

Lytroの動作原理と アルゴリズム

京都産業大学 コンピュータ理工学部

蚊野 浩

カメラの歴史的な変化

紀元前 ~西暦1700年代

記録できないカメラ

ピンホール
カメラの
原理

カメラ・オブスクラ
レンズを使って風景を
投影する装置。絵画・
測量の補助具

銀塩写真

1826年頃

1900年前後

~1950年頃

~2000年頃

現在

写真の発明

イーストマンによ
る写真フィルムの
発明など

ライカなど
によるカメラの
開発・改良

一眼レフなど写真
用カメラの成熟

銀塩写真産業
の縮小

ビデオカメラ

1927年

~現在

1980年代

1995年

現在

デジタルカメラ

電子式撮像機
の開発

放送用/民生用
ビデオカメラ

電子スチル
カメラ

デジカメ
元年

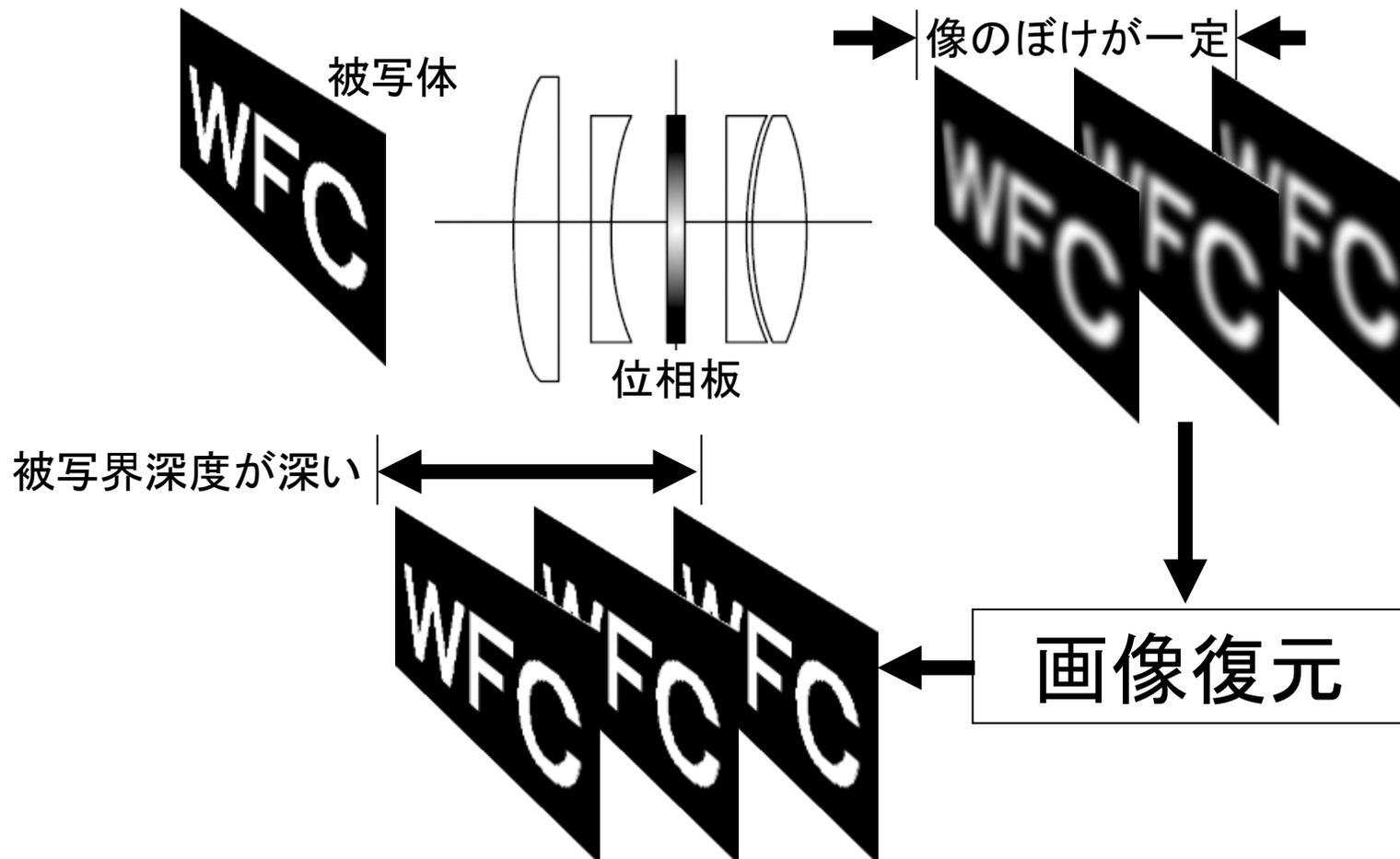
スマホカメラの普及
デジタルカメラの
高画質化

Computational Photography

- コンピュータ処理で写真画像を生成・加工する技術を広い意味でのComputational Photographyとよぶ。画像の修復や、高画素化のための超解像処理などは、広く実用化されている。
- 撮影された画像を処理するだけでなく、撮影段階に特別な工夫をこらし、中間情報として得られる生データに高度な信号処理を加えることで、これまで不可能であった写真画像を生成する技術を狭義のComputational Photographyとよぶ。Lytroはその代表的な成果の一つである。

Wavefrontコーディングによる 被写界深度の拡大

- レンズ口径を絞ることなく被写界深度が深い写真の撮影を可能とする技術。

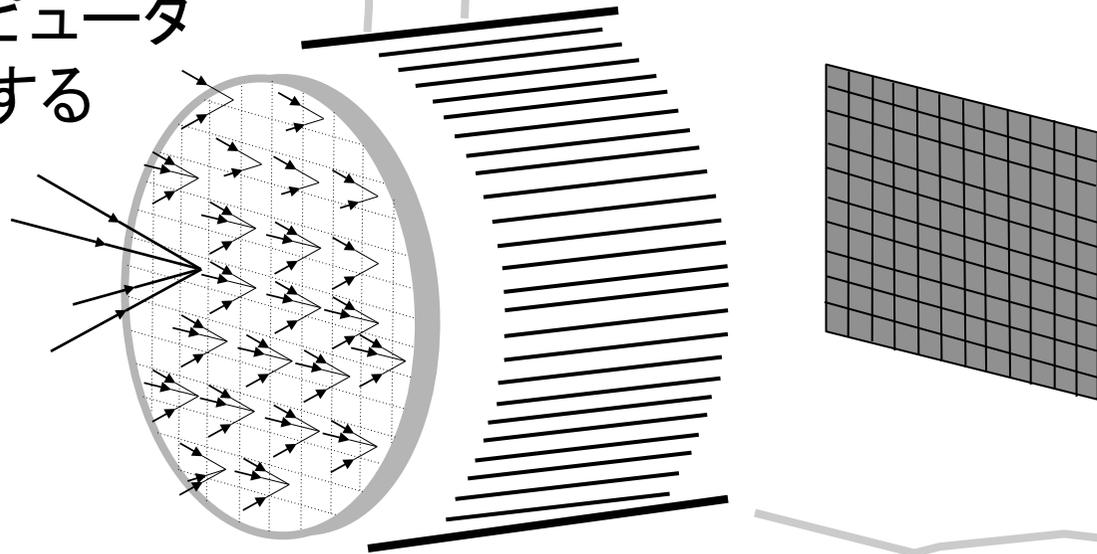


符号化露光によるぶれ補正

- 失敗写真の多くは「ピンぼけ」か「手ぶれ」である。
- ライトフィールドカメラとWavefrontコーディングは「ピンぼけ」に効果がある。
- 「手ぶれ」に効果があるコンピュータショナルフォトグラフィ手法として符号化露光が知られている。
- もっとも性質が悪い「手ぶれ」は、等速移動するものである。一方、性質が良いぶれが存在する。そのようなぶれ画像は、元画像の高周波数成分が保存されているので、画像復元によって元画像に戻すことができる。
- 符号化露光は、通常の撮影動作の露光中に、その露光状態を変調することで、性質のよいぶれ画像を生成する手法である。

ライトフィールドカメラ

- 従来のカメラ: レンズに入射する光線を、レンズの働きによって集光させることで光像を作り、その光像に忠実な写真画像を生成する装置。
- ライトフィールドカメラ: カメラに入射する光線の分布状態 (位置・方向・強さ、ライトフィールド) を記録し、そこから計算処理によって写真画像を生成する装置。
写真撮影をコンピュータシミュレーションする装置。



カメラアレイによる ライトフィールドカメラ

- 2005年に、Wilburn、Levoyらは100台の小型カメラをアレイ状に配置したシステムを開発し、ライトフィールドレンダリングを実証した[5]。
 - HDR画像生成、高解像度画像生成、高速度撮影
 - 合成開口写真、リフォーカス、etc
- Point Grayから、25台の小型カメラを5×5配列にコンパクトに実装した商品が販売されている(日本での代理店はビュープラス社)。

<http://graphics.stanford.edu/projects/array/images/from-above2-cebal-w1200sh.jpg>

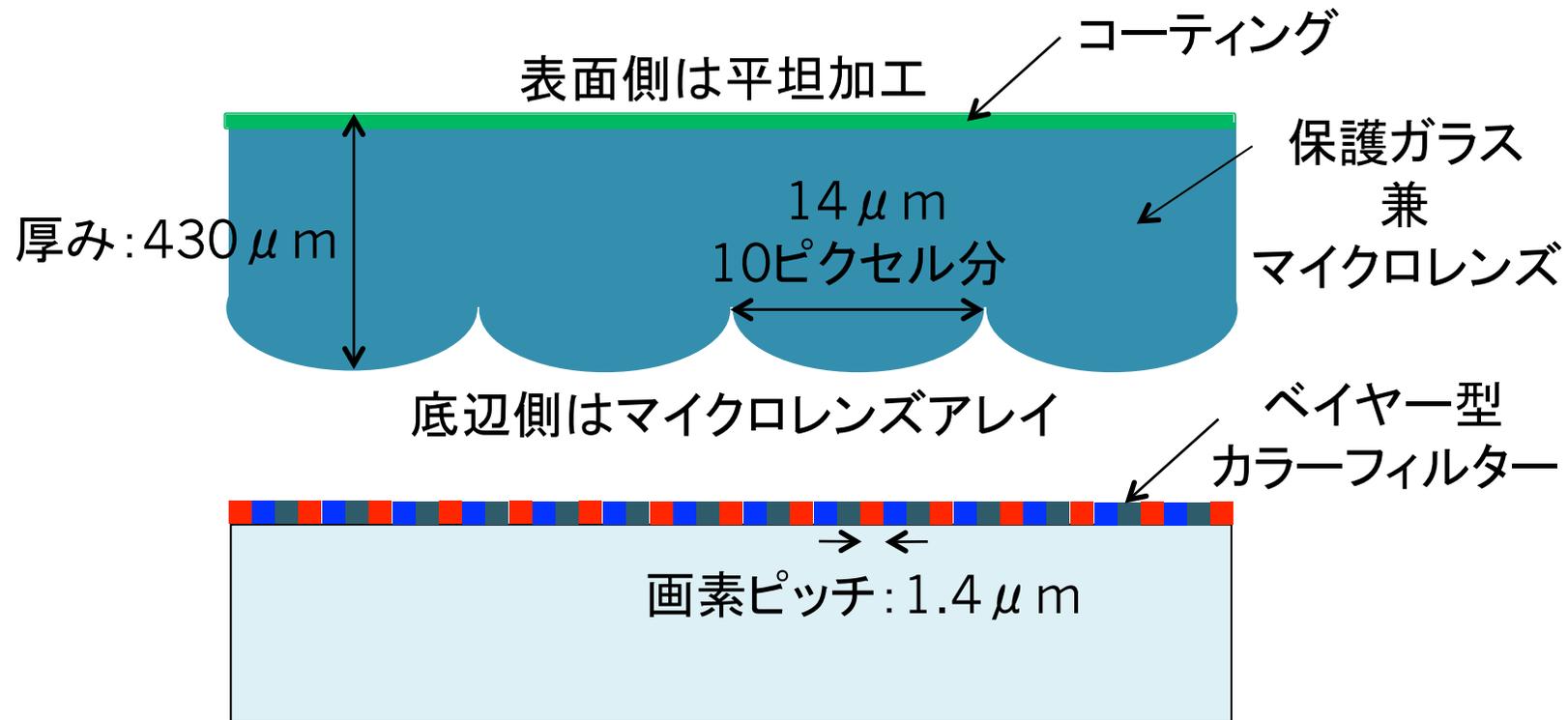
写真、画像、図面はURL先を参照してください

<http://www.viewplus.co.jp/product/camera/profusion250.html>

<http://graphics.stanford.edu/projects/lightfield/tiled-side-view-cessh.jpg>

Lytroのマイクロレンズアレイの拡大写真など、撮像部の詳細を日経エレクトロニクス2012年、8-20号p43で確認していただけます。

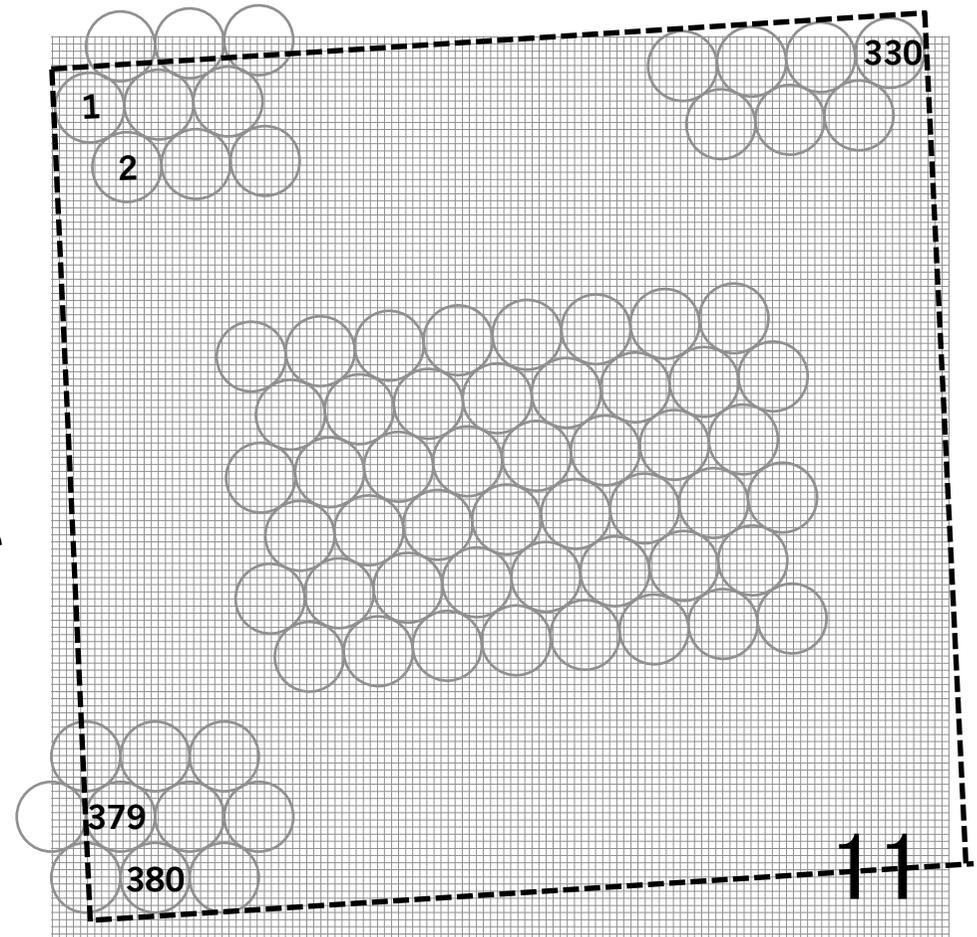
イメージセンサ部の断面構造

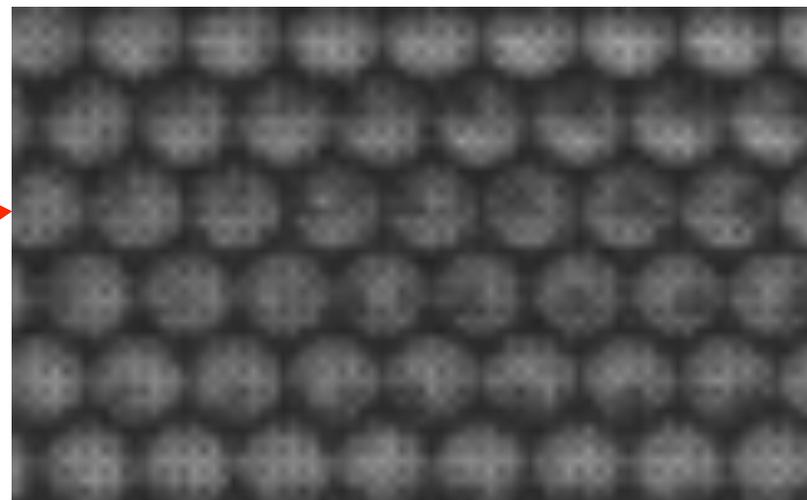
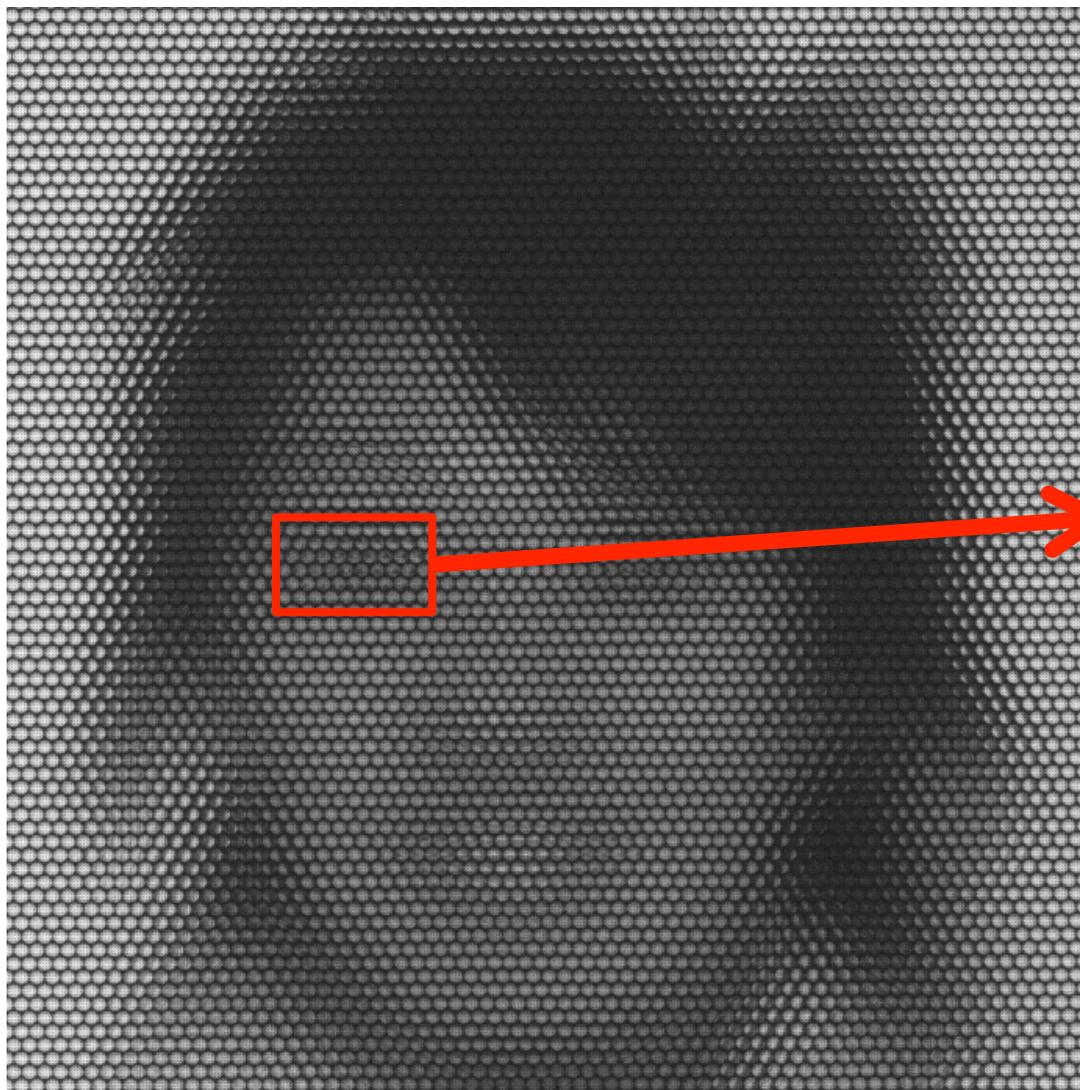


- ・CMOSセンサ表面の保護ガラスとマイクロレンズが一体化した構造
- ・保護ガラスの上面側は平坦、底面側はハニカム状のマイクロレンズアレイ
- ・パッケージは、CSP (Chip Scale Package) で、パッケージとほぼ同サイズのシリコンチップが搭載
- ・Aptina Imaging社のWLC (Wafer Level Camera module) 技術を利用か

画像センサとマイクロレンズアレイの アライメント

- 3280×3280画素の画像センサを330×380のハニカムマイクロレンズアレイがカバーする。
- 個体ごとに画像センサとマイクロレンズアレイのずれが異なる。
- この位置関係の特性は、キャリブレーションデータとしてカメラごとに保持していると思われる。



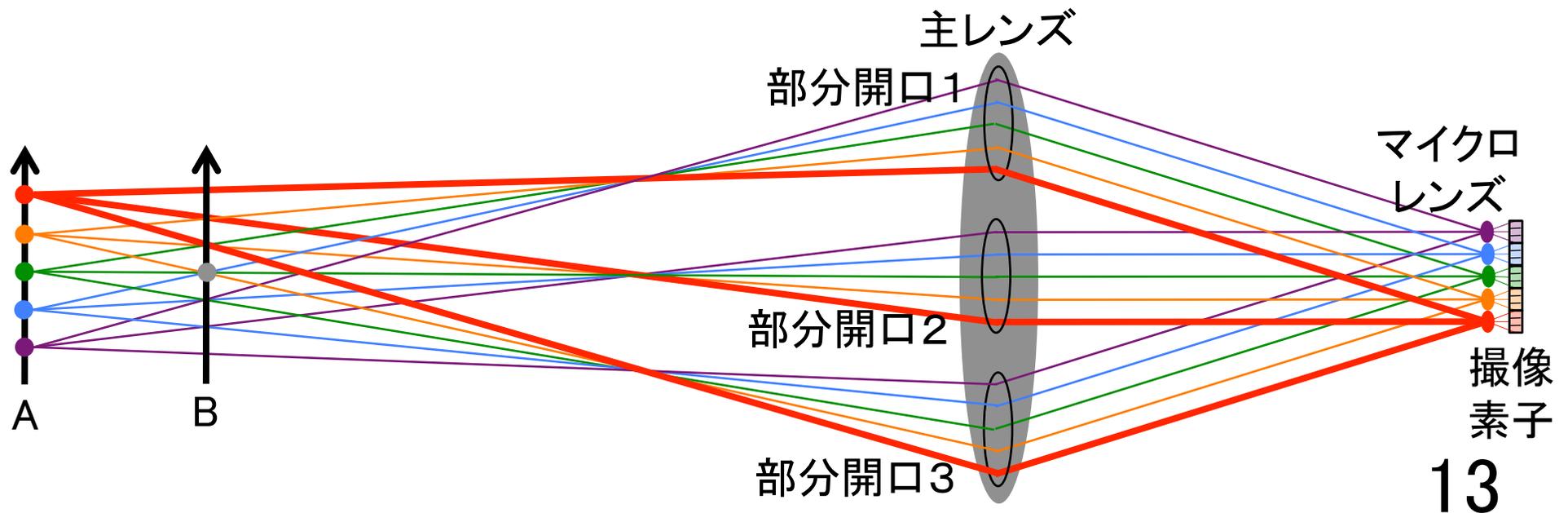


部分拡大

3280 × 3280画素の生画像
(カラーフィルタアレイ画像)の一部

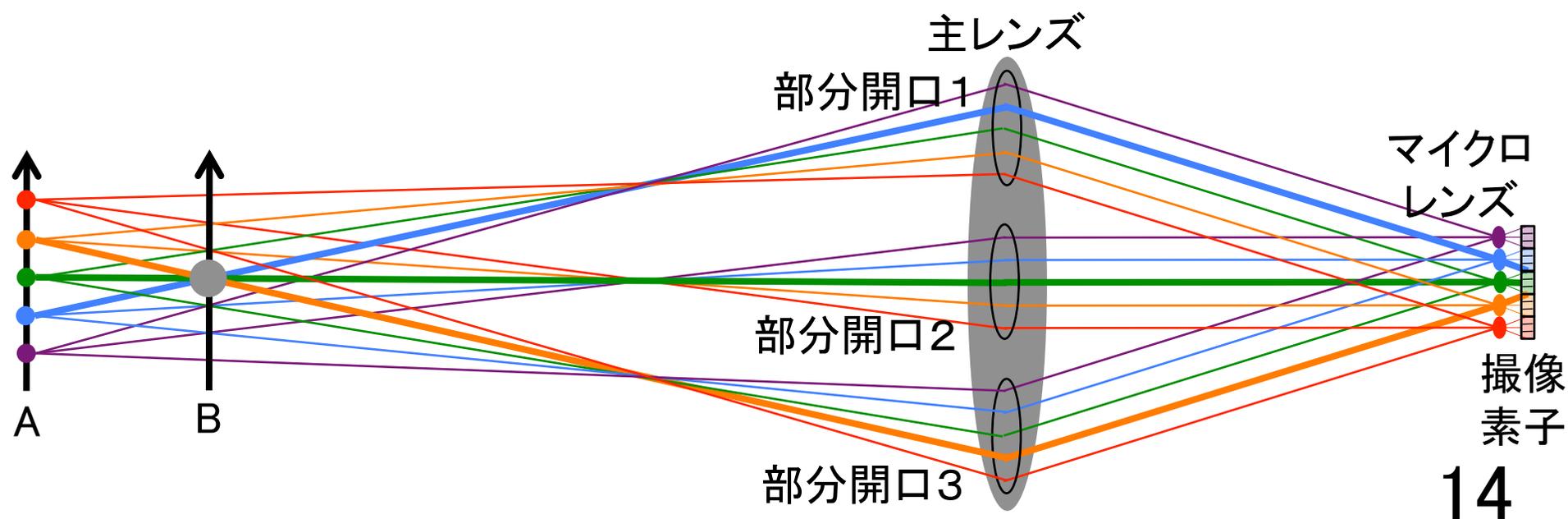
Lytroによるライトフィールドの取得

- 主レンズがAの像をマイクロレンズ面に結像するとき、Aから発する光線は図のように撮像素子に記録される。
- マイクロレンズがカバーする画素の値をすべて平均すると、Aに焦点を合わせた画像が生成される。

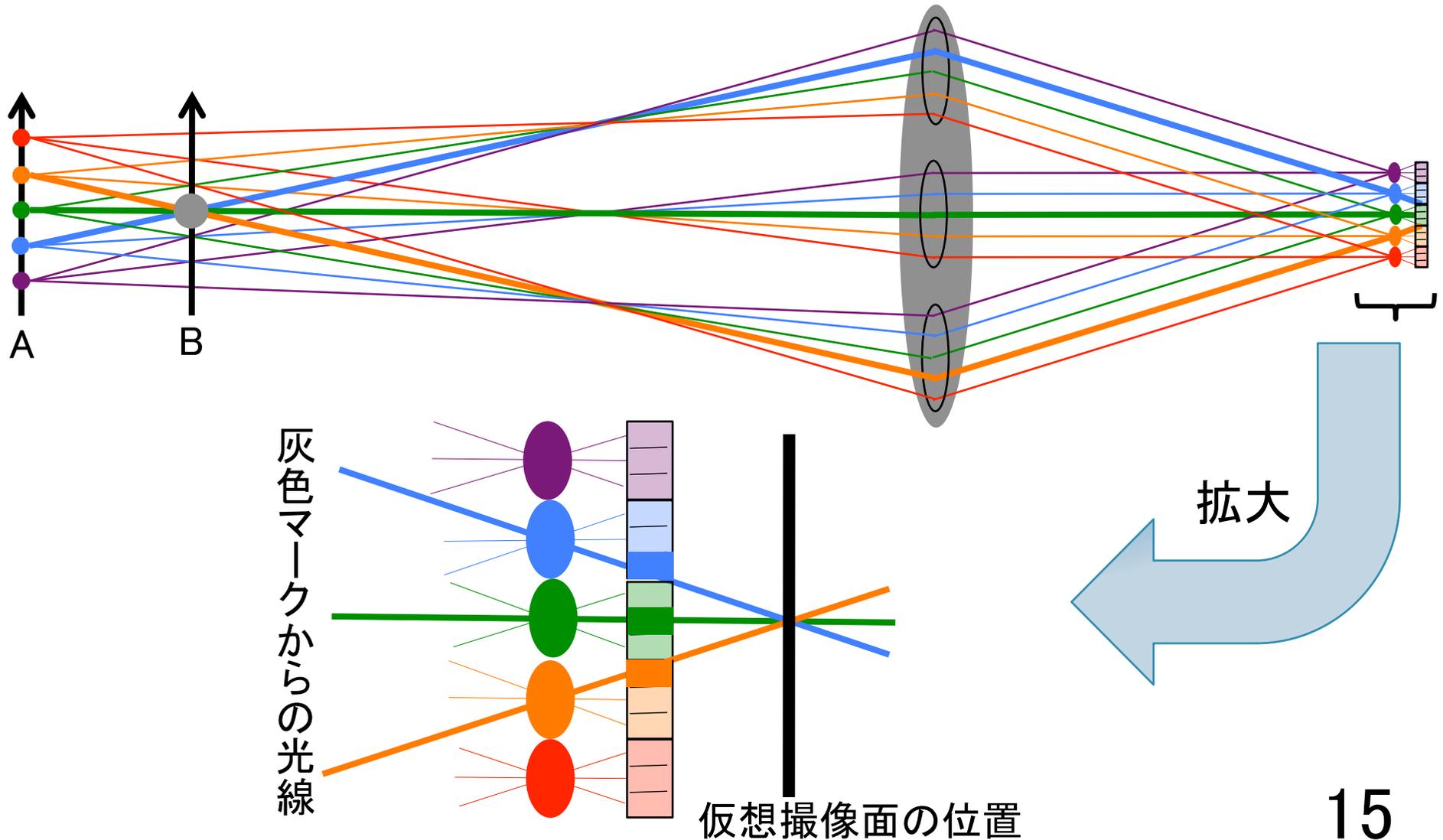


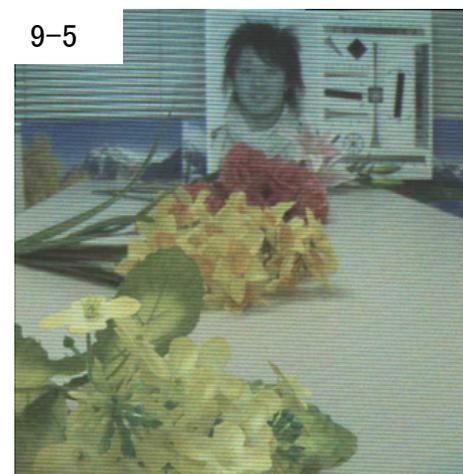
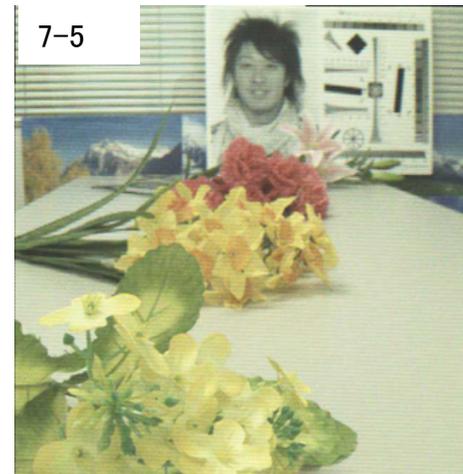
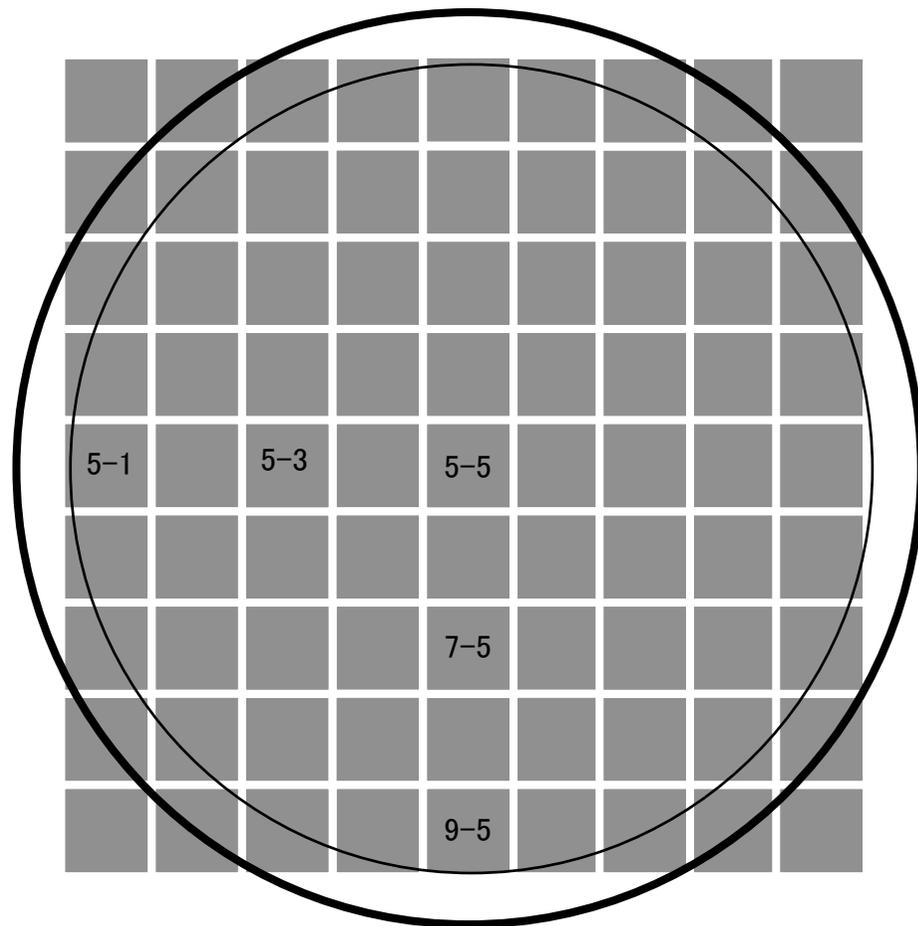
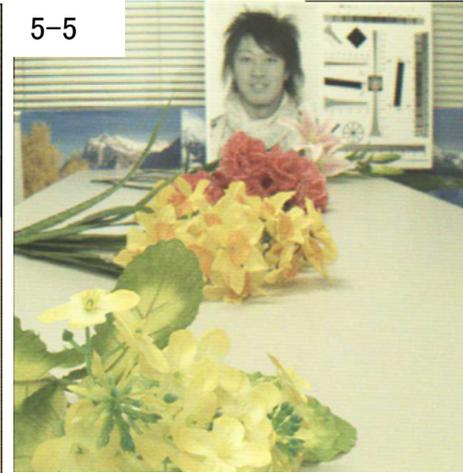
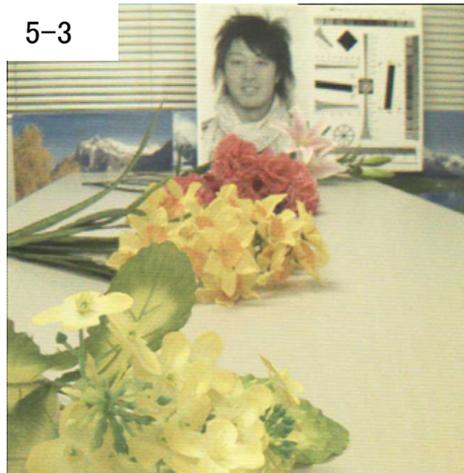
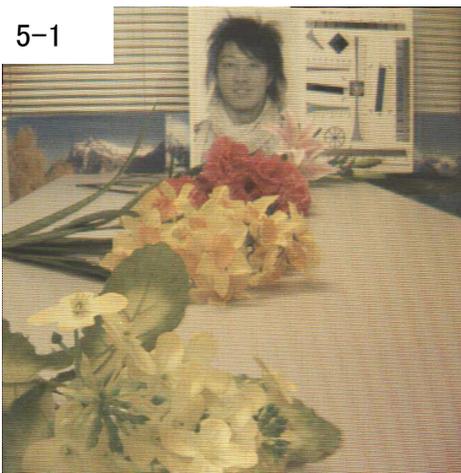
Lytroによるリフォーカスの原理

- Bの灰色マークを通過する光線を記録した画素の値を加算平均することは、ライトフィールドを用いてBに焦点を合わせた像を生成すること、すなわちリフォーカスすることである。



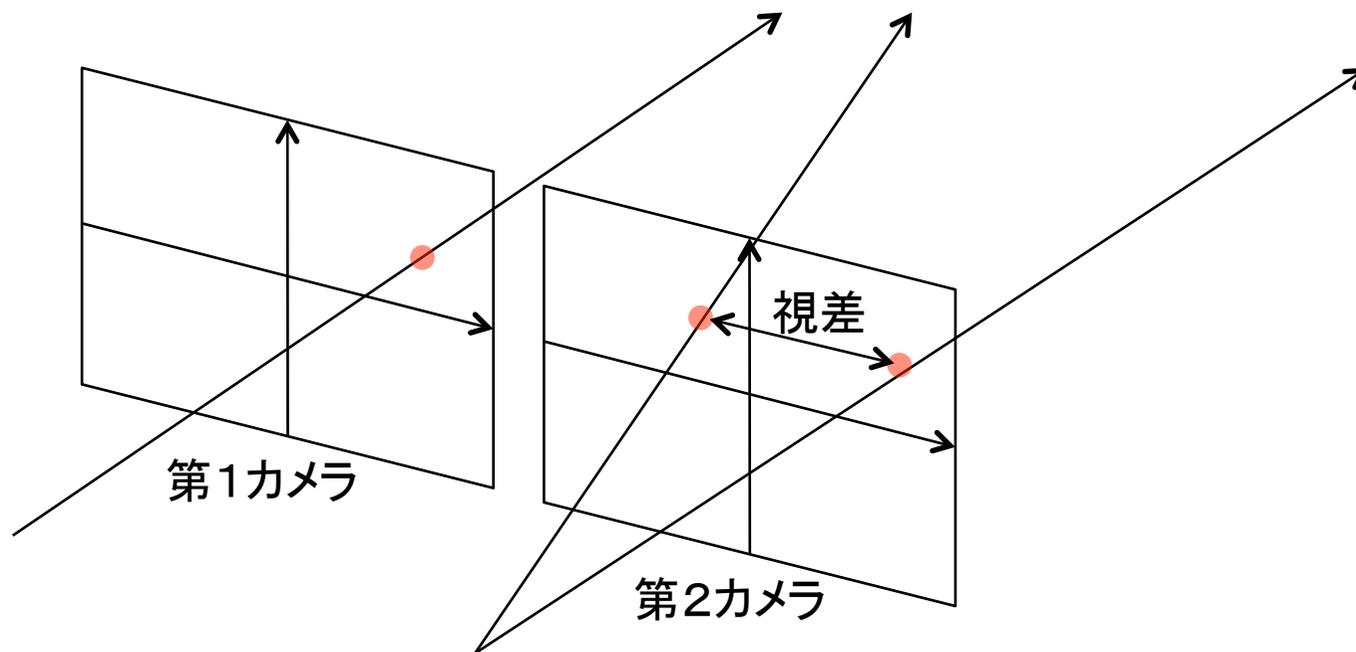
Bにピントを合わせた場合の 仮想撮像面の位置





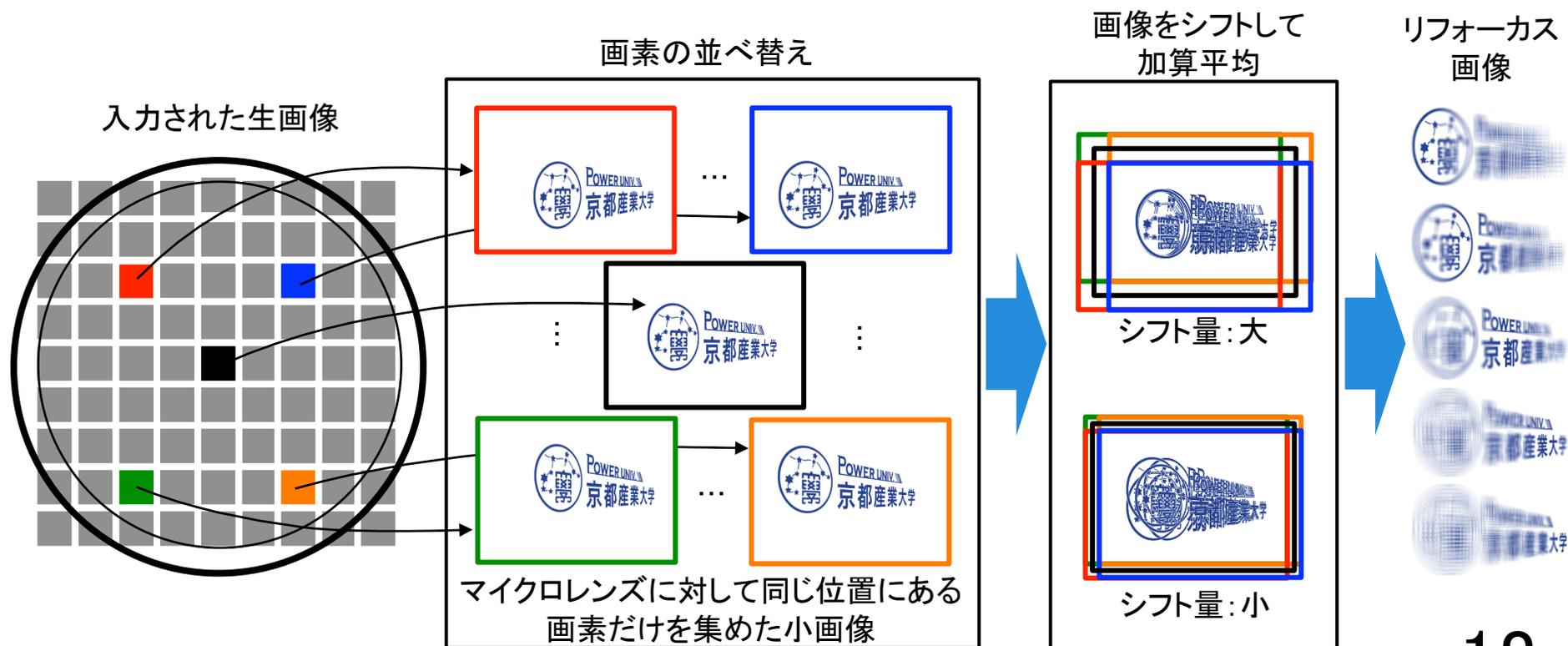
ステレオ画像の性質

- 異なる位置から同じ被写体を見た複数画像を、ステレオ画像とよぶ。被写体までの距離によって、それが画像上で見える位置が変化する。下図の場合、無限遠で同じ位置に見える、近づくにしたが、ずれが大きくなる。このずれ量を視差とよぶ。距離に応じた視差だけ画像をずらせば、被写体の像が重なる。



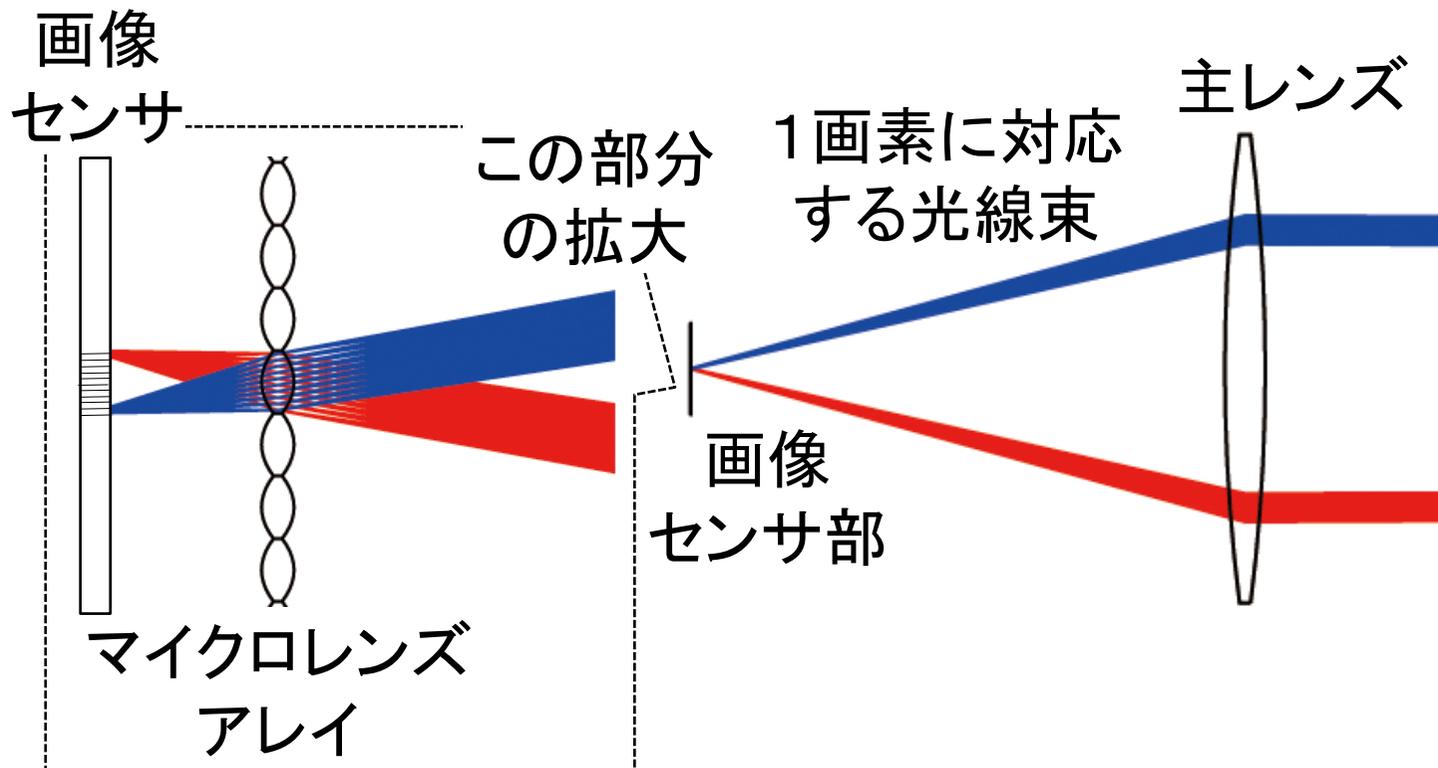
リフォーカスのしくみ

- Lytroが取得するライトフィールドをステレオ画像に変換できることを利用し、下図のようにリフォーカスが可能。



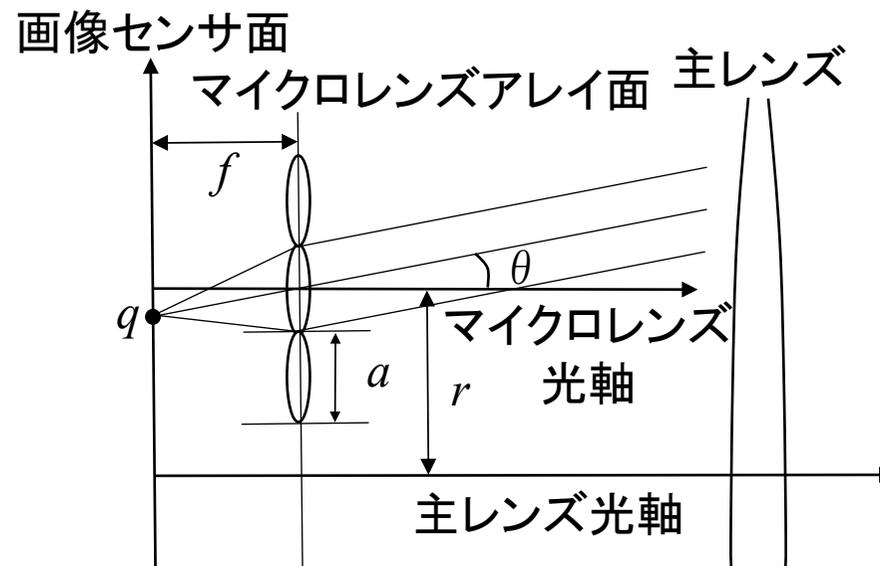
画素と光線束

- 画素が記録するのは一本の光線ではなく、ある幅を持つ光線束である。



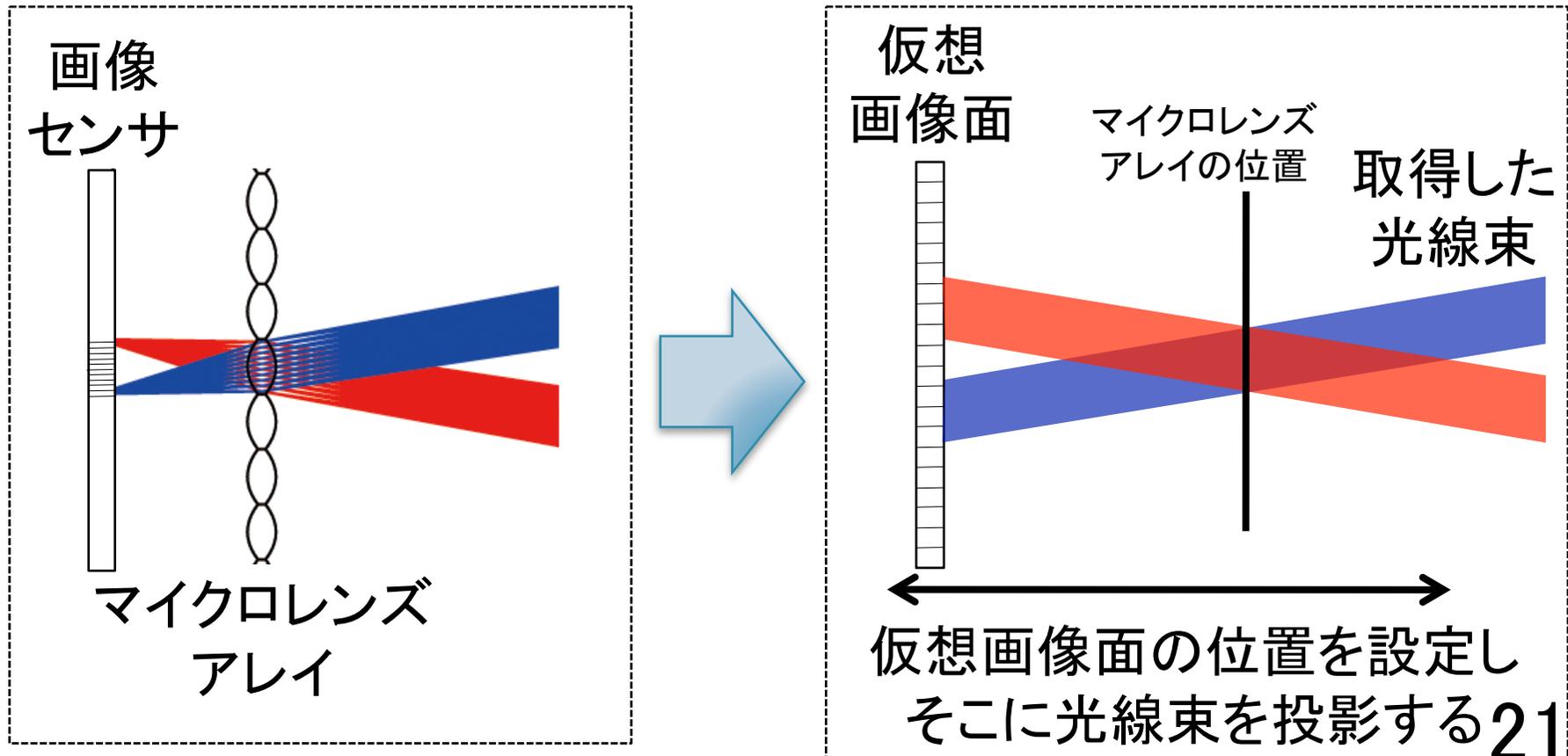
光線束の位置・方向・形状

- 光線束の位置・方向・形状を幾何光学的に計算する。下図は次のように設定した場合である。
- f : マイクロレンズアレイの焦点距離、 a : マイクロレンズの直径、 q : マイクロレンズ光軸から画素までの距離、 r : マイクロレンズ光軸と主レンズ光軸の距離、 θ : 光線束の角度
- 画像センサとマイクロレンズの距離は f



光線束を仮想画像面へ投影

- 画素が取得する光線束を、仮想的な画像面に再投影することで、リフォーカス画像をレンダリングできる。



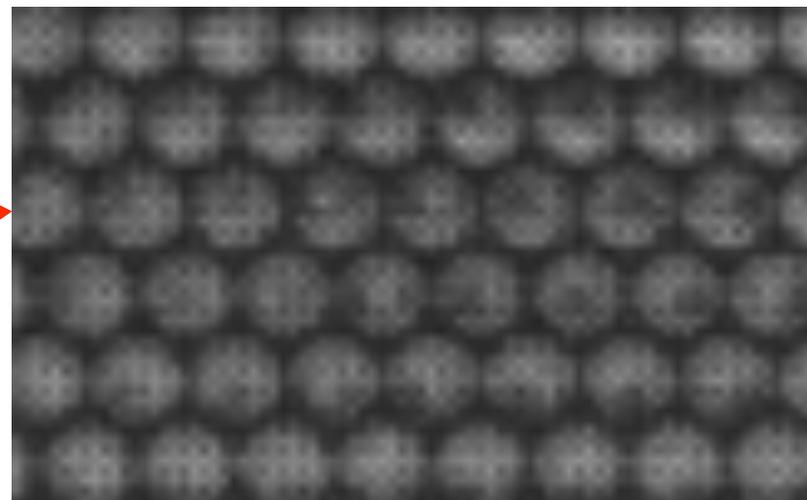
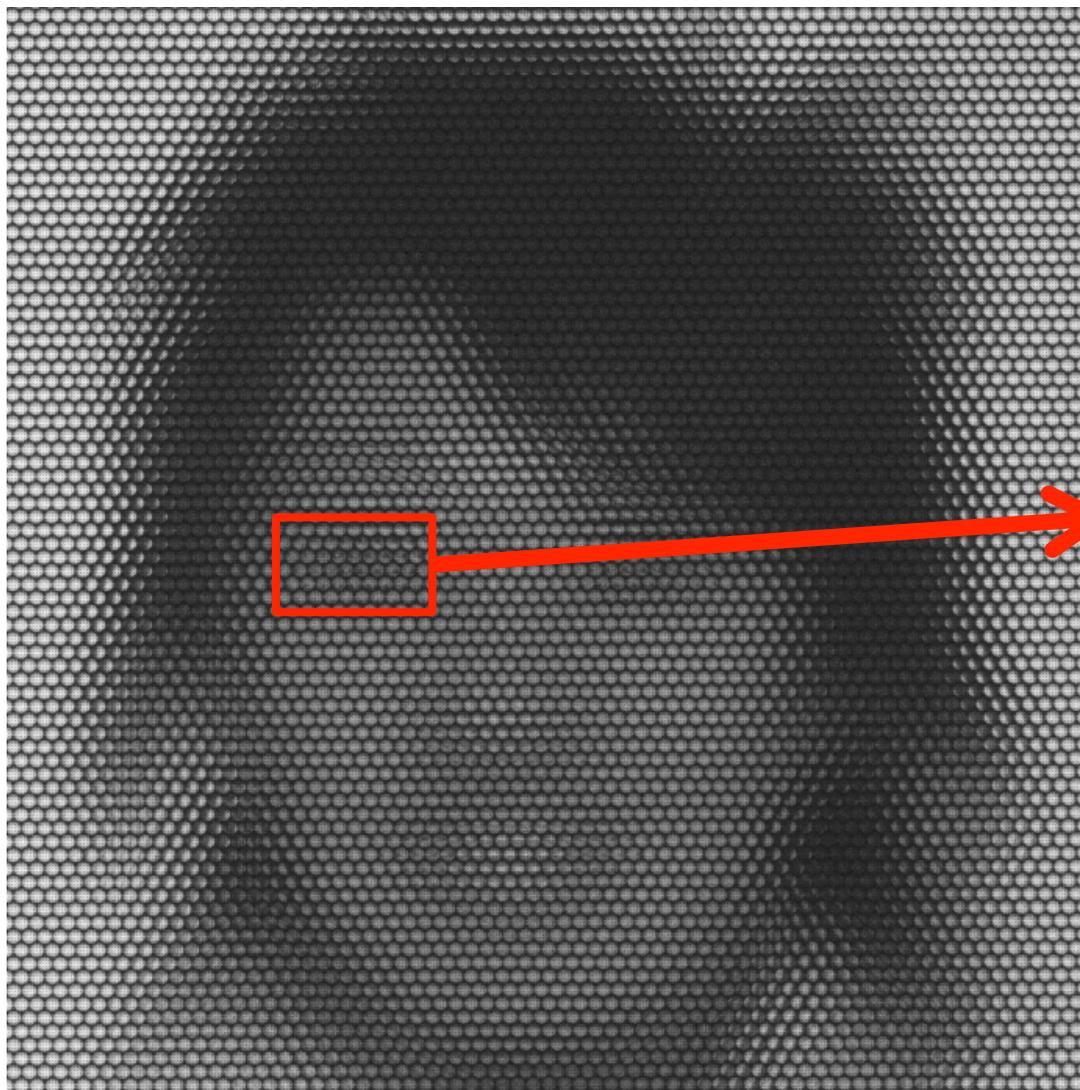
Lytroの出力ファイル

- Lytroで撮影した画像をMacに保存すると、2つのファイルが生成される。
 - .lfpファイル: 生データ(生画像)を格納したファイル
 - -stk.lfpファイル: Webレンダリング用画像を格納したファイル
 - これらを解析して、幾つかの画像を出力するmatlabコード(LyTroSample.zip)を
<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/study.html>
に公開しているので、参考にしてください。

.lfpファイル

- 撮影したライトフィールドの生データを保存したファイル。その内容は5つのセクションに別れている^{注1)}。
 - 第0セクション: 16バイトのヘッダ。データの解析には不要。
 - 第1セクション: ファイルの概要に関するJSON記述。
 - 第2セクション: 生データが格納されている領域。生データは各画素12ビット×3280×3280=16MB。3バイトに2画素のデータを格納する。画素値は原色ベイヤー配列の色フィルタで分解されたRGBいずれかの値である。
 - 第3セクション: 生データに関するJSON記述。画素値の範囲、色変換係数、撮影パラメータなどが記述されている。
 - 第4セクション: 画像センサと製品番号のJSON記述。

注1) lfpファイルを読み出すフリーソフトにlfp-toolsがある(<https://github.com/nrpatel/lfp-tools>)。その利用法が次のURLに記述されている。
<http://lightfield-forum.com/2012/07/lytro-hack-how-to-extract-data-and-jpg-files-from-the-lfp-file-format-using-lfplsplitter/>

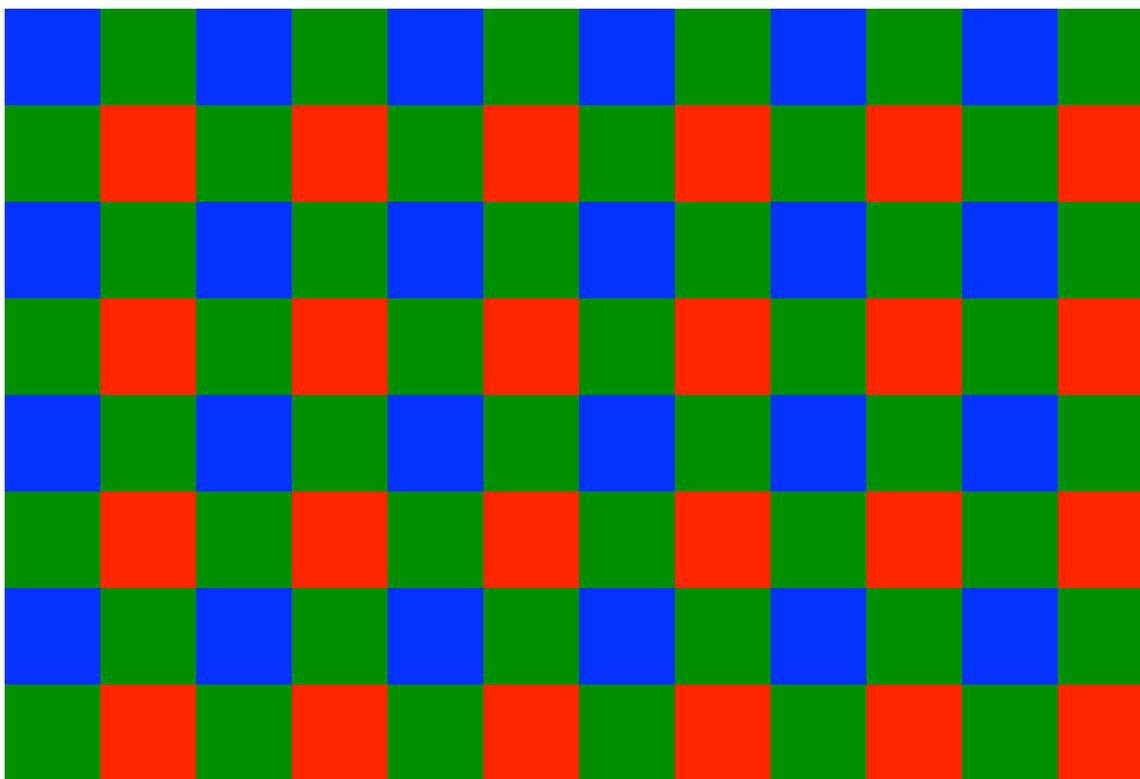


部分拡大

3280 × 3280画素の生画像
(カラーフィルタアレイ画像)の一部

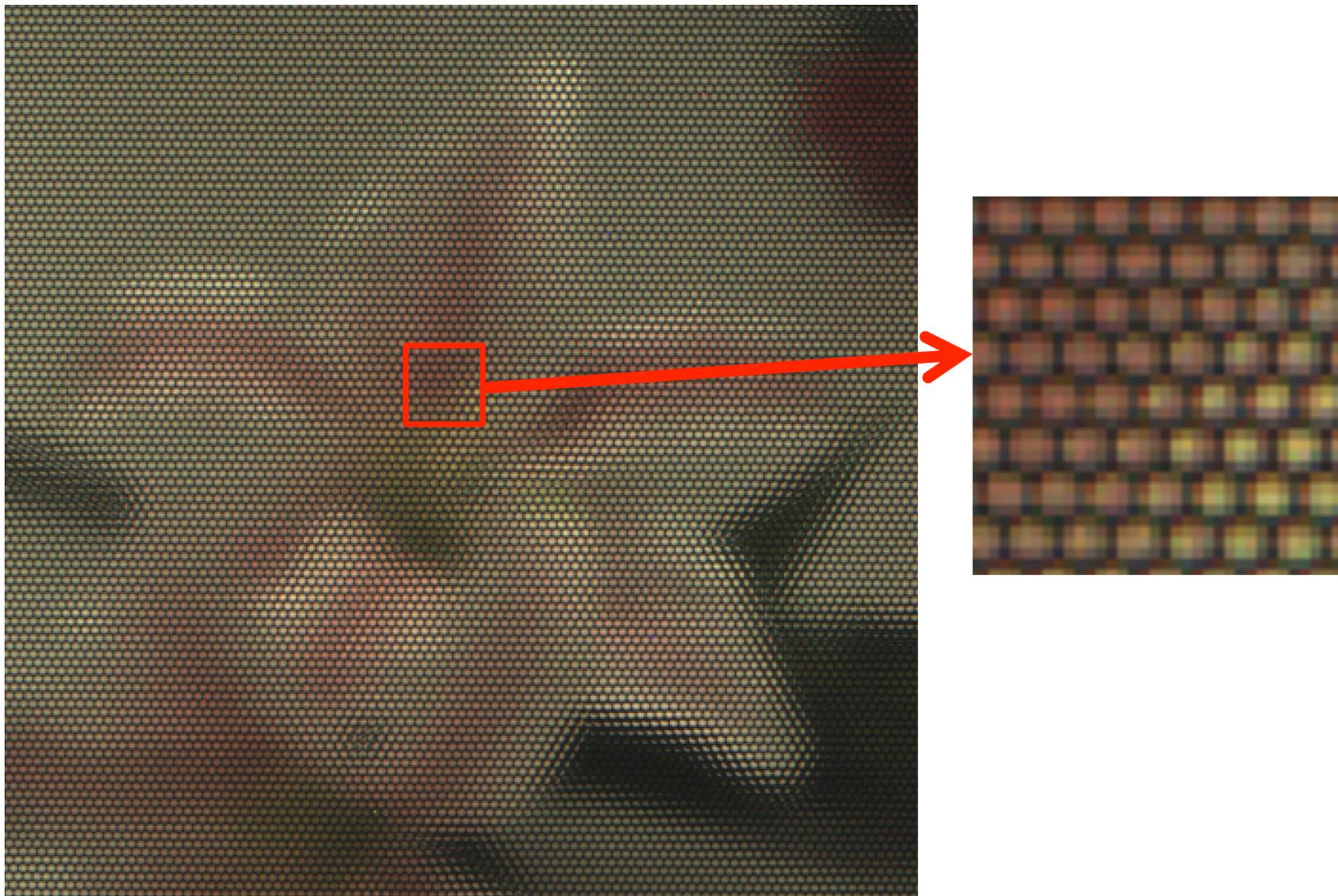
ベイヤー型カラーフィルタ

- Lytroが使うベイヤー型のカラーフィルタは、最も一般的なカラーフィルタで、RGBが下記のように配列する。

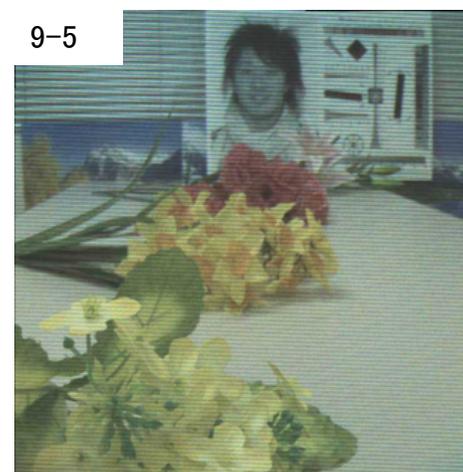
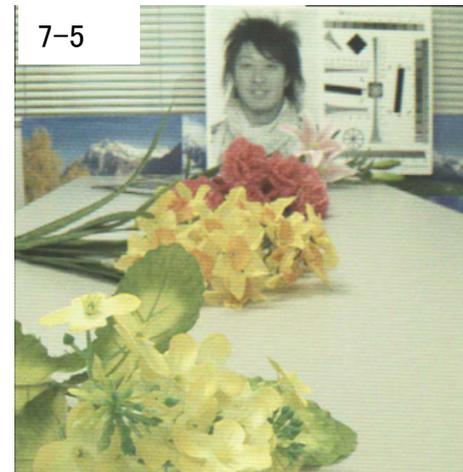
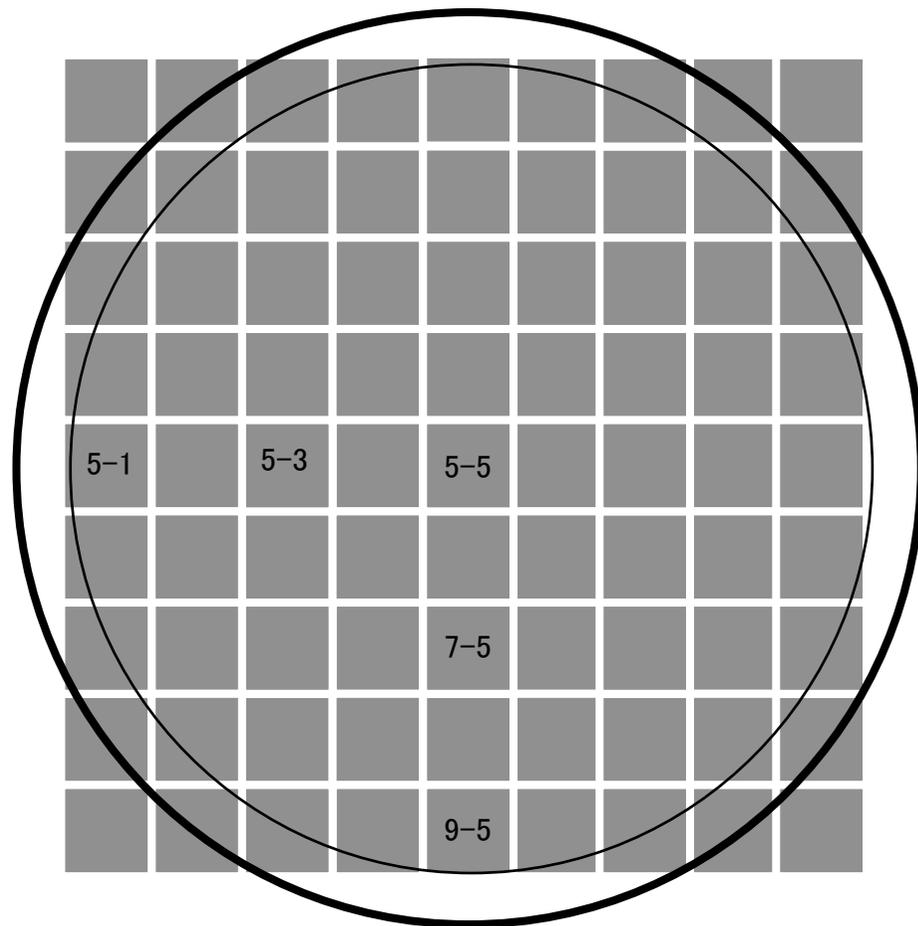
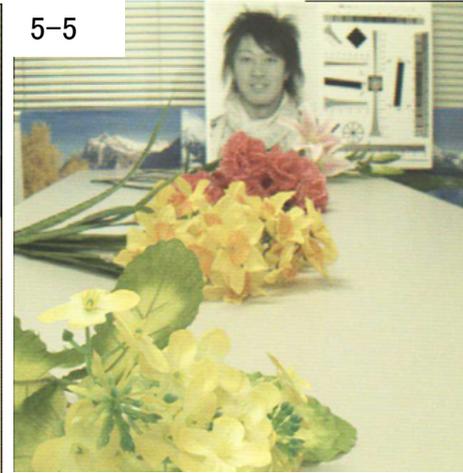
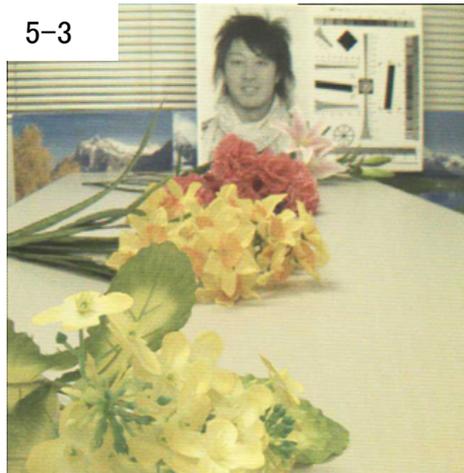
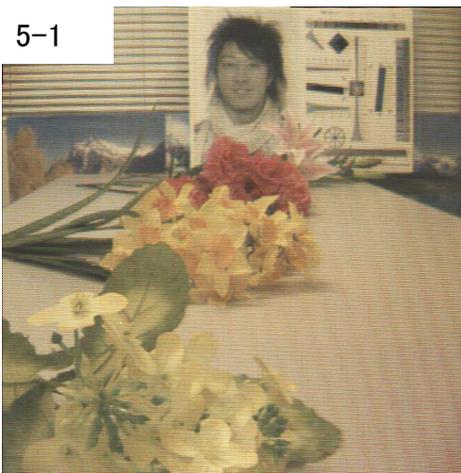


生画像のデモザイク

- Lytroの生画像を実験などで使う場合、RGB Raw画像に変換する必要がある。カラーフィルタアレイ画像からRGB Raw画像への変換をデモザイクとよぶ。

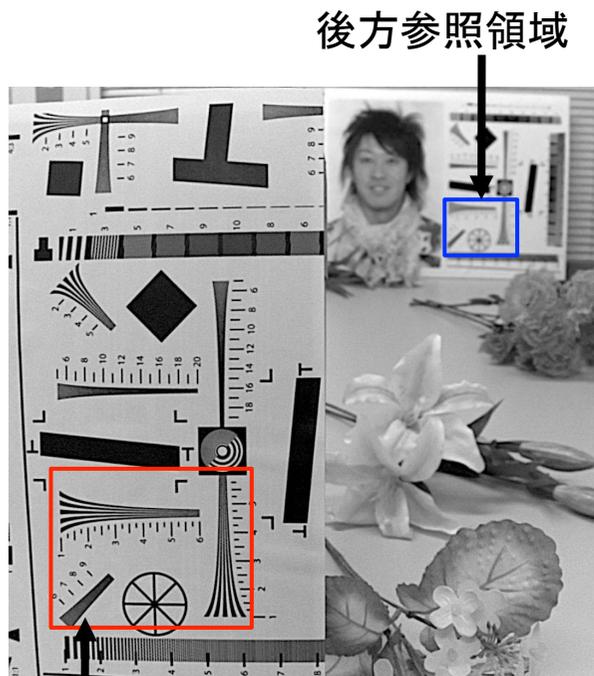


生画像をデモザイクしたRGB Raw 画像の一部とその部分拡大



ライトフィールドレンダリング

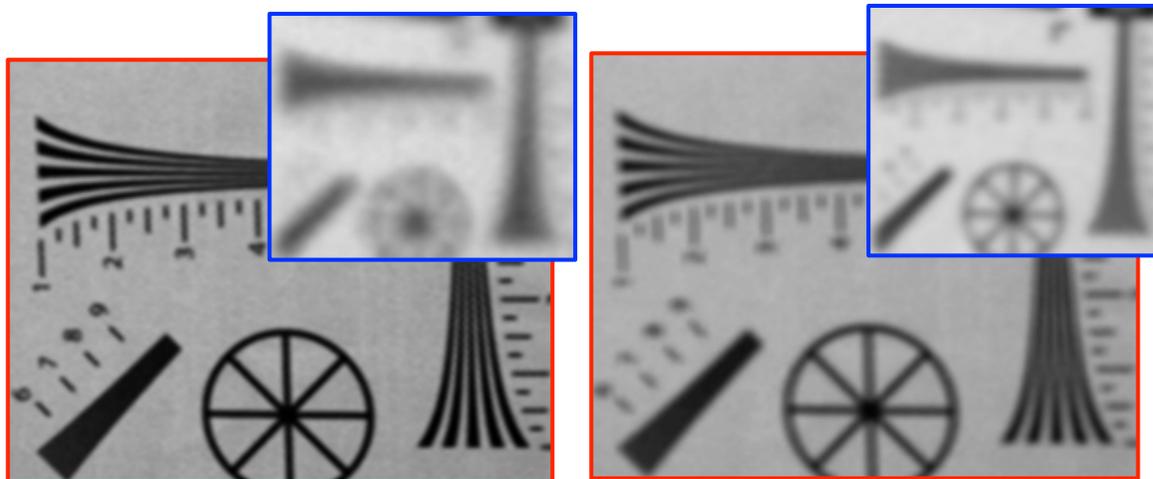
- Lytroが取得した生画像からリフォーカス画像を生成した
- 第一のアルゴリズムは、一旦、ステレオ画像群を生成し、それらをシフト加算する方法
- 第二のアルゴリズムは、画素が取得する光線束を、仮想画像面に投影する方法
- 光線束の投影による方法では、仮想画面の一つの画素に複数の光線束が投影される。その性質を用いて、超解像処理した画像を参考に示す



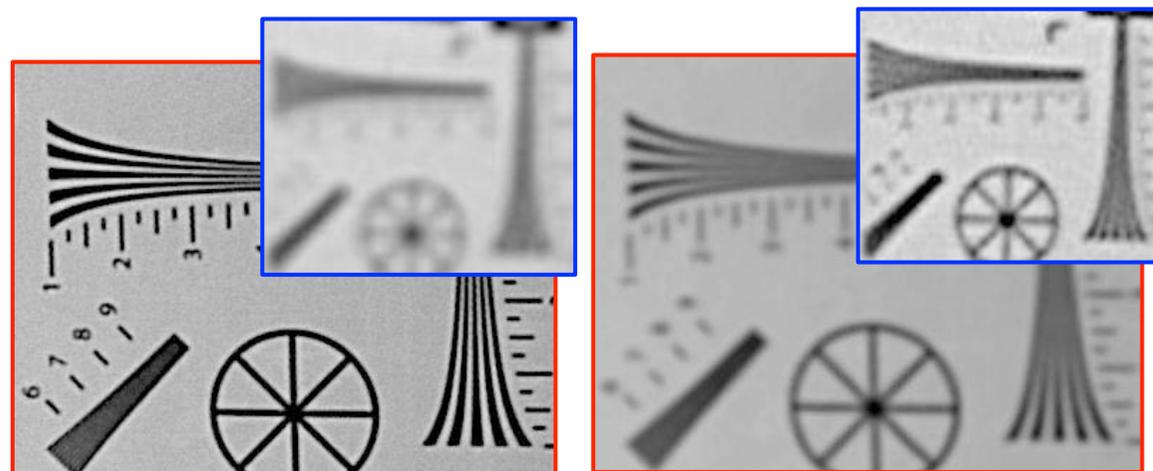
後方参照領域

前方参照領域

サンプル画像の全体

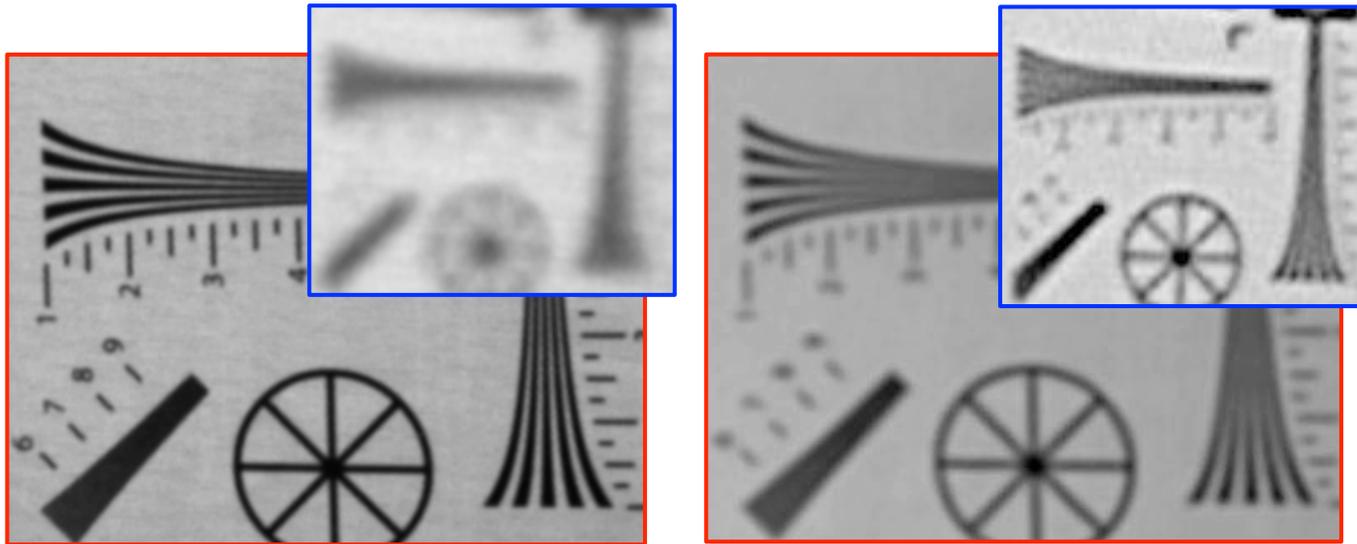


シフト加算によるレンダリングで前方と後方にピントを合わせた場合の、参照領域の画像

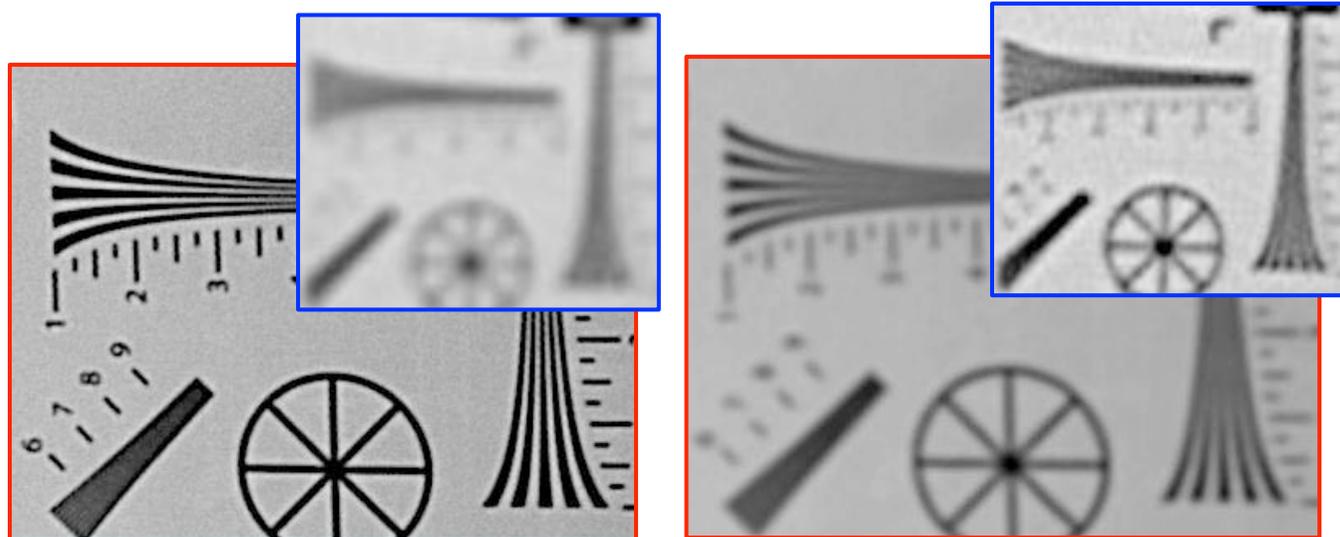


Lytroに内蔵のソフトウェアで前方と後方にピントを合わせた場合の、参照領域の画像

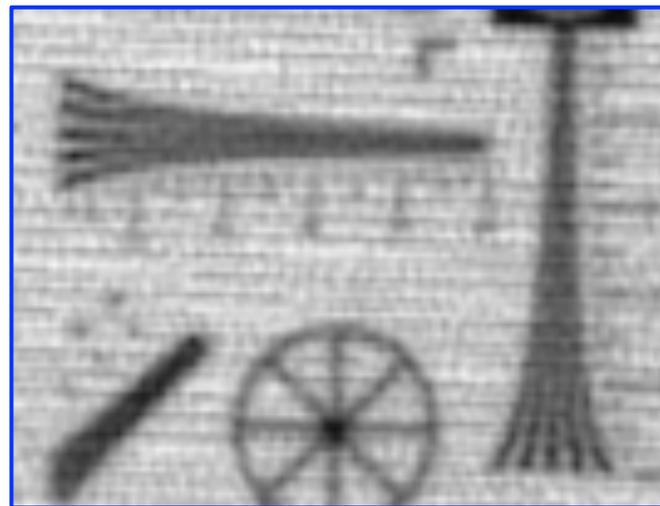
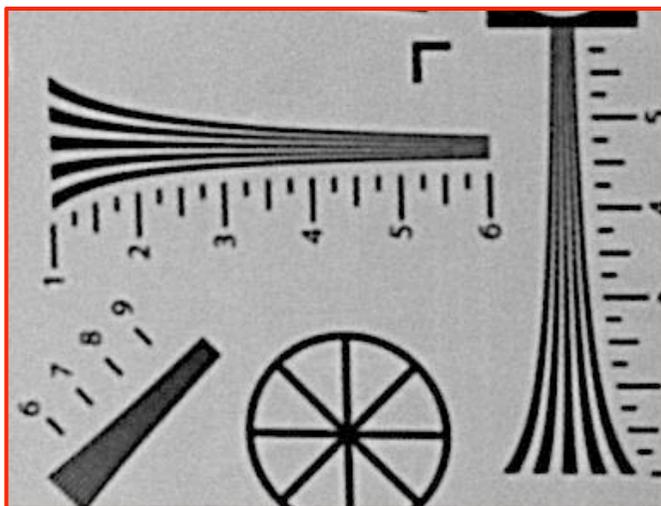
シフト加算によるレンダリングの例 30



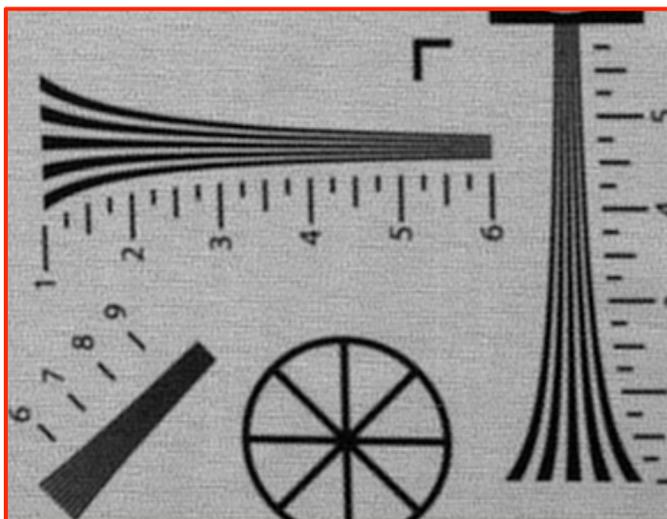
光線束投影によるレンダリングで前方と後方にピントを合わせた場合の、参照領域の画像



Lytroに内蔵のソフトウェアで前方と後方にピントを合わせた場合の、参照領域の画像



光線束投影でレンダリングした画像に，共役勾配法で画像復元して鮮鋭化した画像



Lytroに内蔵のソフトウェアで前方と後方にピントを合わせた場合の、参照領域の画像

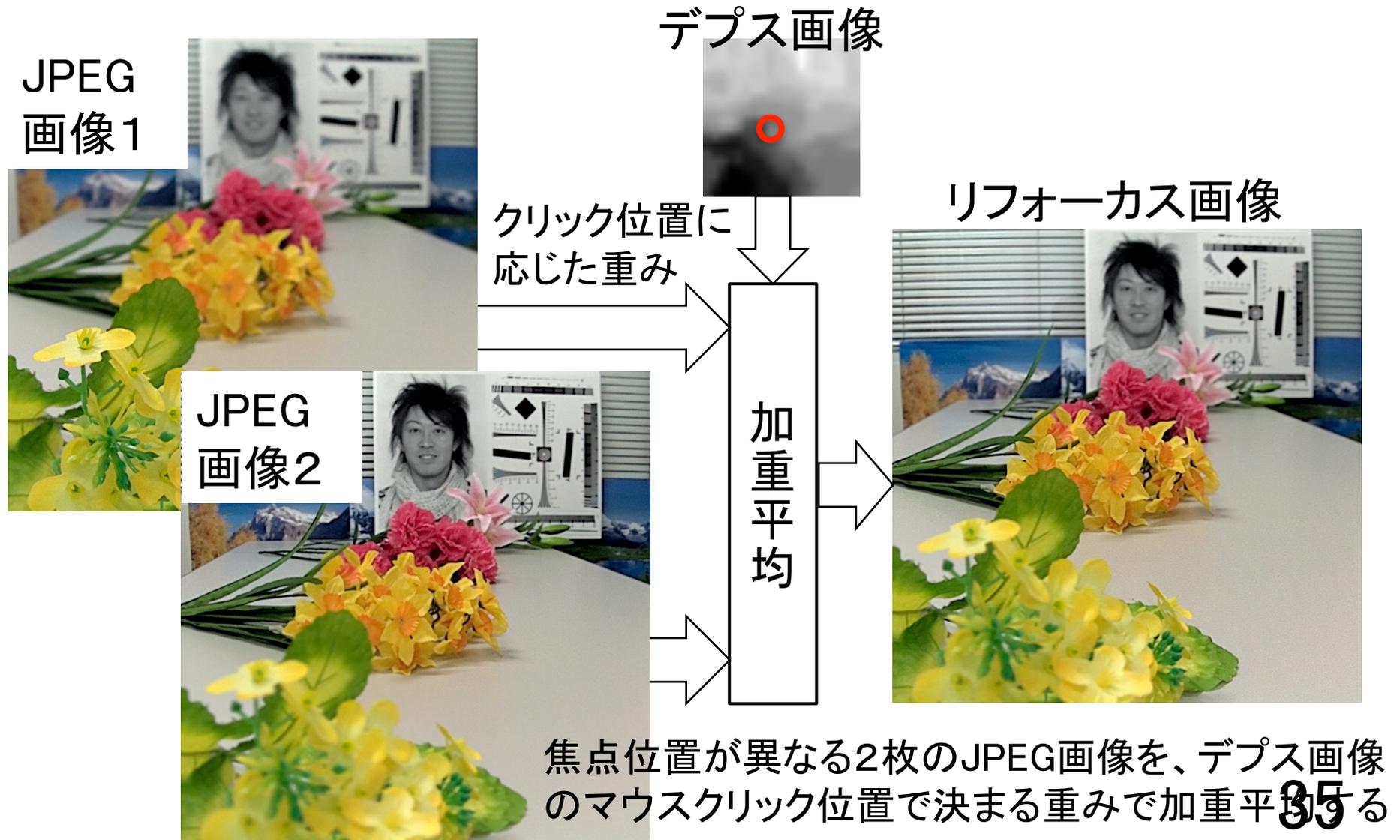
Webレンダリング

- ライトフィールドからリフォーカス画像を生成する処理をリアルタイムで実行することは難しい。一方、LytroアプリやLytroのWebサイトでは、フォーカス位置をマウスクリックすると、瞬時にリフォーカス画像が生成される。
- したがって、ライトフィールドレンダリングとは別な手法でWeb画像をレンダリングしていると考えられる。
- Lytroの出力ファイルの一つ「IMG_シリアル番号-stk.lfp」に、あらかじめ異なった位置に焦点が合った複数のJPEG画像が用意されている。これをWebレンダリングに利用していると考えられる。

-stk.lfpファイル

- Webレンダリングに用いる画像情報を格納したファイル。
 - 第0セクション: 16バイトのヘッダ。データの解析には不要。
 - 第1セクション: ファイルの概要に関するJSON記述。
 - 第2セクション: 20×20画素のデプス画像を格納している。
 - 第3セクション以降: 複数のJPEG画像が順番に格納されている。JPEG画像の画素数は1080×1080画素。これらは、手前に焦点を合わせた画像から、中間位置に焦点を合わせた画像、奥に焦点を合わせた画像などからなる複数の画像。JPEG画像の枚数はシーンの奥行きに依存する。
- Lytroが取得するライトフィールドをステレオ画像と解釈することができるので、そこから粗いデプス画像を計算している。
- 焦点位置が異なった複数のJPEG画像は、取得したライトフィールドから独自にレンダリングしたものである。

Webレンダリングアルゴリズム (推察)



Lytroの課題

- マイクロレンズによる画質の劣化
 - マイクロレンズ周辺の光線が劣化する(色、解像度、SN)。
 - マイクロレンズ境界の画素は光線を取得できない。単純計算では40%以上の画素をロスしている。
- マイクロレンズの装着位置の誤差により、筐体ごとのキャリブレーションが必要
- 静止画ではリフォーカスが有効な利用場面は少ない。動画像での利用が期待される。

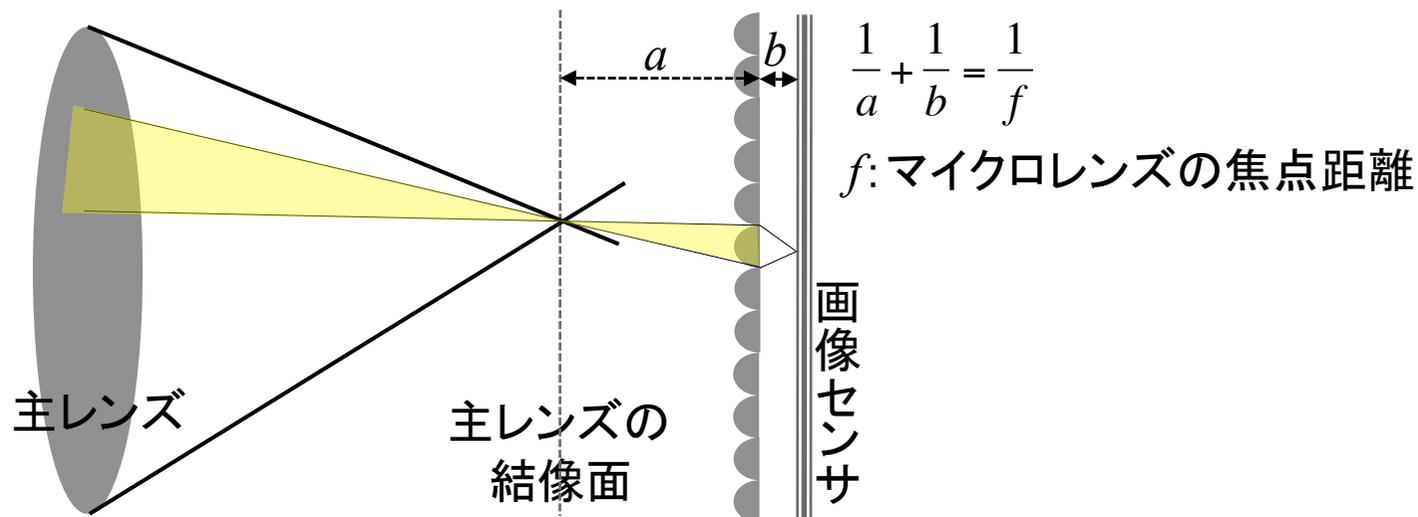
もう一つのライトフィールドカメラ

- 独Raytix社のライトフィールドカメラ

写真、画像、図面はURL先を参照してください

Focused plenoptic camera の特徴

- 主レンズが作る像を、マイクロレンズアレイによって画像センサに再投影するようにはたらく。
- 画像センサの画素はLytroよりも広い角度範囲の光線束を記録するので、奥行き解像度は粗いが、画像解像度は高くなる。



Focused plenoptic camera における リフォーカス画像の生成

- マイクロレンズがカバーする画素の一部を適切に切り出し、それをつなぎ合わせることで、完全な画像にする。
- 画素の重なりを利用して超解像処理を行うことも可能。

