



# コンピューターシヨナル フォトグラフィ

日浦慎作  
広島市立大学  
大学院情報科学研究科



# あらまし



- コンピュータショナルフォトグラフィとは？
  - デジタルカメラが実現したこと, しなかったこと
  - コンピュータショナルフォトグラフィとは何か？
- カメラと光線
  - レンズと光線の関係, ライトフィールドカメラ
  - 光線の記録と, デジタルリフォーカス
- 符号化撮像
  - カメラにおける積分と, その制御・設計
  - 符号化露光・符号化撮像と, その他の符号化
- 最近の話題



# カメラと写真制作



- 画像処理では嫌われるボケも、写真制作では重要な要素
- デジタルカメラは小型化によりボケの演出が難しくなっている





# デジタルリフォーカス



- 手持ちカメラで撮影した複数の画像から、背景や前景など任意の部分にピントを合わせ、それ以外をぼかすことが出来る



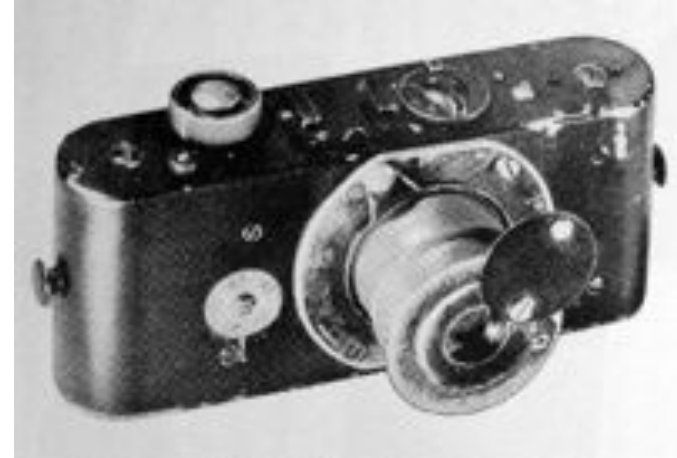
# 写真の歴史について



- 1839年 銀板写真の発明
  - 1900年 ロールフィルムの発売 連写
  - 1935年 カラーフィルムの発売
  - 1932年 35mm フィルムカメラ (ライカ)
  - 1930～50年ごろ 距離計連動カメラ
  - 1950～60年 一眼レフカメラの台頭 見たまま映る
  - 1960～70年 自動露出 自動化
  - 1977年 オートフォーカス
  - 1995年 デジタルカメラ(casio QV-10)
- ・ ・ 主に, 利便性の向上が主体



ロールフィルム（巻き取れる，つまり連写できる．映画撮影にも．）



最初のライカカメラ．映画用のフィルムを使う小型のカメラ．



Konica C35AF，通称「ジャスピコンニカ」．世界初のオートフォーカスカメラ．1977年．



カシオQV-10．デジタルカメラの爆発的普及のきっかけとなったカメラ．1995年発売．



# 銀塩カメラとデジタルカメラ



- 銀塩カメラと画像センサは、撮像方法（光を記録するための方法）が違っただけ
- 例：デジタル一眼レフ vs 銀塩一眼レフ



フィルム・デジタル共用カメラ  
Rolleiflex Hy6



一眼レフカメラ



# デジタルカメラが変えたもの



- フィルムが要らない，現像をしなくてよい
  - すぐに写真を見ることが出来る
  - フィルムや現像液などの材料コストがいらぬ
- デジタルデータであることの利点
  - 写真をネットワークで送ったり，公開することが容易
  - 複製・バックアップ，パソコンでの編集（レタッチ）が容易
- 変わらなかつたもの
  - 撮影時にピント合わせや露出の調整が必要
  - カメラはしっかり構え，ぶらさないようにしなければならない

→ 撮影の瞬間に仕上がる写真がほぼ決まってしまう

「撮影」という行為そのものはあまり変わっていない





# 「撮影」に関する取り組み



ライフログ用カメラ

- 画像処理・画像認識
- センサ技術
- 記憶デバイス



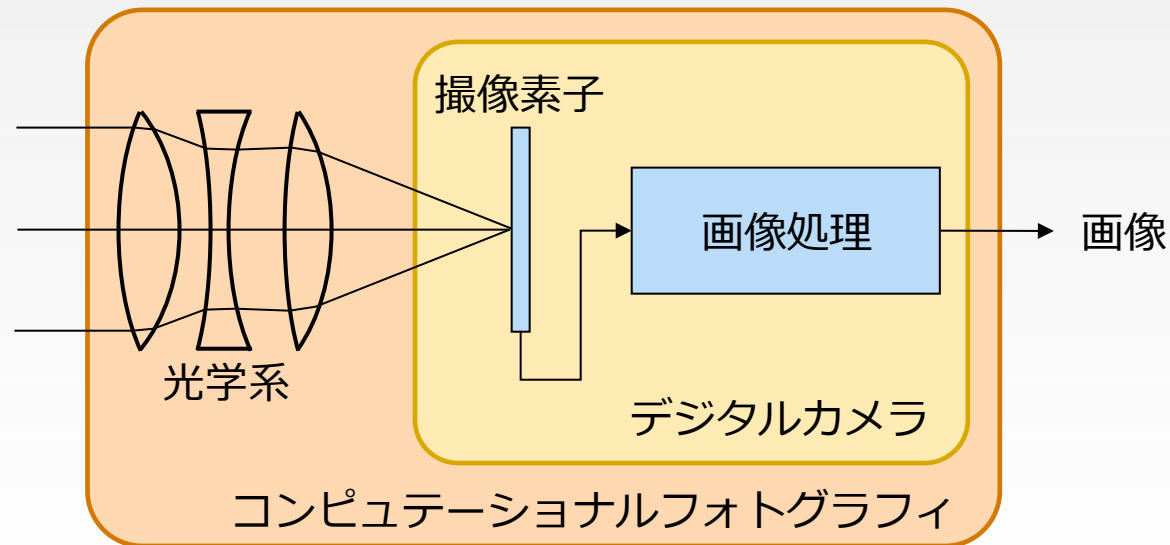
SONY Party-shot (顔検出, 笑顔判定 → タイミングと構図の自動化)



CASIO パスト連写 (連写による過去の画像の記録)

# コンピューターショナル フォトグラフィとは？

- 計算機技術による、カメラ進化の第二幕
  - 第一幕：フィルムを撮像素子で置き換え（デジタルカメラ）
    - 「レンズが結んだ像」を高精度にデジタル記録する
  - 第二幕：カメラ全体（光学系，使い方）の再定義・再構築
    - 計算（画像処理）の結果，初めて画像が形成される



コンピューターショナルフォトグラフィ技術が変えようとする範囲



フィルムカメラ



デジタルカメラ



# 何が新しいのか？



対象 (シーン)

光学的な工夫

光学系

撮像素子

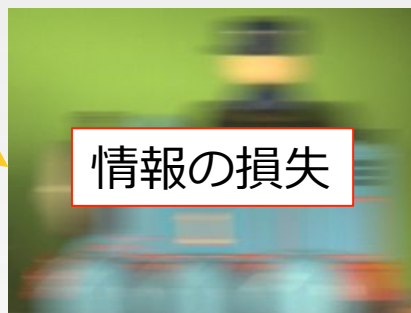
出力像

画像処理

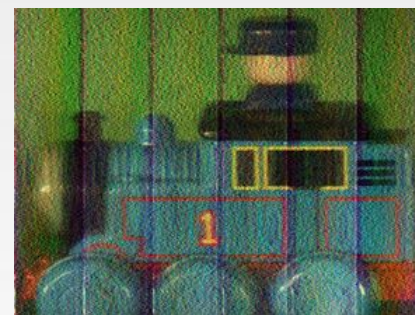


- 従来のカメラ
  - 像を形成する主役は光学系
  - 光学像≒出力像, と考える
- コンピュータショナルカメラ
  - 光学像は中間的な情報
  - 光学系は光分布の符号化装置
  - 復号結果 = 出力像, と考える

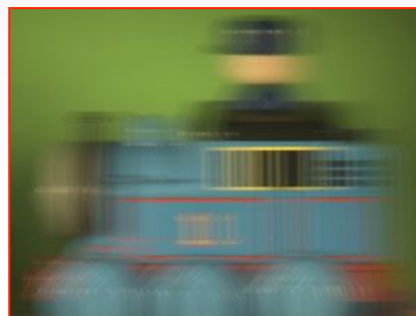
情報の損失



光学像



画像処理結果



光学像 (符号化)



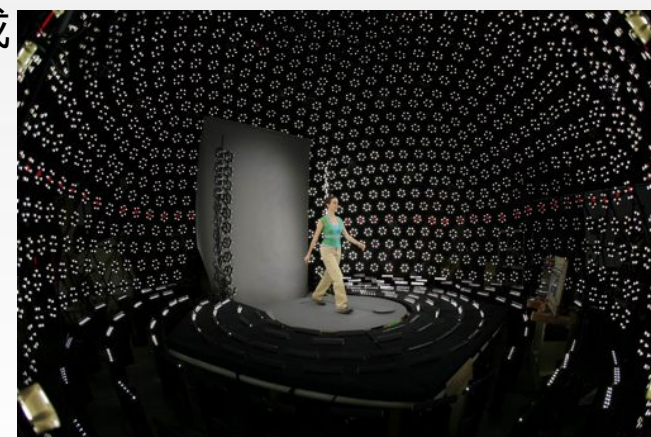
復号結果



# 画像と計算機に関する他の技術



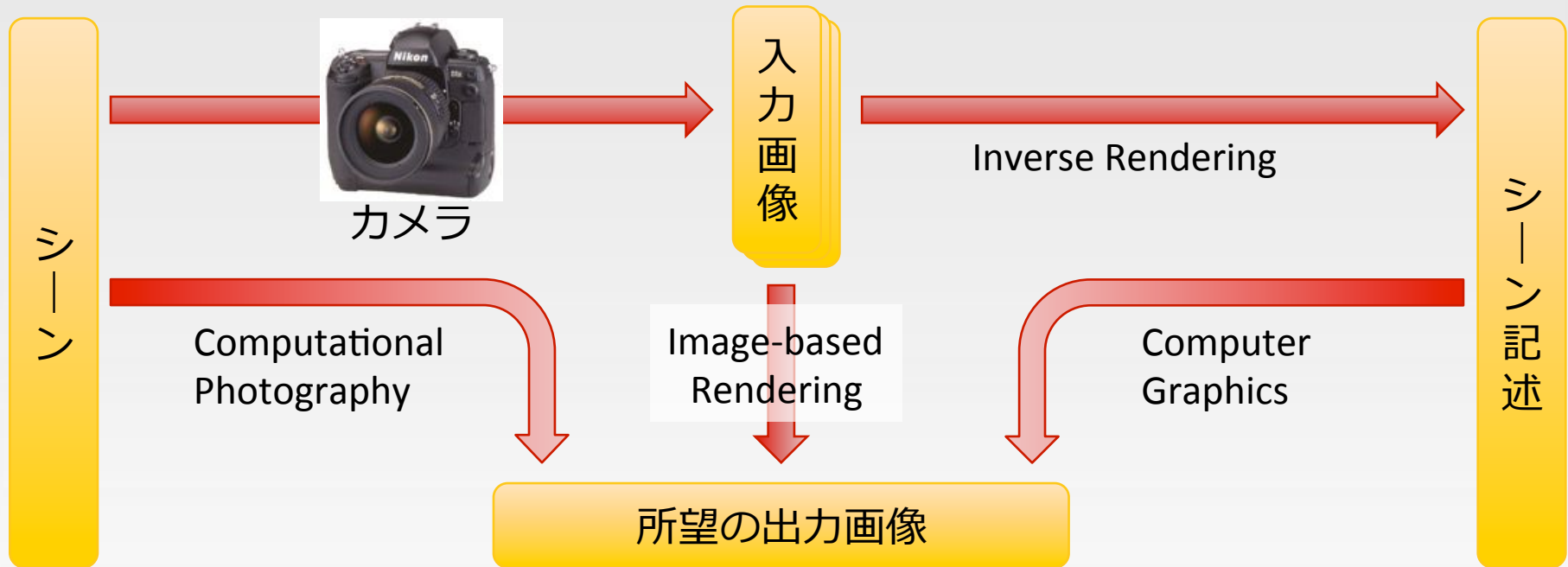
- コンピュータグラフィックス(CG)
  - モデル（対象や照明の記述）からの画像生成
  - 光の反射・伝搬現象のシミュレーション
- イメージベースドレンダリング(IBR)
  - (多数の) 画像からの画像生成
  - 様々な視点位置や照明条件における画像の生成
- インバースレンダリング(IR)
  - 画像からのモデルパラメータの推定
  - 対象物体の形状や表面特性, 照明条件の推定
- バーチャルリアリティ・複合現実感
  - 没入感を与えるためのデバイスや技法
  - 現実世界と生成像との合成・融合



Light Stage (Paul Debevec)



# CP vs. CG, IBR or IR



- コンピュータショナルフォトグラフィは
  - 必ずしも画像を入力とはしない.
  - レンダリング (出力) よりも, カメラ (入力) 指向.
- 訳語は? 演算撮像? (computational imaging)



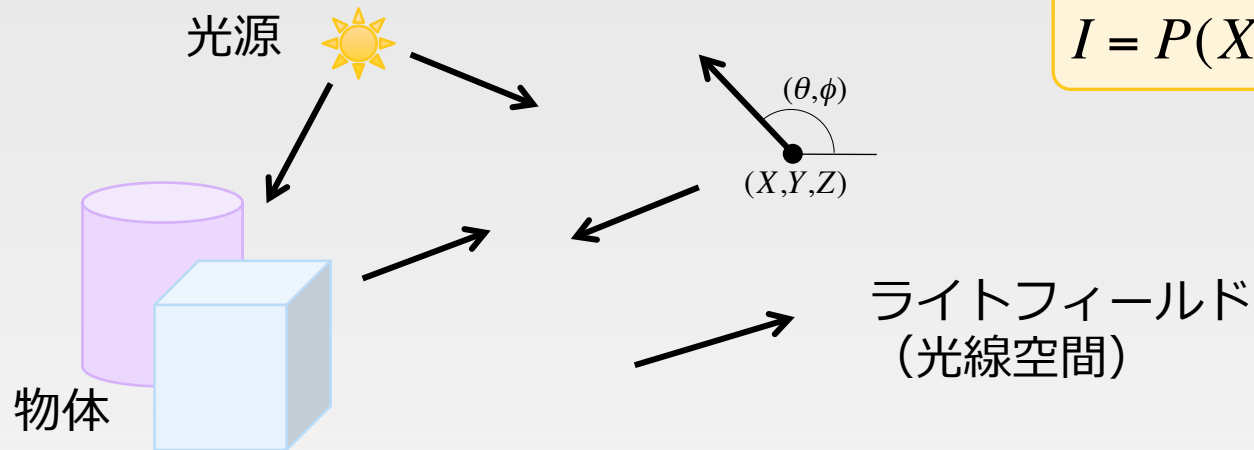
カメラと光線

符号化撮像

最近の話題



# カメラとは何か



$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t)$$

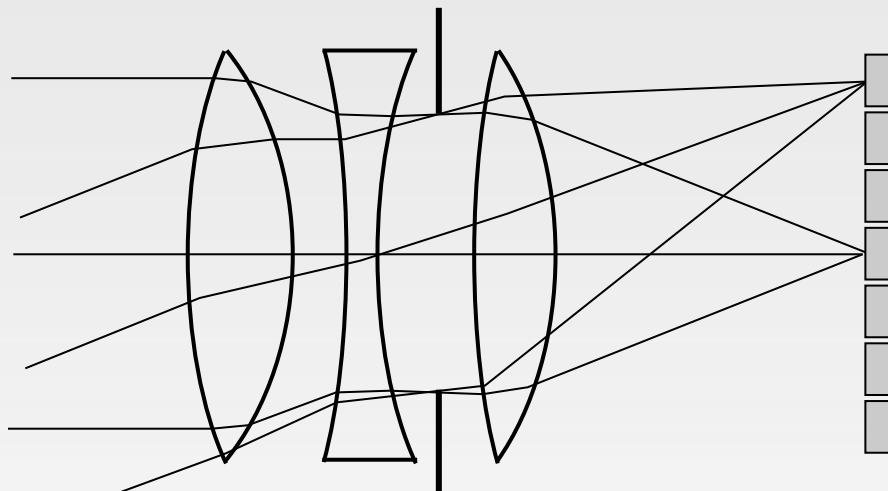
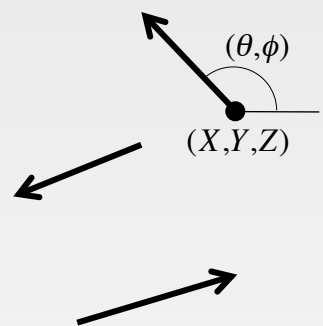
- カメラは、シーン中の光の分布を記録する機械である
- シーン中の光の分布を表すには？
  - 光線が通過する点の3次元座標：X, Y, Z
  - 光線がその点を通る方向： $\theta, \phi$
  - 通過する光線の波長（色に対応）： $\lambda$
  - 光線が通過する時刻： $t$
- これら7変数により表した、シーンの光源状況を表す関数  $P$  をプレノプティック関数という



# カメラにおける「積分」



$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t)$$



ライトフィールド (光線)

光学系 (レンズ)

撮像素子 (画素)

- カメラは入射する光を, 一定の範囲について積分する
  - 位置 ( X, Y, Z の範囲に対応 : 絞りの面積は0には出来ない)
  - 方位 (  $\theta$ ,  $\phi$  の範囲に対応 : 面積0の画素は作れない)
  - 波長 (  $\lambda$  の感光範囲に対応 : 特定波長だけの観察は出来ない)
  - 露光時間 ( t の範囲に対応 : シャッター速度は0に出来ない)
- 複数サンプルの計測 :  $\theta, \phi$ :画素数,  $\lambda$  : RGB, t : 連射 ・ ・ X, Y, Zは?





# カメラアレイ



The Stanford  
Multi-Camera Array  
(Marc Levoy  
@Stanford University)

- 複数の位置について  
光の分布を計測する装置

ProFUSION25 (ViewPlus, Inc.)





# カメラアレイの用途



- 自由視点映像生成
- 合成開口法によるぼけ生成



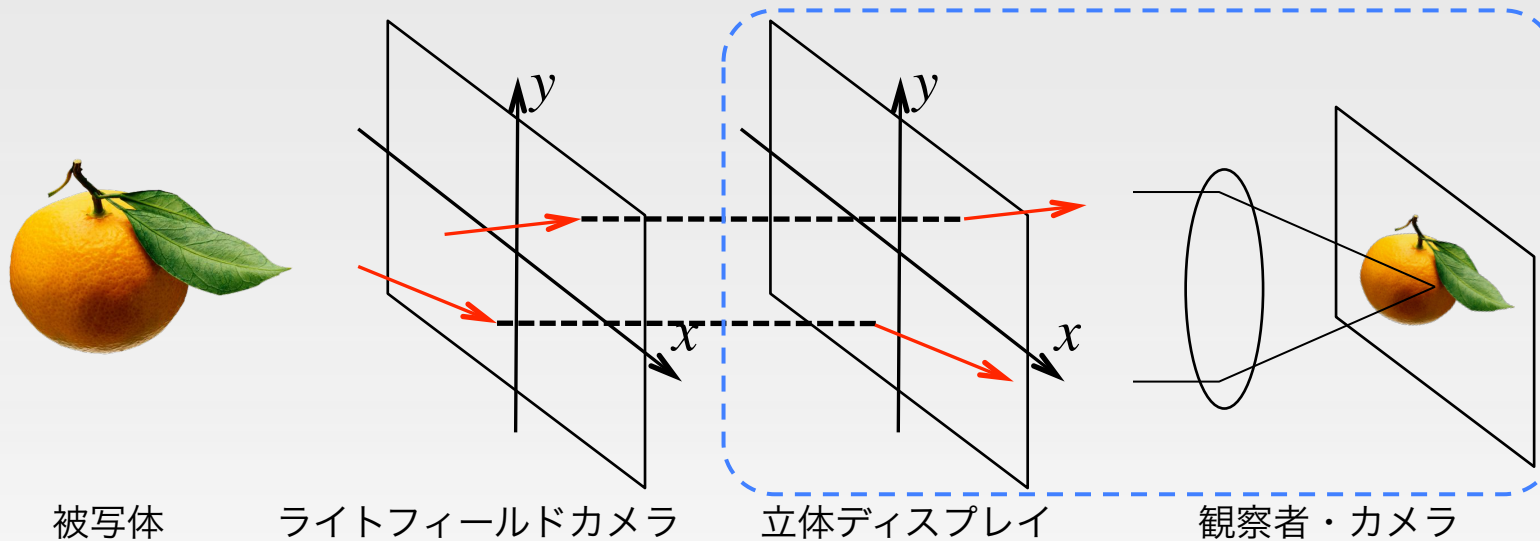
3次元ビデオ (松山研究室@京都大学)



合成開口法 (Vaish@Stanford)



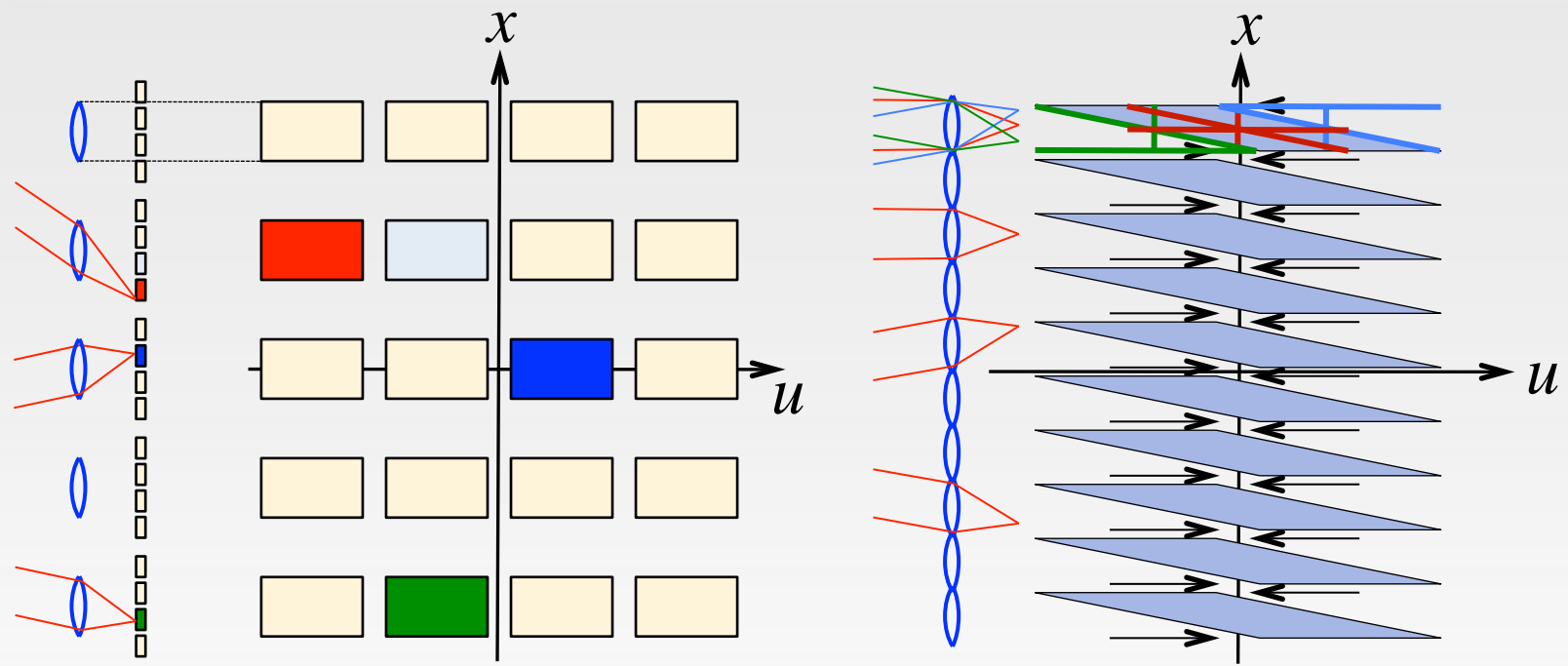
# 立体テレビの再撮影



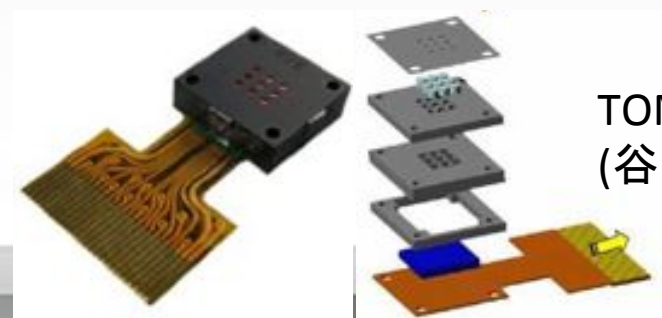
- 光線再生式テレビと、その画面の再撮影
  - カメラに入射した光線が完全に再生されていれば、その画面をカメラで撮影することで、視点位置やピントを合わせる距離などを自由に変更できる
- 自由視点映像生成やデジタルリフォーカス
  - 立体ディスプレイとカメラ（点線内）を計算機シミュレーションで実現
  - 被写体を事後的に自由に再撮影することができる



# 通常のライトフィールドカメラ



- カメラを単に並べただけの構成
  - 個々の画素は、ライトフィールド上では長方形領域に対応



TOMBO  
(谷田ら)



Freedom to Focus

Home

News / Press

Careers

About

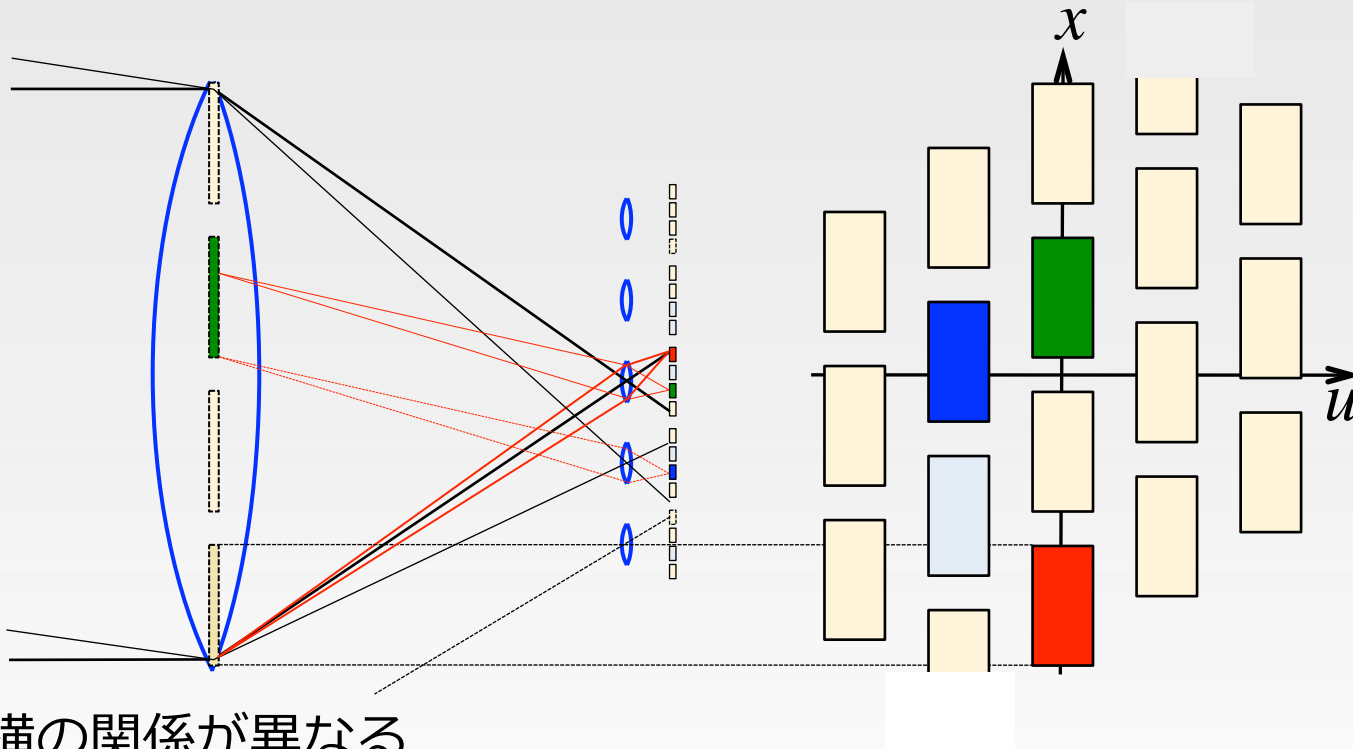
Contact



<http://www.pelicanimaging.com/>



# カメラ内にレンズアレイ



- 縦横の関係が異なる
  - 隣り合った画素は，開口位置が異なる．
  - それぞれの小レンズは，受光する方位が異なる．
- 隙間のないライトフィールドの取得に向く．リフォーカシング向け．



# Plenoptic Camera

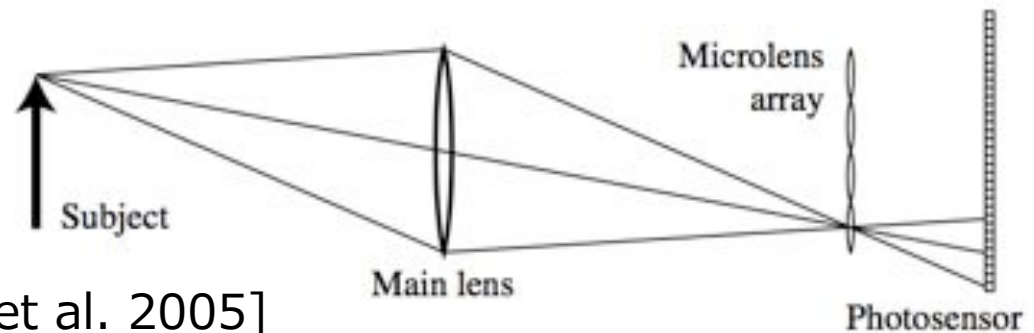


Hand-held Plenoptic Camera  
(Ren@Stanford)



Heterodyne Light Field Camera  
(Raskar@MERL)

- 撮像素子に工夫することで、複数視点からの映像を得る
- レンズの「どこ」を通った光かがわかる



[Ren et al. 2005]



(a)

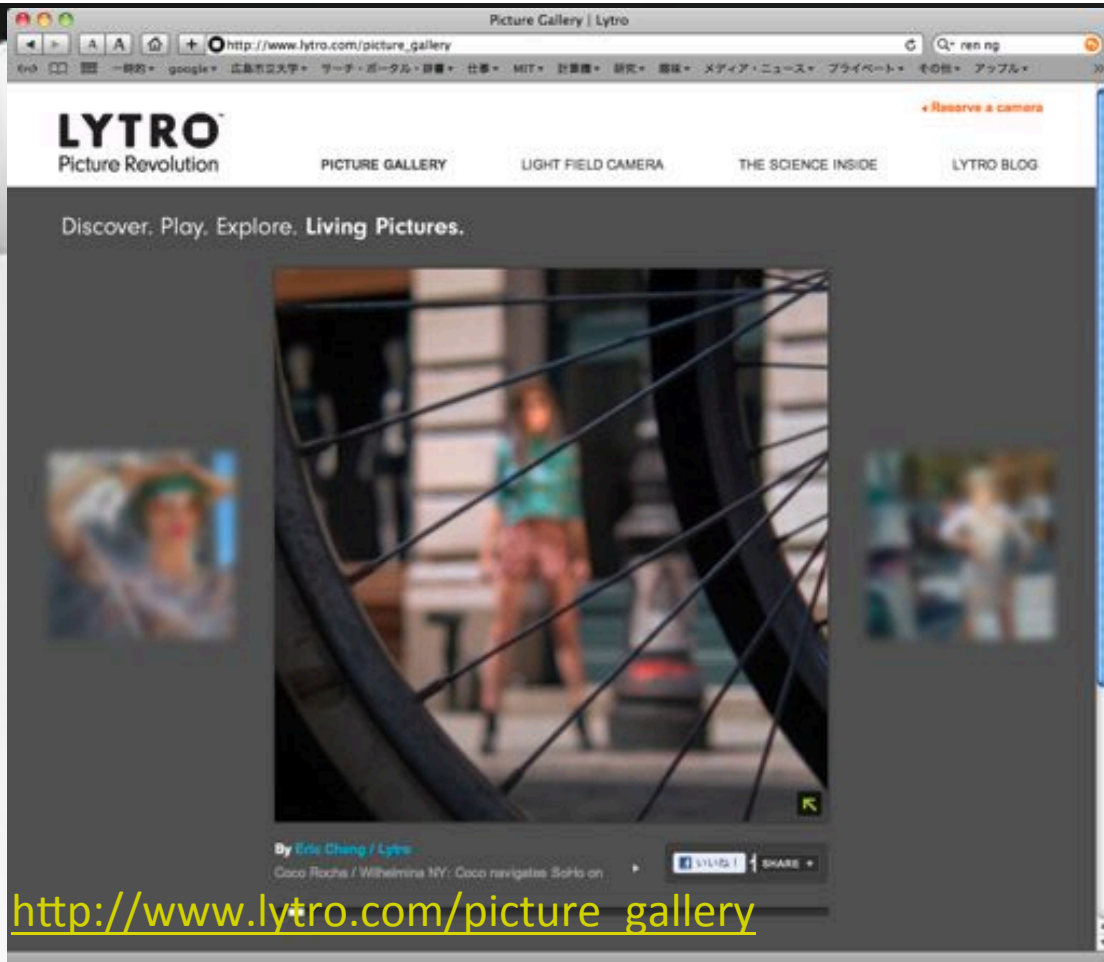
(b)

(c)

(d)

[Ren et al. 2005]

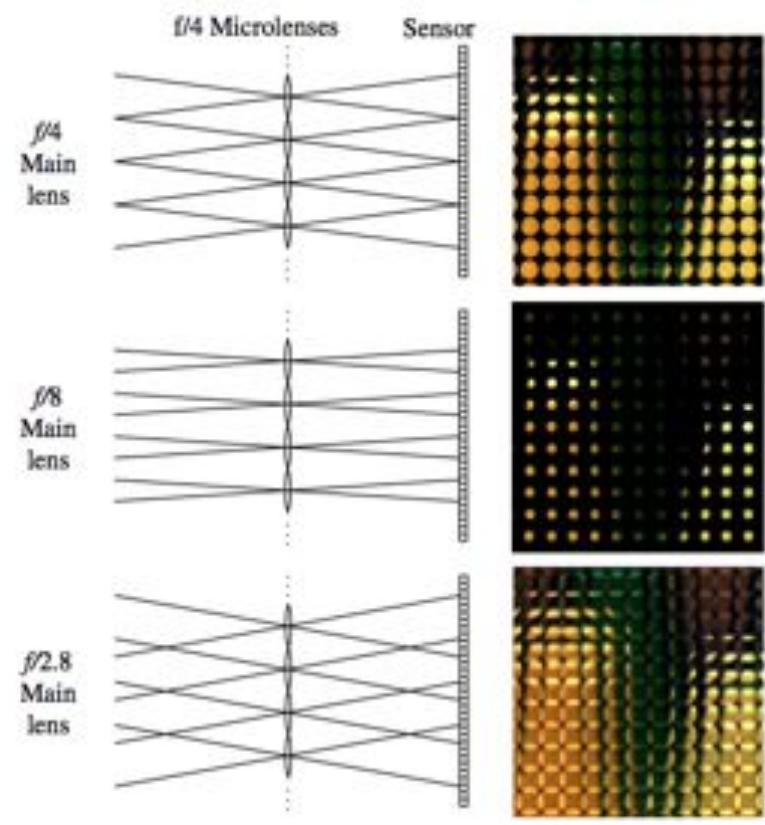
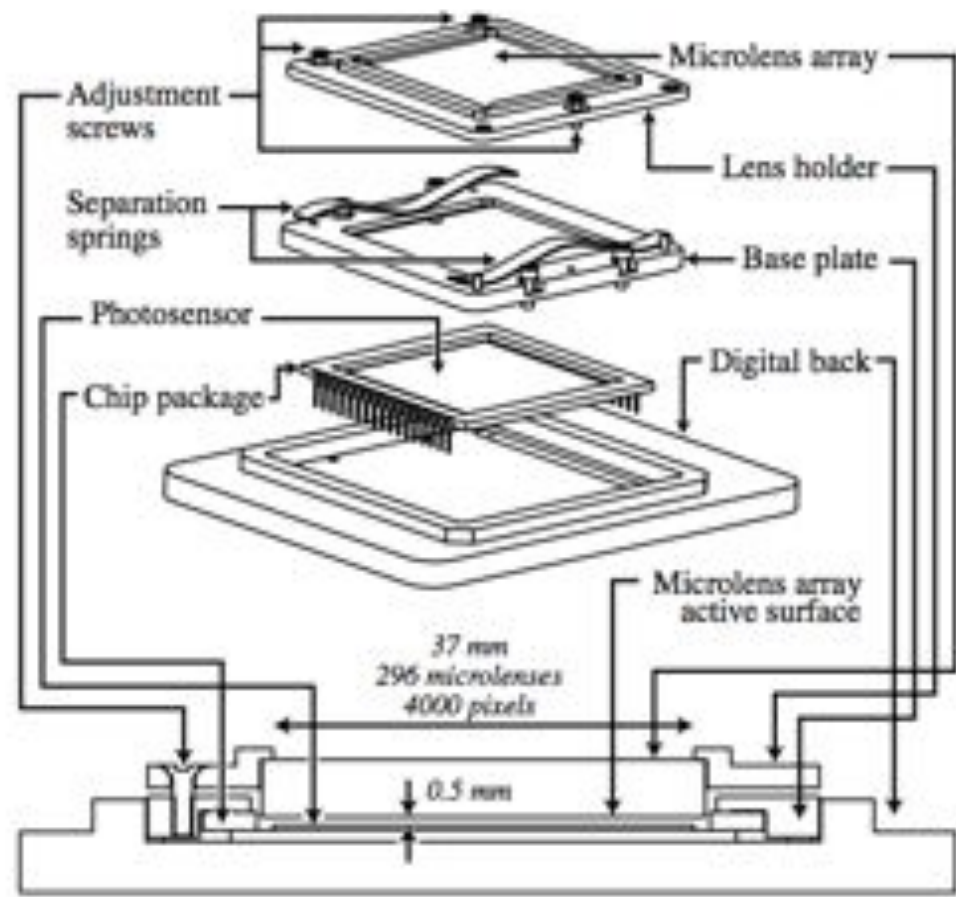








# マイクロレンズ方式



[Ren et al. 2005]

- Ren Ng らの, マイクロレンズを用いたプレノプティックカメラ



# 撮像素子の多画素化



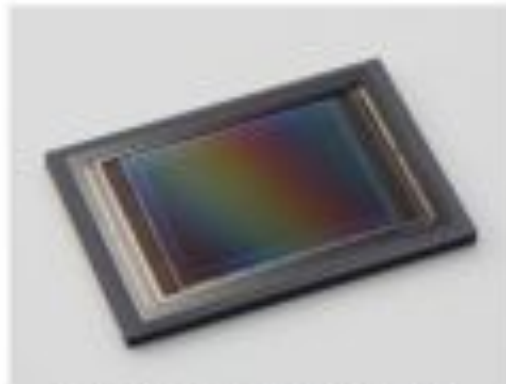
- キヤノンは1億2000万画素のセンサを開発（以下のニュースリリース）

## ◆ ニュースリリース

2010年8月24日  
キヤノン株式会社

### APS-Hサイズで世界最高の約1億2,000万画素の CMOSセンサーの開発に成功

キヤノンは、APS-Hサイズ<sup>\*1</sup>で、世界最高画素数<sup>\*2</sup>の約1億2,000万画素（13,280×9,184画素）のCMOS（相補性金属酸化膜半導体）センサーの開発に成功しました。



約1億2,000万画素CMOSセンサー



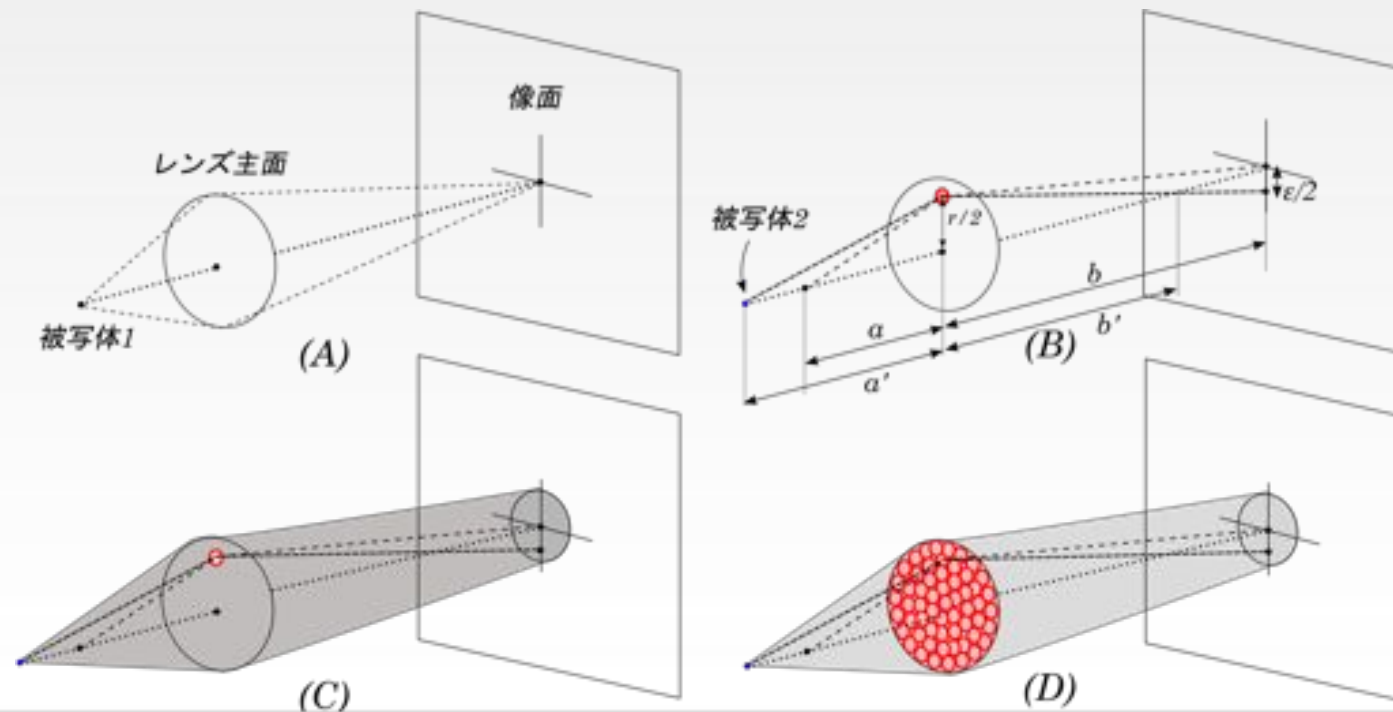
# 合成開口撮影法



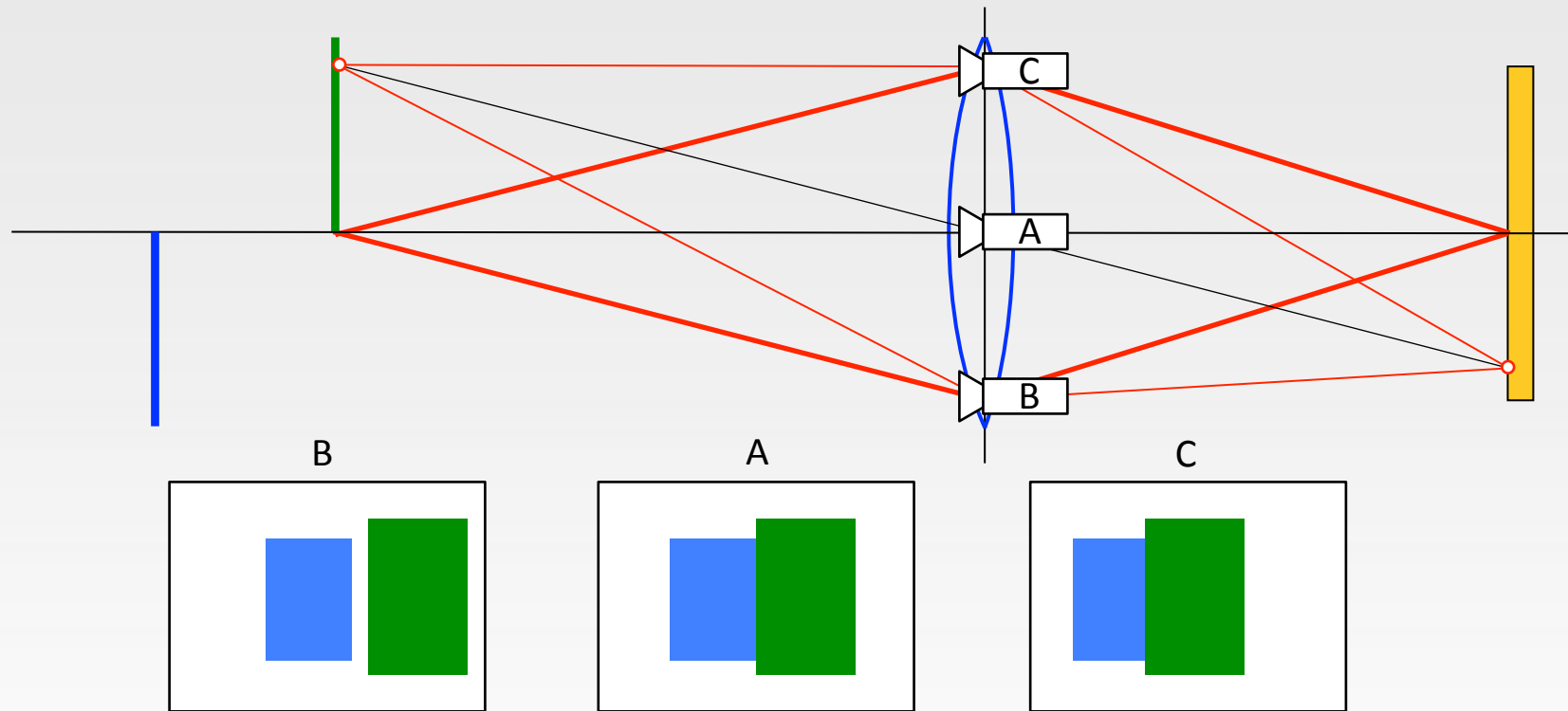
- レンズは「口径内を通過した光」を平面上に投影する装置



- 口径を細分化して撮影し、計算により平面上に重ねあわせ
  - 「ぼけ」と「視差」は、もとは同じ現象



# なぜぼけが生じるのか



- レンズの大きさによる「視差」がぼけの要因
  - 被写体をレンズ口径内の異なった位置から見ている
  - 奥行きによって視差が異なる
- ピント合わせとは、特定の奥行きに対する「視差のキャンセル」



# 合成開口法の画像処理(1)



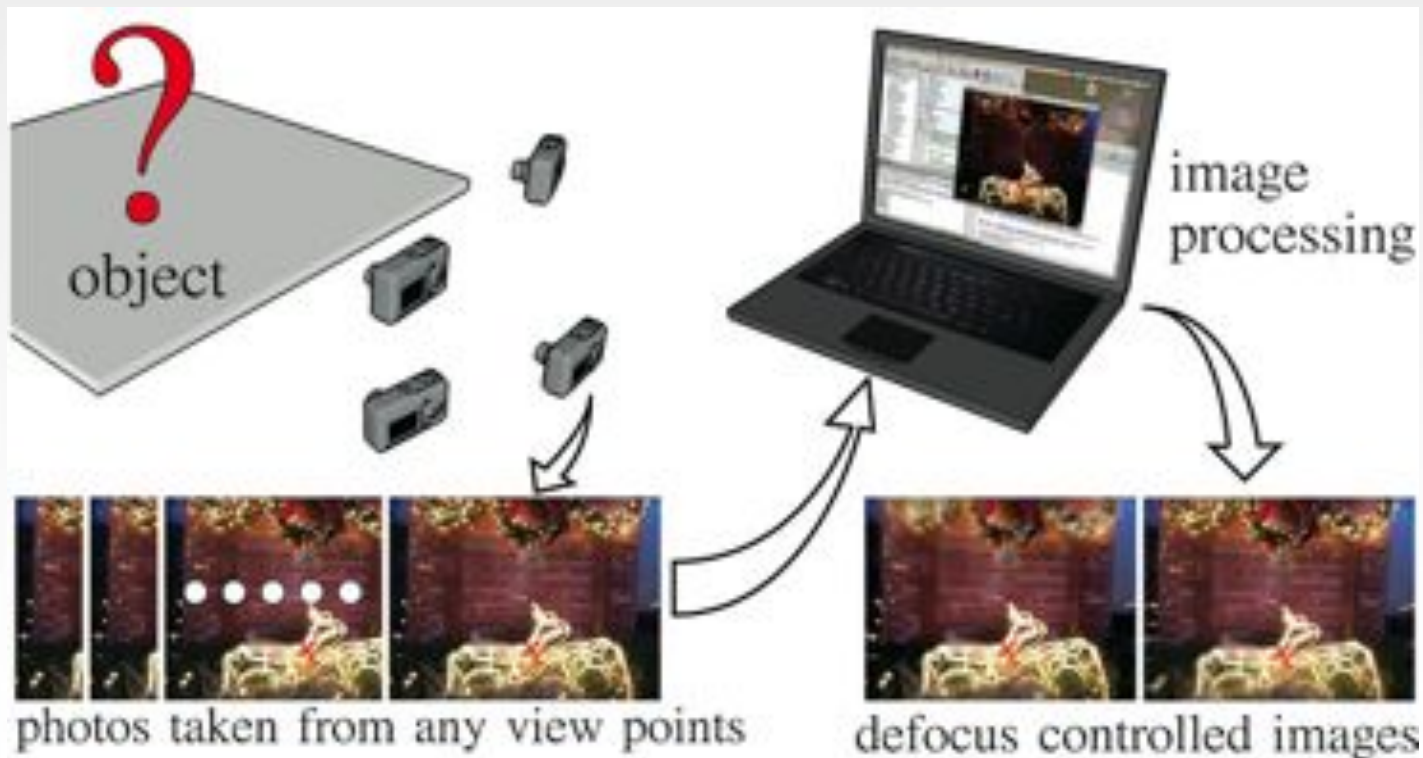
- 光軸が並行なステレオカメラ  
プレノプティックカメラ  
では、画像処理は簡単
- ピントを合わせたい距離の視差がゼロになる  
ように（ずれがないように）重ね合わせるだけ
- ずらし量を変えることでピント位置を変えられる
- 画像の枚数が十分多ければ、ぼけらしくなる



# 手持ちカメラによる合成開口



- 専用の装置を必要としない合成開口法
  - 一般の小型デジタルカメラにより手持ちで連射した多視点画像から画像処理によってきれいなぼけを作り出す
    - ・ 視点位置が不明
    - ・ 光軸が平行でない
    - ・ 画像撮影枚数が少ない

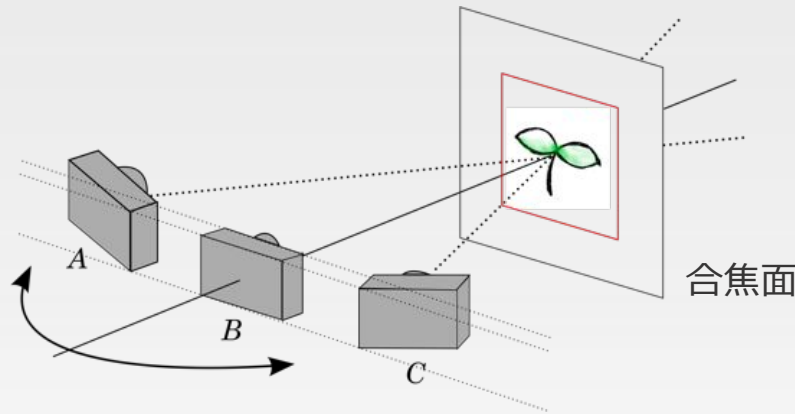


楠本@阪大,  
MIRU(2008),  
CVPR(2009)

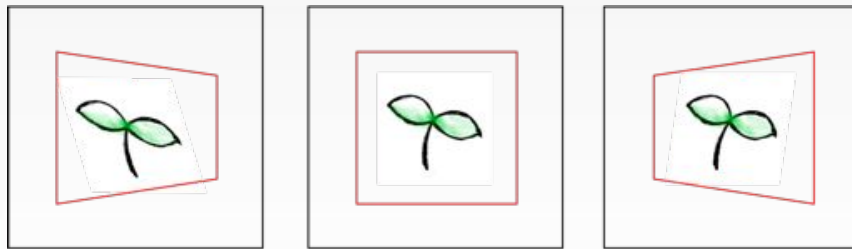


# カメラ位置姿勢の変化による 画像変形の補正

## ■ 手持ちによる撮影の問題（1）



カメラ姿勢の光軸に対する回転



撮影画像上の合焦面の形状・スケール

合焦面のみかけの形状が  
同じである保証がない

カメラ位置姿勢による変形の  
補正が必要

各画像間の合焦面に対して  
平面ホモグラフィを計算



ホモグラフィ変形により  
合焦面の視差を補正

# 撮影画像枚数が少ないことによる 不連続・不自然なぼけ

焦点面が合うように重ね合わせた結果



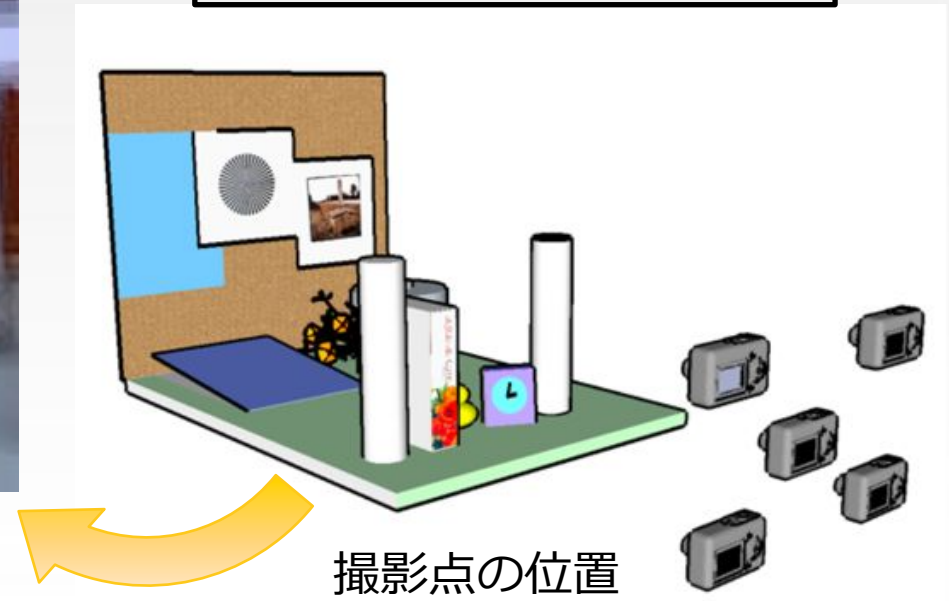
5枚の画像の重ね合わせ(前景に焦点)  
 ○合焦面は鮮明      ×背景は見苦しい

## ■ 手持ちによる撮影の問題 (2)

ぼけ部分に輪郭線が出現



撮影点の間隔が広すぎる

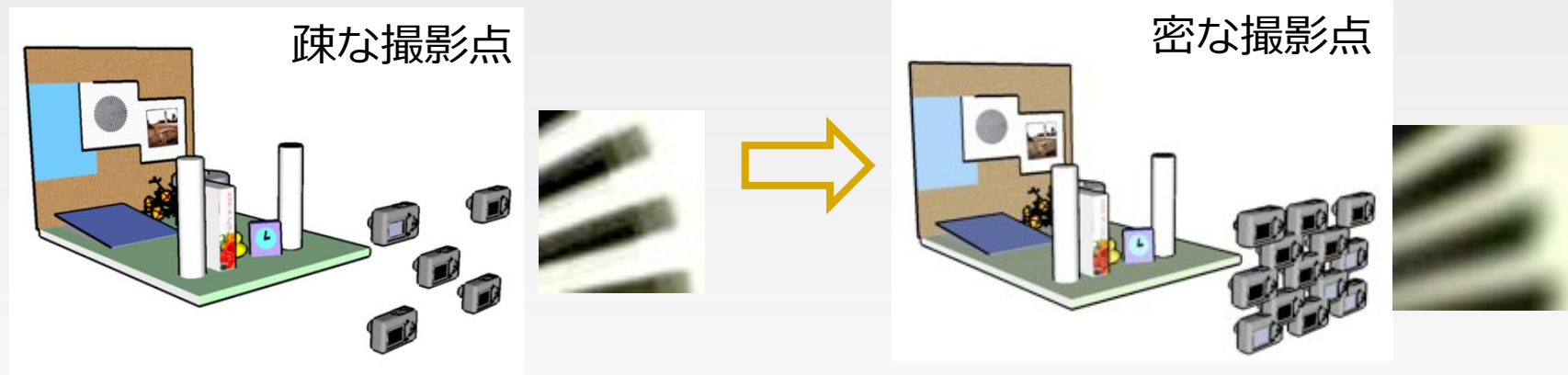




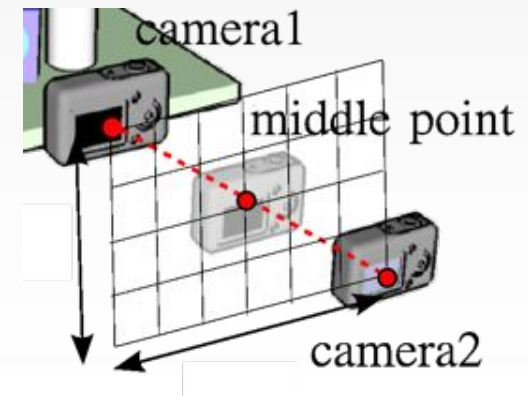
# 補間画像によるぼけ品質の向上



- 撮影画像間の中間画像を作成
  - 中間画像で補間することで滑らかなぼけを実現  
= 疎な撮影点を密に補間

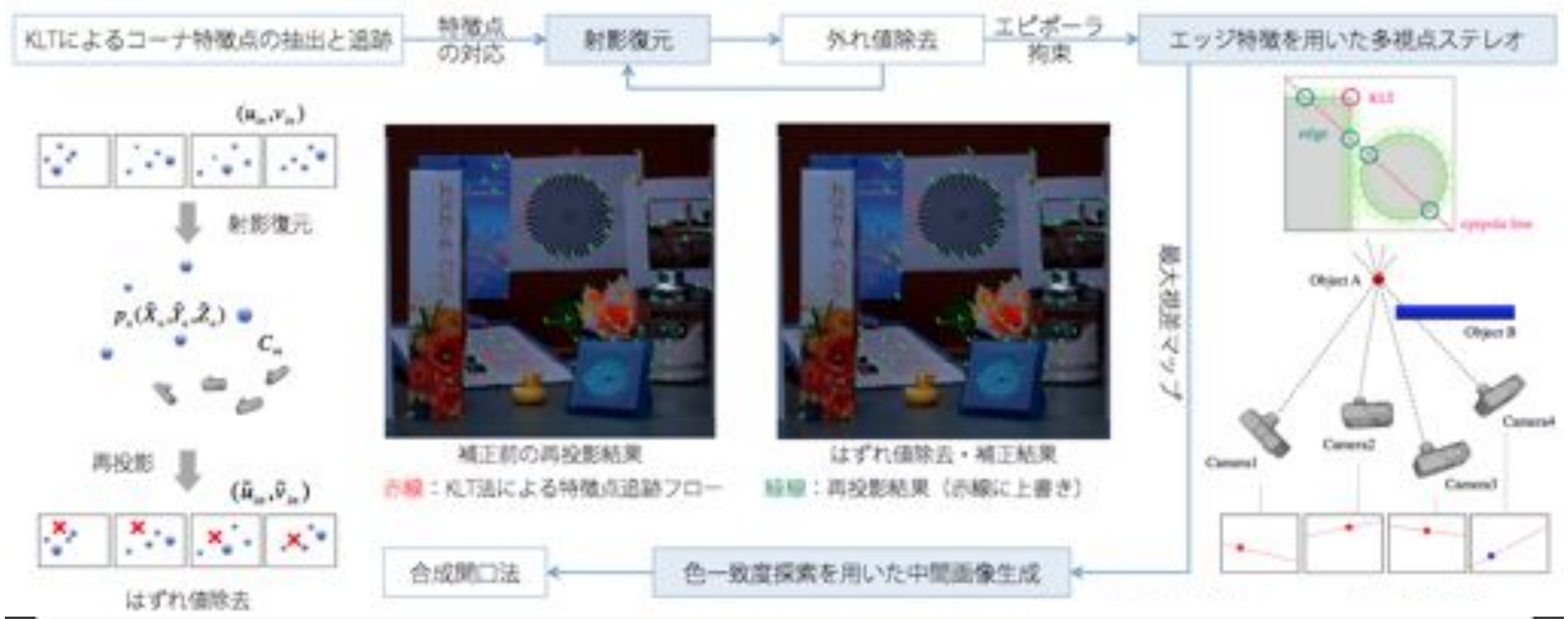


- 撮影画像間の視差から相対的な撮影位置を推定
  - 補間画像のための撮影点を相対的に設定
- 撮影画像から補間画像を作成
  - モーフィング技術を応用





# シーン解析の高精度化



- コンピュータビジョン技術を用いた高精度化
  - 射影復元 (未校正ステレオ法)
  - 多視点ステレオ
  - 色一致度探索



# シーン解析の高精度化



ドローネー網による領域分割

最大視差マップ

KLTによる  
追跡可能特  
徴点からの  
結果



エッジ特徴  
点による追跡  
可能特徴点  
からの結果





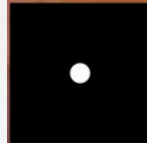
# デジタルリフォーカス



- 手持ちカメラで撮影した複数の画像から、背景や前景など任意の部分にピントを合わせ、それ以外をぼかすことができる



# PSF変更によるぼけ味の調整





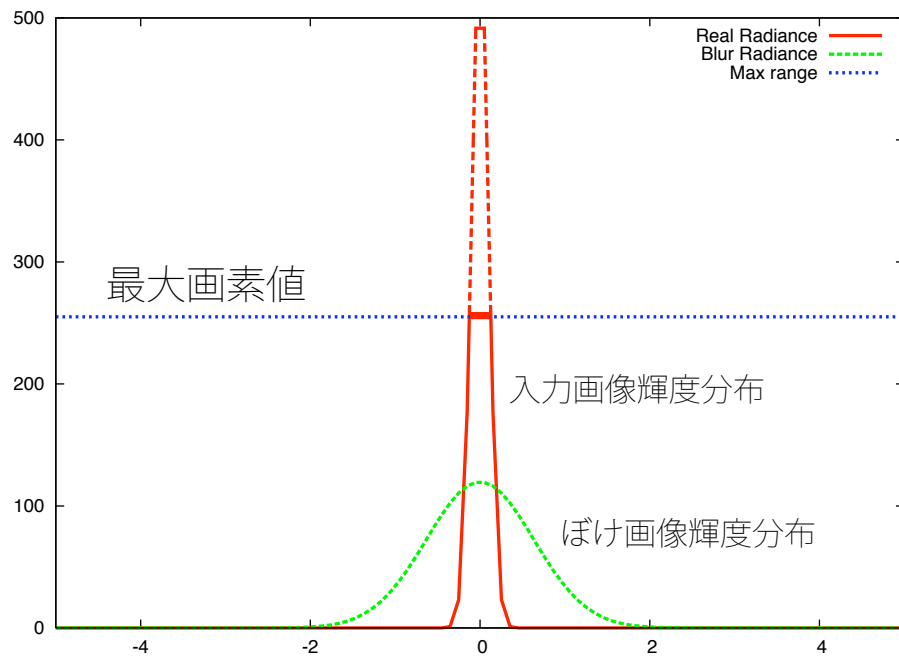
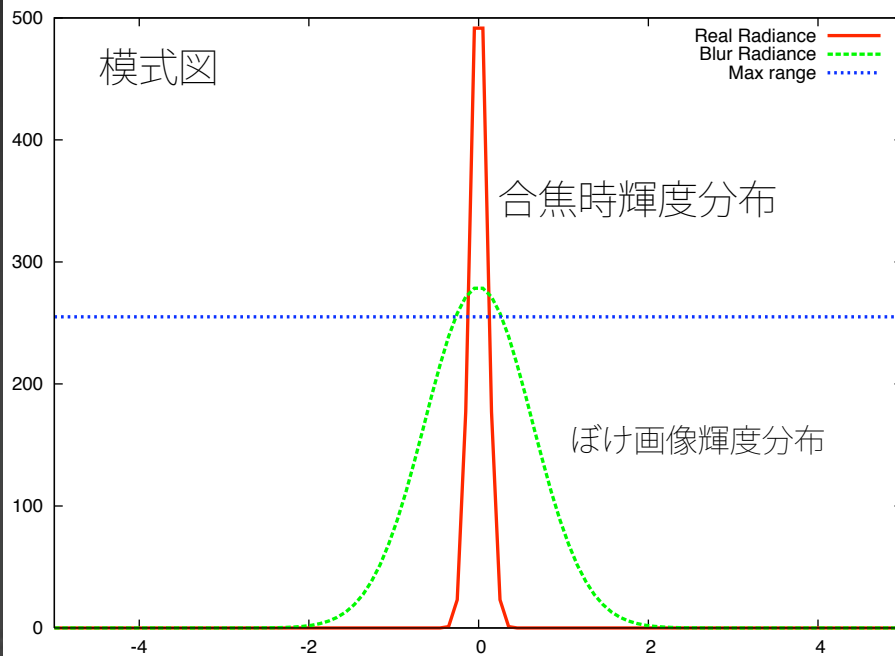
# 光量の飽和とぼけ



大口径レンズによる実際のぼけ



絞りを絞って撮影した画像と計算によるぼけ







# 露光の違いとヒストグラム



長時間露光画像



短時間露光画像



各画像のヒストグラム

- 一般に、点光源などは白飛び（飽和）してしまう
- 短時間露光画像では白飛びがない代わりに鑑賞に耐えない

# 実験結果



光量の復元無し



位置合わせ+光量復元結果（提案手法）

- 点光源のぼけがくすんでしまうことなく、くっきり、色鮮やかになる



カメラと光線

符号化撮像

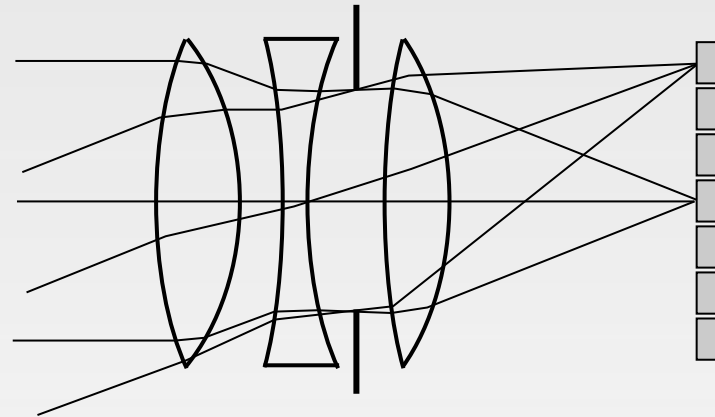
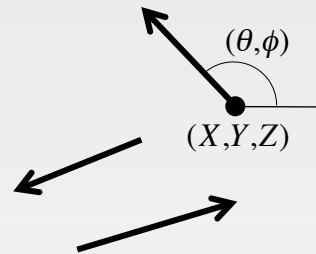
最近の話題



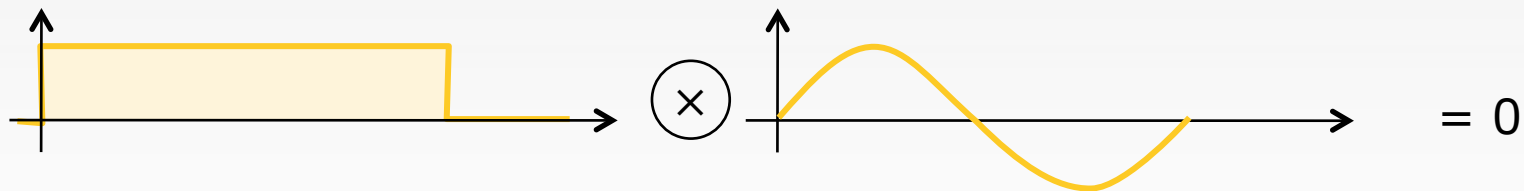
# 「積分」を再考する



$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t)$$



- 積分により, 情報の一部が失われる
  - 積分区間にちょうどn周期が収まるような周波数の情報は失われる

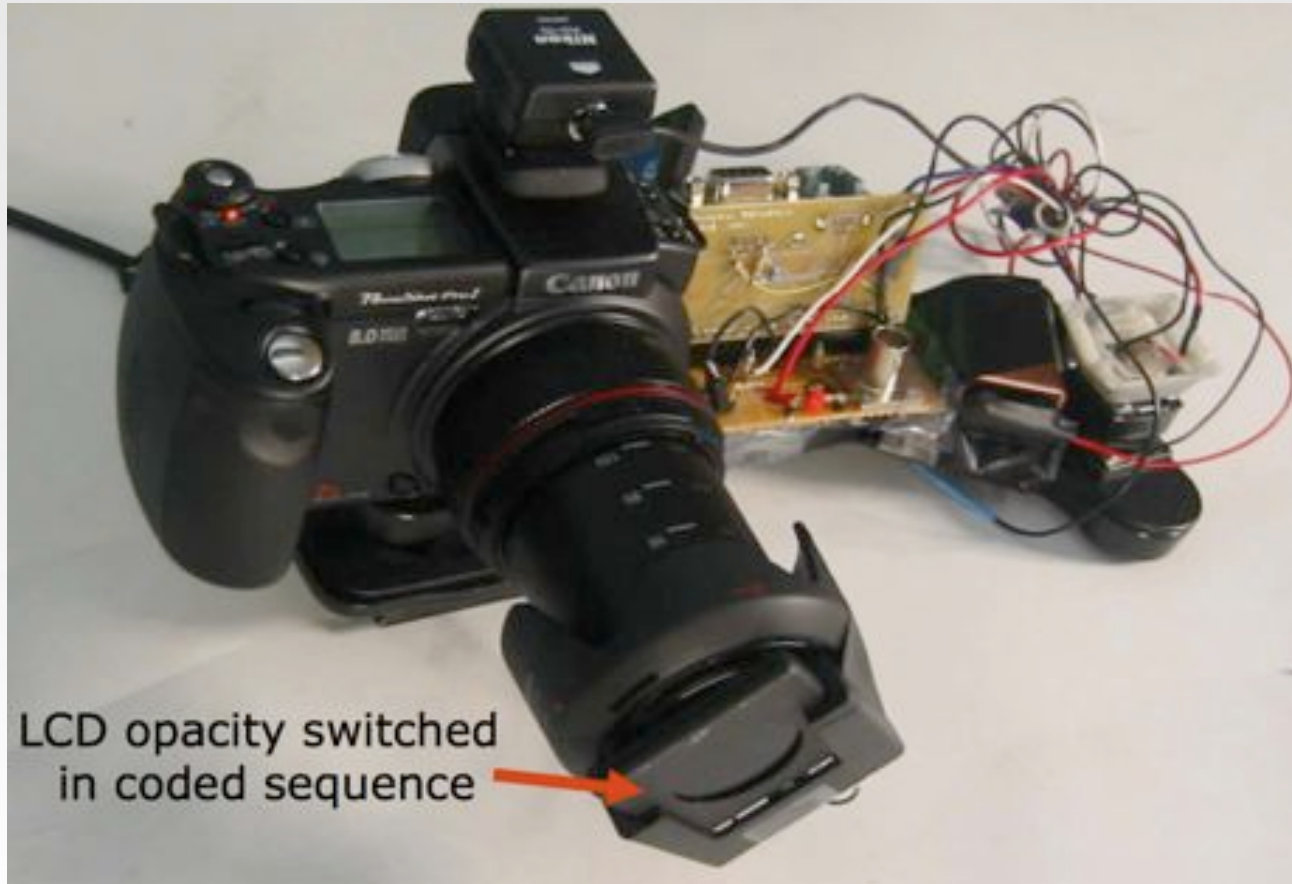


- 露光時間内の被写体のぶれ
- 距離の違いによるぼけ

$$\int_0^{2\pi} A \sin(nt) dt = 0$$



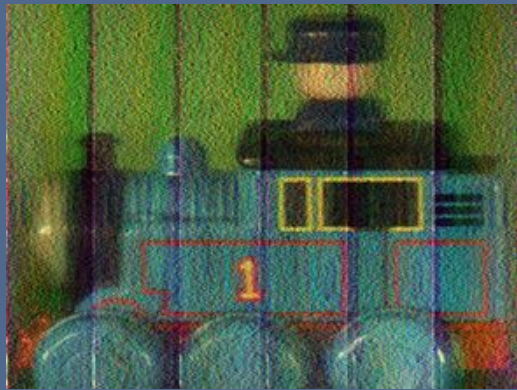
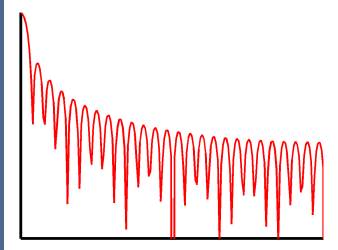
# Coded Exposure



Flutter Shutter Camera (Raskar@MERL)

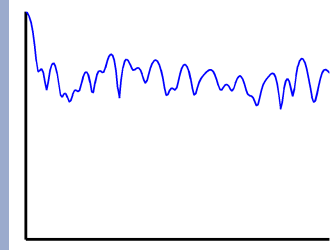
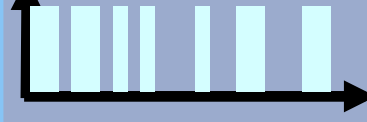
- 符号化露光：露光を時間軸方向に符号化

Traditional



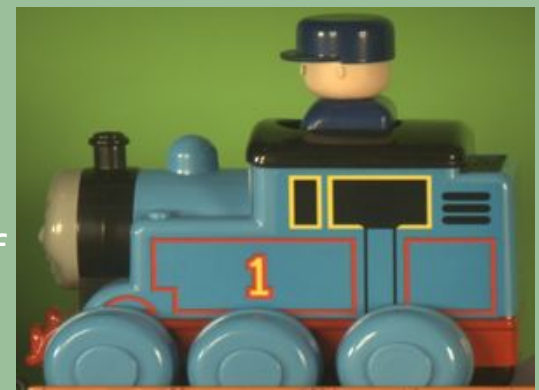
Deblurred Image

Coded Exposure



Deblurred Image

Image of Static Object

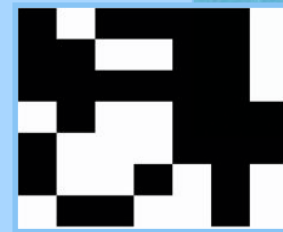


## Coded Exposure



Temporal 1-D broadband code:  
Motion Deblurring

## Coded Aperture



Spatial 2-D broadband mask:  
Focus Deblurring

# 画像のぼけ除去



⊗



=



ぼけ関数

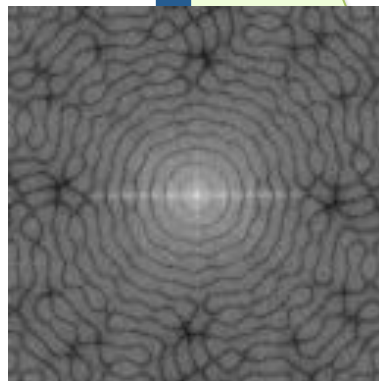
復元画像

フーリエ変換

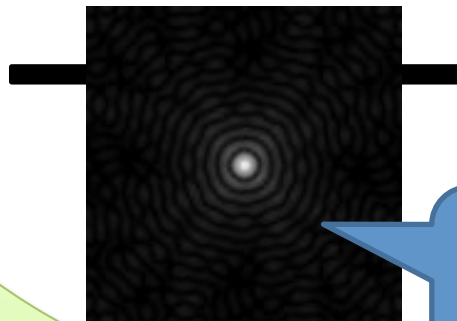
ぼけ画像

フーリエ変換

逆フーリエ変換



=



- ・ゼロ成分があると除算できない
- ・値が小さいとノイズに弱い

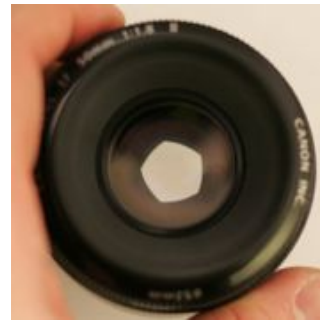


# 符号化開口

- カメラの絞りの部分を符号化し、ぼけ関数を制御

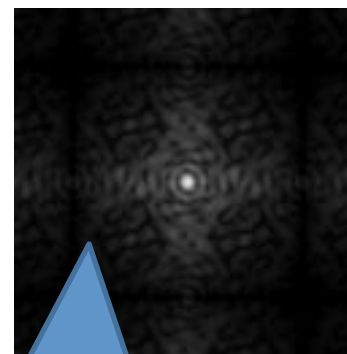
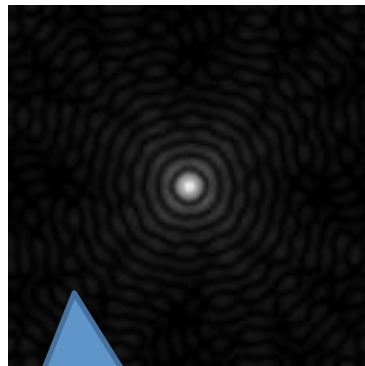
円形開口

符号化開口



フーリエ変換

フーリエ変換

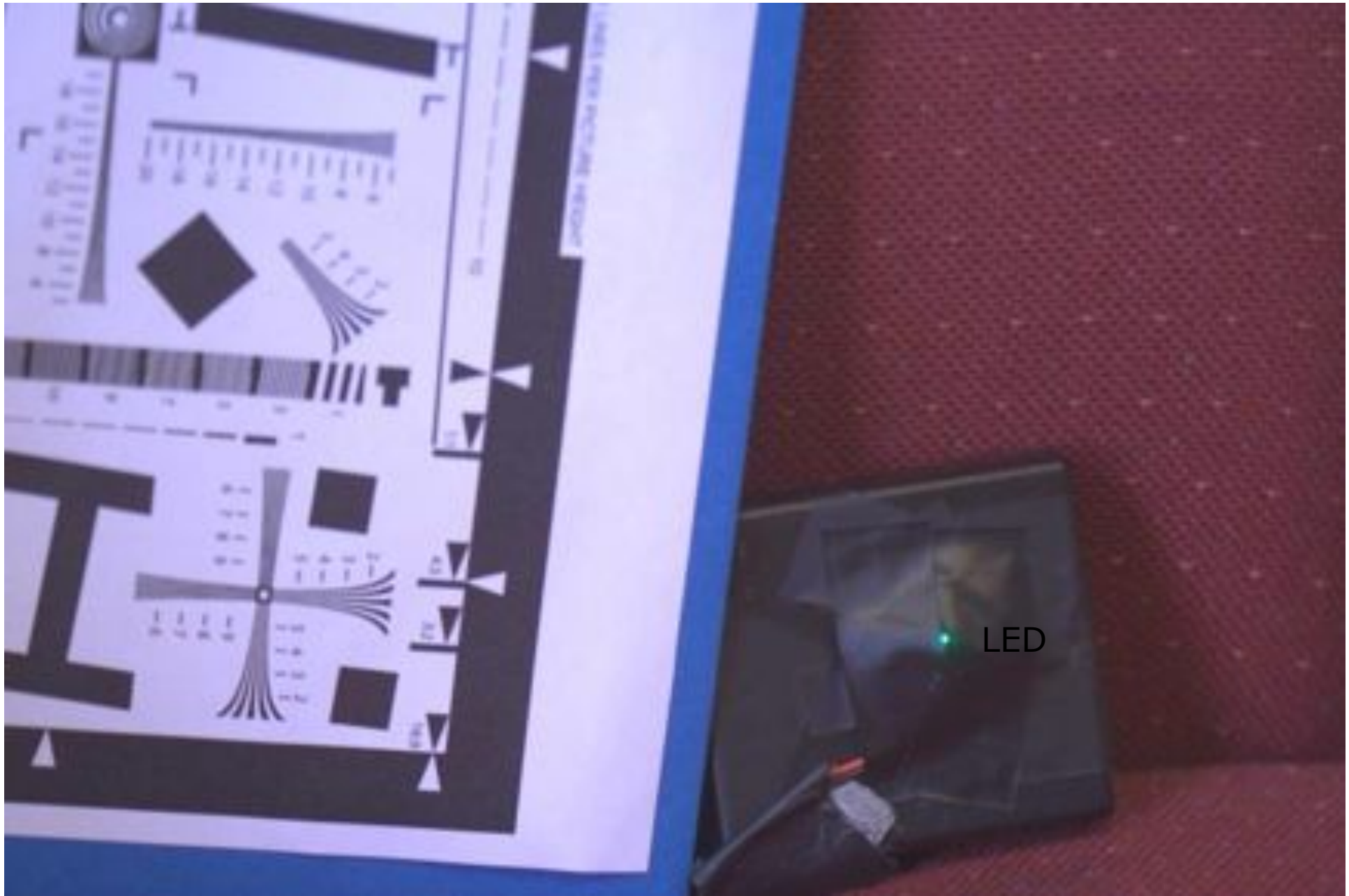


0に近い値が多い

ぼけ除去結果

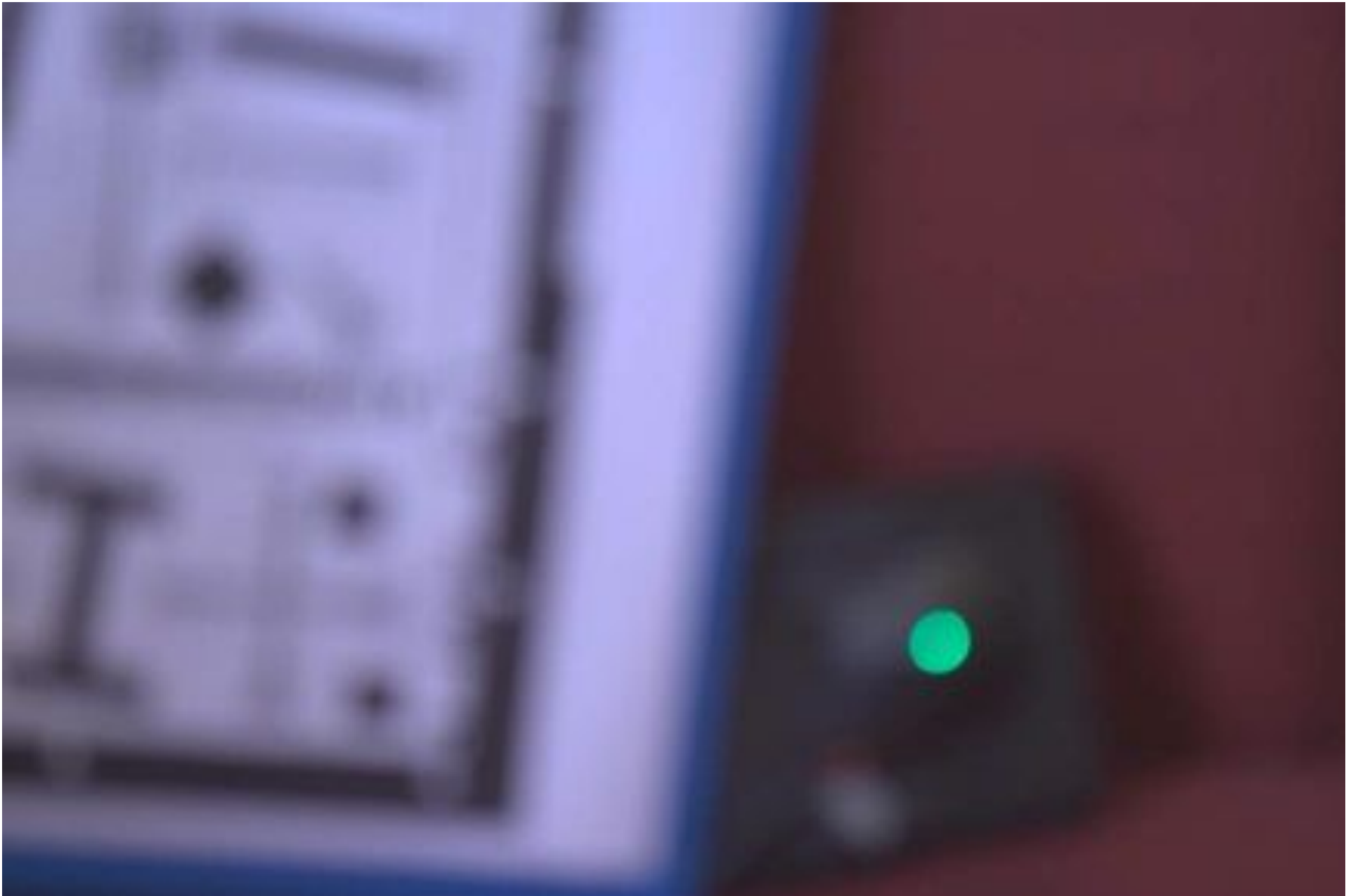
0に近い値が少ない

ぼけ除去結果



# In Focus Photo

Slide by R. Raskar



Out of Focus Photo: Open Aperture

Slide by R. Raskar



# Out of Focus Photo: Coded Aperture

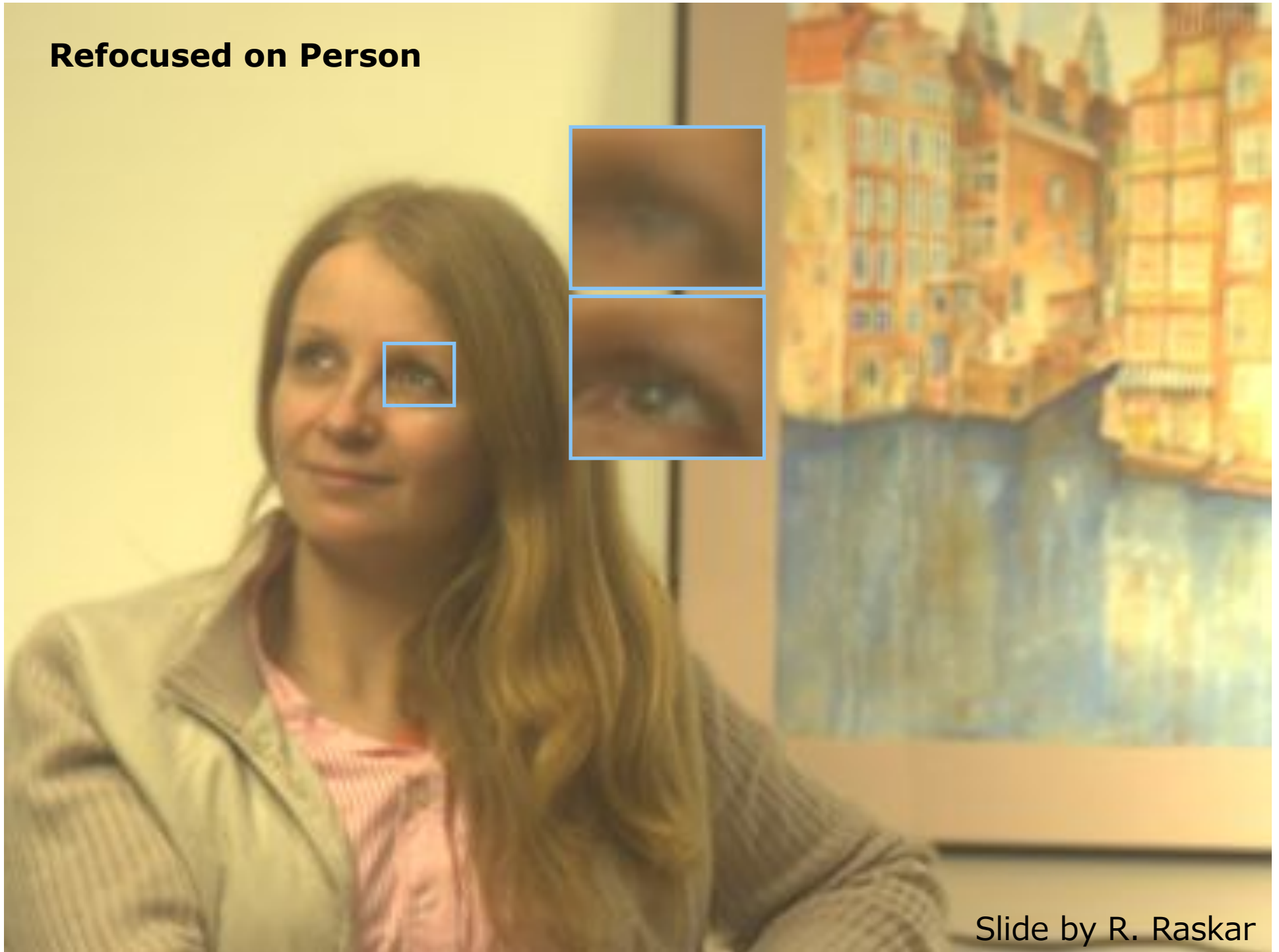
Slide by R. Raskar

Captured Blurred Photo



Slide by R. Raskar

# Refocused on Person



# 多重フォーカスカメラと符号化開口を用いた実時間距離画像計測

京都大学大学院 情報学研究科

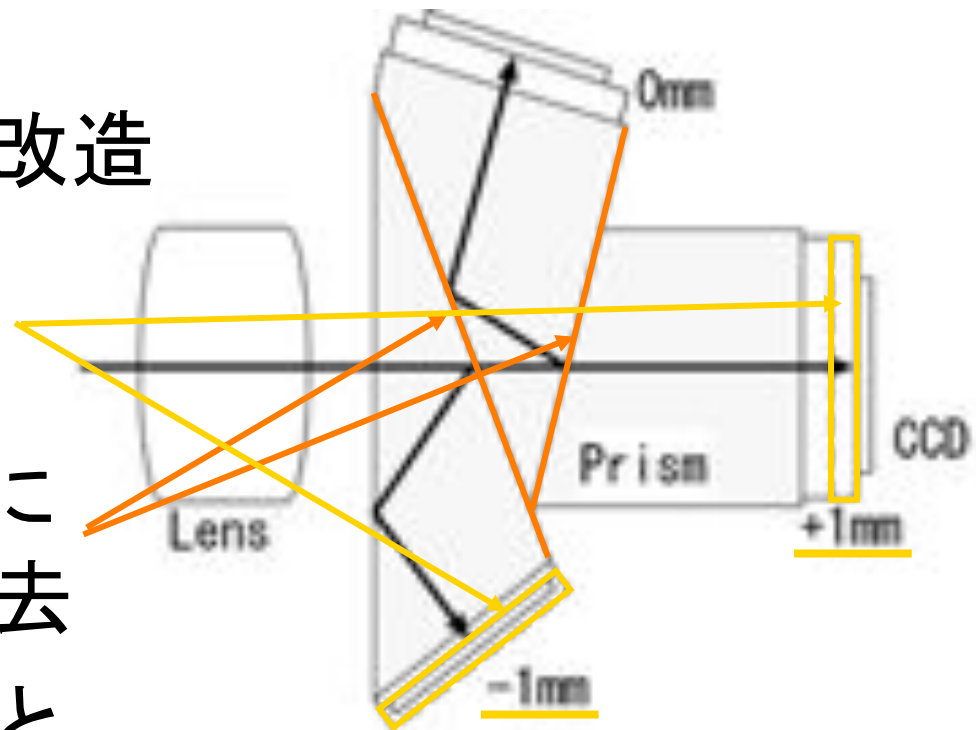
日浦慎作\* 松山隆司

(\*現 大阪大学大学院 基礎工学研究科 (1999年)

第5回画像センシングシンポジウム (1999年)

# 多重フォーカスカメラの構造

- カラーCCDカメラを改造
- 各CCDを1mmずつ光軸方向に移動
- プリズムの再蒸着による分光特性の除去
- 通常の3CCDカメラと同等の寸法／重量

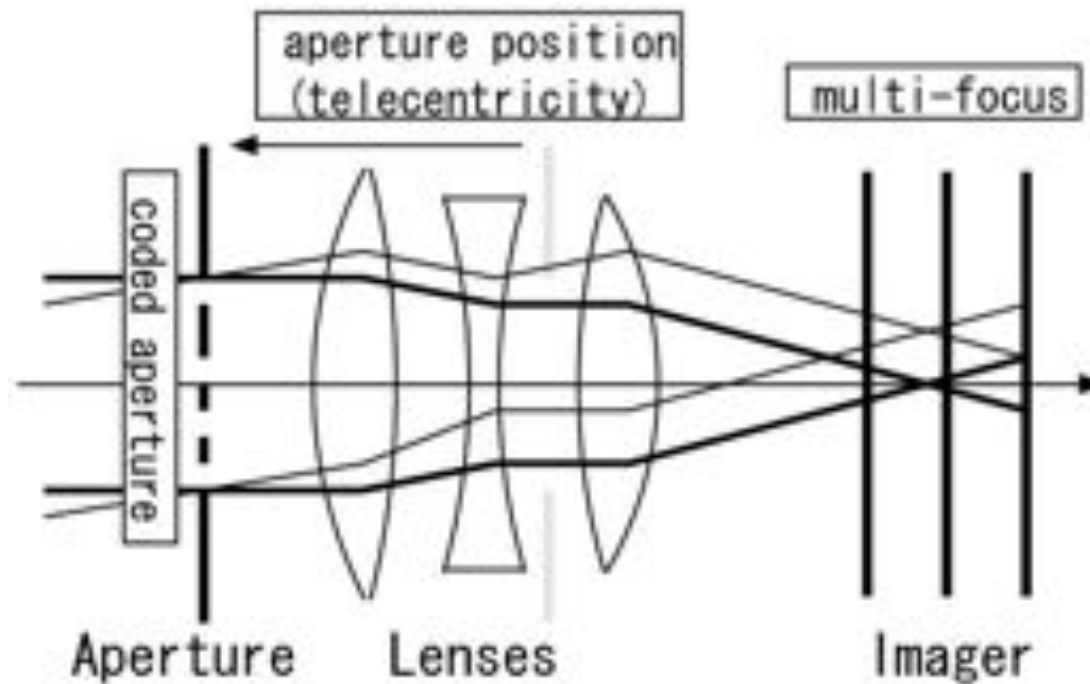




# Depth from Defocus の問題点

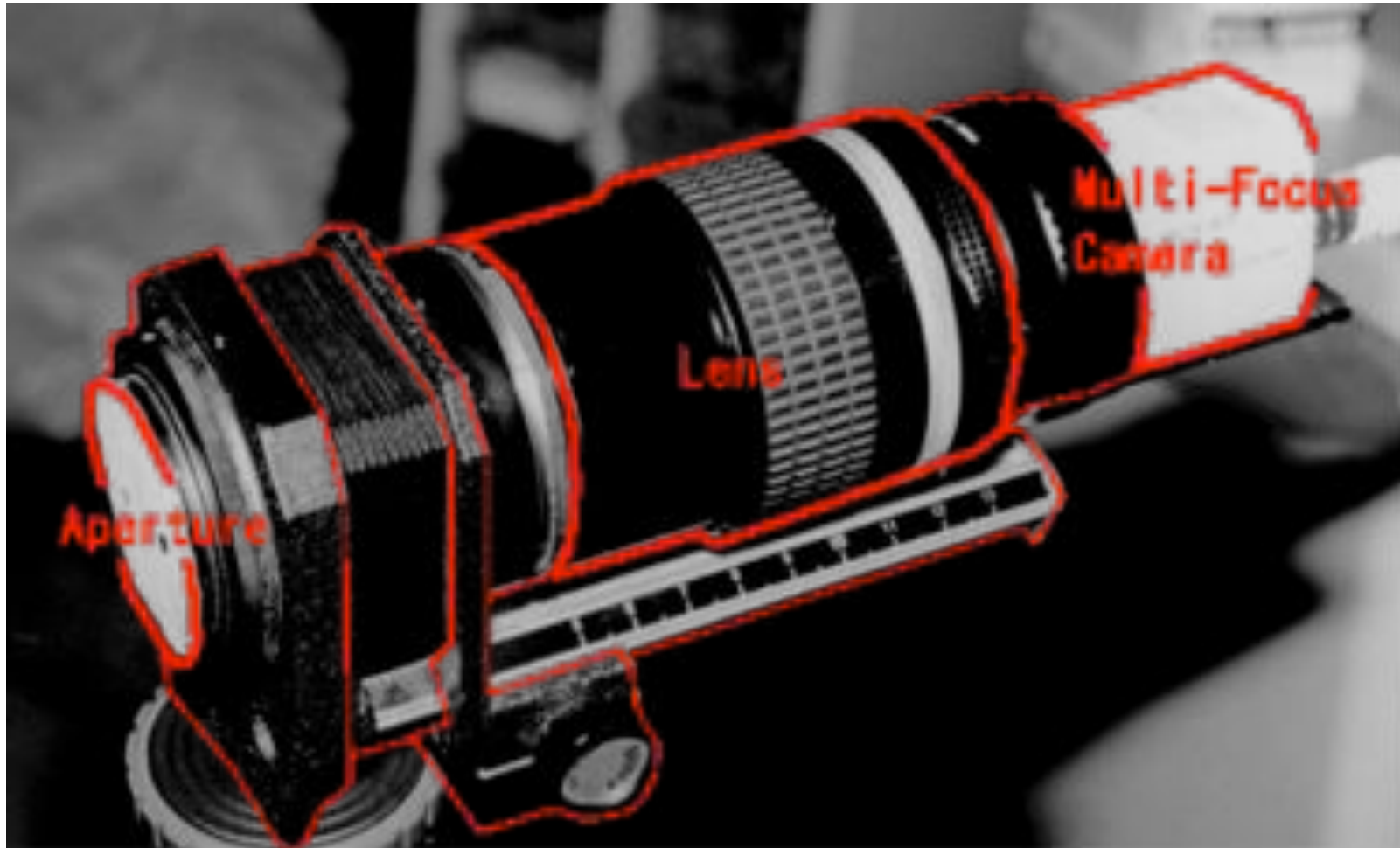
- ぼけ現象(=LPF)により画像上の情報が欠落
  - 距離計測の安定性が低く, 高品質な(ノイズの少ない)画像が必要  
例:Nayar らは 256 枚の画像を入力/加算
  - テクスチャの種類や機器の調整に敏感
- ぼけ現象の性質を, 解析に適するように最適化すれば, 安定性が向上する可能性がある  
→瞳形状の構造化

# 構造化瞳を持つ 多重フォーカスカメラの構成要素



- ぼけカーネルは瞳形状と相似な図形
- カーネルの縮小率は被写体距離に応じて変化

# 構造化瞳を持つ多重フォーカスカメラ





# 開口の符号化による効果



# 実験・入力画像

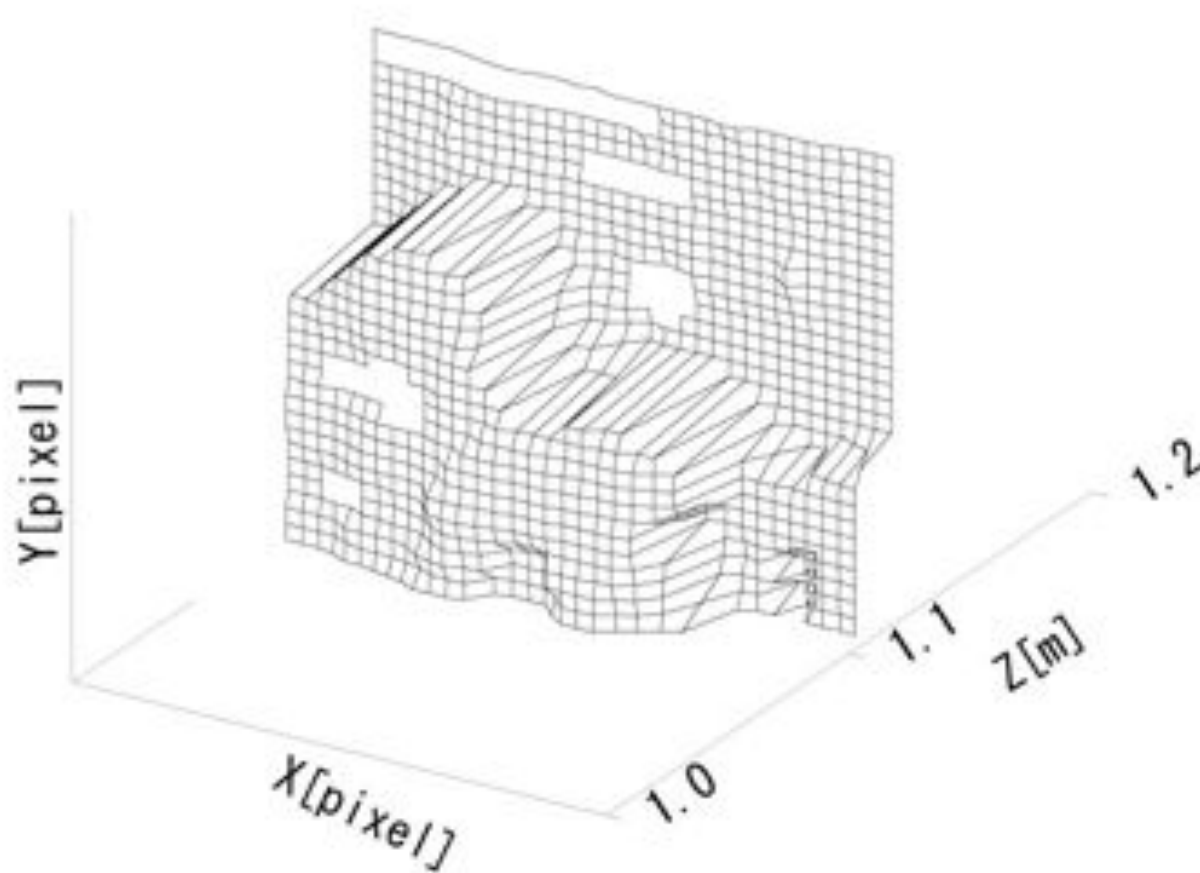


最後面CCD  
中央CCD  
前面CCD

# 実験：復元された完全合焦画像



# 実験：復元された対象の形状



対象の三次元形状



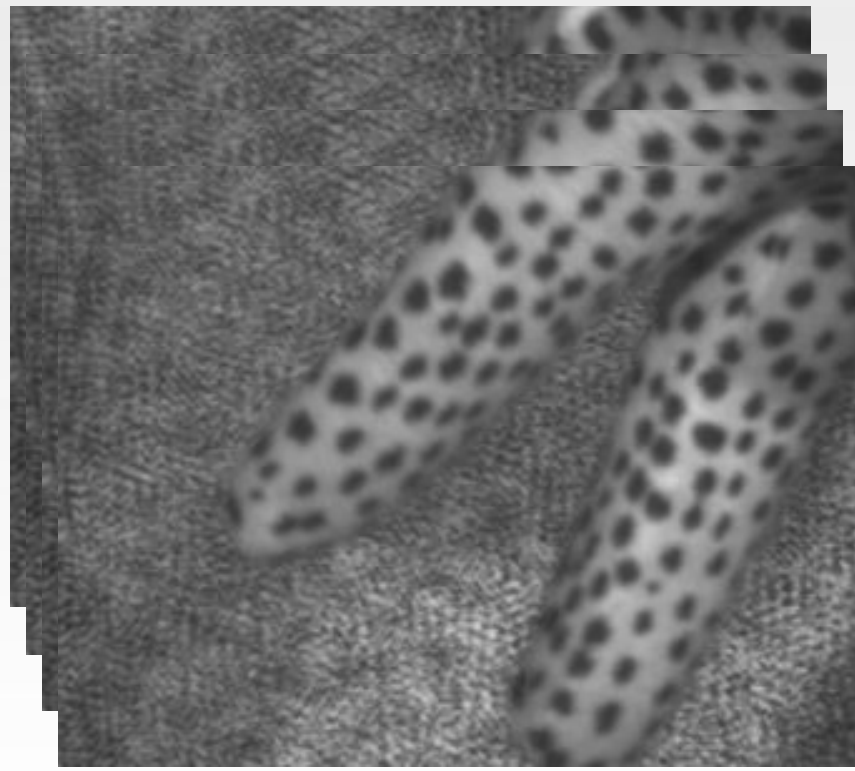
完全合焦画像(部分)



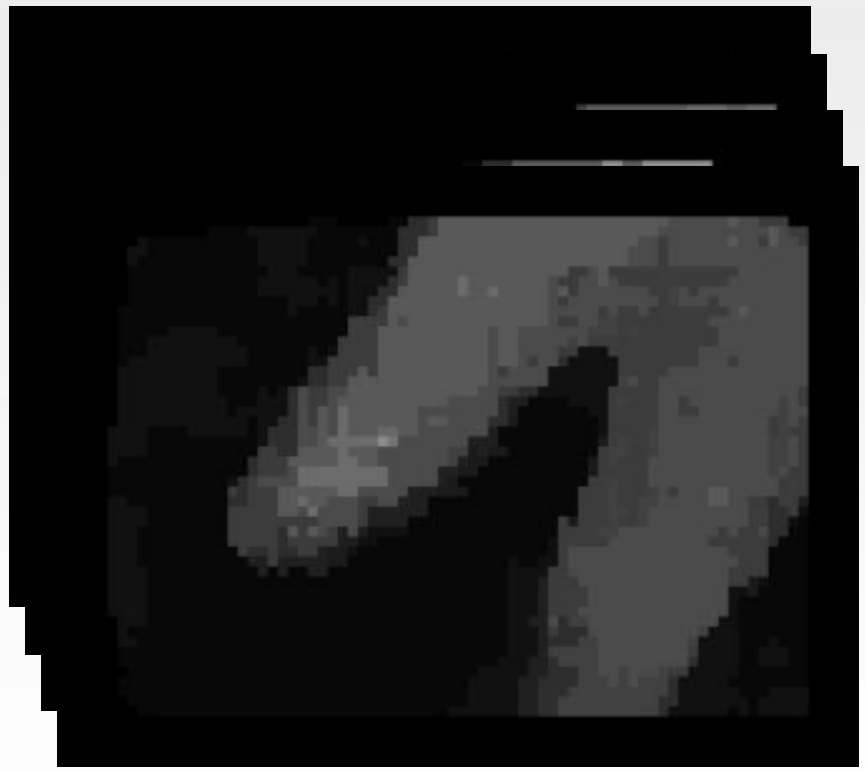
# 計測結果：指の動作



入力画像



距離画像







# 計測結果：指の動作



Input Image Sequence



なぜ符号化開口の利用を思いついたか？



## 符号化マスクを使ったX線源撮像装置

X線を放射している物体を、一般的な方法で写真に撮ることはできない。そこで、複数の穴のある“変形ピンホールカメラ”を使い、その影から、もとの物体の姿を割り出す方法が実用化された。これを天文学の分野に応用すれば、詳細な天体像が得られるはずである

G. K. スキナー

雑誌「サイエンス」（日経サイエンスの前身）1988年10月号

- 高校2年生の秋に読む。双子の弟との雑談で思い出す。
- 京大図書館地下のアーカイブで発掘。



# X線モニタ



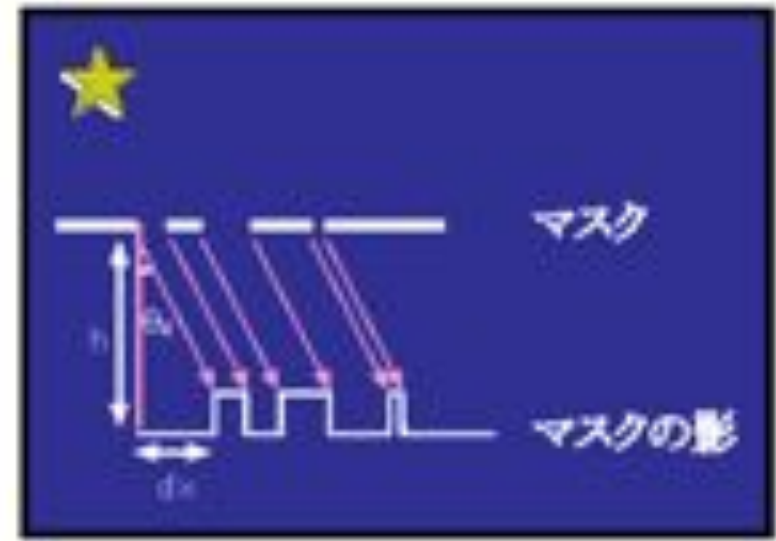
私がヘティちゃんです。  
よろしくね。



符号化マスク



位置検出型比例計数管



- 広視野X線モニタ
  - HETE-2衛星, 理化学研究所&ロスマラモス国立研究所

[http://cosmic.riken.go.jp/hete\\_new/hete\\_grb\\_beginner.html](http://cosmic.riken.go.jp/hete_new/hete_grb_beginner.html)



# Ramesh との出会い

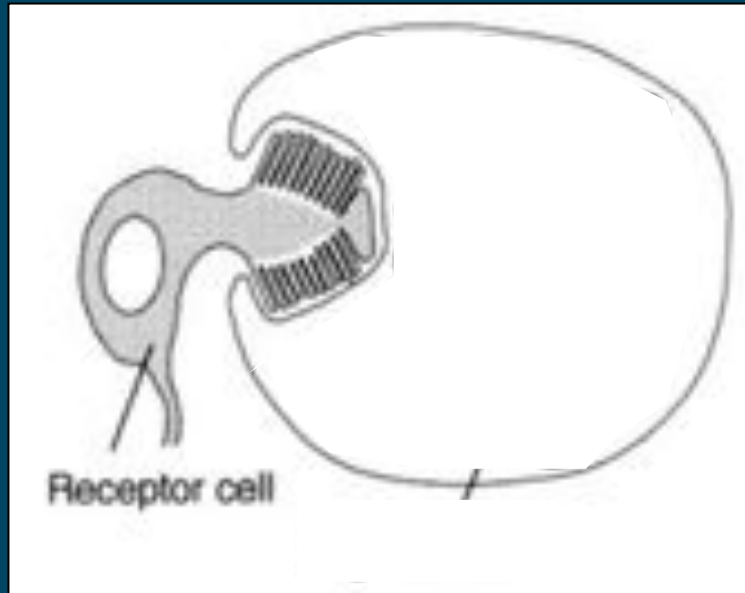


- 2006/6 : at NY
  - CVPR / PROCAMS の懇親会で雑談していて、研究の話で盛り上がり、お互いの研究を知る（京大での研究成果で認知される）
- 2007/6 : at Boston (MERL)
  - CVPR (Minneapolis)参加後に呼んでもらう
  - MERL で講演, MIT 見学
- 2007/12 Ramesh が MIT へ移る
  - すぐさまコンタクトし、渡航を決める
  - 7ヶ月滞在



Ramesh Raskar, MIT

# Simplest Visual Organs

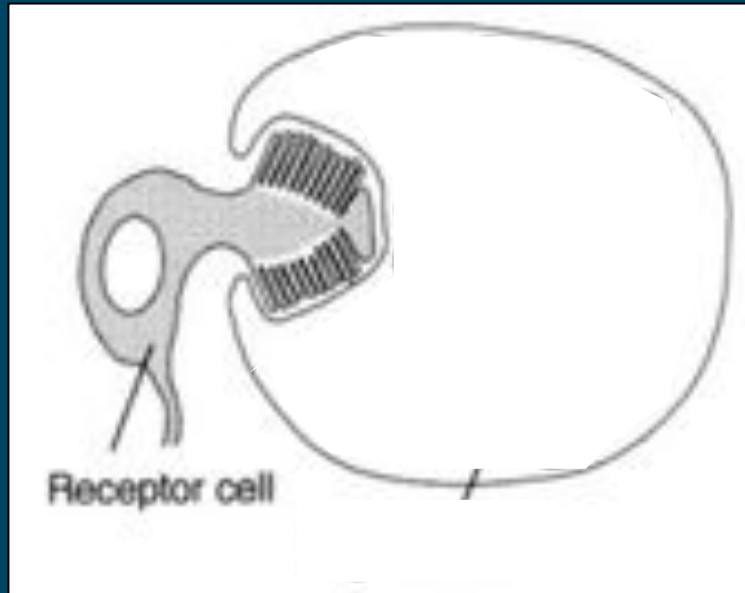


Larval Trematode Worm

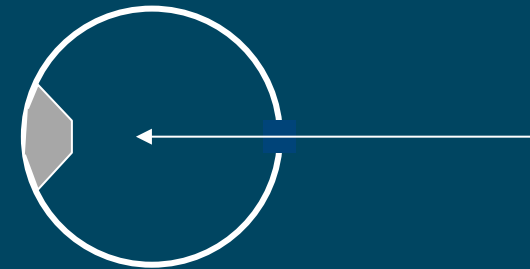


'Single Pixel' Camera

# Simplest Visual Organs

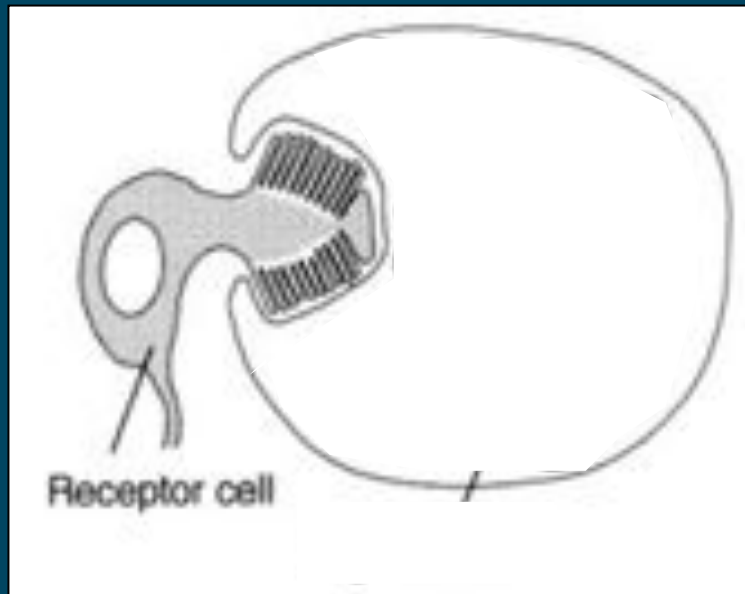


Larval Trematode Worm

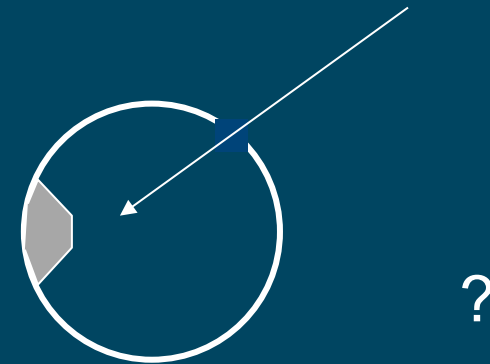


'Single Pixel' Camera

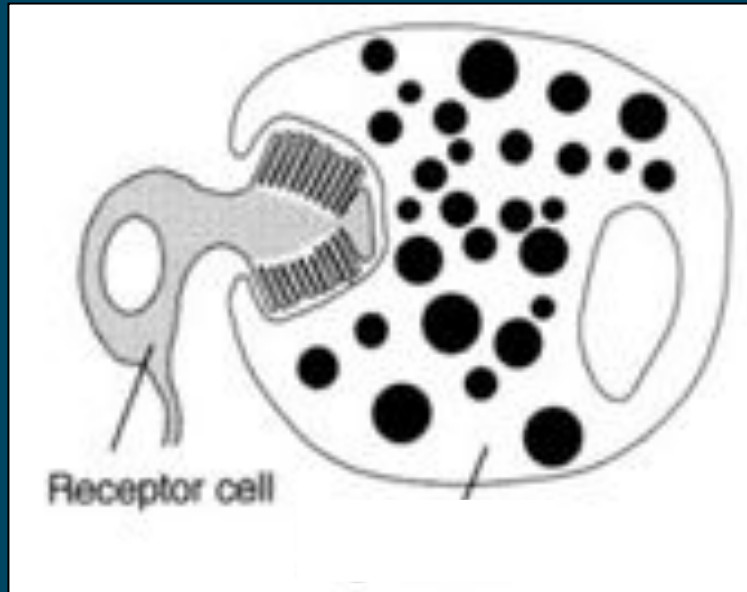
# Simplest Visual Organs



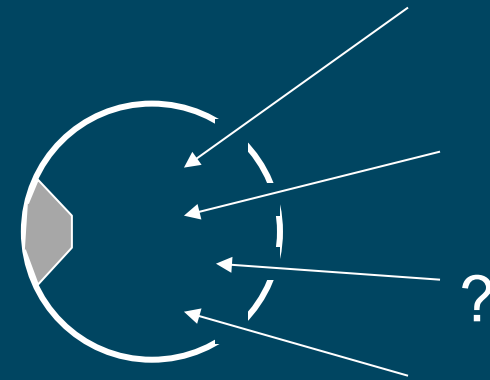
Larval Trematode Worm



# Special Aperture

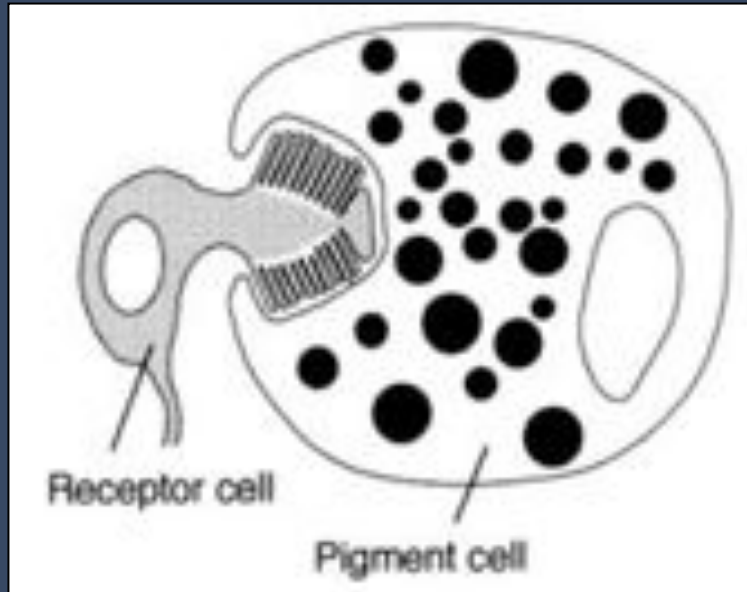


Larval Trematode Worm

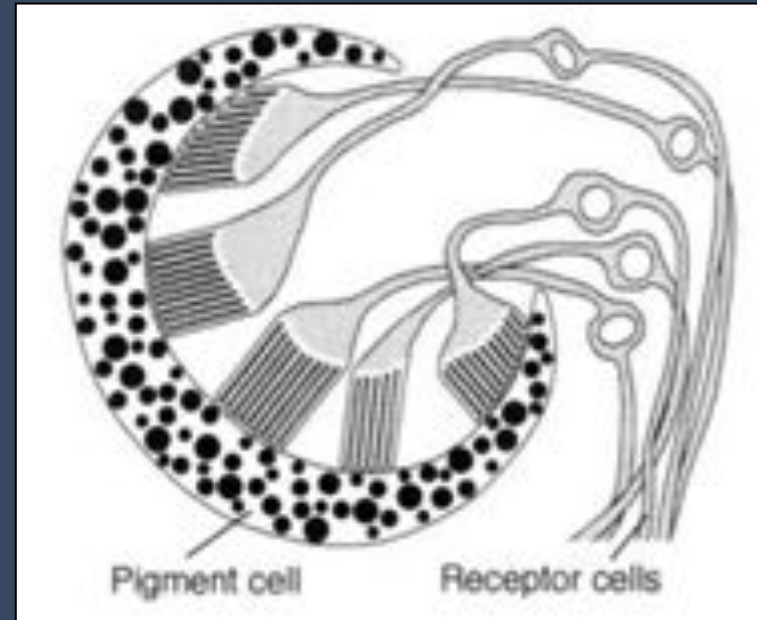




# Coded Aperture in Nature ?



Larval Trematode Worm



Turbellarian Worm

Chambered eyes (camera eyes)

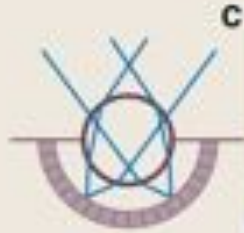
Hiura, Mohan, Raskar

Why not learn from animals more?

We have explored possibilities to utilize compound eyes



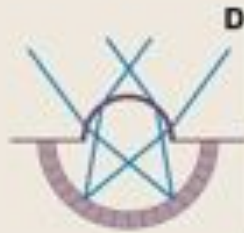
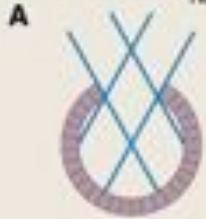
Nautilus



Octopus



Scallop



Red-tailed hawk



Shadow

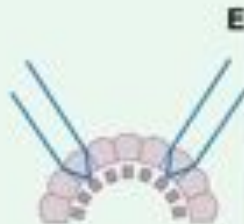
Refractive

Reflective

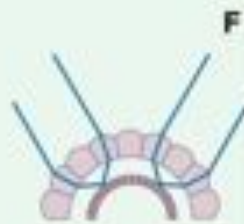
Compound eyes



Sea fan



Dragonfly



Krill eye

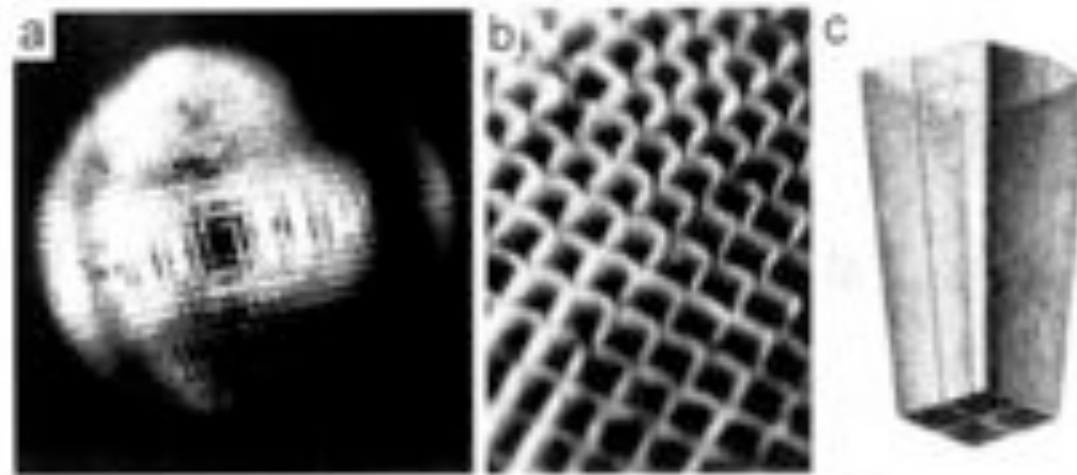
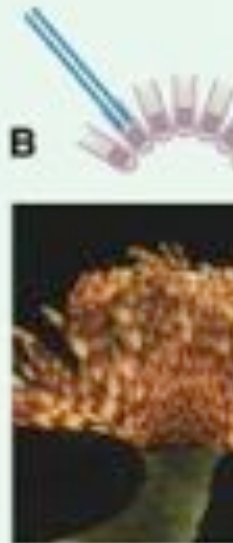


Lobster

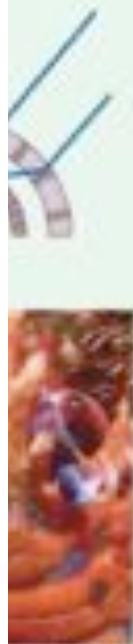
Fernald, Science [Sept 2006]

# ロブスター

## Compound eyes



**Fig. B.13** Reflecting superposition eyes. (a) Eye of the decapod shrimp *Palaemonetes varians*. Note the square facet array, the silvery appearance, and the dark central facets of the region contributing to the image in the light adapted state. (b) Distal tips of the mirror boxes in the eye of a living crayfish. (c) Tapered mirror box in a shrimp (*Palaemon squilla*) drawn by Grenacher in 1879. The structure is 63  $\mu\text{m}$  deep and 30  $\mu\text{m}$  along each top edge.

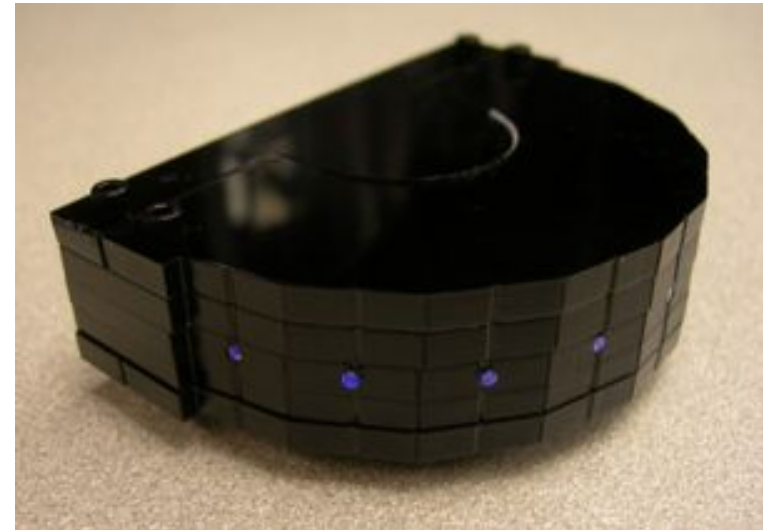
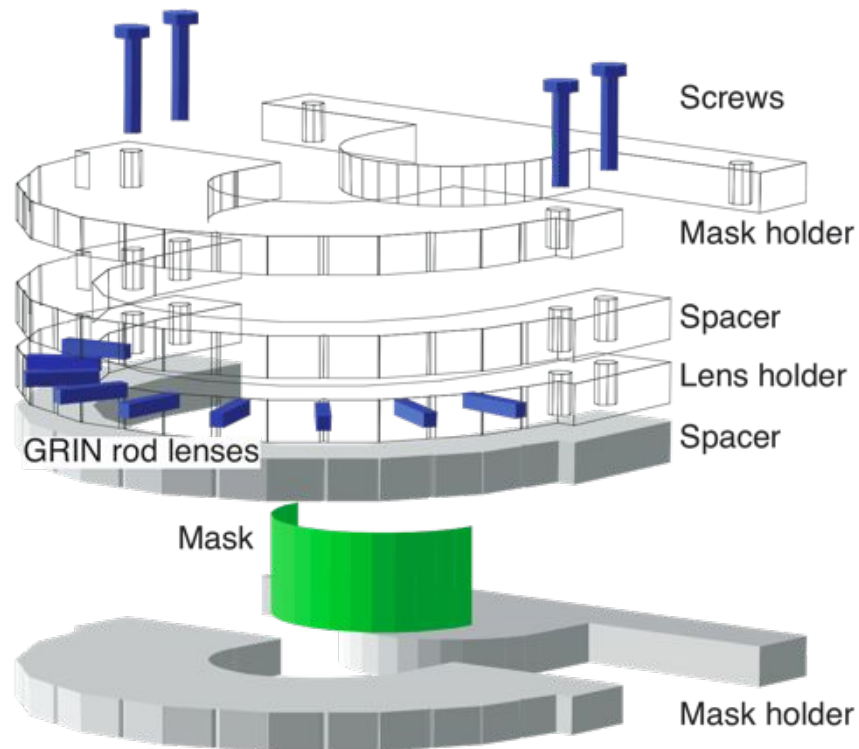


Lobster

Krill eye

- ボストンのうまいもん, といえはコレ

# 「オキアミの目」ビーコン



- カメラの代わりに、灯台（光源）として用いる
- 周囲から撮影することで、方位がわかる
- レンズ同士の角度 20deg



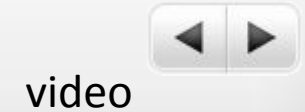
カメラと光線

符号化撮像

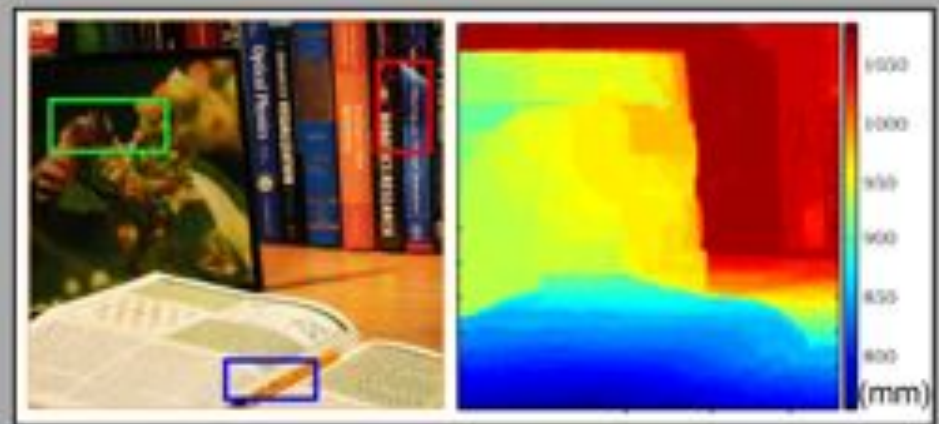
最近の話題



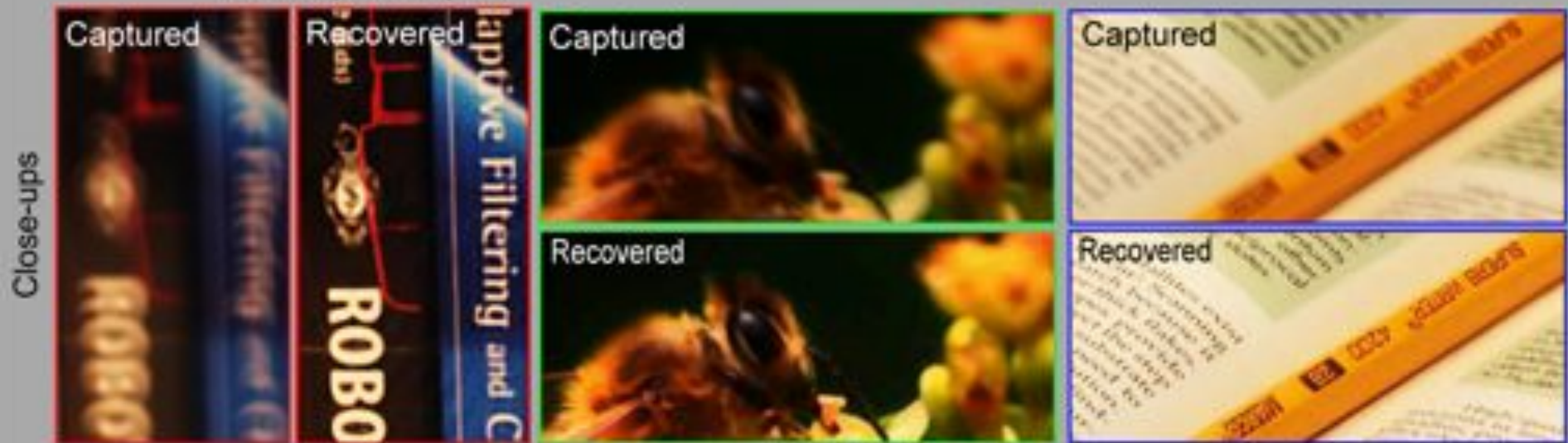
# Aperture Pair



Two captured images using the optimized coded aperture pair



Computed all-focused image and depth map



C. Zhou, S. Lin, and S. K. Nayar, "Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus," ICCV2009.



## Implementation



Precision Laser Photoplot (1 micron)

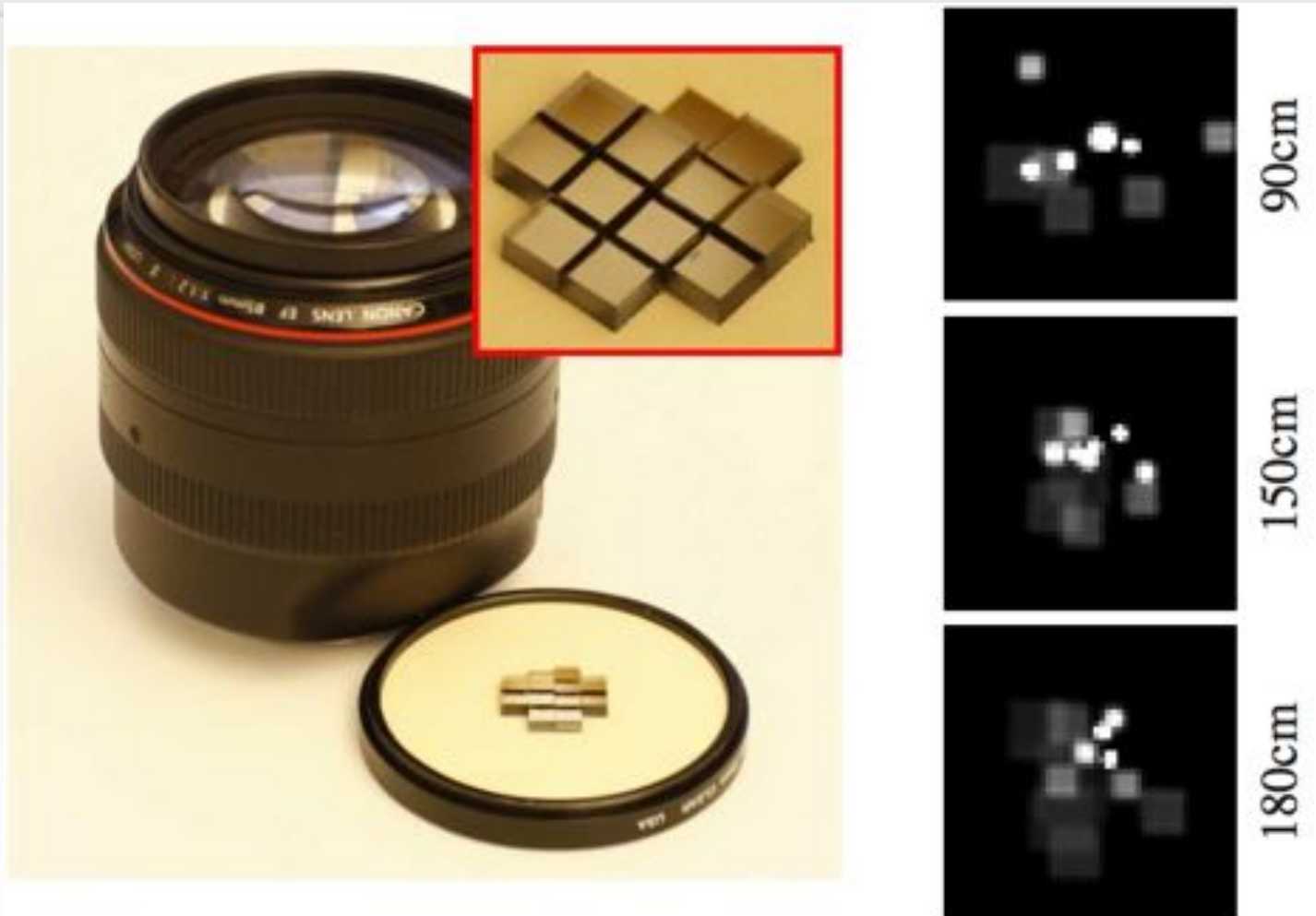


Two Lenses with the Optimized Patterns Inserted  
Disassembled Canon EF 50mm F/1.8 Lens

Slide courtesy of C. Zhou



# Lattice-focal lens



- A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand, W. Freeman, 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, SIGGRAPH2009.

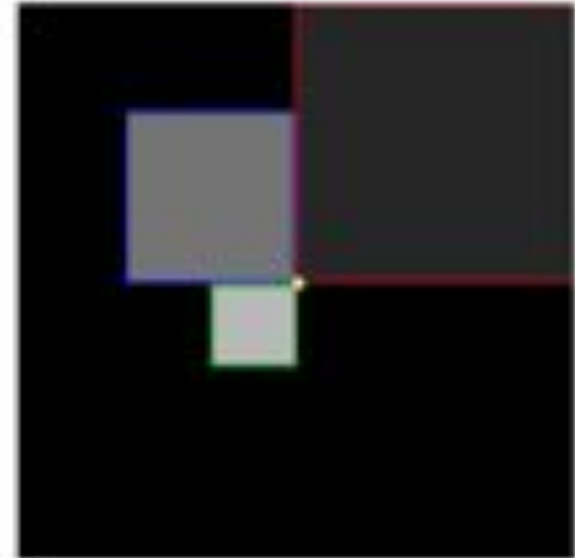
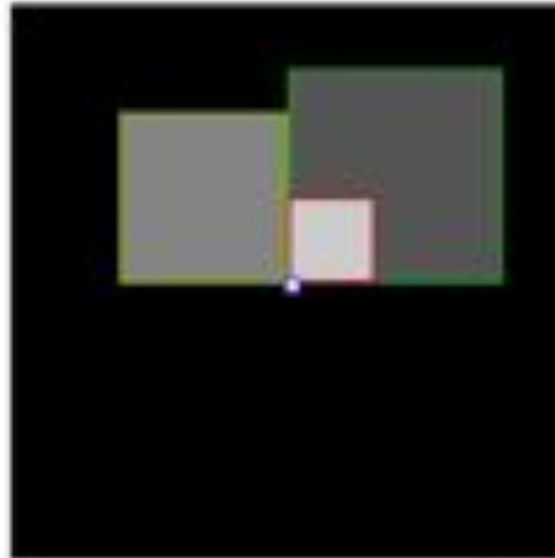




# Lattice-focal lens



(a) Lattice-focal lens

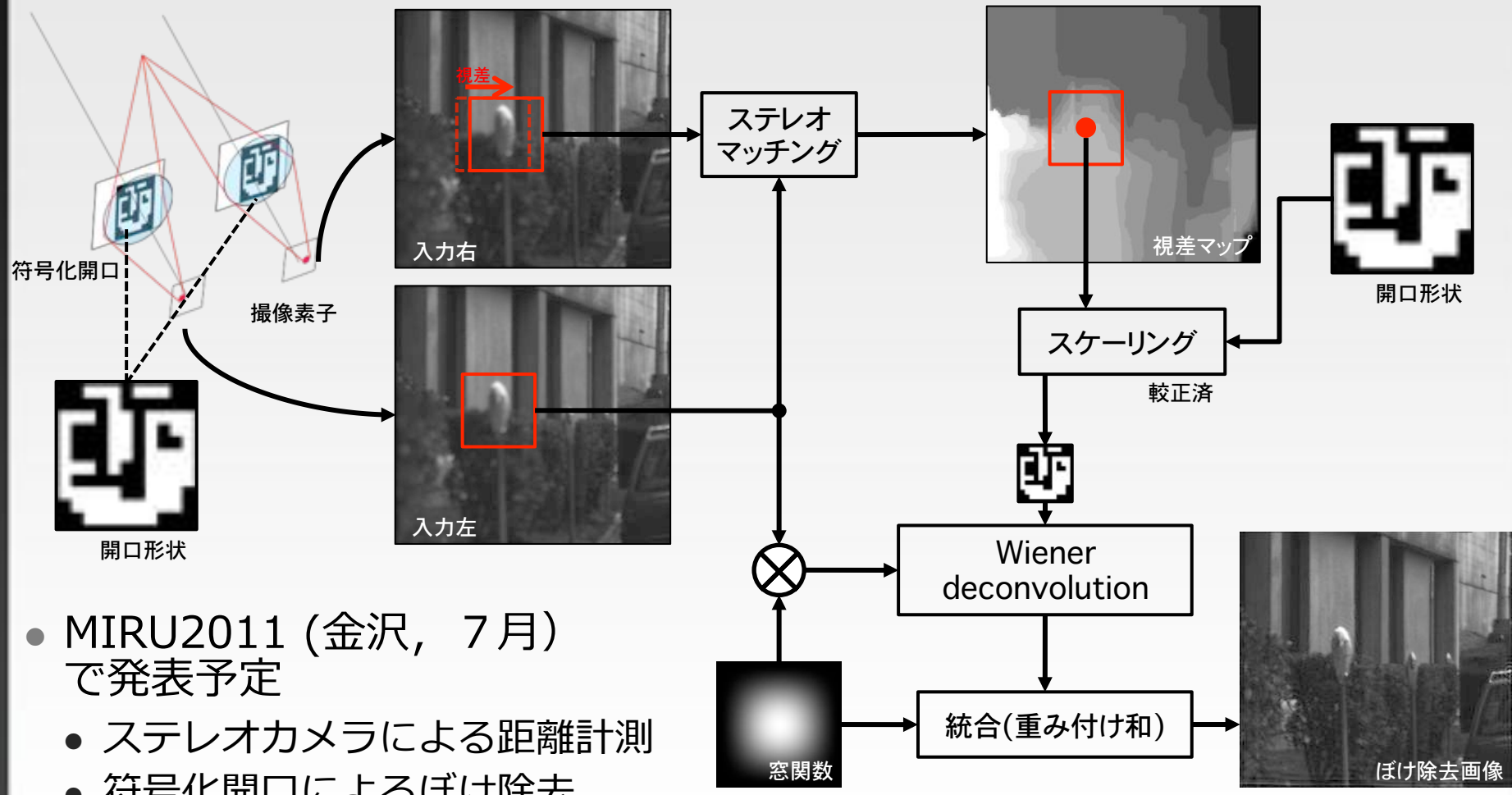


(b) PSFs

- A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand, W. Freeman, 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, SIGGRAPH2009.



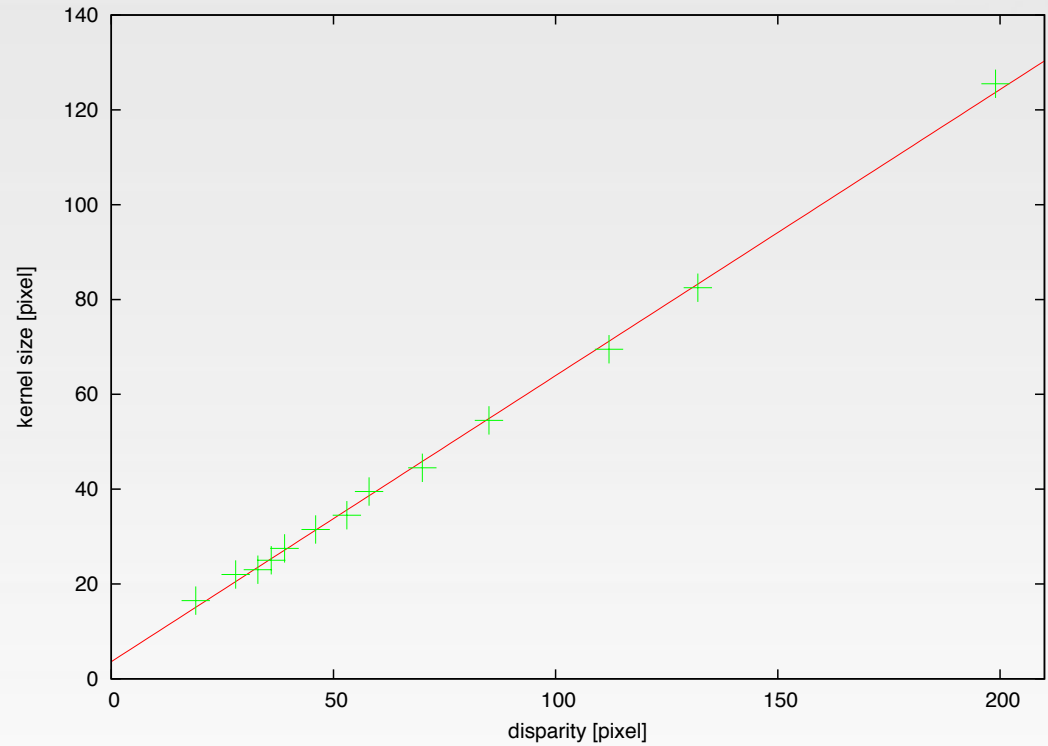
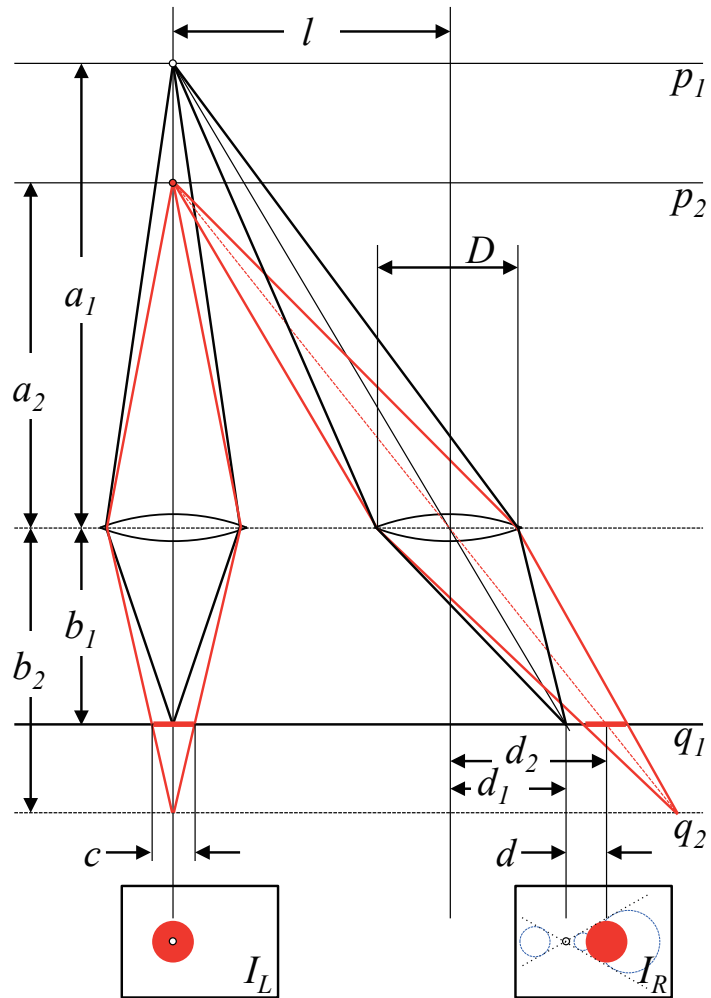
# 符号化開口ステレオ



- MIRU2011 (金沢, 7月) で発表予定
  - ステレオカメラによる距離計測
  - 符号化開口によるぼけ除去



# 符号化開口ステレオ



武田祐一, 日浦慎作, 佐藤宏介, 符号化開口ステレオによる被写界深度の拡張, MIRU2011 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp.1026-1033(2011)

- 視差とボケカーネルの大きさは比例関係にある



# ぼけの除去





# ぼけ除去結果



通常のレンズを用いた場合



符号化開口を用いた場合



# ピント合わせ位置の変更



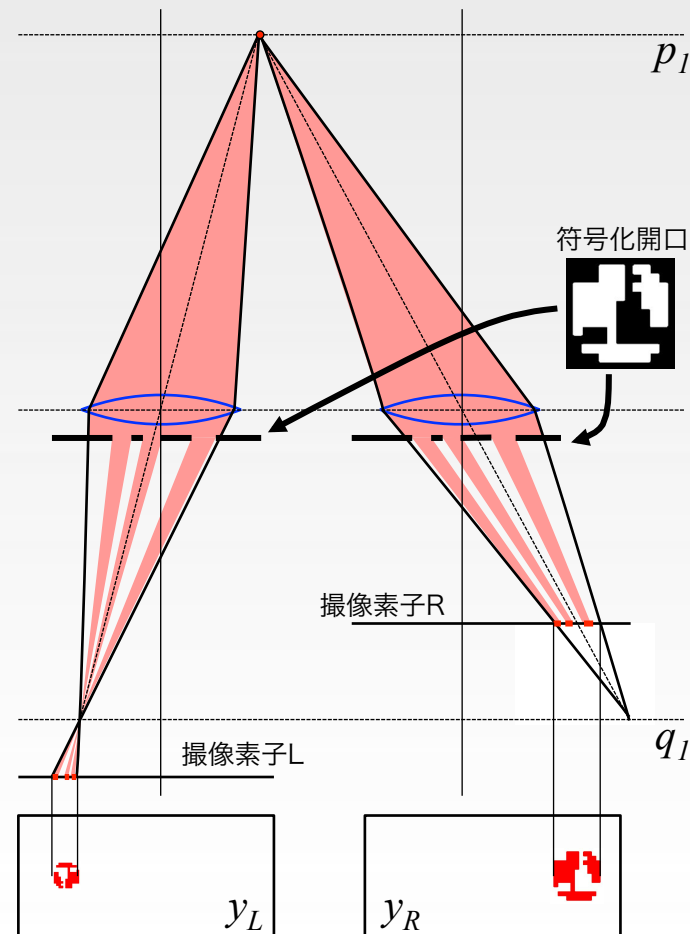


# 光学系とPSF



平行な光軸を持つステレオカメラに符号化開口を装着

- ステレオカメラと同様に、視差によって距離を求めることができる
  - 精度が高い
- Depth from Defocus と同様に、ぼけ具合によって距離を求めることができる
  - 水平線や繰り返し模様に強い
- 符号化開口により、原画像の情報が残存する
  - 原画像の復元が可能





# シミュレーション実験



本手法を用いることで奥行き推定が高精度になることを示すため、

シミュレーションによる奥行き推定の精度比較を行った  
**方法**

ひな壇状のシーンに3種類のテクスチャを  
貼り、奥行きを推定。真値とのSADを評価

## 比較手法

- 提案手法
- 符号化開口を搭載したステレオ法
- Depth from Defocus
- ZhouらのCoded Aperture Pair<sup>[2]</sup>

## 実験設定

- 画像は一度8bitPNG画像に保存後処理を行った
- 視差と開口の比は1:3
- 視差スケールで奥行きを推定、視差の幅は15pixel
- ピントは最前段と最後段に合わせた



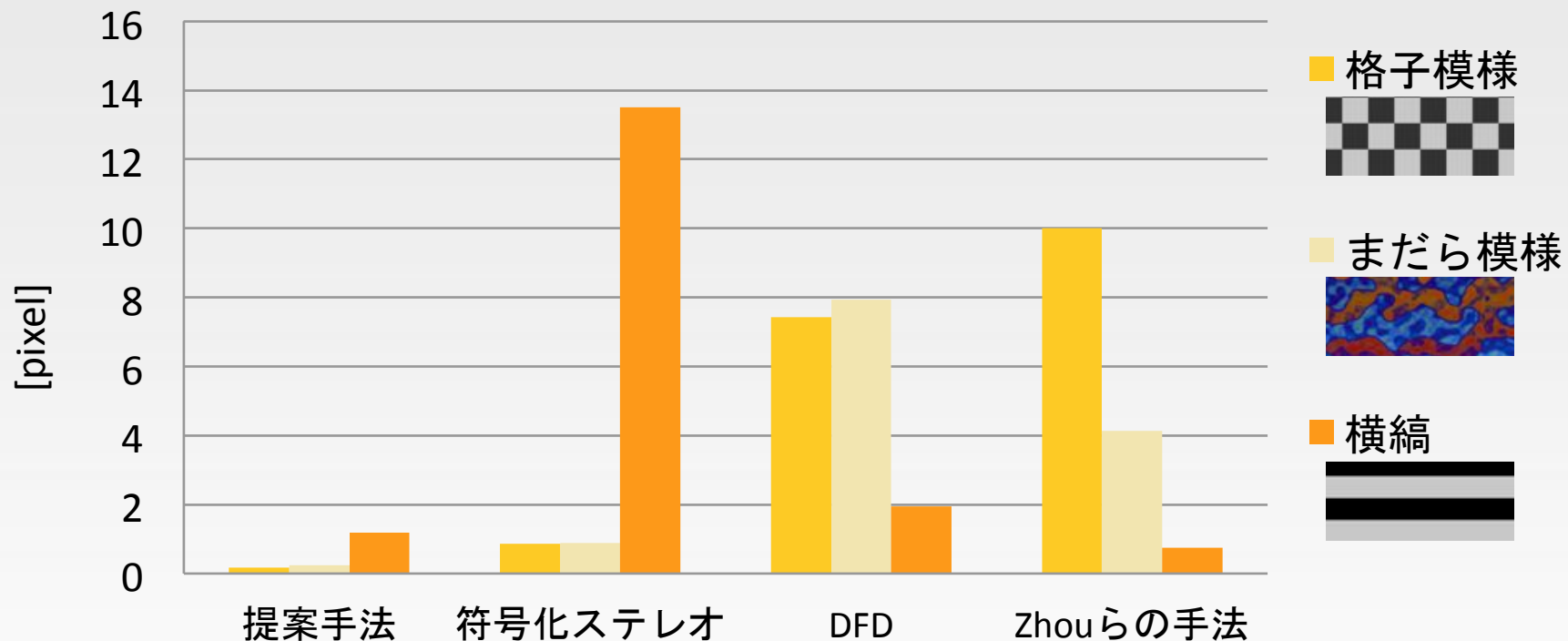




# シミュレーション実験 - 結果



## 平均誤差



- ぼけ量でのみ比較を行うDFDとZhouらの手法よりも、**提案手法やステレオ法が高い精度で推定が可能**
- 水平方向に画像情報の変化のない横縞模様ではステレオ法では推定ができていないが、**本手法ではぼけ情報も用いるため可能**

# 実機を用いた奥行き推定と完全合 焦画像推定

実シーンにおいても、提案手法が正しく動作することを確認するために、  
実機を用いて奥行き推定とぼけ除去を行った。



符号化開口を搭載したレンズ



用いたカメラ



撮影シーン

## 実験環境

レンズ：コシナ Carl Zeiss Makro-Planar T\* 2/50mm ZF.2

カメラ：Nikon D200

符号化開口：普通紙に印刷し、切り出してレンズ後部に貼付け  
カメラをスライドステージ上に配置し、水平に移動させて撮影

シーンの奥行き範囲は2[m]-5[m]、ピント位置は2[m]と5[m]に合わせた  
合焦距離の変更による画角の変化をスケール変換による前処理を施した



# 実機実験 - 結果



### 撮影画像



左入力



右入力

### 実行結果



視差マップ



完全合焦画像

左入力	右入力	完全合焦画像

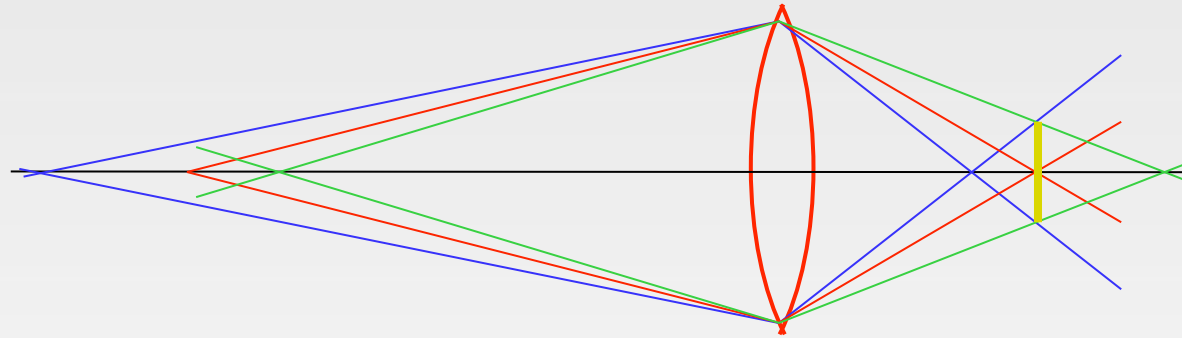
- 視差マップより、概ね正しく奥行き推定が行えた
- 双方の入力画像でぼけている箇所の鮮鋭度が向上しており、ぼけを取り除くことができた



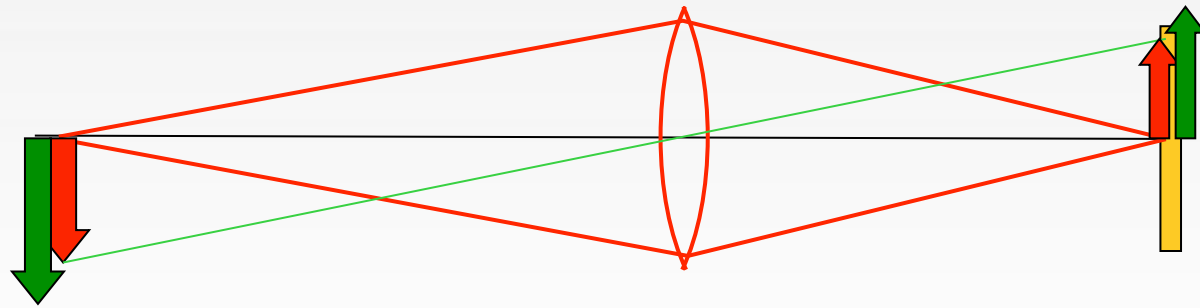
# 積分の不変量化



- 開口と距離によるぼけ：距離によってぼけの大きさが変化する



- 被写体の動きによるぶれ：被写体の速度によってぶれ量が変わる



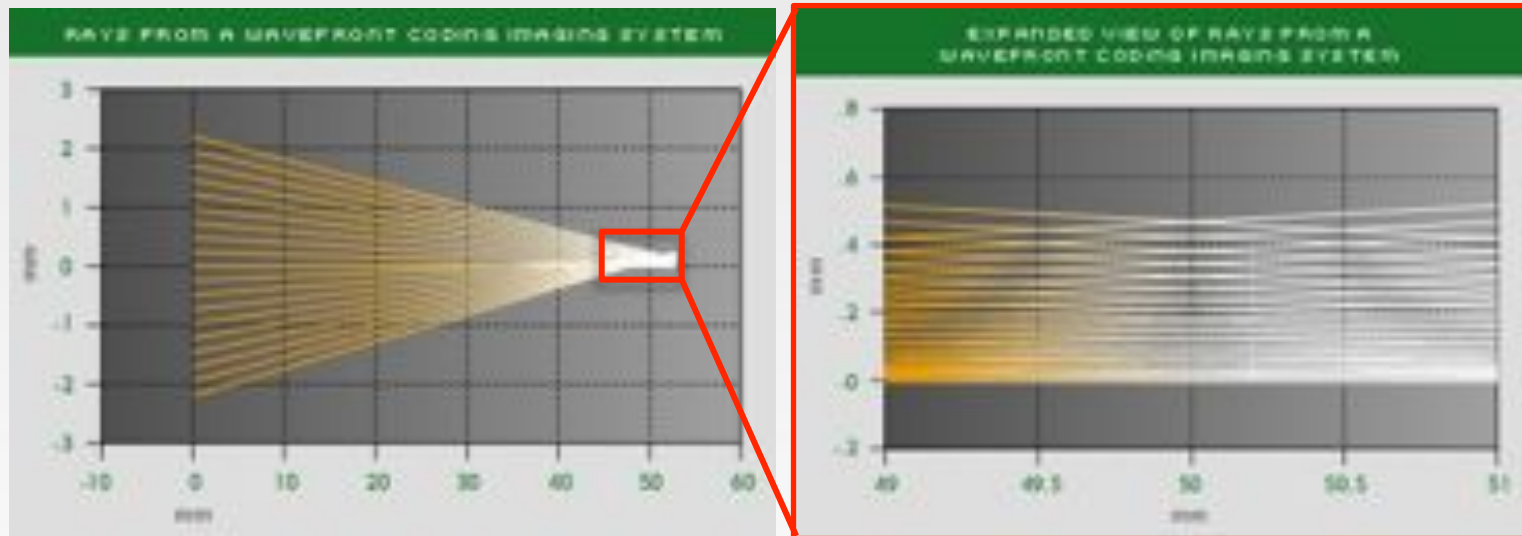
- 計算により元の画像を求めるときに問題になる  
(速度や奥行きの推定が必要となる)  
→奥行きや速度によって変わらないぼけやぶれは作れるのか？



# 積分の不変量化



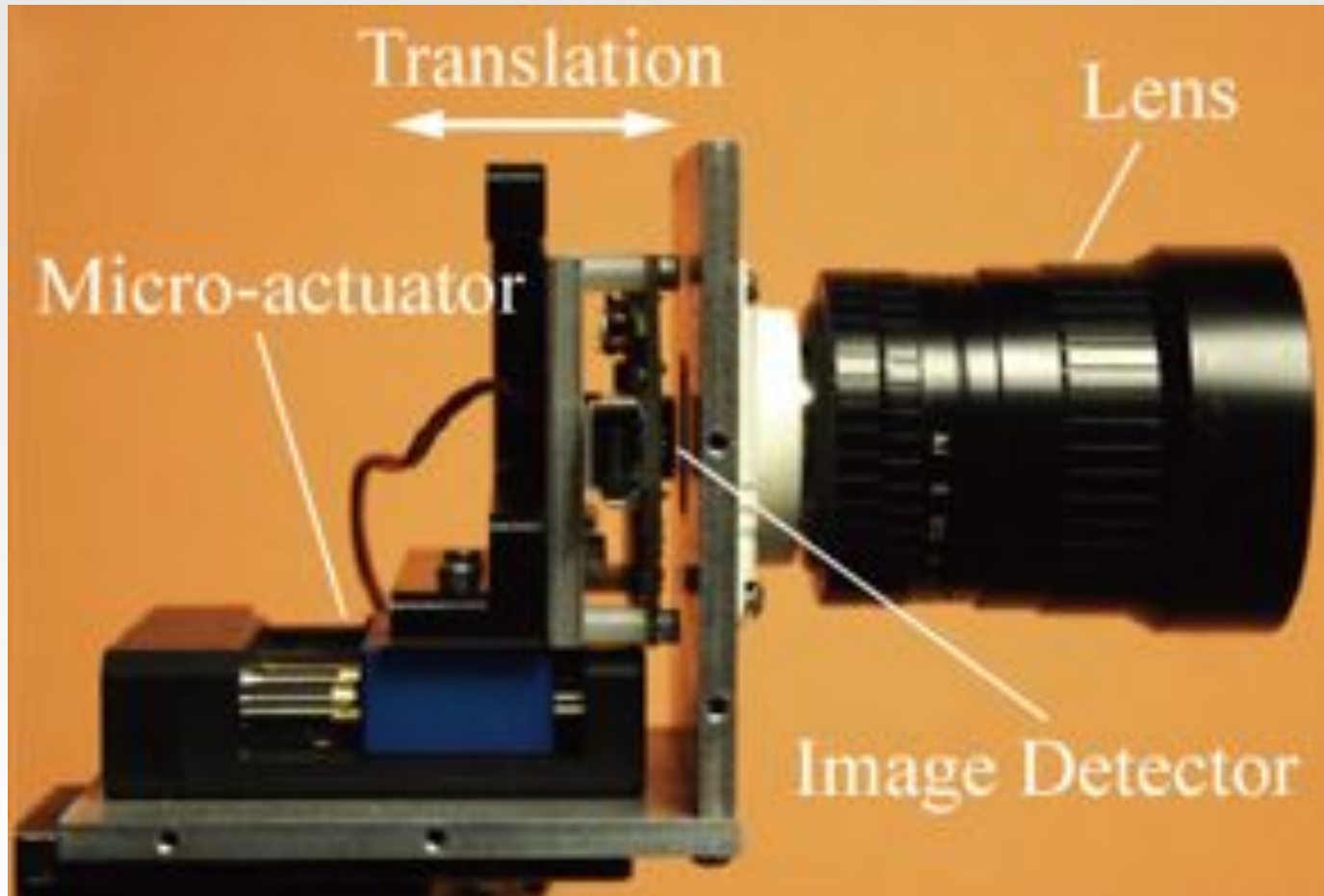
- 開口と距離によるぼけ：距離によってぼけの大きさが変化する
  - 光学系の工夫による解決：Wavefront Coding



OmniVision TrueFocus

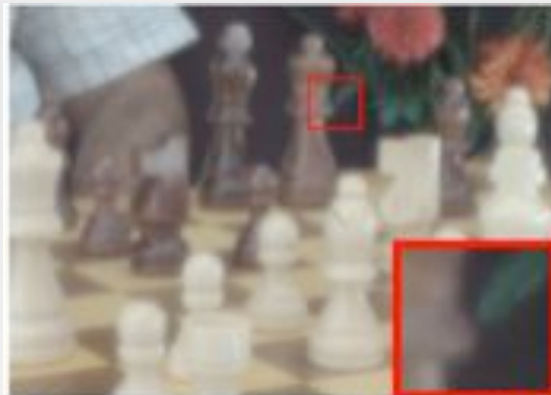
- 露光中の撮像素子の移動による解決
- 被写体の動きによるぶれ：被写体の速度によってぶれ量が変わる
  - 露光中のカメラの往復運動による解決

# 撮像素子の移動による ぼけの不変量化



- H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, and S.K. Nayar, Flexible Depth of Field Photography, ECCV2008

# 撮像素子の移動による ぼけの不変量化



(a) Captured Image ( $f/1.4$ ,  $T=0.36\text{sec}$ )



(b) Computed EDOF Image



(c) Image from Normal Camera  
( $f/1.4$ ,  $T=0.36\text{sec}$ , Near Focus)



(d) Image from Normal Camera  
( $f/8$ ,  $T=0.36\text{sec}$ , Near Focus) with Scaling

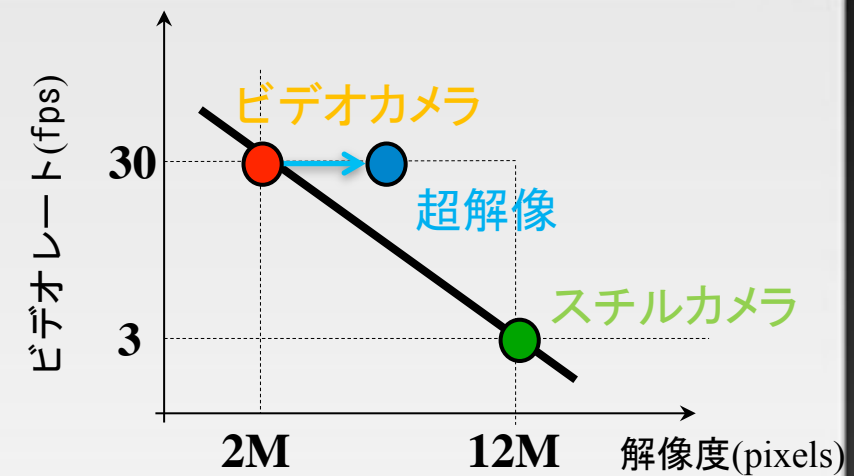
- H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, and S.K. Nayar, Flexible Depth of Field Photography, ECCV2008



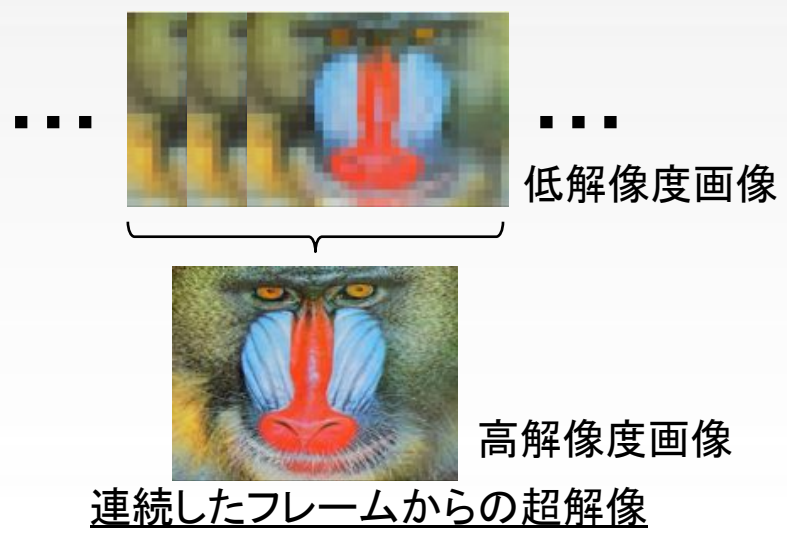
# 超解像処理



- ビデオカメラは適度なビデオレートと被写界深度で画像を作るため低解像度となる
- 数百万画素分のデータをビデオレートで読み出す技術はコストが高い
- 本研究では超解像を使用する
  - 複数枚の低解像度画像を用いて一枚の高解像度画像を作成する手法
  - ビデオカメラの場合、連続したフレームの静止画がほぼ同じ画像であるため超解像に利用できる



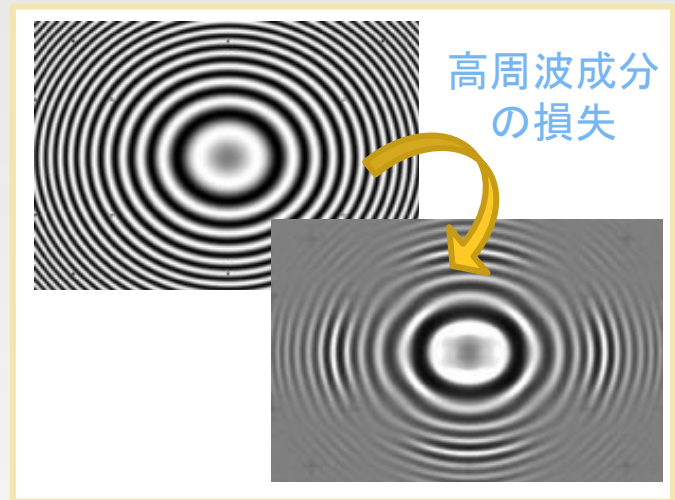
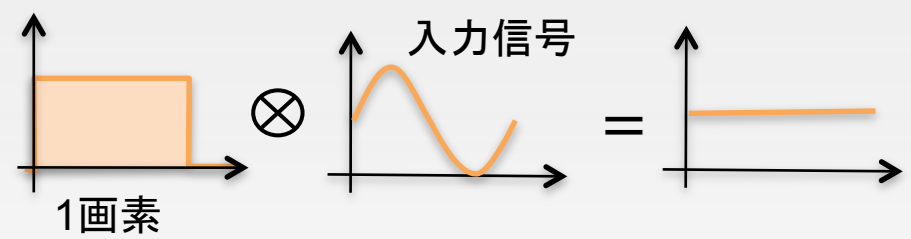
ビデオレートと解像度のトレードオフ(2010年現在)





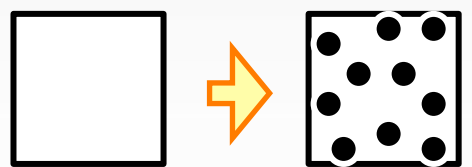
# 🏠 撮像素子における畳み込み演算 ▶

- 多くの超解像手法では撮像素子の各画素を正方形(矩形)で扱っている
- 画素幅に一致する周期信号は畳み込みにより振幅と位相が失われ、高周波成分を失うことになる

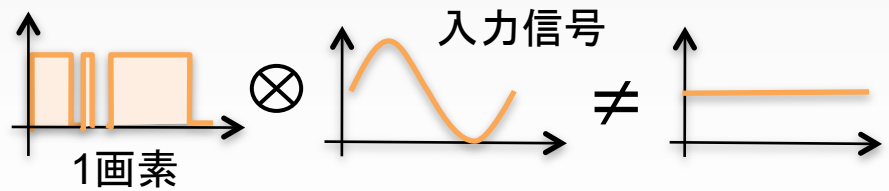


CZP (Circular Zone Plate)

- 撮像素子の上に細かい黒色粉末を振りかけて各画素形状をコード化する



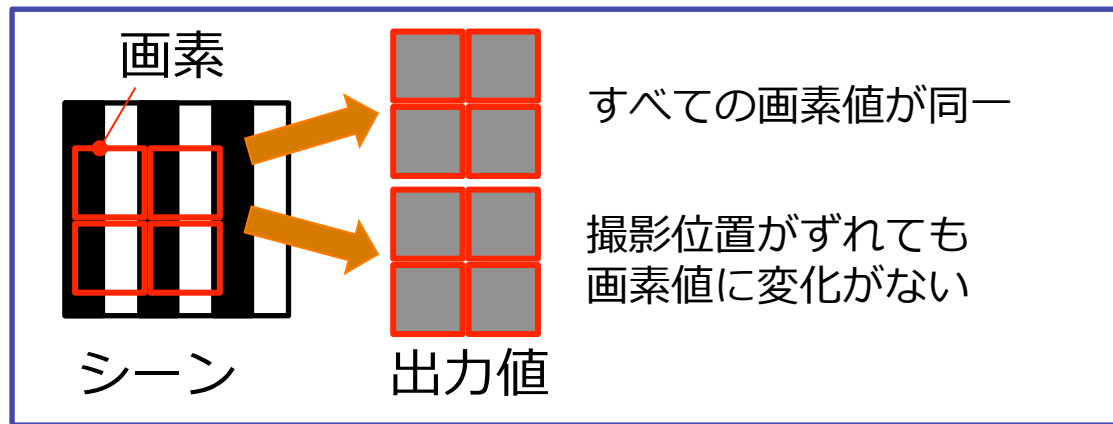
撮像素子の画素形状のコード化



- 高周波成分の残った画像が得られる可能性が高まる

# 超解像処理のための 黒色粉末の散布による画素形状のコード化

笹尾朋貴(大阪大学), 日浦慎作(広島市立大学), 佐藤宏介(大阪大学)



通常の撮像素子を用いたとき

多数の画像を撮影しても,  
シーンに関する情報が得られない



高周波成分が復元できない  
(解像度が向上しない)

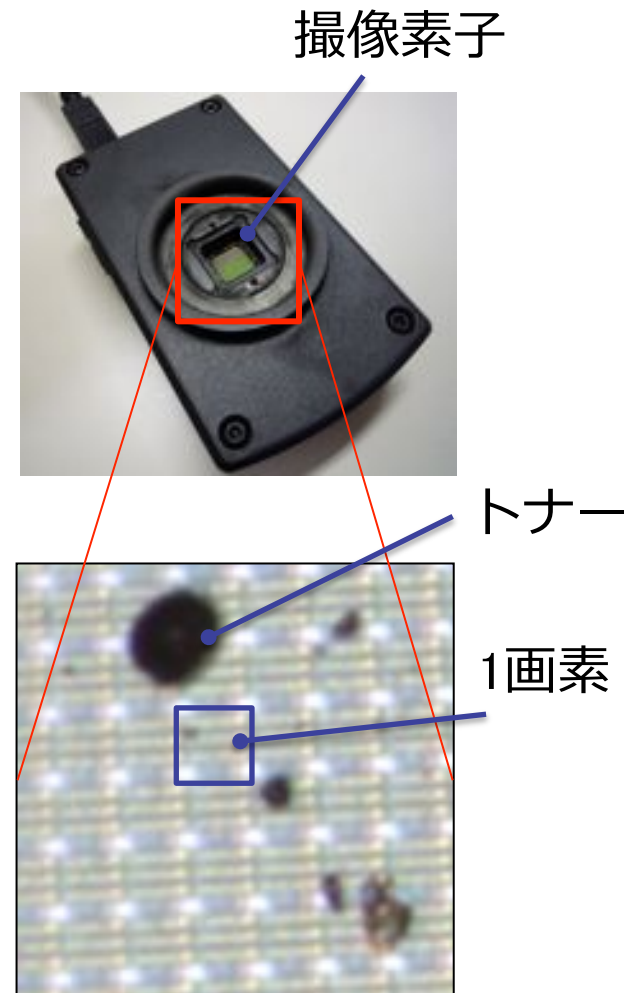
IS3-6

# 超解像処理のための 黒色粉末の散布による画素形状のコード化

笹尾朋貴(大阪大学), 日浦慎作(広島市立大学), 佐藤宏介(大阪大学)

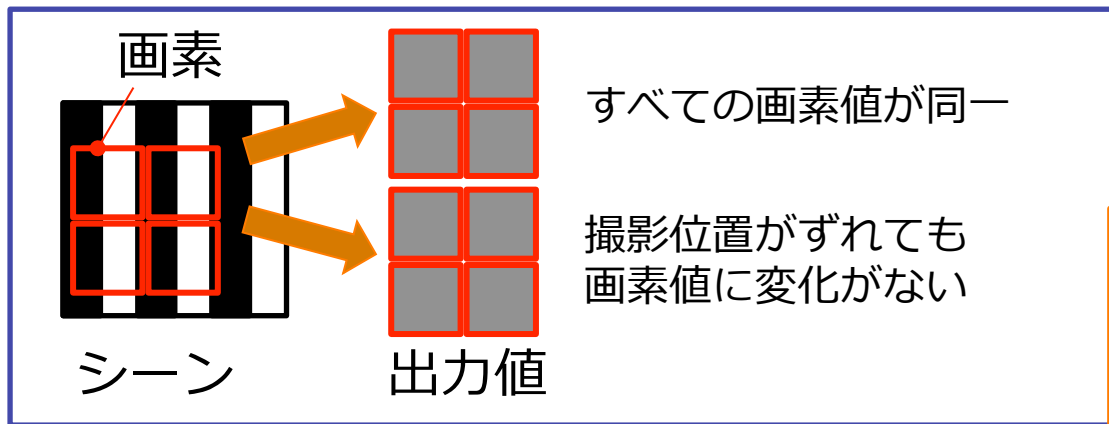


トナーを撮像素子  
に振り掛ける

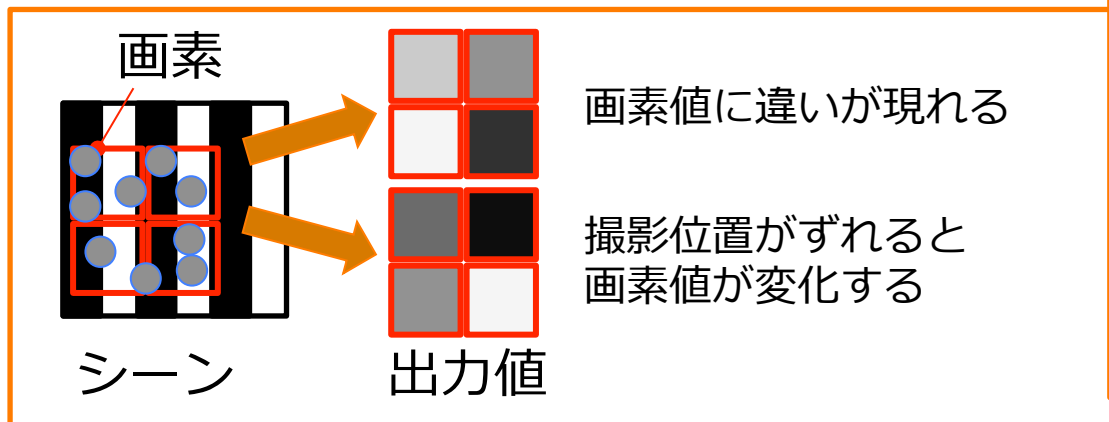


# 超解像処理のための 黒色粉末の散布による画素形状のコード化

笹尾朋貴(大阪大学), 日浦慎作(広島市立大学), 佐藤宏介(大阪大学)



通常の撮像素子を用いたとき



画素形状をランダムにコード化したとき

撮像素子



多くの画像を撮影するほど解像度が上がる

発表内容：

- トナー位置を画像から求める方法
- 実機を用いた超解像処理性能の検証

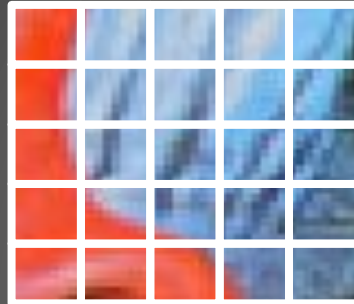


# ランダムコードの使用



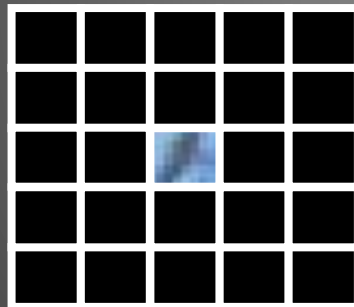
カメラの移動方向を横方向のみに限定した場合

コードなし



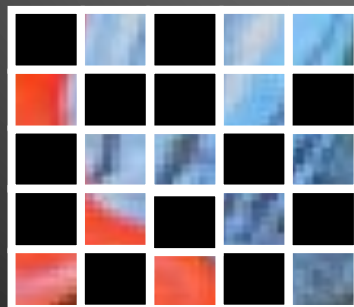
- 原画像のすべての画素を通過することができる
- 高周波成分が失われる

ピンホールコード



- 高周波成分が残りやすい
- このまま横にずらししていくと、3行目以外の原画像の情報を得ることができない

ランダムコード

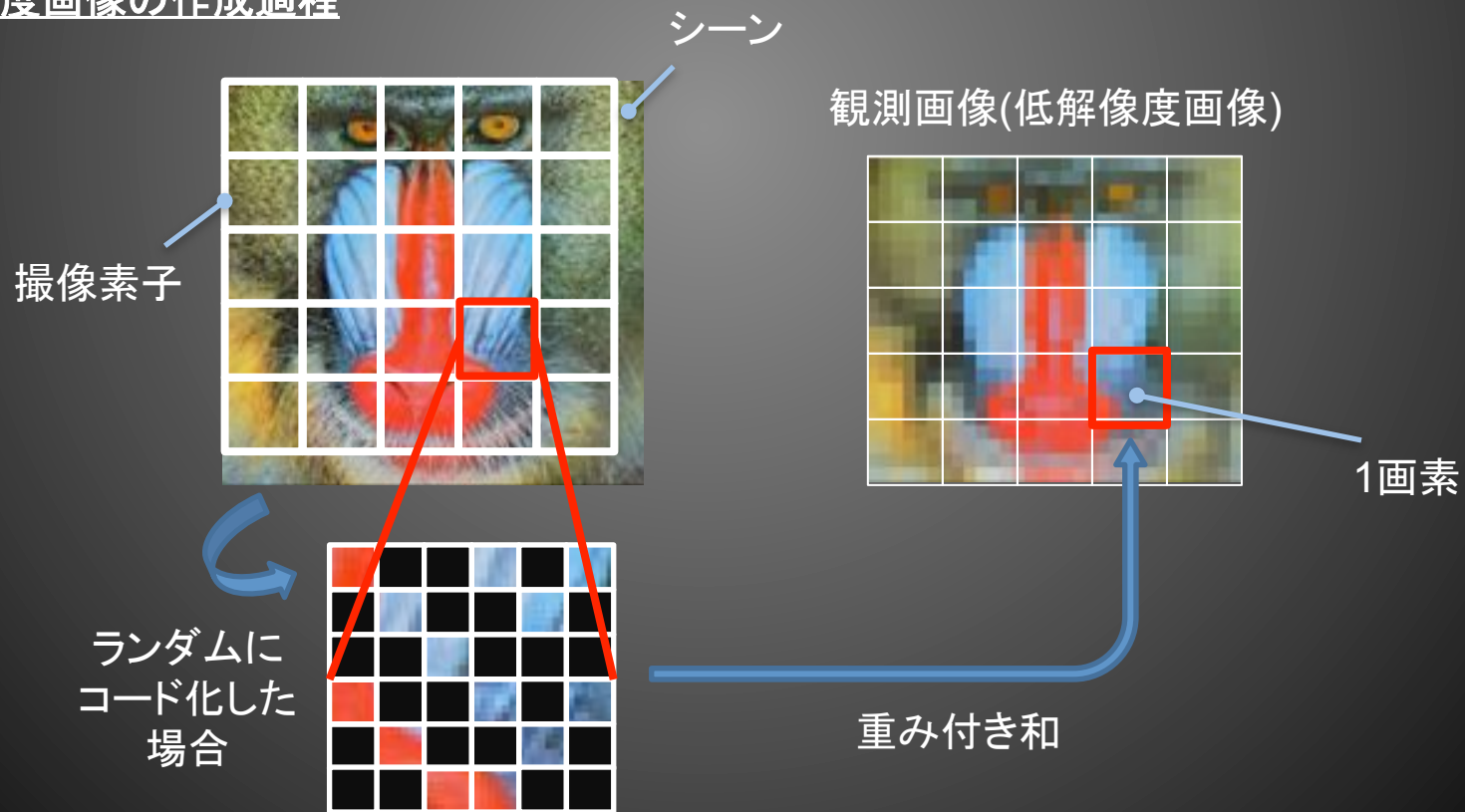


- 高周波成分の損失を減らすことができる
- 原画像のすべての画素を通過することができ、情報損失の少ない観測画像が得られる

# シミュレーション実験

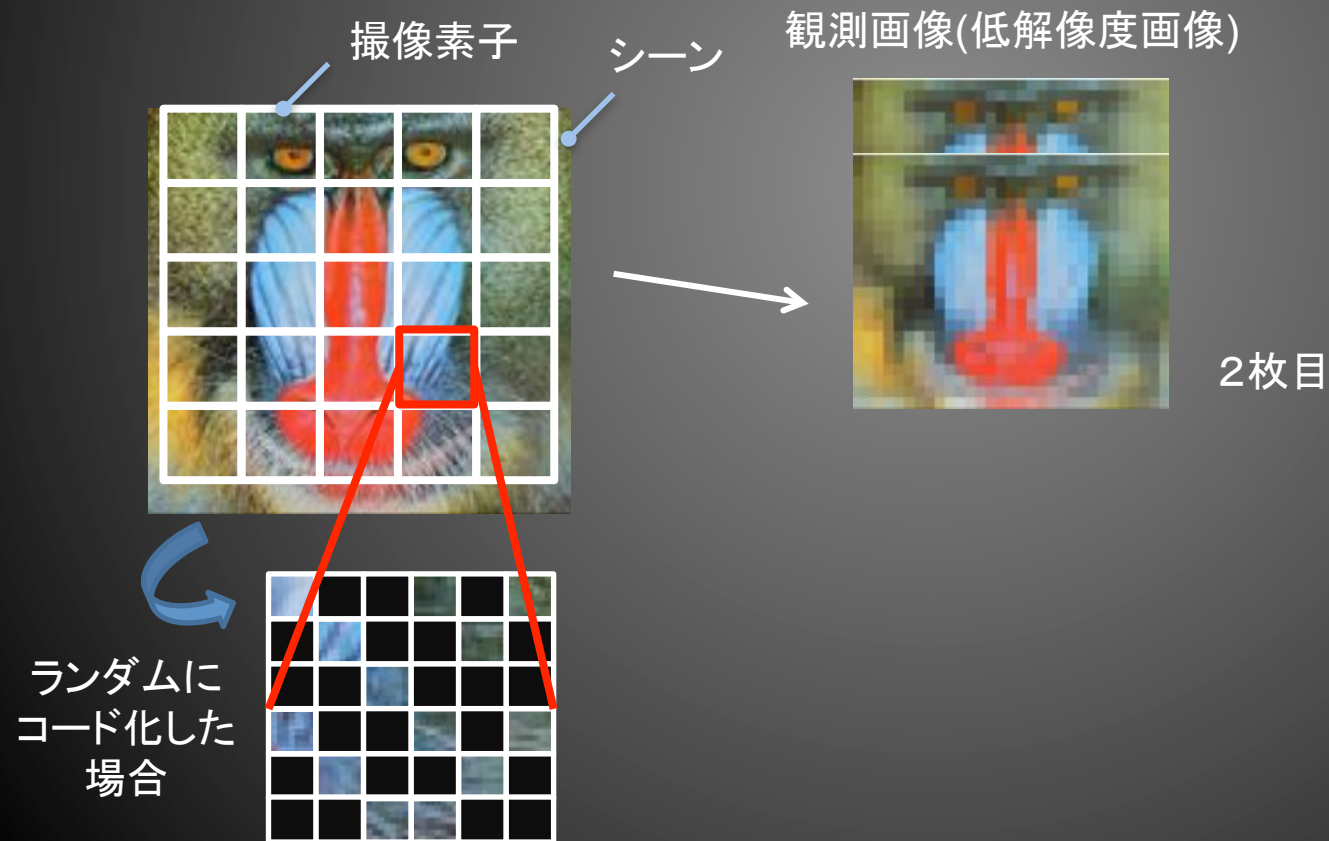
- コード化した撮像素子により高解像度画像が得られるかシミュレーション実験を行う
  - 超解像手法の一つであるRichardson-Lucy deconvolution (以下RL法)を使う
  - 低解像度画像(32×24pixel)100枚を使用して高解像度画像(320×240pixel)を推定する

## 低解像度画像の作成過程



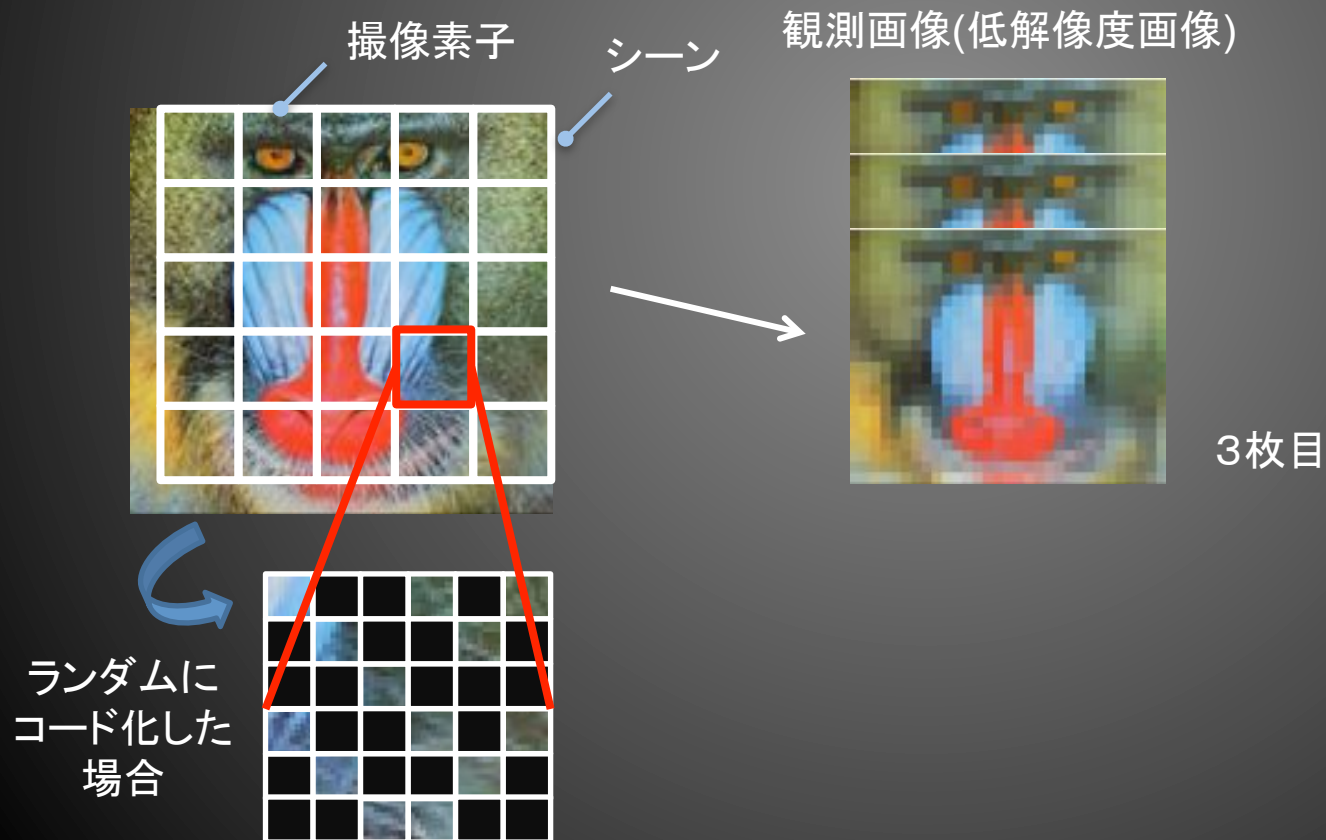
# シミュレーション実験

- コード化した撮像素子により高解像度画像が得られるかシミュレーション実験を行う
  - 超解像手法の一つであるRichardson-Lucy deconvolution (以下RL法)を使う
  - 低解像度画像(32×24pixel)100枚を使用して高解像度画像(320×240pixel)を推定する



# シミュレーション実験

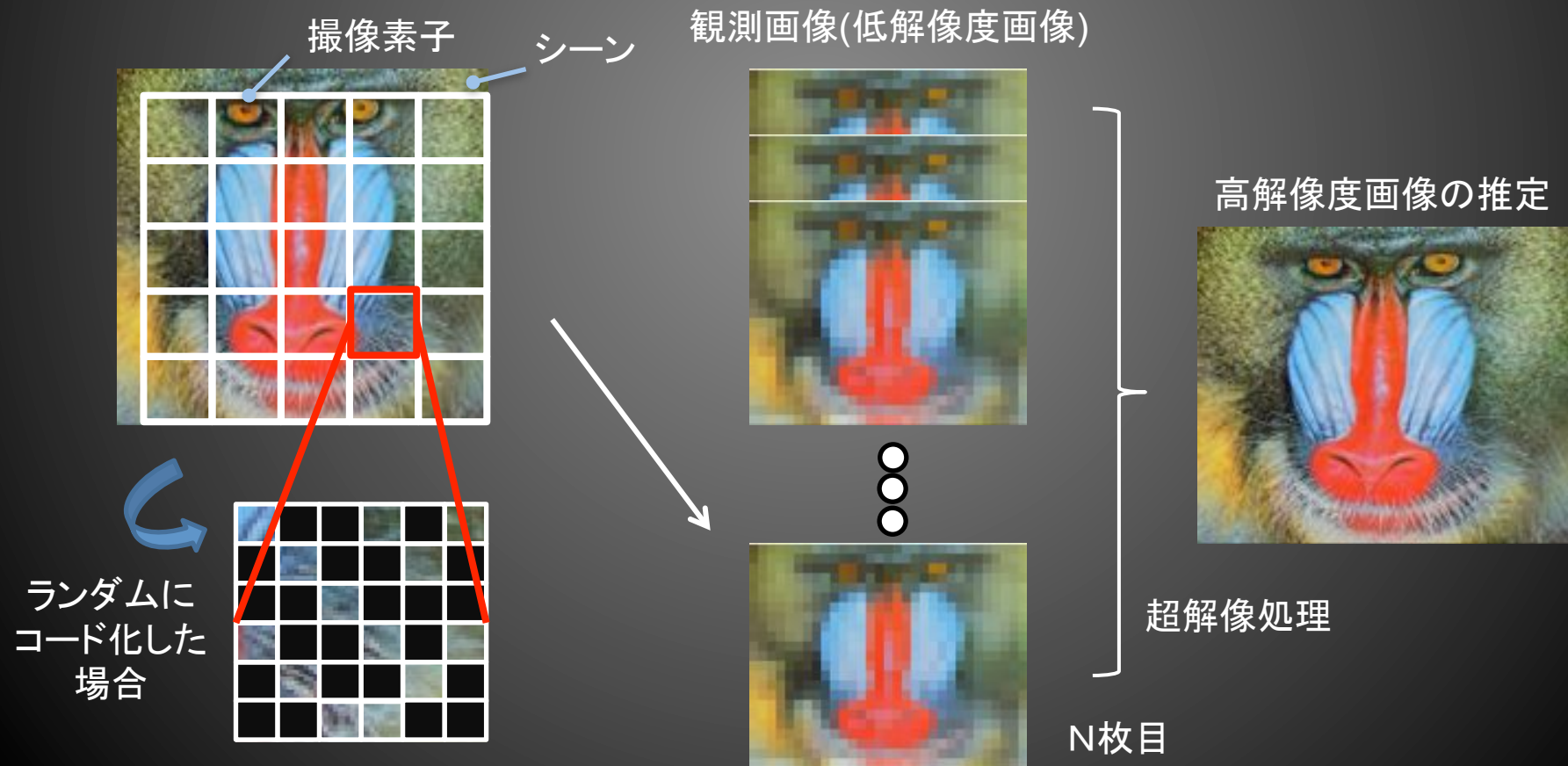
- コード化した撮像素子により高解像度画像が得られるかシミュレーション実験を行う
  - 超解像手法の一つであるRichardson-Lucy deconvolution (以下RL法)を使う
  - 低解像度画像(32×24pixel)100枚を使用して高解像度画像(320×240pixel)を推定する





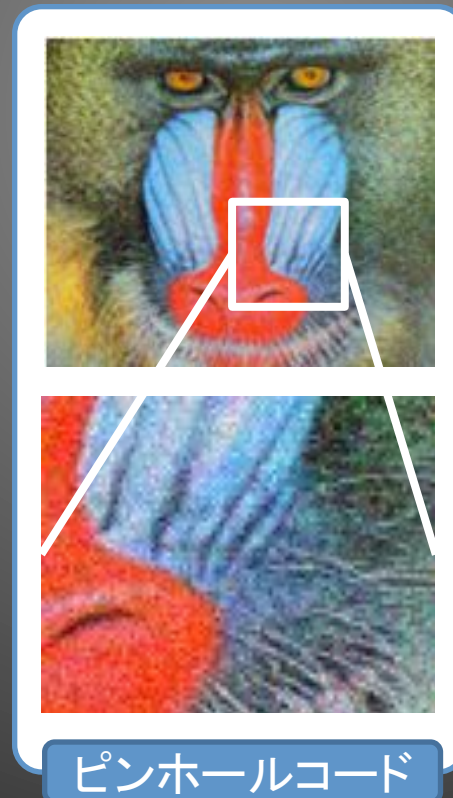
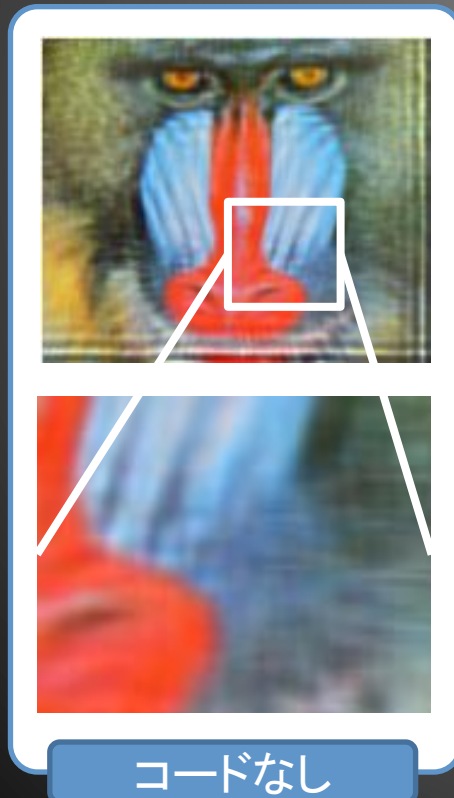
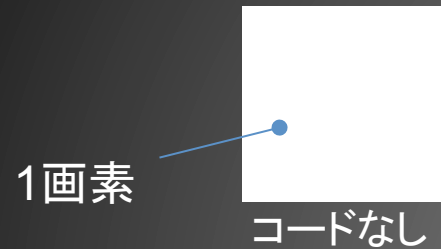
# シミュレーション実験

- コード化した撮像素子により高解像度画像が得られるかシミュレーション実験を行う
  - 超解像手法の一つであるRichardson-Lucy deconvolution (以下RL法)を使う
  - 低解像度画像(32×24pixel)100枚を使用して高解像度画像(320×240pixel)を推定する

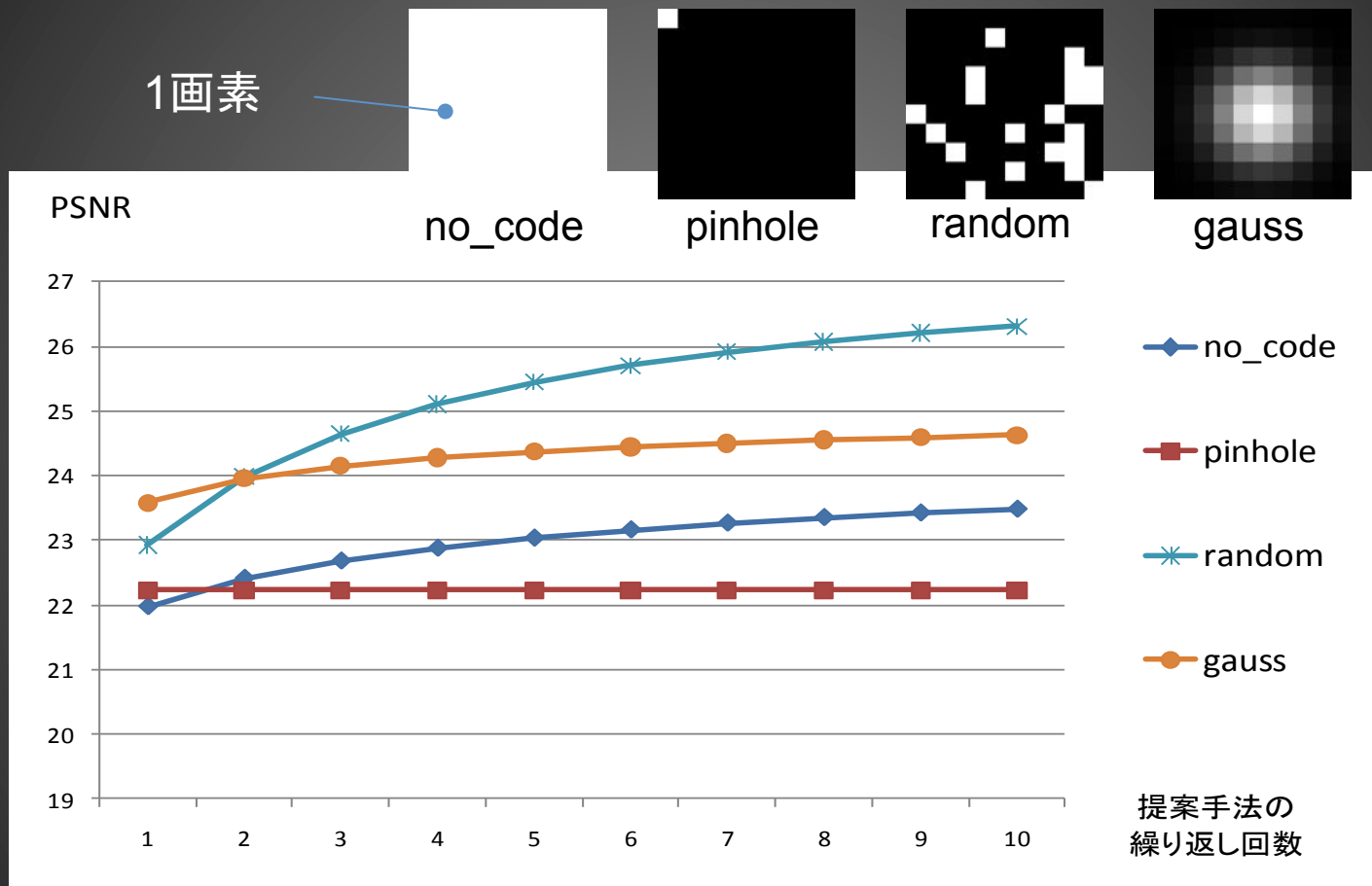


# シミュレーション結果(1/2)

- 観測画像にガウスノイズ(平均0、標準偏差20)を重畳し、シミュレーション実験を行った



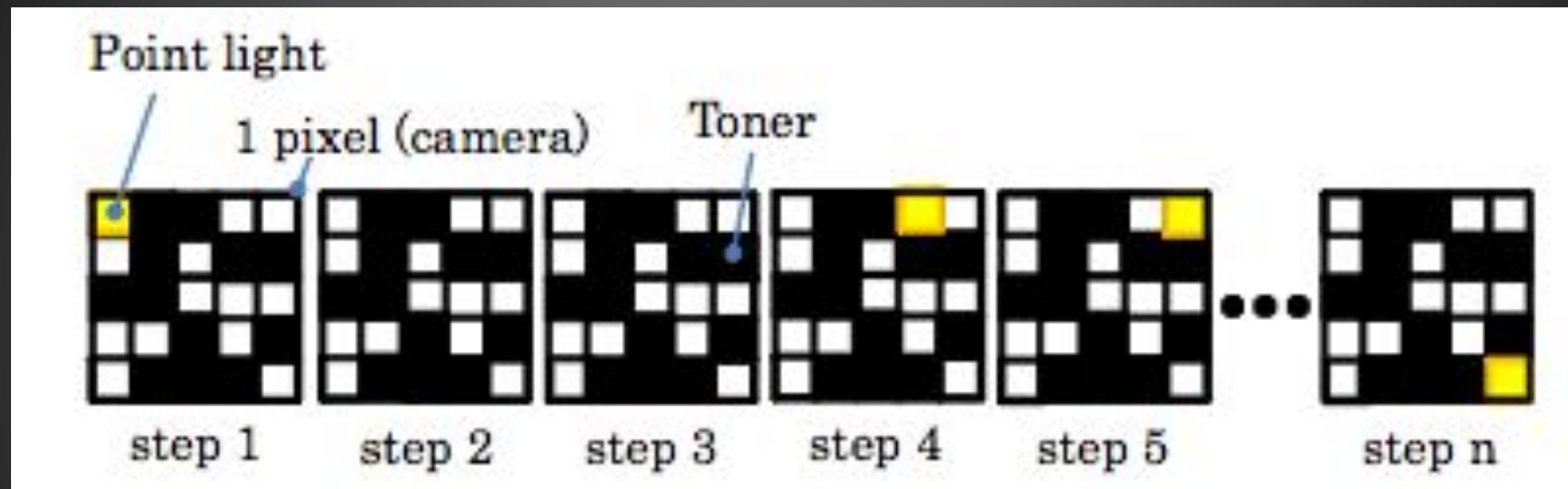
# シミュレーション結果(2/2)



カメラを水平、および垂直に移動したときの超解像結果におけるPSNR

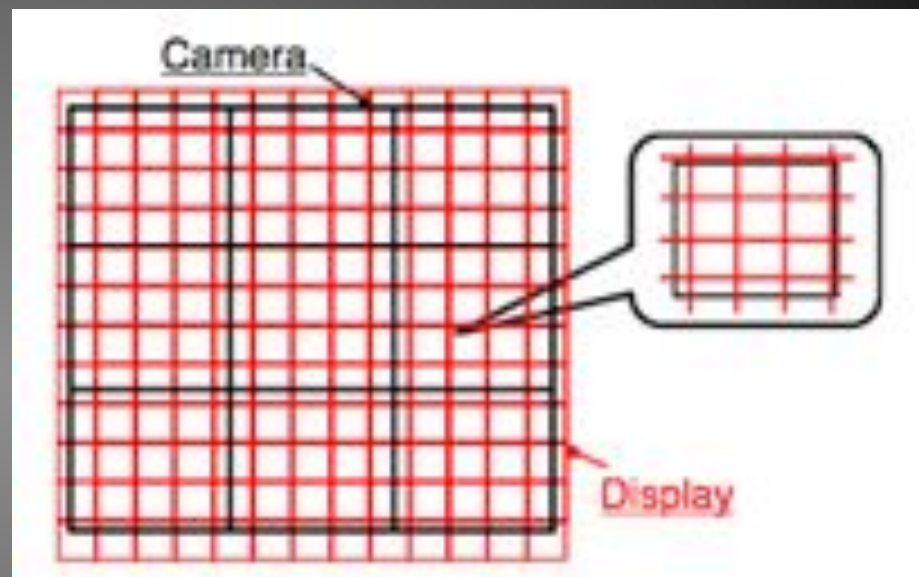
ランダムコードがPSNRがもっとも高く、精度向上を確認することができた

# 粉末散布時のコード推定



- シーン中の点光源をずらしていき, その時の画素値の変化からコードを推定する
  - まともにやると時間がかかりすぎる

# ディスプレイと画素の位置関係

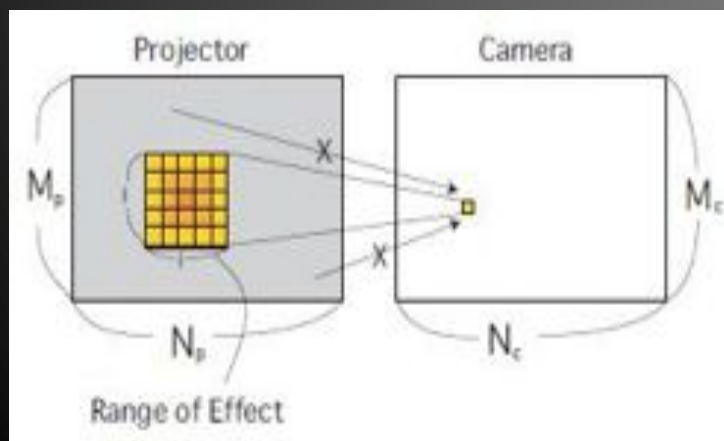


- ディスプレイとカメラの画素の位置関係がわからない
- 画素境界を一致させられない

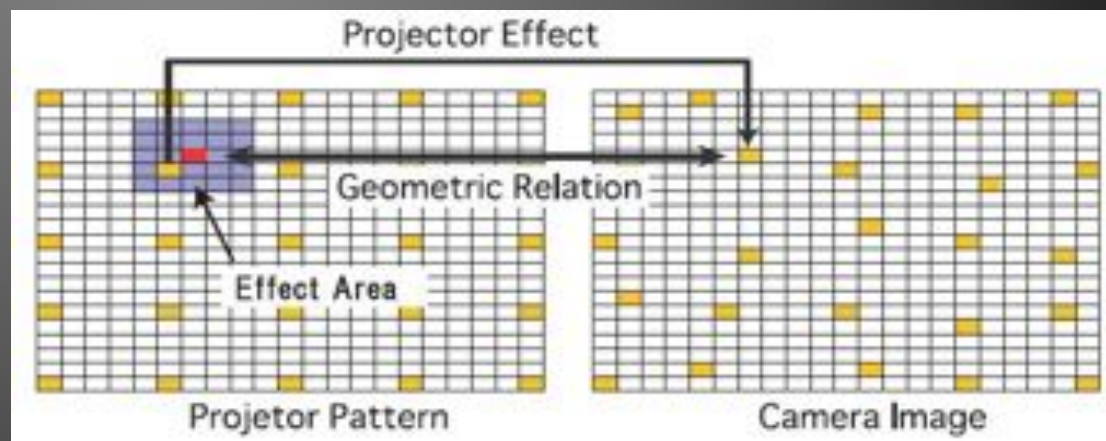
# コードの推定

## コード推定の方法

1. グレイコードをディスプレイに表示して、ディスプレイとカメラの画素の位置関係を大まかに求める
    - カメラ画素に対応するディスプレイ画素がどこであるのかがおおよそ分かる
  2. 十分広い間隔を持った、繰り返しドットパターンを表示する
    - 画素値に変化が生じたとき、その画素に対応するディスプレイ画素に最も近い点灯画素により、その画素が影響されたと考える
- 繰り返しドットパターンを動かしながら多数枚撮影する

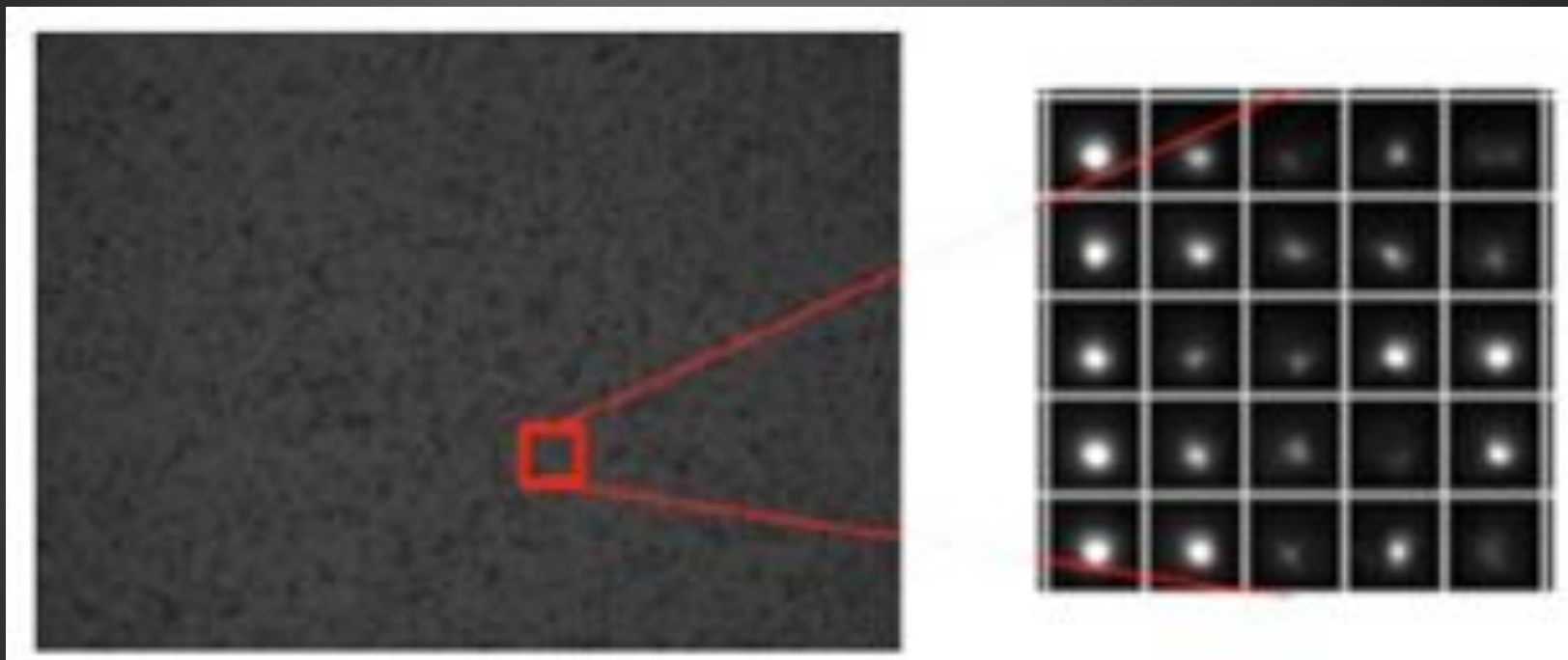


対応ピクセルを中心に設定する影響領域



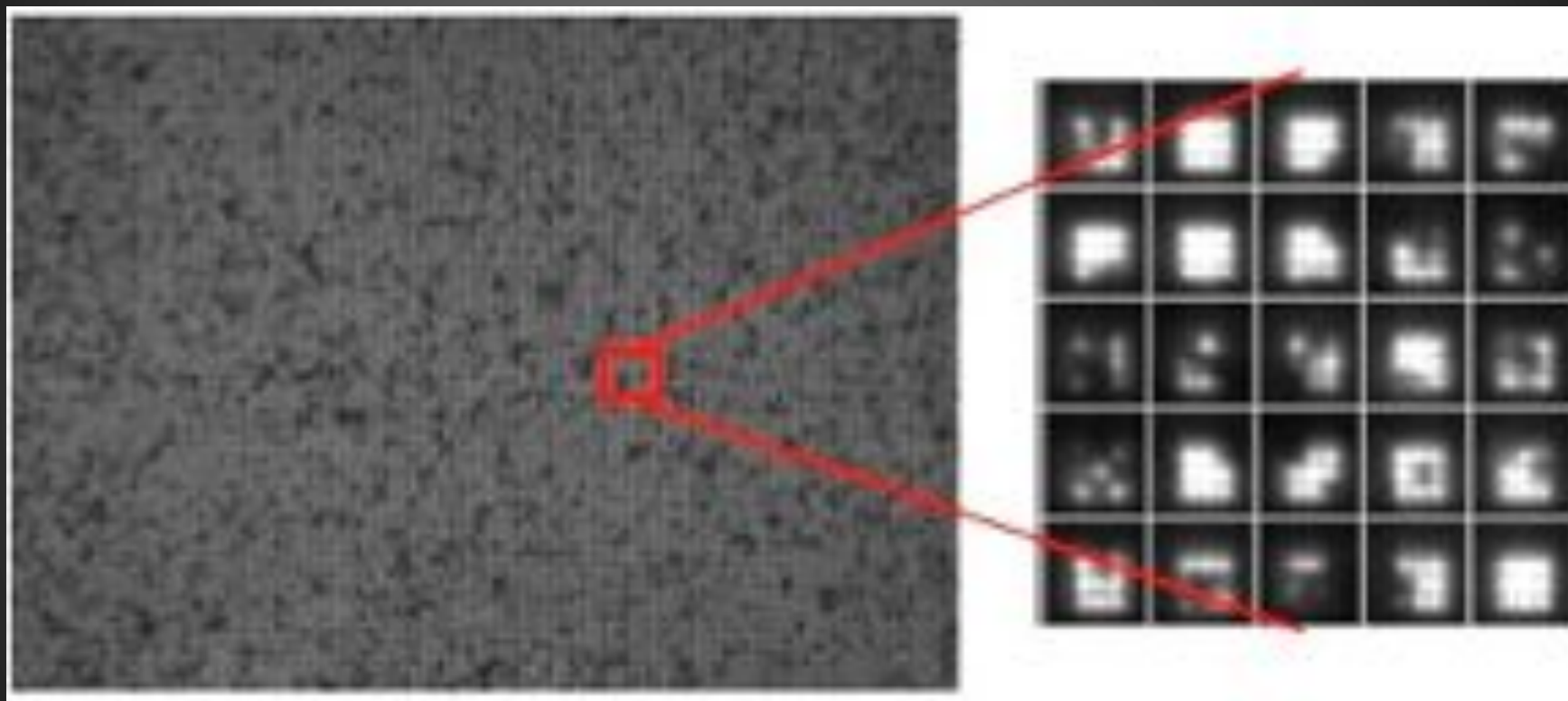
ドットパターンの投影

# 実験例(1)



- 1画素の場合は上手く行かなかった
  - トナーの粉末が大きすぎた
  - レンズの解像度が低すぎた など

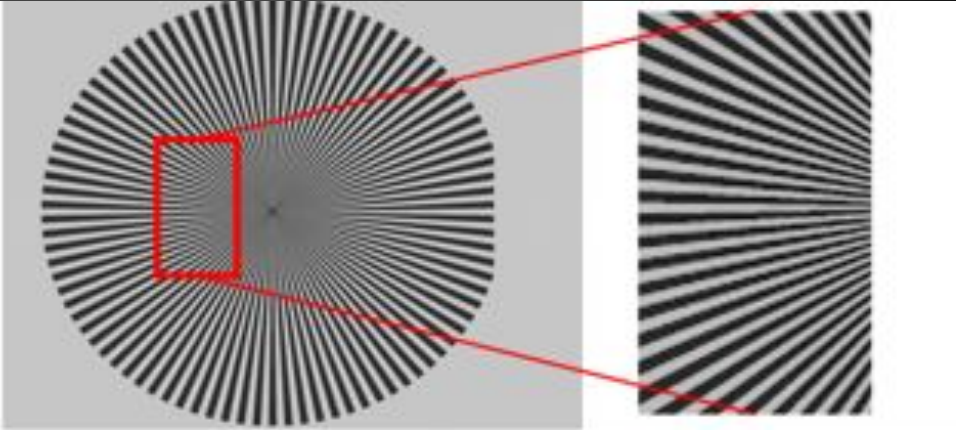
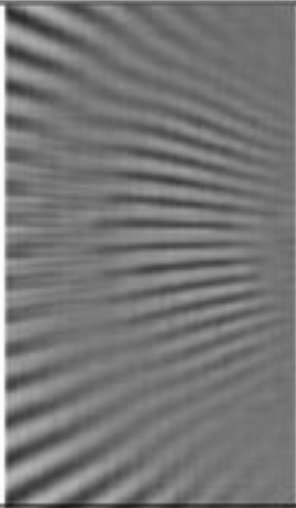
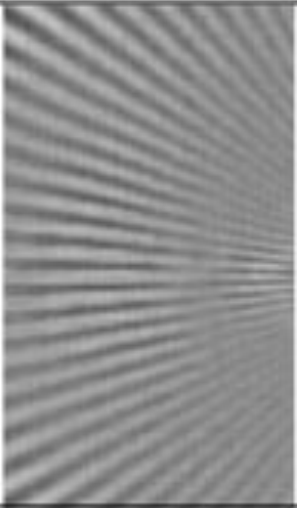
## 実験例(2)



- 3x3画素の値を混合して用いた  
– 画素形状が推定できた



# 実画像実験

目標画像		
コードの種類	コードなし	ランダムコード
逆問題解法		
PSNR	11.858526	13.138333

- シーンの移動量は既知（ディスプレイ上に画像をずらしながら表示）

# 実画像実験



(a) コードなし



(b) ランダムコード

- 運動未知の実画像(入力画像 140x100画素)

# 実画像実験



図 14: コードなしの場合の超解像結果

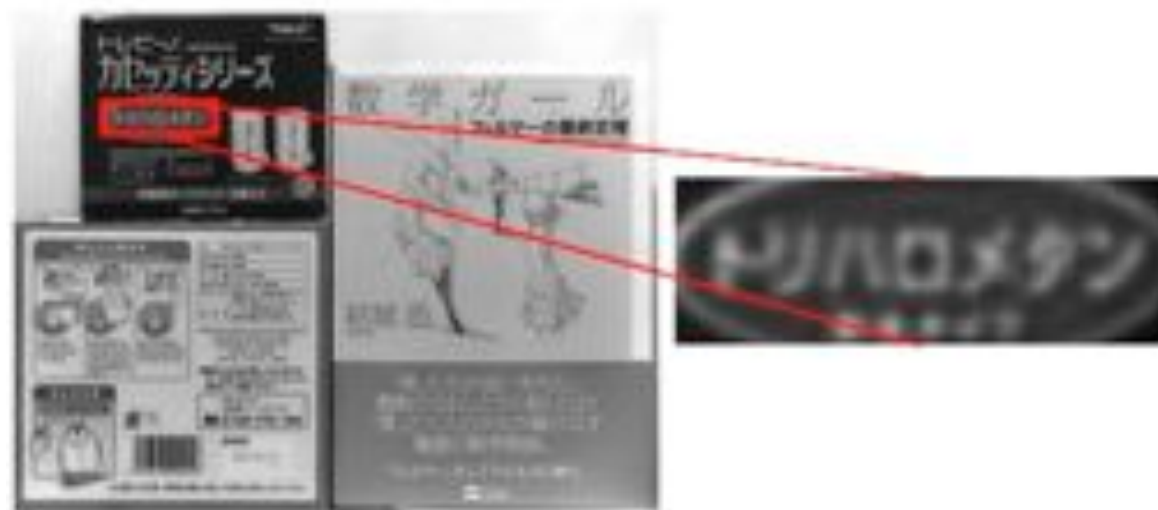
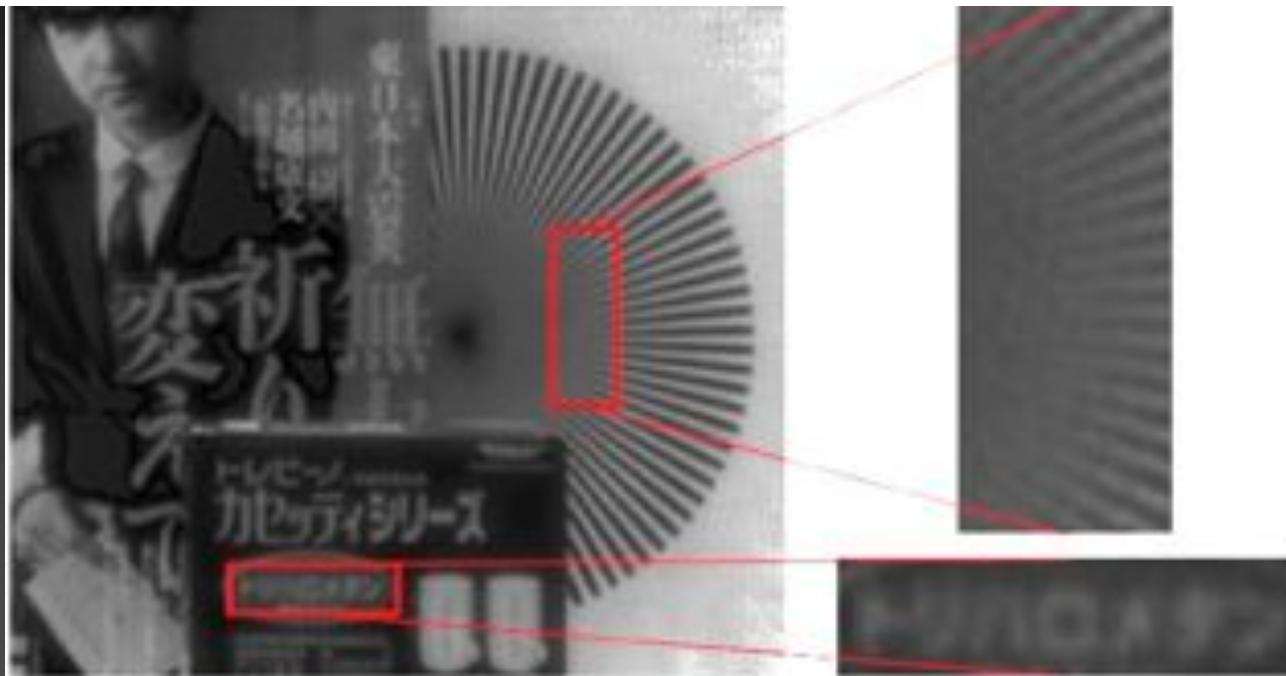
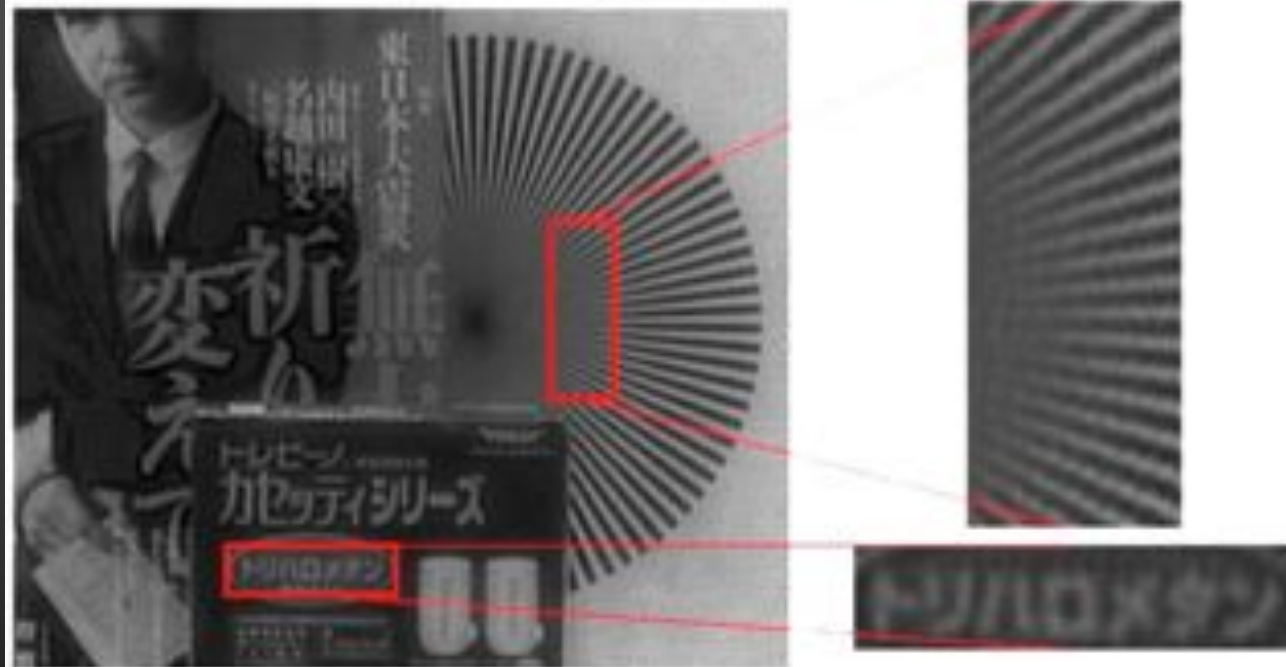


図 15: ランダムコードの場合の超解像結果

- 解像度向上の効果が認められた



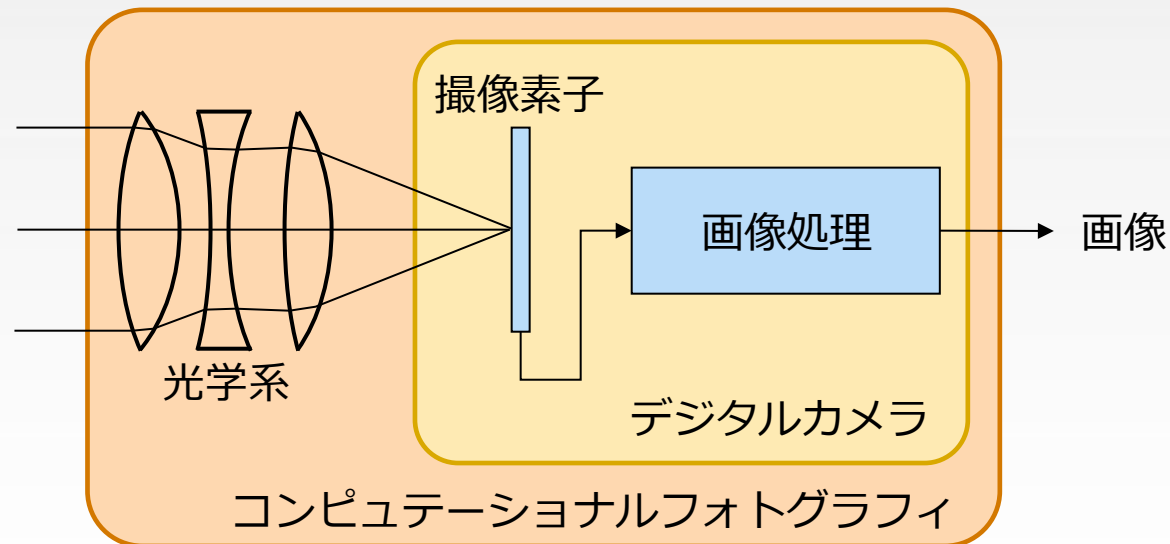
(a) no-code



(b) random-code

# コンピューターショナル フォトグラフィとは？

- 計算機技術による、カメラ進化の第二幕
  - 第一幕：フィルムを撮像素子で置き換え（デジタルカメラ）
    - 「レンズが結んだ像」を高精度にデジタル記録する
  - 第二幕：カメラ全体（光学系，使い方）の再定義・再構築
    - 計算（画像処理）の結果，初めて画像が形成される



コンピューターショナルフォトグラフィ技術が変えようとする範囲



フィルムカメラ



デジタルカメラ



# まとめ



- コンピュータショナルフォトグラフィについて
  - 計算機による演算を前提に光の記録方法そのものを再考することにより, 従来のカメラでは実現できなかったような機能を実現する
    - 「画像を撮影する」カメラから, 「光の分布を計測する」カメラへ
    - レンズの設計が変わる. レンズ単体で画像は完成されない
- コード化 (符号化) の考え方が用いられる
  - カメラが持つ「積分」の性質を積極的に制御・設計する
  - テレビや電話: アナログ通信から, 符号を用いたデジタル通信へ
  - 情報理論や統計理論が, カメラを変える
    - 圧縮センシング, スパースコーディング, など
- カメラのこれから
  - 現在: 様々な用途に対して, 似たようなカメラが用いられている
  - 将来: 用途に応じて構造や原理の異なるカメラが用いられる