

# ライトフィールドカメラの原理と 超解像処理による高画素化

2015年12月17日

JOEM セミナー「超解像と解像力制御の技術」

京都産業大学  
コンピュータ工学部  
教授 蚊野 浩

# 目次

- ライトフィールドカメラの原理
  - Lytro
    - ライトフィールドセンサの構造
    - ライトフィールドの記録
    - リフォーカスの原理
    - 写真画像の計算
    - 多視点画像の取得
  - Raytrix
    - Raytrixカメラの構造
    - Raytrixの生画像
    - Raytrixの機能
    - Raytrixの応用分野
    - RaytrixとLytroの比較
- ライトフィールドカメラ画像の高画素化
  - Lytroの出力画像の解像度
  - Lytroの多視点画像
  - 複数画像からの画像超解像
  - 多視点画像からの画像超解像
  - 実験条件
  - 実験結果
- まとめ

# Lytro

第二世代  
Illum

第一世代  
Lytro



Keep Innovating.

# Raytrix



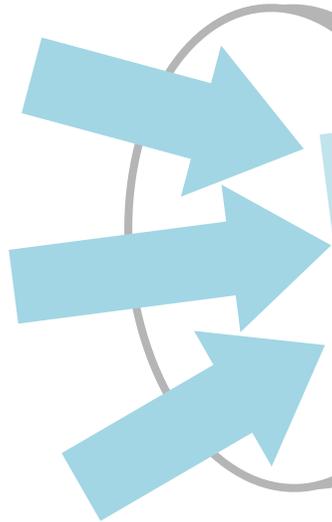
# ライトフィールドカメラの原理

LytroとRaytrix

# 通常の デジタルカメラ

Keep Innovating.

被写体  
からの光



レンズによる  
光像の形成



光像の記録

デジタル画像処理



最終写真画像

# Lytroの原理

被写体  
からの光

レンズによる  
光像の形成

ライトフィールドセンサ

- 画像センサ
- マイクロレンズアレイ

光線への分解と記録

ライトフィールドエンジン

- 光線追跡
- 多視点画像処理
- デジタル画像処理

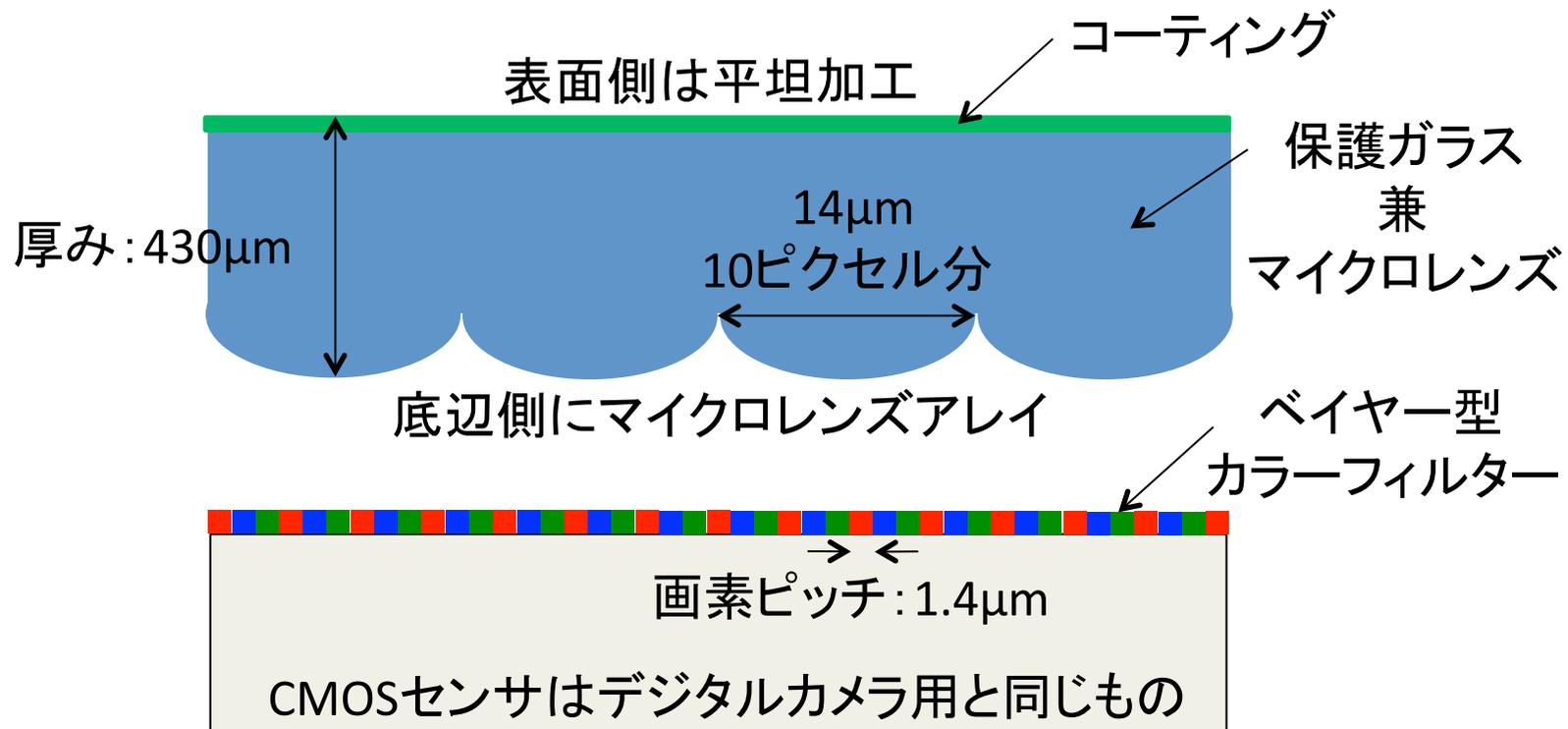


撮影後のリフォーカスなどが可能

# ライトフィールドセンサの構造

(第一世代Lytro)

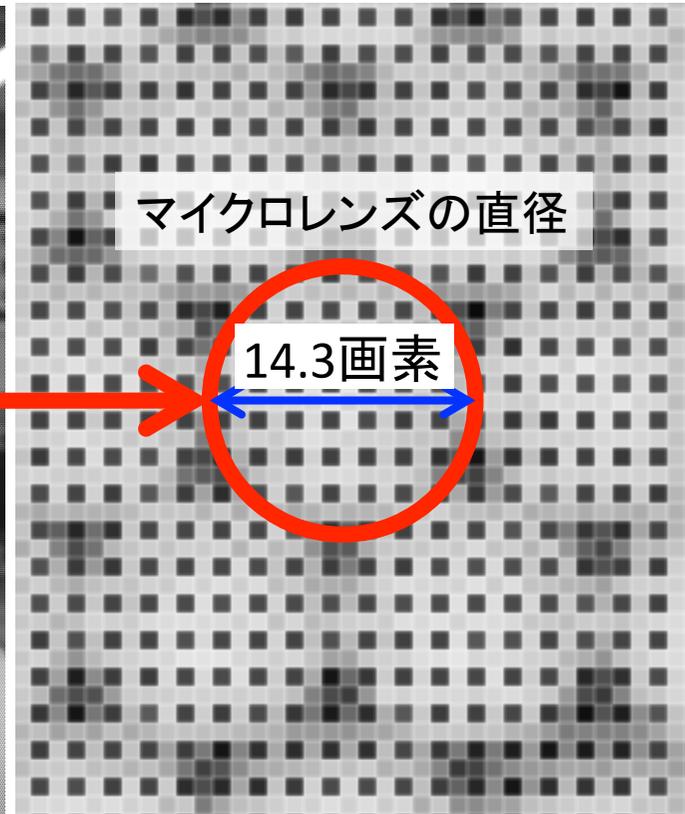
- CMOSセンサとマイクロレンズアレイが一体化したものの。
- 保護ガラスの上面側は平坦、底面側はハニカム配列のマイクロレンズアレイ。



# Illumの生画像



7728 × 5368画素の生画像



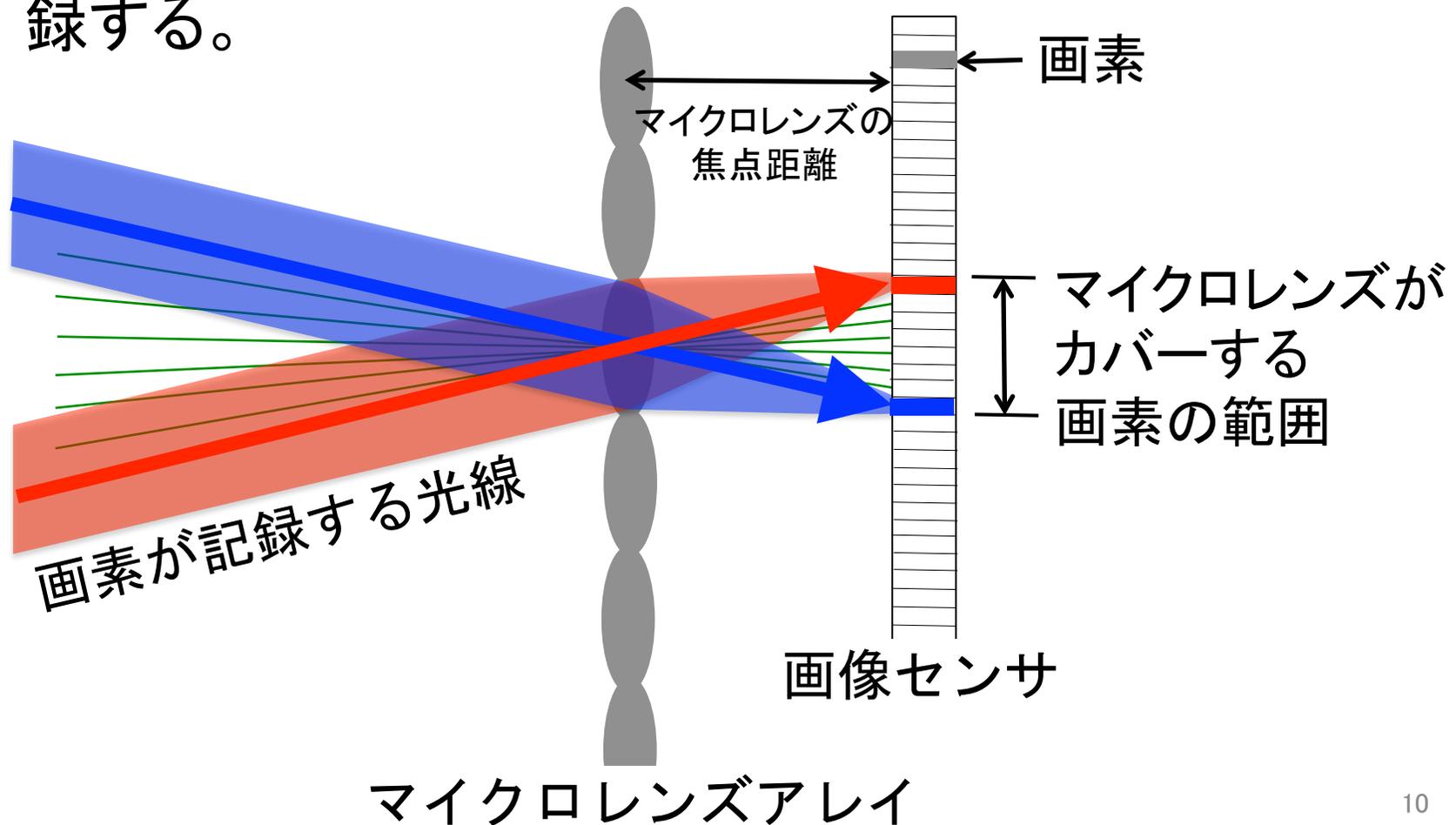
マイクロレンズの直径

14.3画素

部分拡大

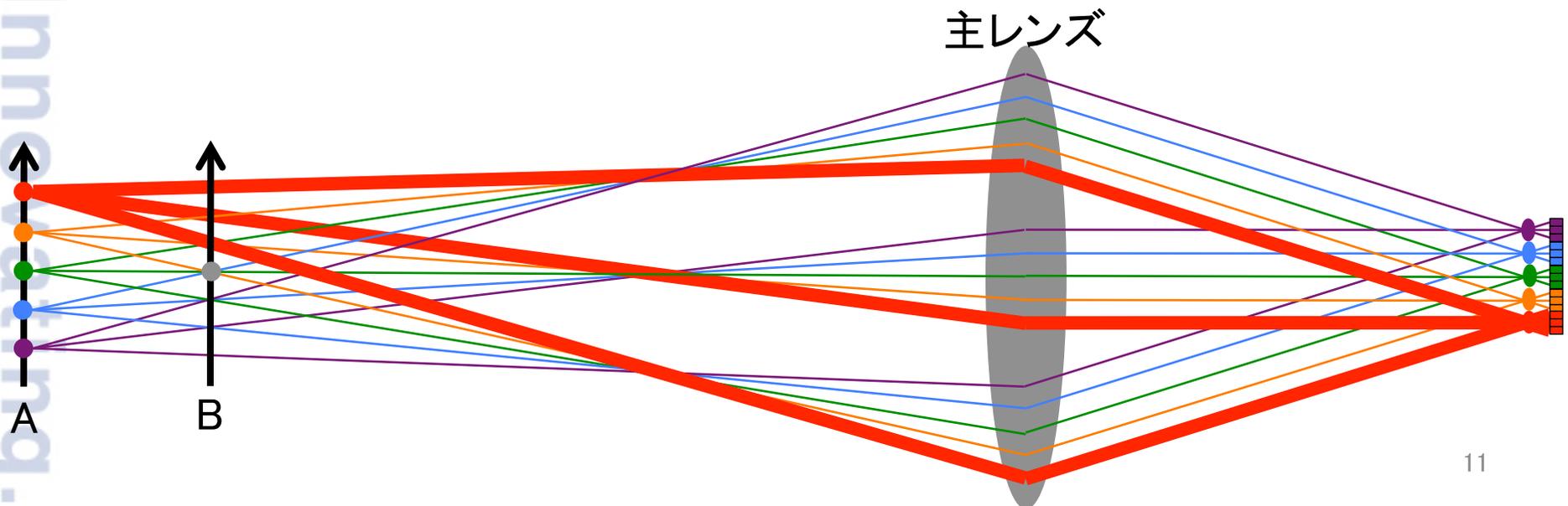
# ライトフィールドセンサーが記録する光線

- マイクロレンズと画像センサで光を光線に分解して記録する。



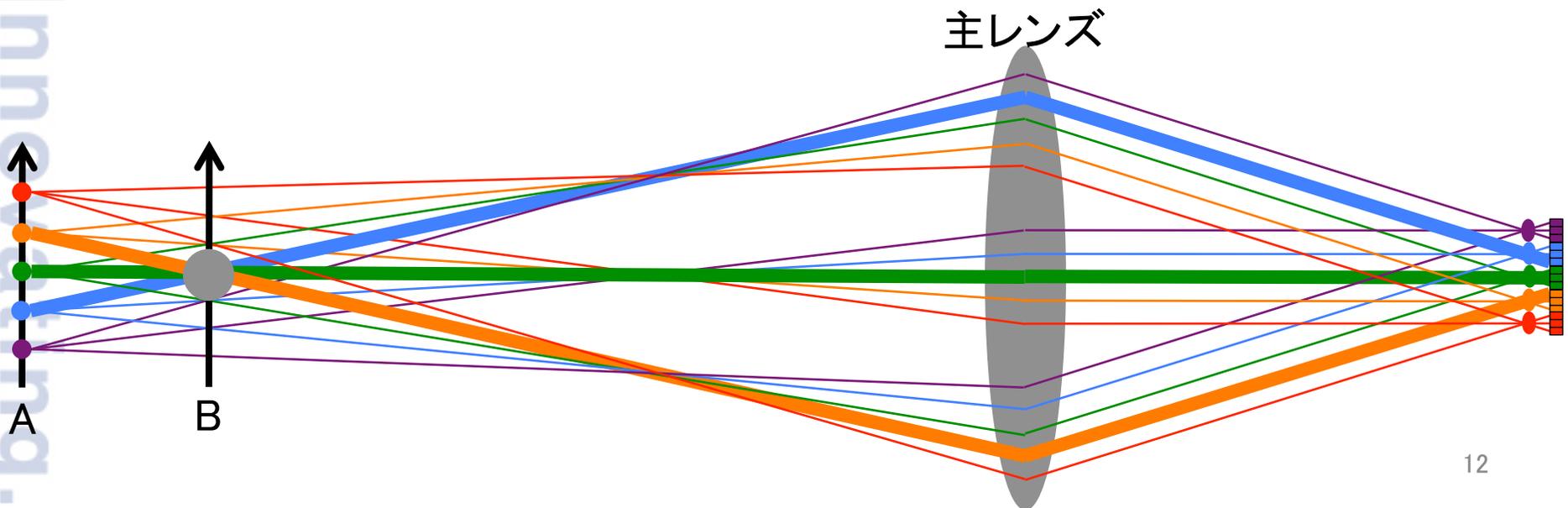
# Lytroによるライトフィールドの記録

- 主レンズがAの像をマイクロレンズ面に結像する時、Aの各点から発する光線は、マイクロレンズがカバーするいずれかの画素に記録される。
- マイクロレンズがカバーする画素の値を平均すると、Aに焦点を合わせた画像が生成される。



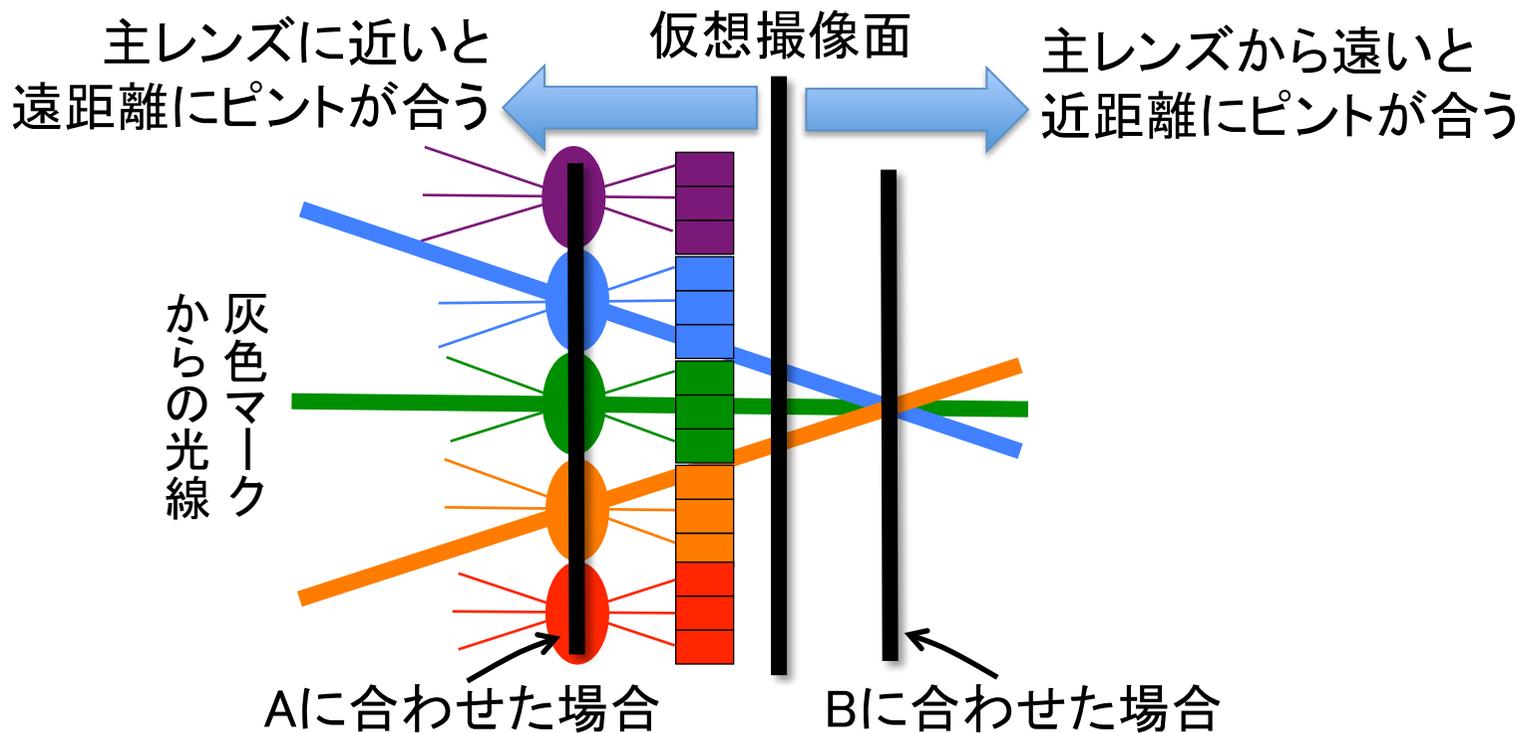
# Lytroによるリフォーカスの原理

- Bの灰色マークを通過する光線は、異なったマイクロレンズがカバーする画素に記録される。それらの画素値を加算平均することは、ライトフィールドを用いてBにピント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。



# 仮想撮像面の設定とリフォーカス

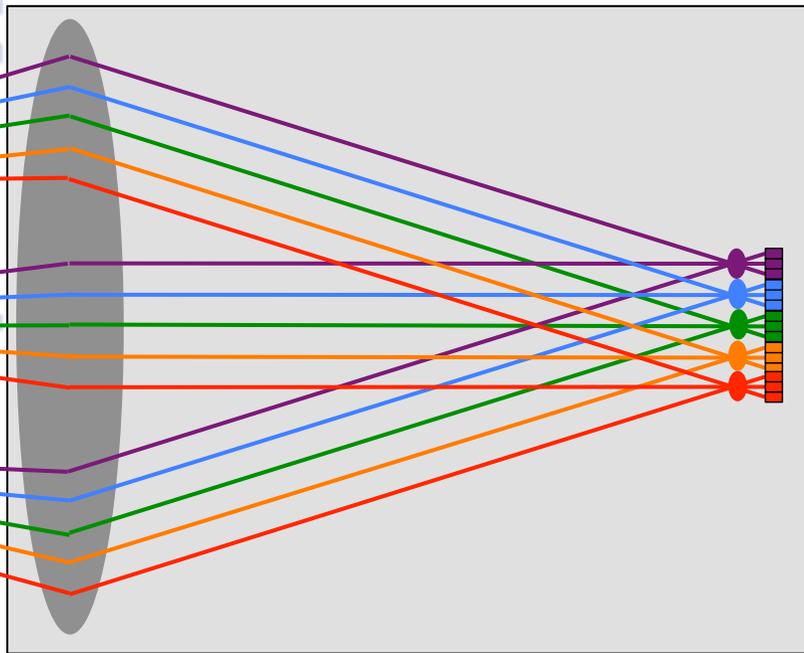
- 一般のリフォーカス画像の計算は、次のように行う
  1. 仮想撮像面の位置を設定する
  2. 記録した光線と仮想撮像面の交点を光線の色で描画する



# ライトフィールドを用いて 写真画像を計算する

仮想レンズを設定

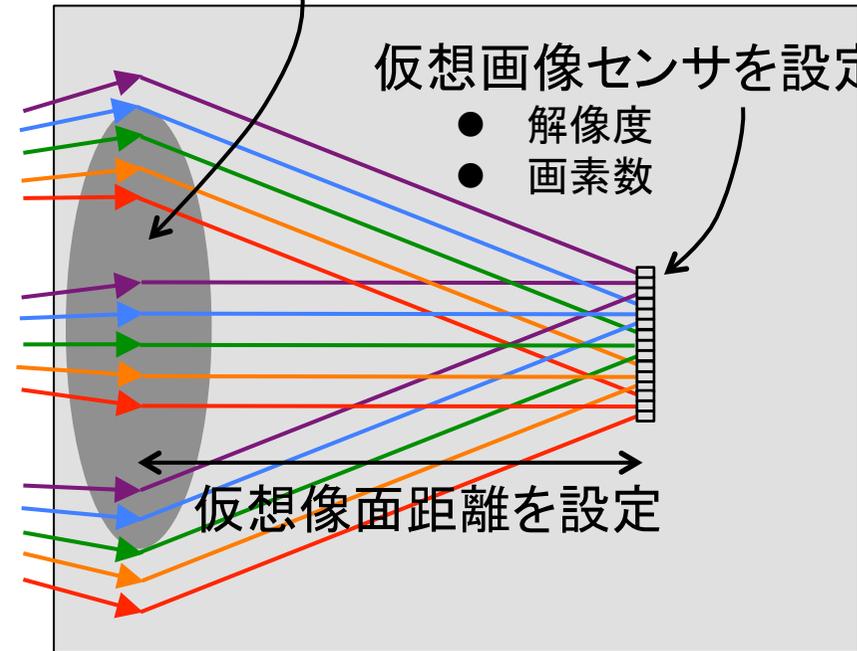
- レンズ口径
- 焦点距離



主レンズに入射する光線を  
逆追跡する

仮想画像センサを設定

- 解像度
- 画素数

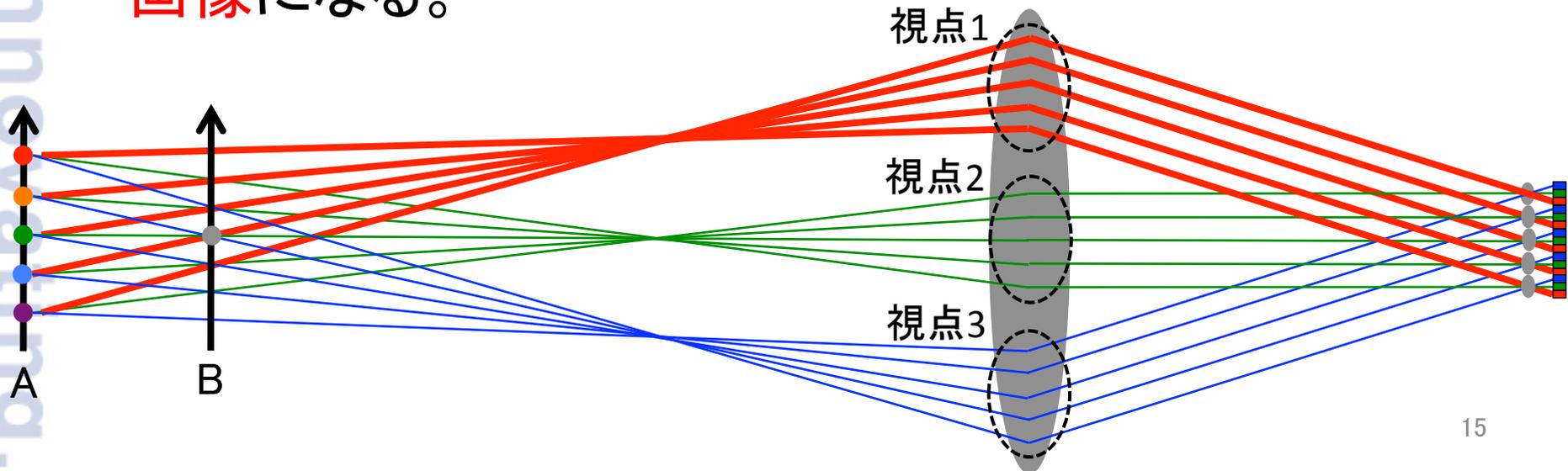


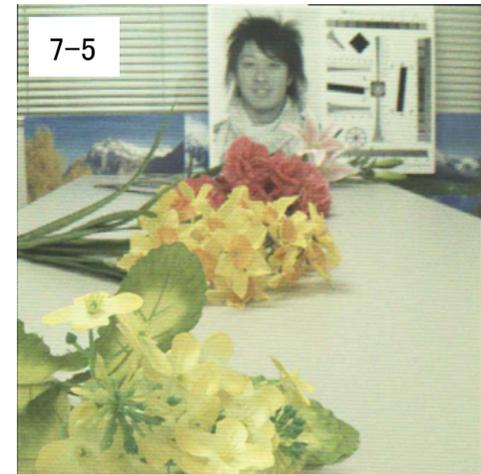
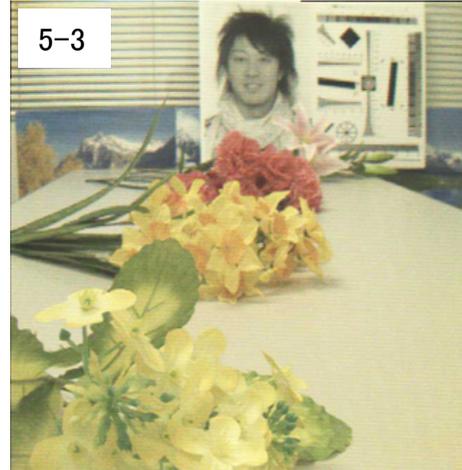
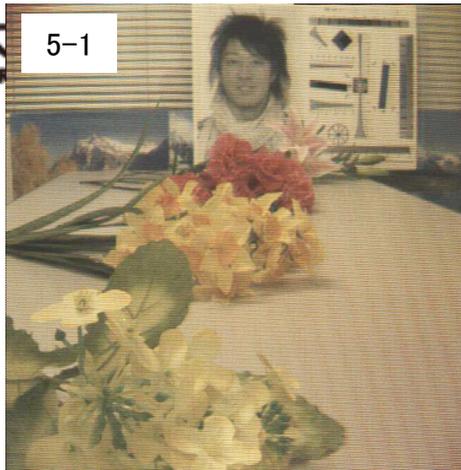
仮想像面距離を設定

主レンズに入射する光線から  
像を計算する

# Lytroによる多視点画像の取得

- マイクロレンズに対して同じ位置の画素を、マイクロレンズの配列順に並べた画像は、主レンズの一部から被写体を観察した**サブアパチャー画像**になる。
- マイクロレンズあたりの画素数をNとする。この手順で生成したN個の画像は、**視差を持つN組の多視点画像**になる。

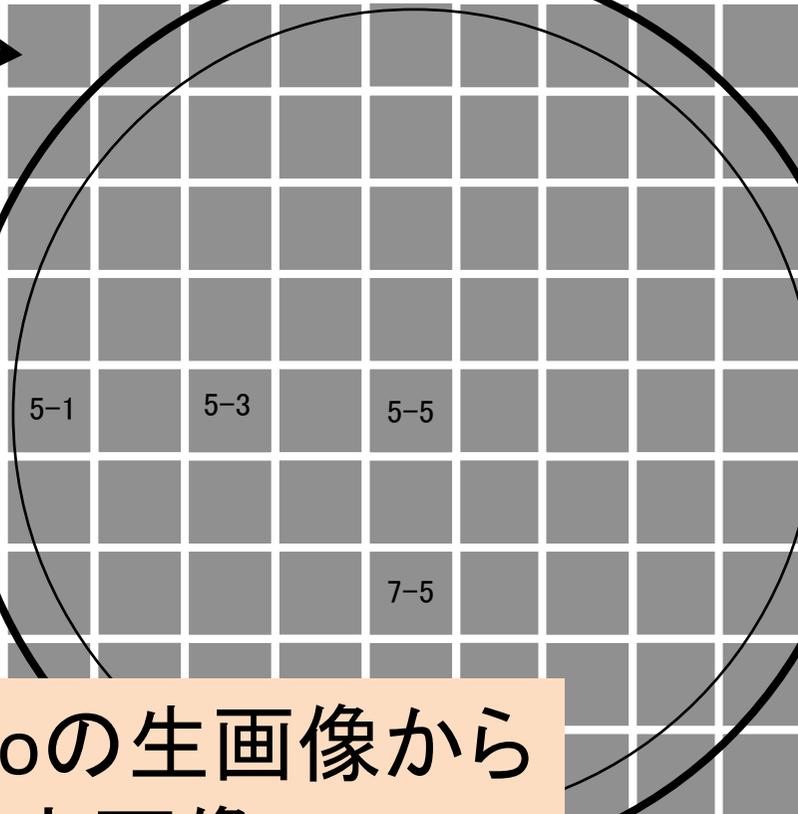




Keep Innovat

画素 →

マイクロ  
レンズ →

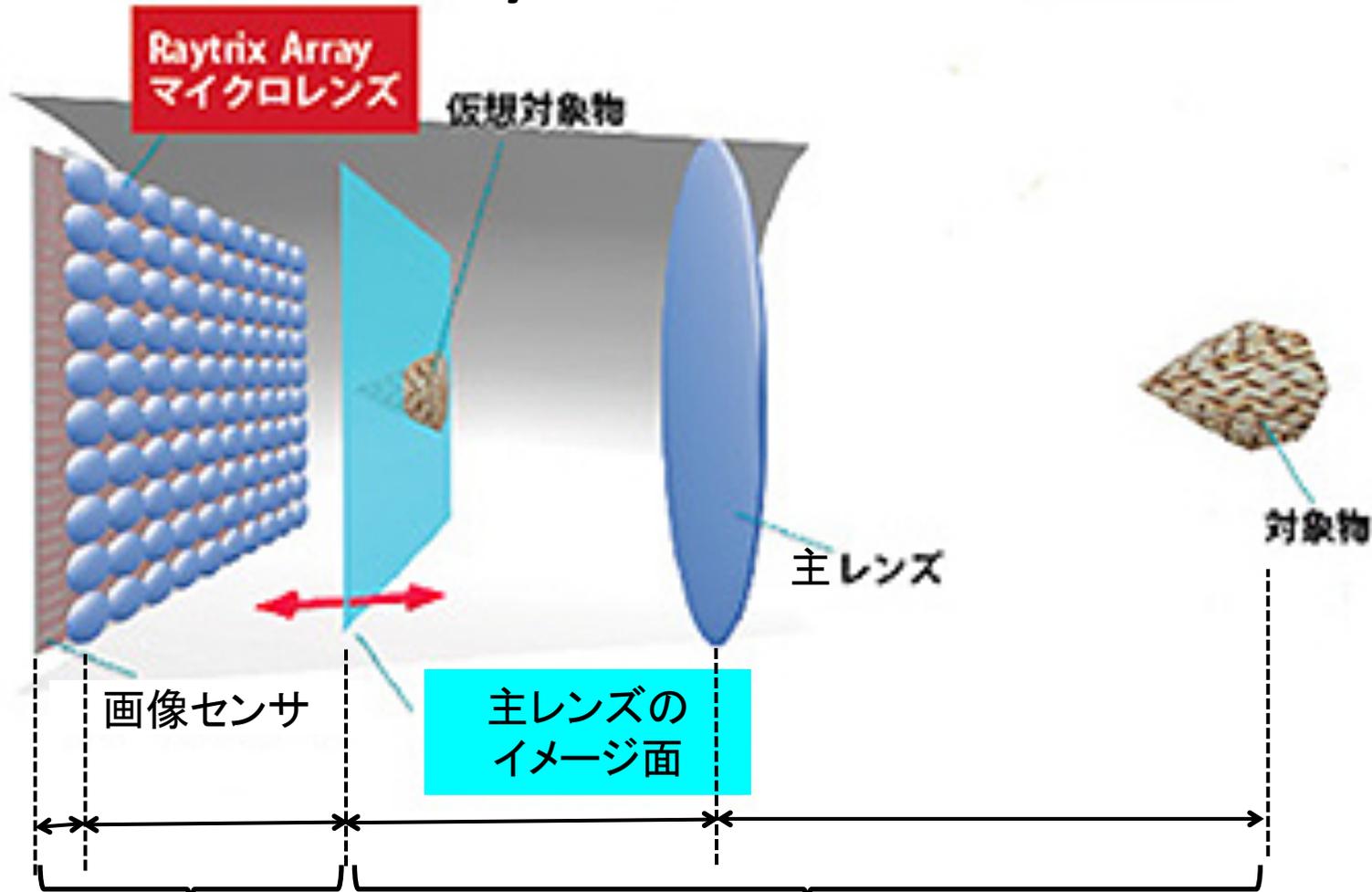


第一世代Lytroの生画像から  
生成した多視点画像

# Raytrix



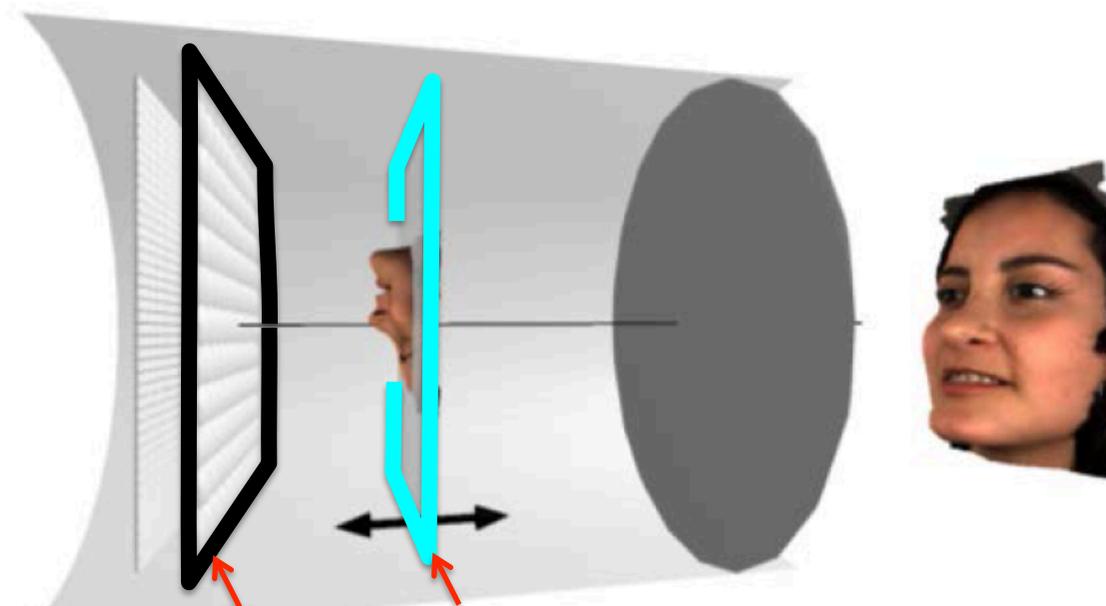
# Raytrixの構造



マイクロレンズアレイ と 主レンズによる結像系 を接続したものの  
による結像系

# RaytrixとLytroの違い

- Raytrix: 主レンズの像をマイクロレンズアレイで再撮影するシステム。光線に分解しているとは言えない。
- Lytro: 主レンズの像をマイクロレンズ面で光線に分解するシステム。

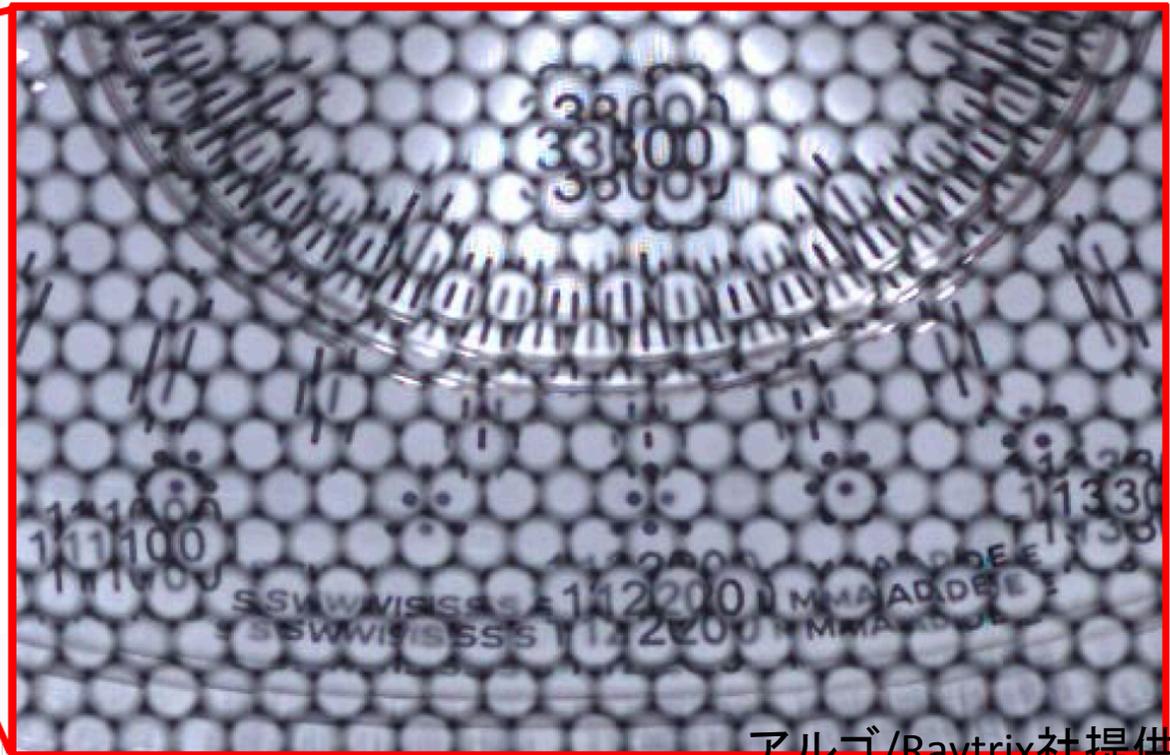
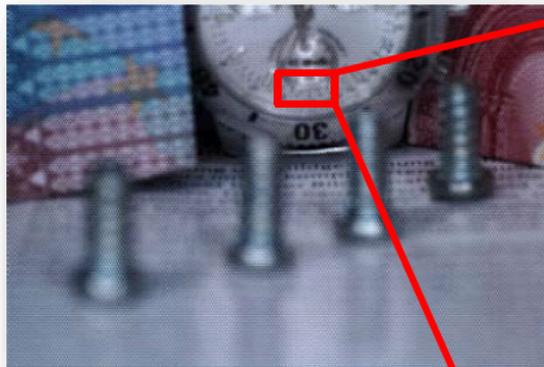


マイクロレンズアレイ面

主レンズのイメージ面

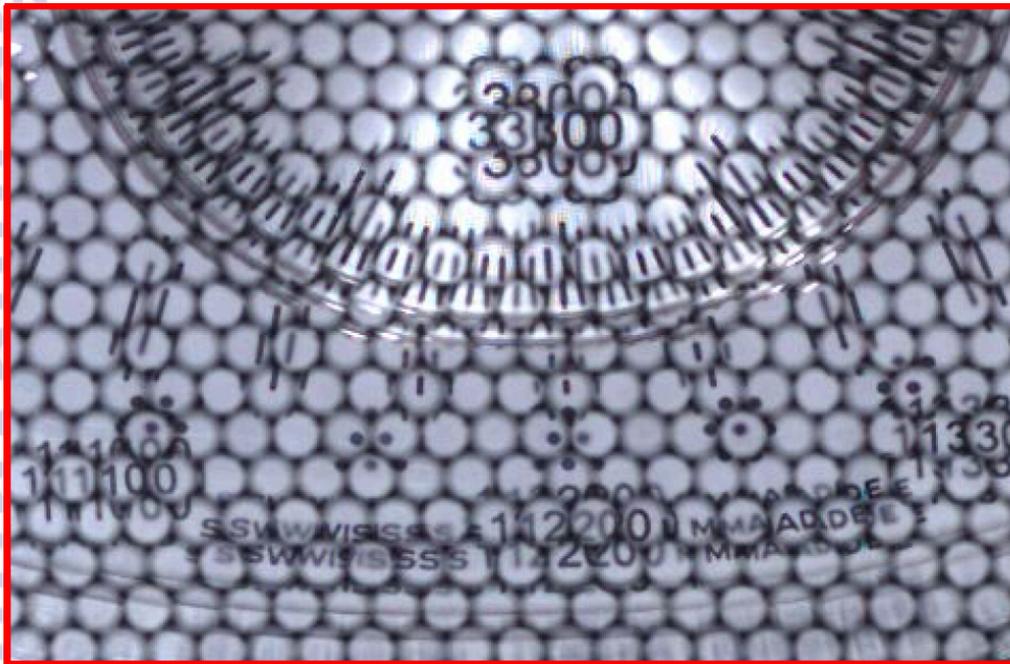
# Raytrixの生画像

- マイクロレンズごとの円形画像は、被写体のごく一部を、ずらせながら撮影したものになっている。このずれ量が視差に相当する。



# Raytrixの機能1：全焦点画像の生成

- マイクロレンズごとの円形画像を、位置を合わせて重ねることで全焦点画像を生成できる。生成した写真画像の解像度は、Lytroよりもかなり高い。



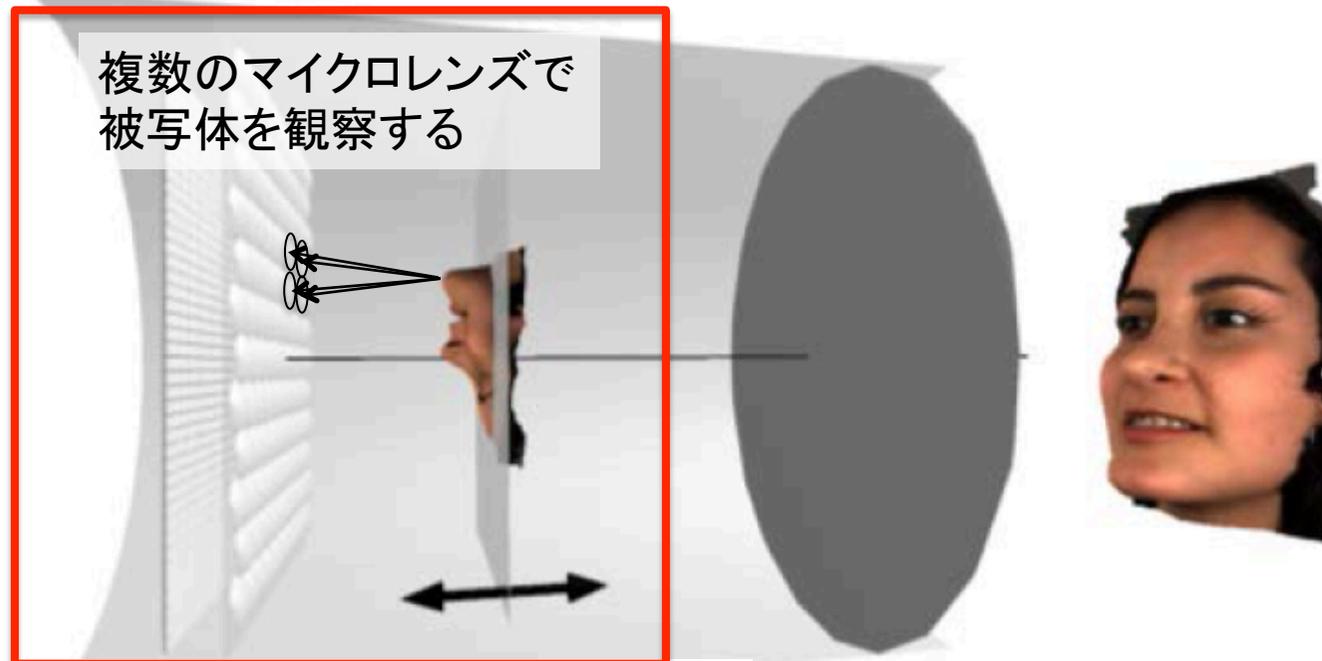
Raytrixの生画像の一部



左の生画像から計算した全焦点画像

## Raytrixの機能2: 三次元計測

- 主レンズ像の各点は、複数のマイクロレンズで観察される。したがって、その点の三次元位置を受動ステレオ法で計算可能である。

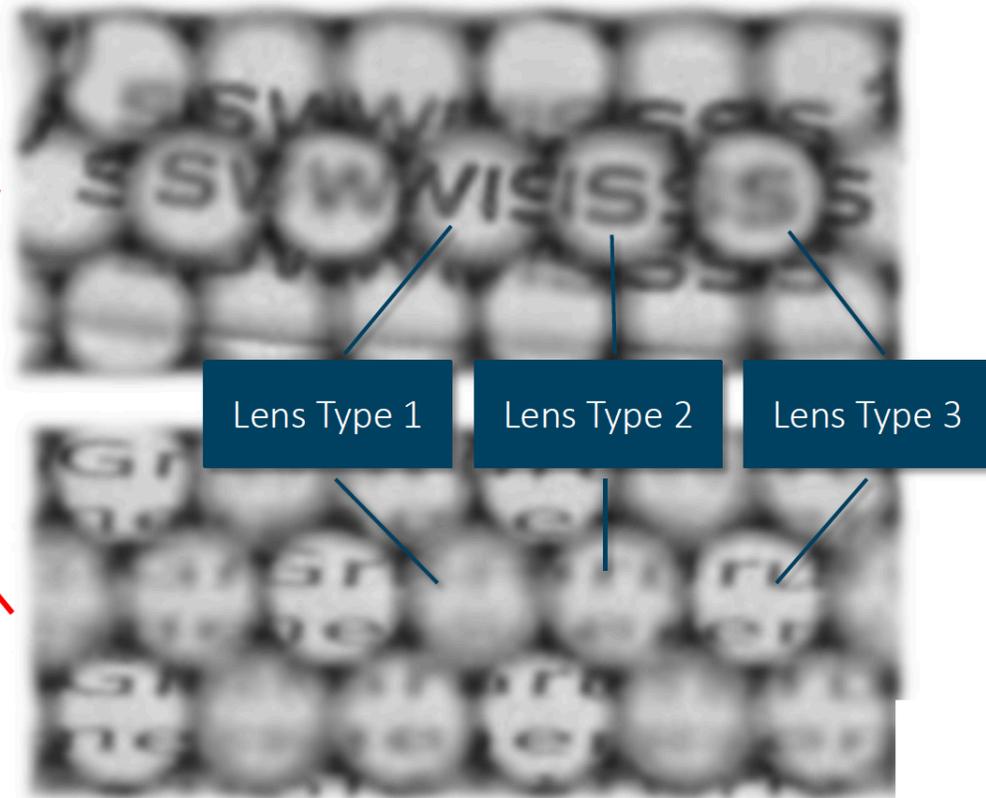
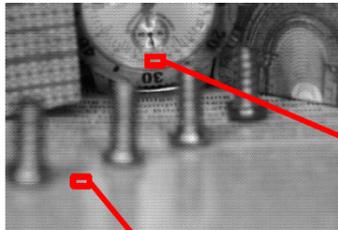


この部分でマルチビューステレオを行う

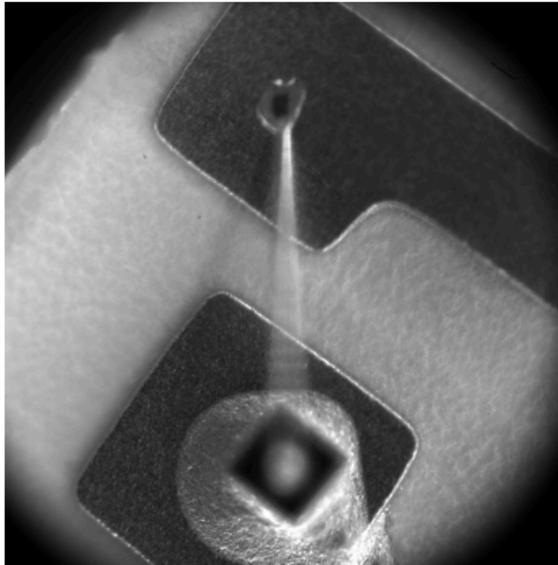
アルゴ/Raytrix社提供<sup>22</sup>

# Raytrixのマイクロレンズアレイの特徴

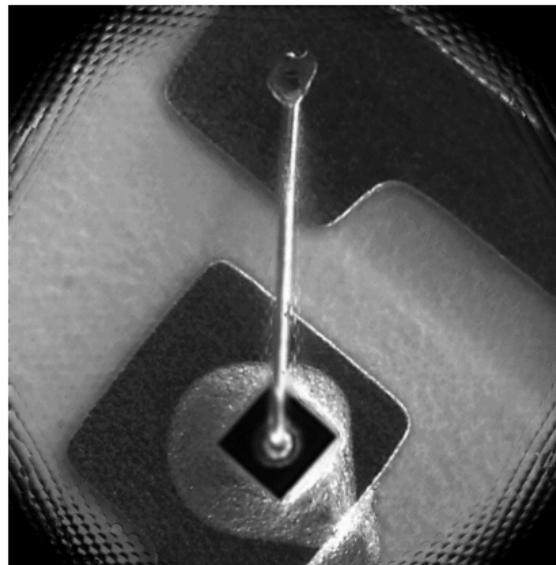
- 計測範囲を広げるために、マイクロレンズの焦点距離は長・中・短の3種類が配置される。



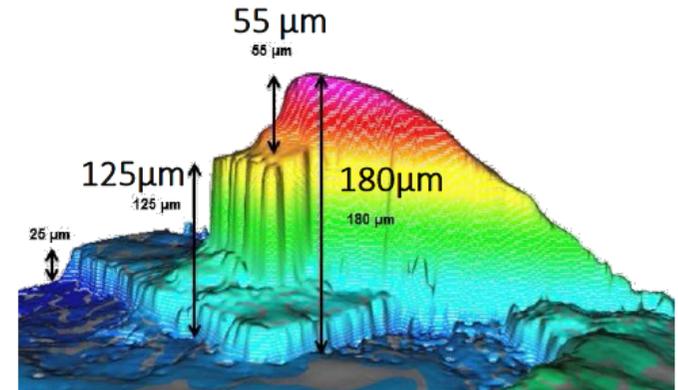
# Raytrixによる撮影の例



通常のカメラによる画像  
(被写界深度が浅い)



Raytrixによる画像  
(被写界深度が深い)



Raytrixによる三次元計測の例

# 立体物の計測と合成の例

Original



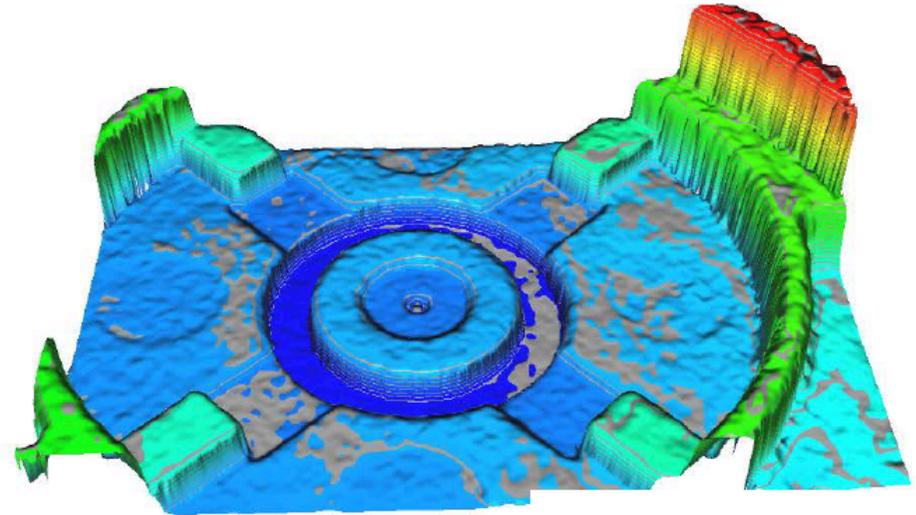
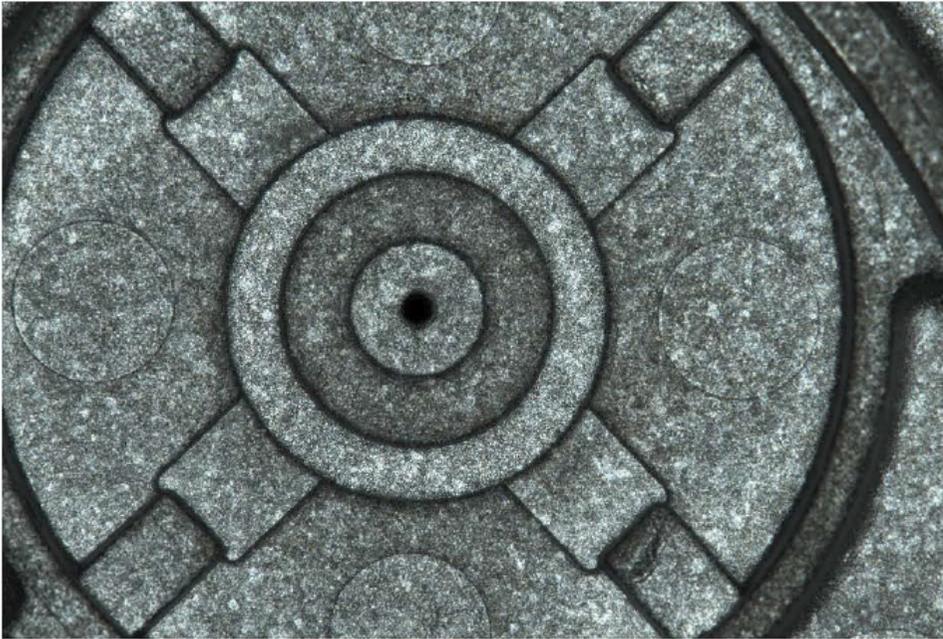
6 reconstructed views



Stitching Result



# シャープな3Dエッジの計測が可能



ating.

# Raytrixの応用分野：3Dマシンビジョン

- 応用例

- 表面の形状検査

- 欠陥検査、形状測定

- コネクタの端子検査

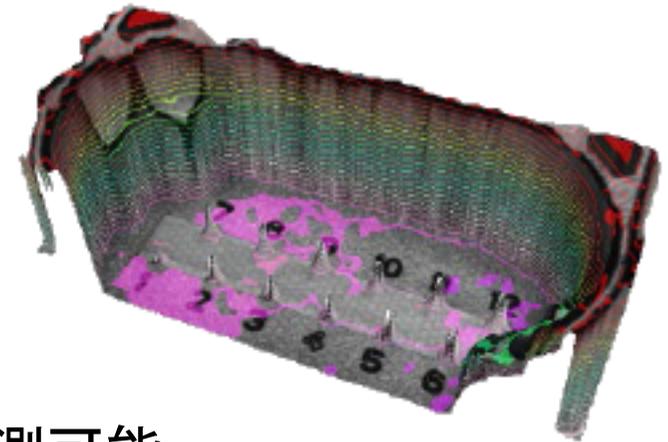
- 端子の高さとコネクタ本体を同時計測可能

- ガラスの汚濁検査

- 透明物体中の汚れとその深さを検査する

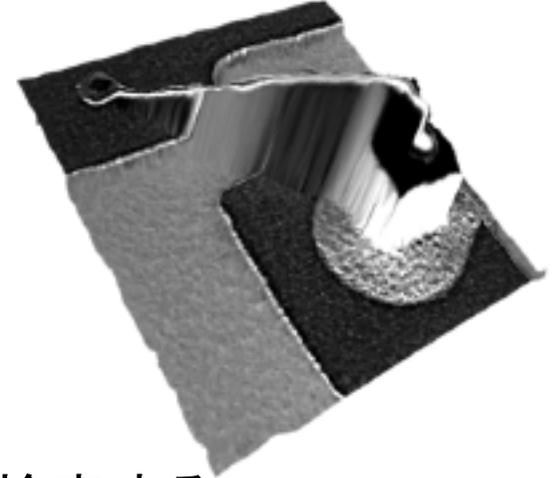
- 利点

- カメラが一台、被写界深度が深い、高速、特殊な照明が不要、微小物体の計測が可能、etc



# Raytrixの応用分野：3D顕微鏡

- 応用例
  - 太陽電池
    - 太陽電池表面の欠陥検査
  - ボンディングワイヤーの検査
    - ボンディングワイヤーの3D形状を高速に検査する
  - ICコネクタの端子形状検査
    - プリント基板に実装前に端子の曲がりを確認する
- 利点
  - 通常の顕微鏡を使って3D計測可能、被写界深度が深い、高速、定量的な計測が可能、etc



# LytroとRaytrixの比較

- 共に、多眼ステレオ系になっており、写真画像を計算すること(リフォーカスなど)や三次元計測が可能。
- Lytro
  - 非常に冗長な多眼ステレオ系である。
  - 光線追跡処理で、自然な写真画像を計算できる。
  - 三次元計測の精度・解像度は高くない。
- Raytrix
  - 冗長度が低い多眼ステレオ系である。
  - 自然な写真画像の生成には不向き。
  - 三次元計測の精度・解像度はLytroよりも高いが、明確にはされていない。

# それぞれの用途・機能

- Lytro
  - デジタルカメラ、ビデオカメラの未来形。
  - デジタルカメラにおける像面位相差測距と類似の（発展的な）システム。
- Raytrix
  - ワンショットで被写界深度が深い画像を撮影できるマシンビジョンカメラ。
  - 一台のカメラでステレオカメラ並みの距離測定精度を持つ3Dカメラ。

# ライトフィールドカメラ画像の 高画素化

第一世代Lytroの例

# Lytroの解像度に関する数値

- Lytroが生成する写真画像の解像度
  - マイクロレンズアレイの解像度が、一つの限界。
  - これは、出力画像に対して380/1080(35%程度)。

画像センサ

画素数: 3280×3280

セルサイズ: 1.4μm

カラーフィルタ: RGBベイヤー配列

マイクロレンズアレイ

レンズ数: 横330×縦380

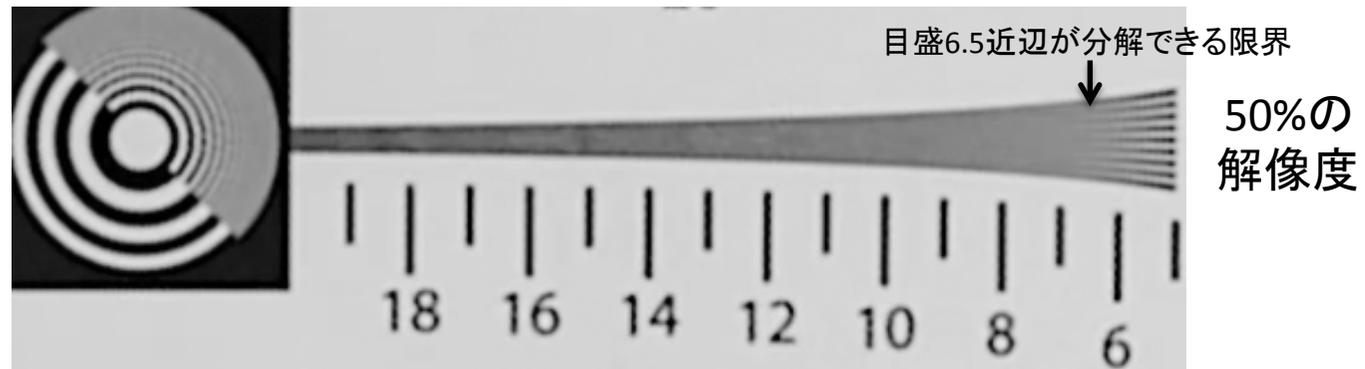
配列: ハニカム構造

出力画像

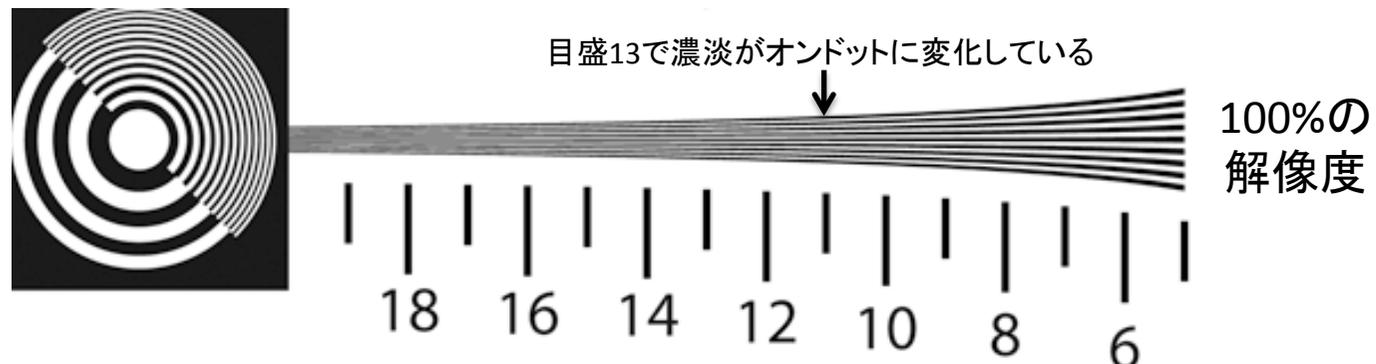
1080×1080画素

# Lytroの実写画像の解像度

- Lytroの実写画像の限界解像度は、出力画像の画素数に対して**50%程度**。



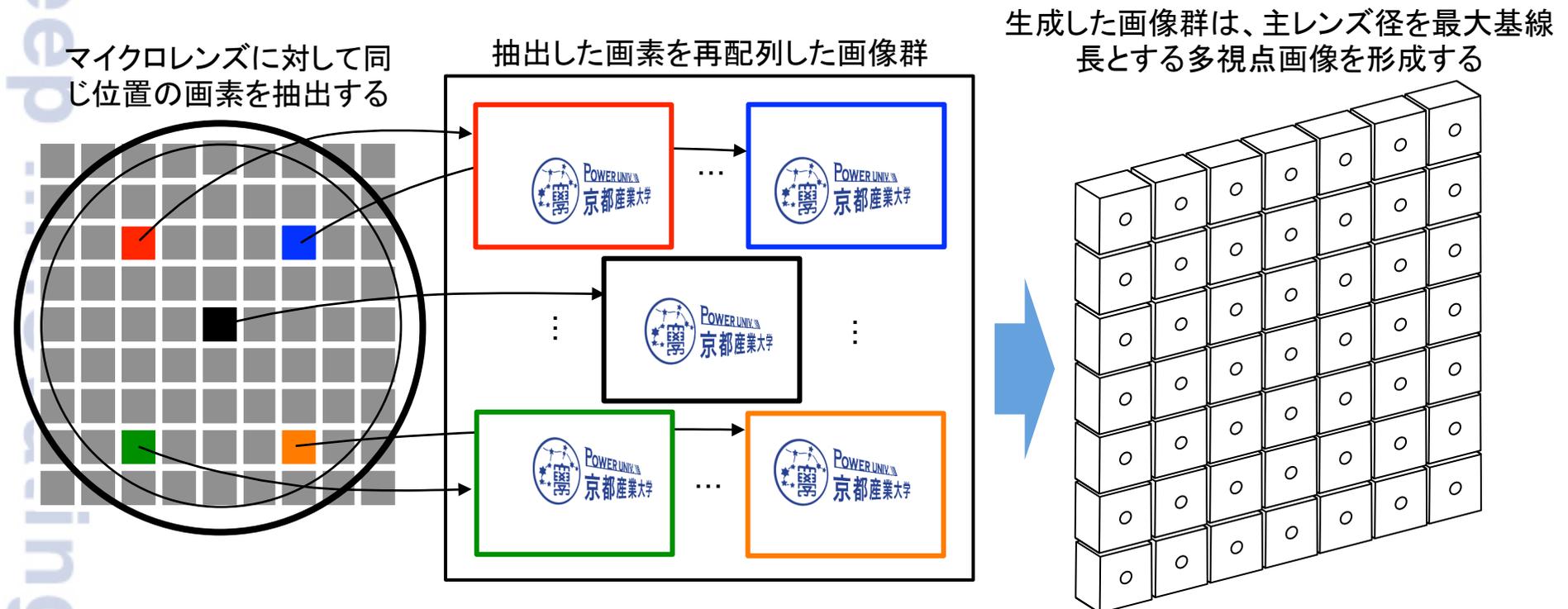
解像度チャートをLytroで撮影し、Lytroアプリで出力した画像の例



解像度チャートのデジタルデータを1080×1080画素に縮小したもの

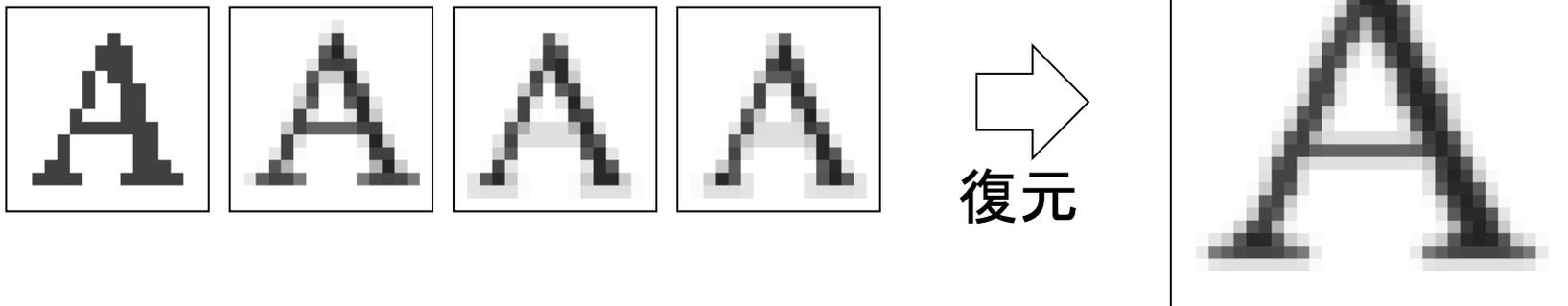
# Lytroの多視点画像

- 330×380画素のカラーフィルタアレイ(CFA)画像
- 視点数は概ね50点



# 複数画像からの画像超解像

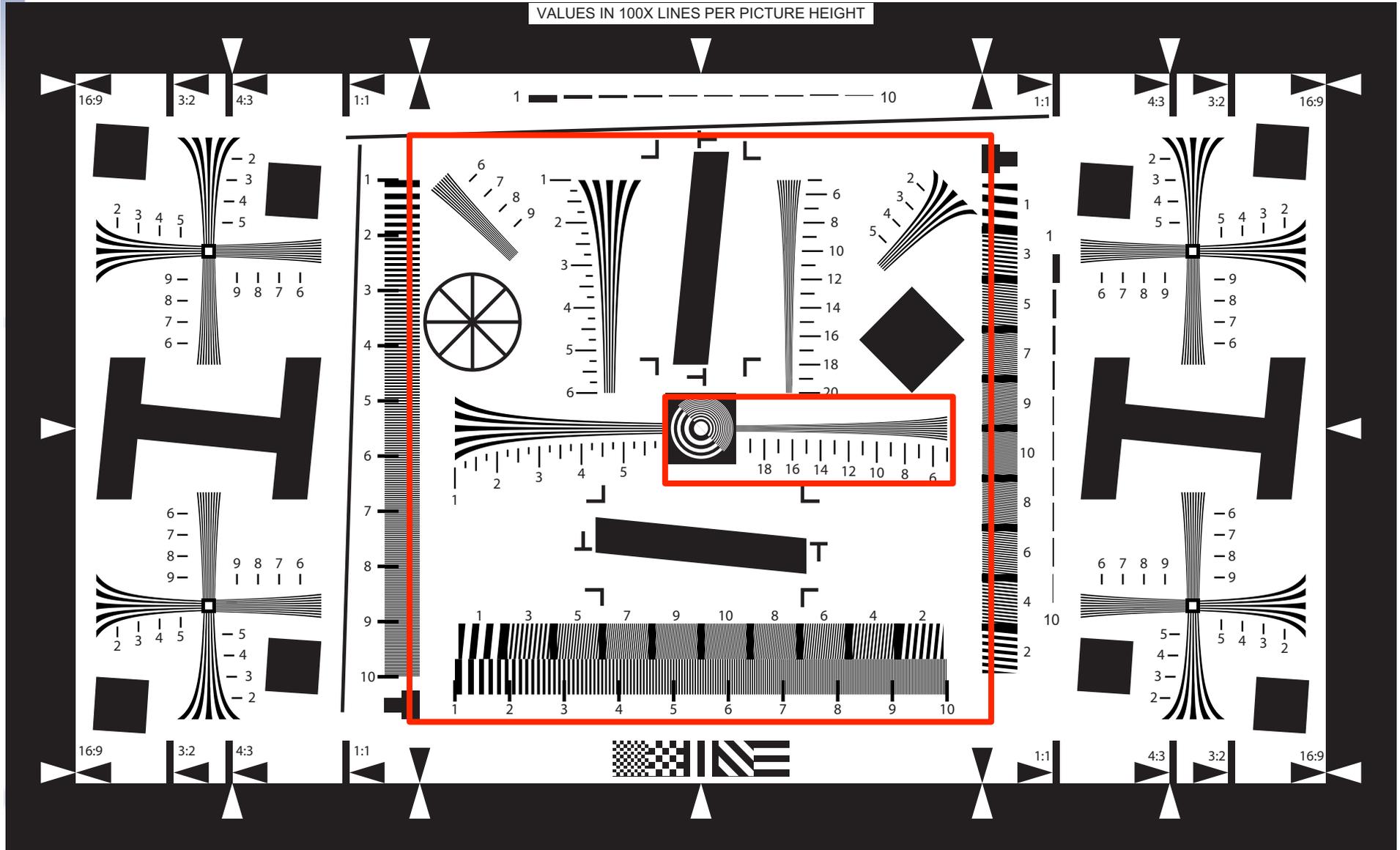
- 位置をずらして撮影した複数画像を位置合わせし、画像復元で高画素化する処理
- 多くの場合、ずれ量は画像全体で均一と仮定



# 多視点画像からの画像超解像

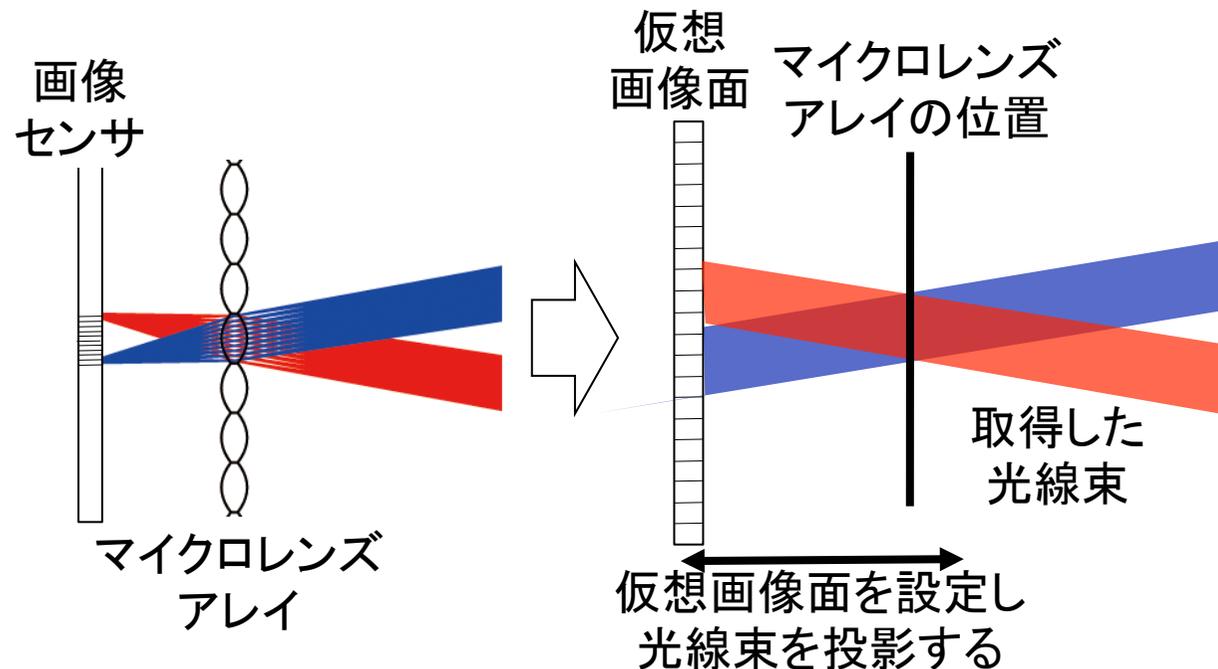
- 複数画像からの画像超解像のバリエーション
  - 全ての被写体にピントが合った高解像度画像を生成する場合、画素単位で位置合わせした後、超解像処理を行う。
  - 特定の撮影距離にピントを合わせる場合、位置合わせ処理は不要。
    - 撮影距離に存在する被写体は超解像処理に成功し、高画素化される。
    - 撮影距離にない被写体は超解像処理を行わない。超解像処理を行うとアーチファクトが発生する。

# 実験条件1: 解像度チャート



## 実験条件2: 処理手順

- 多視点画像を生成する手間を省くため、仮想画像面に光線を直接投影し、点拡がり関数を逆畳み込みすることで高解像度画像を復元した。
- CFA画像の効果を見捨てるため、緑画素のみを利用した。

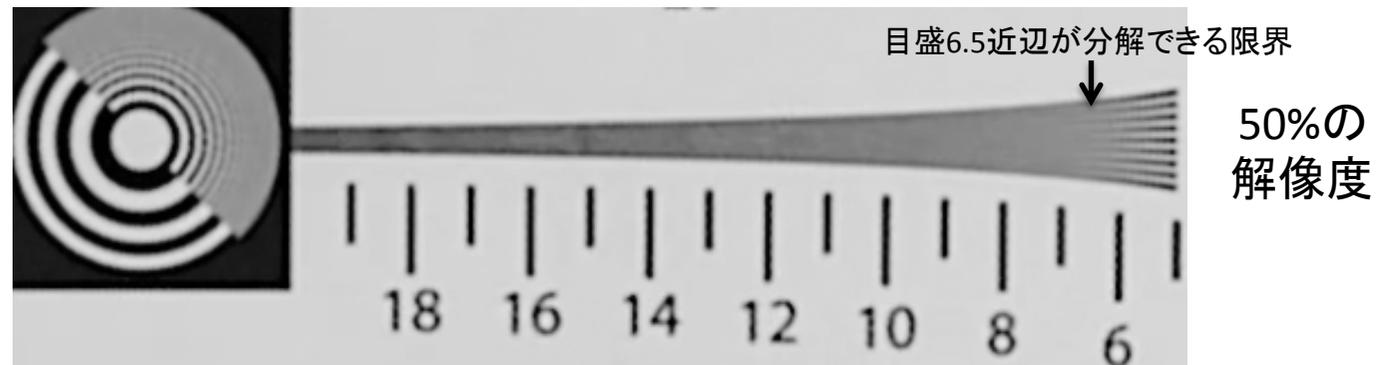


# 実験結果

- 前ページの処理を施すことで、出力画像の画素数に対して60%程度の解像度を達成した。



解像度チャートをLytroで撮影し、前ページの処理で高画素化した画像の例



解像度チャートをLytroで撮影し、Lytroアプリで出力した画像の例

# まとめ

- 2種類のライトフィールドカメラLytroとRaytrixについて解説した。
- Lytroの出力画像の解像度について解説した。
  - 第一世代Lytroの場合、マイクロレンズアレイの解像度から推定される画像解像度は、1080×1080画素の出力画像に対して、35%である。
  - Lytroアプリが出力する実画像の解像度は、出力画像の画素数に対して50%程度である。
  - 多視点画像からの超解像処理を施すことで、解像度を60%程度に向上させることができた。