

## 合焦点推定による光学顕微鏡計測データの三次元再構成

河内 陽介<sup>†1</sup> 臼 杵 深<sup>†1</sup> 三浦 憲二郎<sup>†1</sup>

本研究では、光学顕微鏡によって撮像された複数枚の画像、いわゆるフォーカスタックから合焦点を推定し、三次元形状の再構成を行う。合焦点の推定には、フォーカスタック中各画素のシフトバリエーションな PSF パラメータを推定することで行い、従来手法に比べ少ないフォーカスタックから良好な三次元形状再構成を行う手法を提案する。

### 3-D Reconstruction by Estimating focus for Optical microscopy measurement data

YOSUKE KAWAUCHI,<sup>†1</sup> SHIN USUKI<sup>†1</sup>  
and KENJIRO T. MIURA <sup>†1</sup>

This paper propose new 3-d reconstruction by estimating focus for Optical microscopy measurement data. First, this method estimates pixelwise in-focus depth in focal stuck. In-focus depth are estimated by estimating the shift variant PSF parameter in the focal stuck.

#### 1. はじめに

対象物体の 3 次元形状を復元する非接触の手法の一つに、Shape From Focus(SFF) 法が知られている。これは、通常のレンズ系で撮影された、焦点の異なる画像系列いわゆるフォーカスタックから対象物体の 3 次元形状を復元する手法である。この手法は、まず画像系列中注目画素の合焦評価値を見積もり、合焦評価値を画像系列間で比較を行う。画像

系列間の注目画素の内、最も合焦評価値がピークとなる合焦点の推定を行うことによって、三次元再構成を行う。合焦評価値の多くは、注目画素を中心とした注目領域内のエッジ情報から得られる高周波成分によって定義する手法が提案されている。また、レンズ系の点広がりに関数 (PSF) がガウス分布で近似できるとき、合焦評価値の理論曲線もまた、ガウス分布で近似できるという仮定を用い、合焦評価値がその理論曲線上でピークをとる点が合焦点であると判断する。

これにより、合焦点の画像系列分解能が画像枚数に依存しなくなり、再構成に用いる画像を抑えることができ、処理の短縮につながる。

本研究では、合焦評価値として新たに、画像内の位置に依存したシフトバリエーションな PSF パラメータを用いた三次元再構成手法を提案する。PSF パラメータとは、PSF を関数形にモデル化した際の、その関数のパラメータである。たとえばレンズ系の焦点外れの PSF の場合、式 (1) で示すような、

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2} & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (1)$$

円筒形で、パラメータは円筒形長径となることが知られている。光学顕微鏡などの被写界深度の低いレンズ系を通して得られるボケ画像は、一般的に、注目領域周辺のピントが合い、それ以外のピントが合っておらずボケたものとなる。これは、画像に劣化を引き起こす PSF のパラメータが位置に依存したものとなっているからであり、ボケの程度が小さい領域つまり合焦である領域では PSF パラメータが小さく、ボケの程度が大きい領域では PSF パラメータも大きなものとなっている。本研究では、この焦点ボケと PSF パラメータの関係を利用し、画像系列中のシフトバリエーションな PSF パラメータ推定を行い、それを合焦評価値とする合焦判定法を提案する。さらに、従来の提案手法より光学的に適切な理論曲線を提案し、光学顕微鏡によって得られた焦点の異なる画像系列からの三次元再構成を行う一手法を提案する。

#### 2. 合焦点推定による光学顕微鏡計測データの三次元再構成

本章では、シフトバリエーションなボケ画像の PSF パラメータ推定手法<sup>2)</sup>と推定した PSF パラメータから、3 次元再構成を行う手法について述べる。

##### 2.1 PSF とボケ画像のモデル化

ここでは、本研究で扱うボケ画像のモデルと、本手法において推定する PSF について述

<sup>†1</sup> 静岡大学  
Shizuoka University

べる。一般に、ボケ画像  $g(x, y)$  は、元画像  $f(x, y)$ 、PSF  $h(x, y)$ 、ノイズ  $n(x, y)$  を用いて次式のように表される。

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-u, y-v)h(u, v)dudv + n(x, y) \quad (2)$$

本研究で扱う焦点ボケ画像は PSF  $h(x, y)$  の関数が、画像における位置に依存するシフトバリエーションなボケ画像である。式 (2) はさらに、

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

と表すことができる。但し、

$F(u, v)$ : 元画像の周波数変換

$G(u, v)$ : ボケ画像の周波数変換

$H(u, v)$ : PSF の周波数変換

$N(u, v)$ : ノイズの周波数変換

である。また、本研究で扱う PSF の関数形はレンズの開口の影響やレンズの収差、減衰といった影響を考慮した場合に、より実際の撮影状況に近く簡単にモデル化が行える形としてガウス形をした PSF を用いてボケをモデル化することにした。

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$\sigma^2$ : 分散

$\sigma \propto r$ : 半値幅

## 2.2 劣化画像中の PSF パラメータ推定

レンズ系の焦点外れに限定した焦点ボケ画像中のシフトバリエーションな PSF パラメータ推定に 1) がある。1) では、焦点ボケによる PSF に限定し、円筒形直径の推定を行う。円筒形直径の推定は、注目している直径とその直径からわずかに大きくした直径 (1 ピクセルのサイズを単位とする) を用いて、それぞれウィナーフィルタで画像を復元する。復元した 2 枚の画像の注目画素ごとの PSF パラメータを推定するために、注目画素を中心とした相関を取ると、正解となる直径で、その値が極大となることが示されている。本研究では、1) で提案されているシフトバリエーションな PSF パラメータ推定手法を用い、また、ウィナーフィルタに用いる PSF の関数形はガウス関数とする。

## 2.3 PSF パラメータを用いた合焦点推定による三次元再構成

次に推定した画像系列内のシフトバリエーションな PSF パラメータを合焦評価値として 3 次元再構成を行う。画像系列内の各画素に対応する PSF パラメータは上述の手法により求まっ

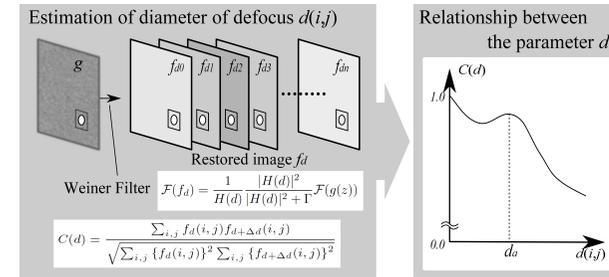


図 1 PSF パラメータの推定法

ているので、それを画像系列間で比較し、合焦点の推定を行う。また、式 (4) で示されるガウス関数の半値幅  $\sigma$  は幾何光学的なボケ半径を  $R$  とするとき、

$$R = \sqrt{2}\sigma \quad (5)$$

で表すことができ<sup>2)</sup>、合焦評価値としてボケ半径  $R$  を用いる。すると、幾何光学的なボケ半径  $R$  が撮像面と撮像対象とを結ぶ光軸  $z$  に対して、比例となる関係から、理論曲線  $f(z) = az + b$  は直線となる。実際には PSF パラメータ推定に用いた最少半値幅  $\sigma_{min}$  を用いて、

$$R'(z) = \begin{cases} R(z) - \sqrt{2}\sigma_{min}/2 & z \leq z_a \\ -R(z) + \sqrt{2}\sigma_{min}/2 & z > z_a \end{cases}$$

とおき、 $R'(z)$  から理論曲線  $f(z) = az + b$  のパラメータ  $a, b$  を求め、 $f(z) = 0$  となる合焦位置  $z_a$  を求める。 $z_a < z$  で  $R(z)$  を負にする必要があるが、 $z_a$  は未知であるので、 $R(z)$  が最小となる  $z$  を  $z_a$  と仮定し、 $z_a < z$  の  $R(z)$  の値を負とする。

以上、提案手法の流れについて図 2 にまとめる。まず光学顕微鏡によって得られた画像系列中  $g_z$  の PSF パラメータである半値幅  $\sigma$  を全画素にわたって推定する。次に、推定した半値幅から幾何光学的なボケ半径  $R$  を算出して、それを合焦評価値とする。最後にボケ半径  $R$  を補正し、最少自乗法によって理論曲線のパラメータを求め、合焦位置  $z_a$  を決定する。

## 3. 本手法の適用例

### 3.1 計算機による合成ボケ画像への適用

計算機上で作成したボケ画像に対して、本手法を適用し、画像系列中の PSF パラメータ

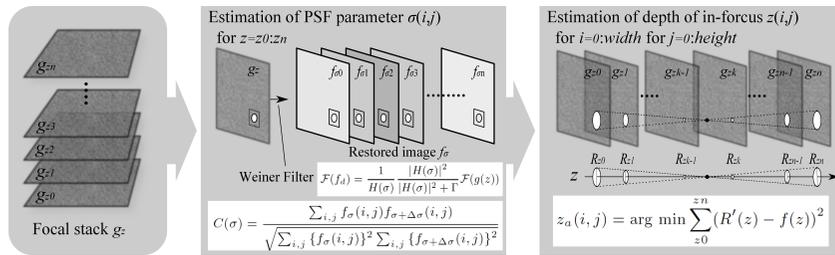


図 2 提案手法の流れ

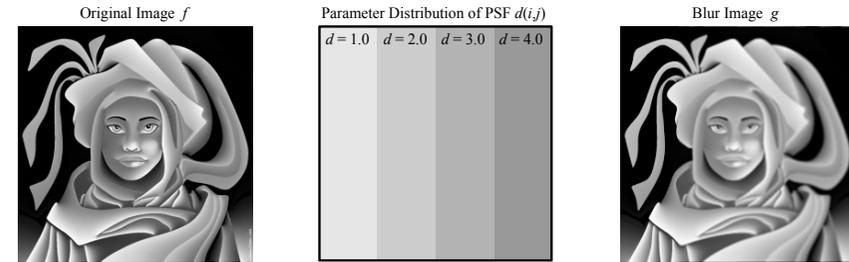


図 4 シミュレーションに用いた元画像と PSF パラメータ分布によって得られるボケ画像

の推定を行った。まず、シフトインバリエントなボケを与えたボケ画像 (256x256[pixel]) を作成し、PSF パラメータ推定の傾向を調べた。ボケに使用した PSF は円筒形でパラメータは  $R = 3.0$  を用いた。また、推定の際には  $\sigma_{min} = 0.1$  から  $\sigma_{max} = 6.0$  まで  $\Delta\sigma = 0.1$  でボケ画像にウィナーフィルタ施し、60 枚の復元画像を作成して各画像間の相関値を求めた。PSF パラメータの推定を行った結果を図 3 に示す。推定された  $\sigma$  は概ね正解に近い値となり、シフトインバリエントなボケ画像において、PSF パラメータ推定が良好に行えることが確認できた。しかし、相関値グラフにおいて極値は不安定に発生するため必ずしも良好な結果を得ることはできない。

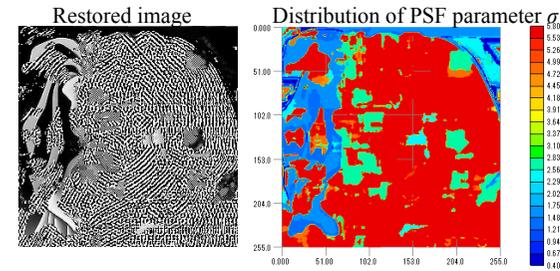


図 5 ボケ画像復元結果と推定された PSF パラメータの分布

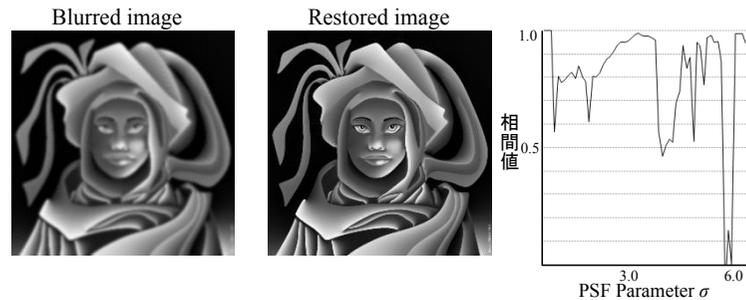


図 3 ボケ画像と PSF パラメータ推定によって回復された画像とパラメータ  $\sigma$  と相関値の関係

次に図 4 に示すような焦点ボケの PSF パラメータとなるボケ画像 (256x256[pixel]) を作成し、同様に PSF パラメータ分布の推定を行った。結果を図 5 に示す。図 5 から分かるように正解である PSF パラメータの推定ができていない。

### 3.2 光学顕微計測画像への適用

PSF パラメータ推定手法を光学顕微計測画像へ適用した結果を図 6 に示す。  $\sigma_{min} = 0.1$  から  $\sigma_{max} = 30.0$  まで  $\Delta\sigma = 0.1$  で 300 枚の復元画像を作成し、PSF パラメータの推定を行った。しかし、良好な PSF パラメータ推定結果を得ることはできなかった。シフトバリエントなボケ画像において良好な結果が得られない原因としては、相関値が不安定になってしまうため、正解のパラメータの極値を捉えることが困難であるためだと考えられる。

## 4. ま と め

本研究では、SFF 法に用いる合焦評価値として、新たにシフトバリエントな PSF パラメータを用いることを提案し、それに伴う、合焦評価値の新たな理論曲線を提案した。シフトバリエントな PSF パラメータ推定に関して、既存の関連研究の追実験を行ったが良好な結果を得ることはできなかった。本提案手法の有効性を確認するためにはより安定的にシフトバリエントな PSF パラメータを推定する手法を考案する必要がある

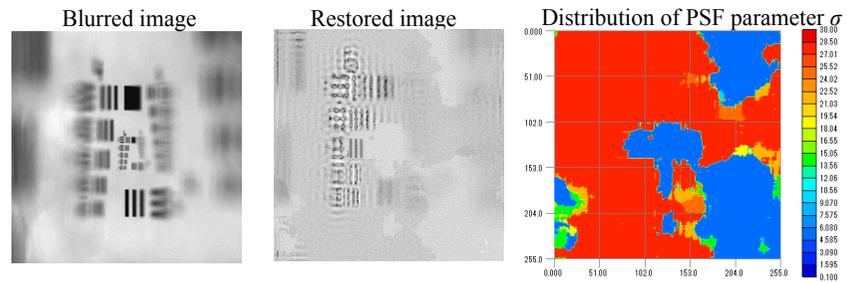


図 6 光学顕微計測データとその復元画像と推定された PSF パラメータの分布

### 参 考 文 献

- 1) 橋本 正一, 斎藤 英雄: PSF のパラメータ分布を推定するシフトバリエーションぼけ画像の復元法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-D-II, No.4, pp.719-728 (1994).
- 2) 児玉 和也, 相澤 清晴, 羽鳥 光俊: 複数画像からの全焦点画像の再構成, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.9, pp.2298-2307 (1997).