より簡単に求めることができる。図 3.4 はレンズにおける光線の屈折を表している。 p 、 q は光線上の点の移動の際と同じもので、 f はレンズの焦点距離を表す。これを式で表すと式 (3.6) になる。この光線行列によって、焦点距離 f のレンズでの屈折を計算することができる。以上の二つの光線行列を組み合わせることで、カメラ内での光線の動きを表現することができる。

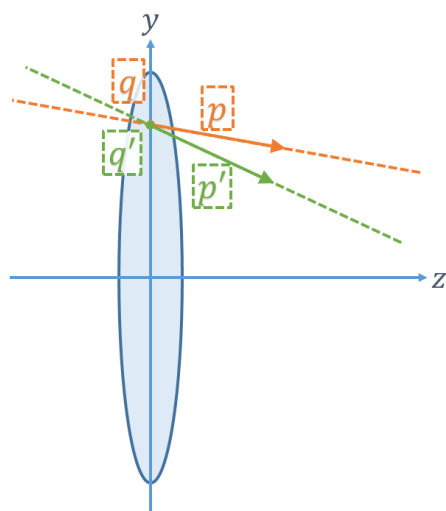


図 3.4 光線の屈折

$$\begin{pmatrix} q' \\ p' \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3.6)$$

レンズの外側から入射した光線は，図 3.5 のように，カメラの主レンズで屈折し，マイクロレンズを通過して，撮像素子に当たる。

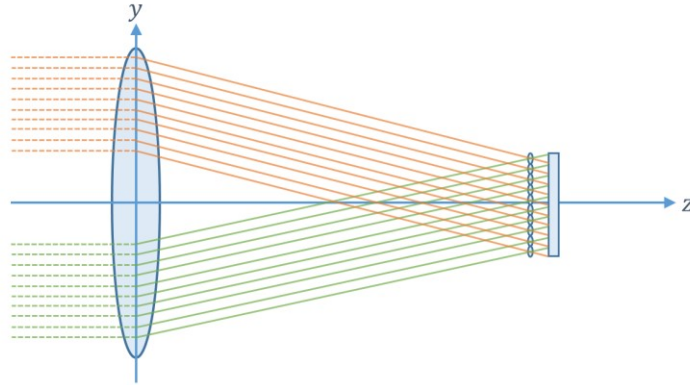


図 3.5 光線の入射と記録

3.1 節で説明したように，ライトフィールドカメラは，撮像素子面で光線を記録する．記録された光線集合を主レンズの位置まで追跡し，主レンズでカメラの外側に向けて屈折させることでシーンからカメラに入射する光線集合を求めることができる。

こうして，主レンズ入射前の光線集合を求めると，後は新しく設定したレンズで屈折させ，新しく設定した撮像素子の位置まで光線を移動させることで，元のカメラとは別のカメラで撮影した写真画像の形成プロセスをシミュレートすることができる。

3.3 撮像面での画像生成

取得した光線集合を用いて，画像を生成する手法はいくつかある．画素の並べ替えによって生成した画像をシフト加算する方法と，光線を撮像面に投影する方法がある [3]．今回は光線追跡を用いるため，後者を用いる。

新たな写真画像を生成するために，カメラのパラメータを設定する．このパラメータには，レンズから撮像面までの距離である像面距離，レンズ口径，レンズの焦点距離がある．これらを設定し，写真画像を計算するプロセスを説明する。

第一に，レンズ口径を設定する．主レンズの位置で入射するすべての光線集

合はあらかじめ決まっている。計算上のレンズ口径の設定は、光線が、設定したレンズ口径の範囲内であれば、それを以降の処理でも使い、範囲外であれば、使用しないようにすることである。これによって、カメラにおける絞りを再現する。ライトフィールドカメラとはいえ、光線取得時の主レンズの大きさは決まっているので、その範囲外の光線を利用することはできない。従って、写真画像を計算する際、レンズ口径を絞ることによる効果はあるが、レンズ口径を大きくしても効果はない。レンズを絞ることの効果として、画像が暗くなると予想される。これは使われる光線の数が少なくなるためである。また、通常のカメラでレンズ口径を絞った場合と同様に、画像のぼけ量が少なくなると予想される。

第二に、主レンズによって光線を再屈折させる。そのために、新しく設定したレンズの焦点距離に基づく光線行列を定義し、光線集合に作用させる。レンズの焦点距離を変えることで、写真画像の画角が変化すると予想される。結果としては、写真画像が拡大・縮小されるはずである。画角が狭くなる場合は問題ないが、光線取得時の画角が決まっているため、画角が広がる場合、画像の外側に計算されない領域ができてしまうと予想される。

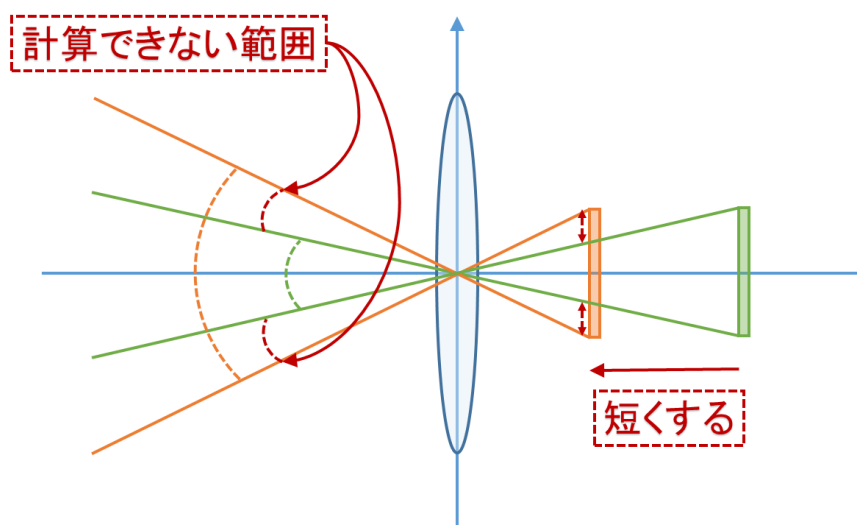


図 3.6 焦点距離の変更による画角の影響

図 3.6 は画角について示したものである。オレンジ色は焦点距離が短い場合で、緑色は焦点距離が長い場合である。光線取得時の焦点距離が緑色の距離であった場合、焦点距離をオレンジ色の距離まで短く設定し、再屈折させると、オレンジ色の角度と、緑色の角度の差分だけ計算できない領域ができてしまう。

第三に光線を撮像素子の位置まで移動させる。新しく設定した像面距離に基づく光線行列を定義し、光線集合に作用させる。像面距離を変えることで、写真

画像のピントの合っている位置が変わると予想される。これにより、写真撮影後のリフォーカスが可能になる。

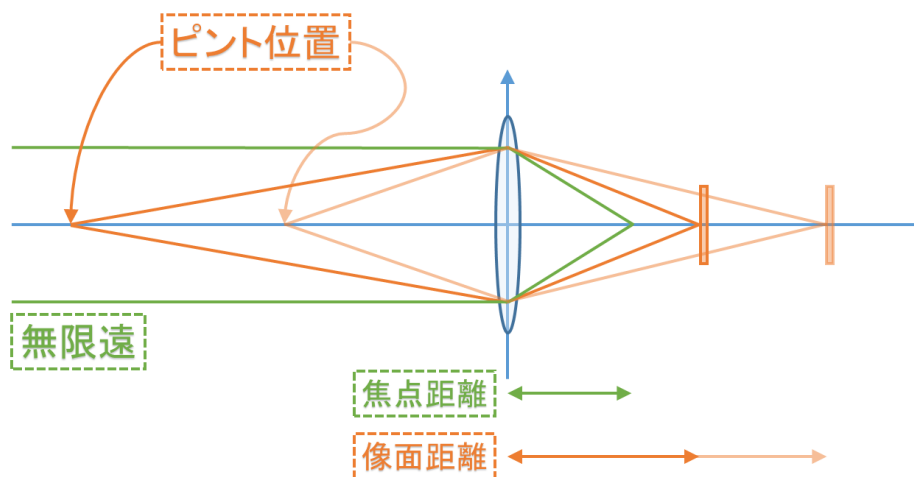


図 3.7 像面距離とピント位置の関係

図 3.7 は像面距離について示したものである。焦点距離は、無限遠にピントが合った時の像面距離である。図中のオレンジ色で示すものは、ある位置にピントが合っているときの像面距離である。像面距離を焦点距離に近づけるほど、遠くにある被写体にピントが合う。これは濃いオレンジ色で示している。また、像面距離を焦点距離より遠ざけるほど、近くの被写体にピントが合う。これは薄いオレンジ色で示している。これらの位置関係はレンズの公式によって求めることができる。レンズからピント位置までの距離を a とし、像面距離を b 、焦点距離を f とすると式 (3.7) が成り立つ。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

最後に、撮像面に到達した光線の色情報を画素に記録する。この時、撮像面における光線位置の近傍画素に光線の色情報を配分する。光線の撮像面上での位置は、実数値になるので、近傍画素との距離に応じて、比例配分する。

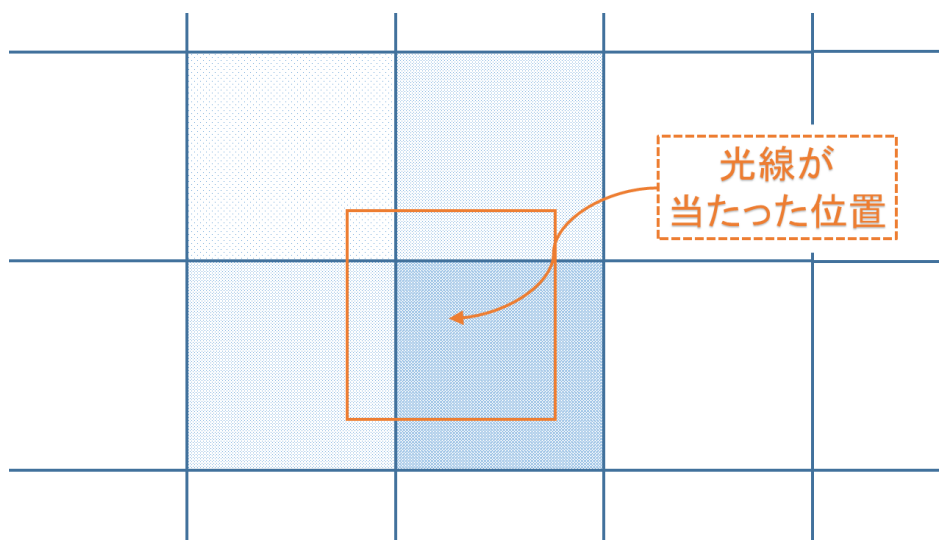


図 3.8 光線と撮像素子の交点に応じた色情報の配分

図 3.8 は色情報の配分の例を示す. 図では, 光線が 1 画素の面積を持つと考え, 光線の中心位置にある画素と, その周辺の三画素の合計四画素に色情報を配分している. 光線の当たった画素の比重を最も大きくし, 光線の当たった位置から遠い画素の比重を小さくする.

以上の処理を全ての光線に対して行うと, 像面距離, 焦点距離, レンズ口径の三つのパラメータに沿った画像を計算することができる.

4 章 実験結果と考察

Lytro の生データから光線集合を計算し, 3 章で述べた光線追跡を行うことで写真画像を再構成するアプリケーションを作成した. 以下でその結果について示す. Lytro の仕様と実験条件を表 4.1, 表 4.2 に示す.

表 4.1 Lytro の仕様

項目	値
焦点距離	8.24mm
レンズ口径	10.12mm
撮像素子	4.6mm×4.6mm
画素数	3280×3280
マイクロレンズ	330×190 個

表 4.2 実験条件

実験		像面距離 (mm)	焦点距離 (mm)	レンズ口径 (mm)
リフォーカス	実験 1-1	8.38	8.24	10.12
	実験 1-2	8.33	8.24	10.12
画角制御	実験 2-1	8.38	7.74	10.12
	実験 2-2	8.38	8.74	10.12
レンズ口径	実験 3-1	8.38	8.24	10.12
	実験 3-2	8.38	8.24	3.12

4.1 リフォーカス

像面距離を変化させる効果を確認する実験を行った. この時, 焦点距離, レンズ口径の値は元のカメラの値と同じ値に設定した. よって, 変化があるのはピントの位置だけになる.



実験 1-1 (像面距離 8.38mm)

実験 1-2 (像面距離 8.33mm)

図 4.1 リフォーカス画像の比較

図 4.1 の実験 1-1 は、焦点距離よりも少し長い像面距離を設定して計算した画像である。手前の解像度チャートにピントが合っていることがわかる。実験 1-2 は、焦点距離に近い像面距離を設定して計算した画像である。奥の人物写真にピントが合っている。

4.2 画角制御

次に、レンズの焦点距離を変化させたときの効果を確認する実験を行った。この時も、焦点距離以外のパラメータは変えない。



実験 2-1 (焦点距離 7.74mm)

実験 2-2 (焦点距離 8.74mm)

図 4.2 画角制御の比較

図 4.2 の実験 2-1 は短い焦点距離を設定した場合の画像で、画像が縮小される。画像のふちが黒くなっている理由は、原シーンの該当部分の光線がライトフィールドカメラで取得されていないからである。実験 2-2 は焦点距離が長い場合の画像で、画像が拡大された形になっている。レンズの焦点距離が長ければ、像のズーム倍率が高くなり、通常のカメラのように機能していることがわかる。

4.3 レンズ口径

次に、レンズ口径について実験を行った。この時も、レンズ口径以外のパラメータは変えない。



実験 3-1 (レンズ口径 10.12mm) 実験 3-2 (レンズ口径 3.12mm)

図 4.3 レンズ口径の比較

図 4.3 の実験 3-1 はレンズ口径が全開の場合の画像で、何も変化させていない画像になる。実験 3-2 はレンズ口径を $1/3$ 程絞った画像で、全体的な明るさを同程度にするため、画素値を適当に増幅した。このため、真ん中あたりは明るさを保っているが、外側は暗くなった。また、全開時では、後ろの人物写真はぼやけていたが、絞るとぼやけず、全体的にぼけの少ない画像になっている。これは、実際のカメラと同じ現象である。

4.4 考察

これらの実験から、取得後の光線への処理によって、適切にパラメータを与えると、実際の撮影現象と同じ効果が表れることがわかった。しかし、焦点距離とレンズ口径は一方向にしか作用しないことが確認された。あらかじめわかっていたことだが、ライトフィールドカメラが取得できる光線の数には限りがあるため、それを超える光線を必要とする処理では、実際の撮影現象の様には動作しない。

この問題を解決するには、光線の量を増やすか、光線処理以外の画像処理を施す必要がある。前者はカメラが決まってしまう以上変えようがないので、実際には不可能である。そこで、何かしらの画像処理を施すことになる。

ここまではライトフィールドカメラが光線を取得できることを利用し、その光線へ処理を施すことを主に行ってきたが、ライトフィールドカメラでは視差画像、つまり視点の異なる画像を計算することができる。これを使うことで、ス

テレオマッチング法などを用いて、被写体との距離を求め、光線に深さ情報を付加することができる。深さ情報を用いて、画像のピントの合っていない部分のボケ量を調整することができ、レンズ口径の変化を両方向にし、さらに、暗くならないようにすることができる。焦点距離を変更することによる画角の制御に関しては、光線量が足りなければ、画像処理を用いても解決しようがなく、ライトフィールドカメラでは実現できない。

5 章 結論

ライトフィールドカメラで取得した光線を用いて、光線追跡を行い、画像の再構成を行った。結果は、光線追跡のできる範囲ではよい結果を得ることができた。しかし、コンピュータ上で写真撮影の完全なシミュレーションが行えるというほどではなく、物理的な制限による限界があった。しかし、これらの限界の内のいくつかは、画像処理と、ライトフィールドカメラで得られる情報から、シミュレートすることが可能であることも分かった。結果的に、制限はあるが、ライトフィールドカメラを用いることで、今までの画像処理では難しかった撮影現象の忠実な再現は可能であることがわかった。

参考文献

- [1] *PANCAKES by hedvigs*
<https://www.flickr.com/photos/hedvigs/12591822985>
License
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>
- [2] 日浦 慎作, 「コンピューテーショナルフォトグラフィ理解のための光学系入門」, 情報処理学会研究報告, 2010-CVIM-171(13), pp.1-12, 2010.
- [3] 蚊野 浩, 「コンピューテーショナルフォトグラフィ—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.

謝辞

本論文を作成にあたり、丁寧な御指導を賜りました蚊野浩教授に感謝いたします。

付録 本研究で作成したプログラムの説明

付録 表 1 本研究で作成したプログラム一覧

名前	機能
libray	オープンソース画像処理ライブラリ OpenCV を用いた光線追跡を行うためのライブラリ.
liblfr	主に以下の二つのクラスを実装したライブラリ. Lfr クラス, Lytro 社のライトフィールドカメラの出力データの読み込み, OpenCV を用いた画像生成, デモザイクなどを行う. LightField クラス, libray を用いて光線追跡を行い, 画像再構成を行う.
lfrviewer	liblfr の GUI フロントエンド. レンズ口径, 像面距離, 焦点距離をバーで設定し, 結果画像を表示する.