

# 光学顕微鏡を用いた高速三次元計測のためのロバストなデフォーカス量推定

静岡大学 ○萬立洋次郎 白杵深 三浦憲二郎

Robust defocus estimation for fast 3D microscopic measurement

Shizuoka University: Yojiro MANDACHI, Shin USUKI, Kenjiro T. MIURA

Optical microscope is useful for review inspection of micro-sized industrial components. One of the advantages of optical methods is a high throughput measurement ability. In order to maximize this ability, one-shot 3D measurement method is required. In this study, DFD (Depth from Defocus) which is a conventional distance measurement technique in photogrammetry, is applied for measurements using microscope images. In general, a microscope image has shallow depth of field and low contrast with high noise level. Therefore, we proposed a robust defocus estimation method which is compatible with microscope images.

## 1. はじめに

従来、微細な工業製品や精密部品の生産現場においては、寸法や欠陥等を対象とするインラインの外観検査が行われてきた。近年は、計算機性能や CAD/CAM/CAE の発展に伴い、ナノ・マイクロ分野においても三次元形状を高速に計測し、インラインで形状モデルを構築する技術に注目が集まっている[1]。例えば、走査型電子顕微鏡やプローブ顕微鏡、共焦点レーザ走査顕微鏡を用いることで、ナノ・マイクロ三次元形状測定は可能であるが、蒸着、真空環境、三次元スポット走査等が必要とされ、測定時間やコスト等の観点から実用的なインライン検査装置としての導入は困難である。そこで、我々は比較的 low コストで導入可能な光学顕微鏡に注目した。光学顕微鏡は、光学結像による二次元並列高速計測、非破壊性など様々な利点を有し、幅広い分野で利用されている。一方で、高倍率化・高解像度化に伴う観察視野の縮小や、被写界深度の浅さといった問題点もある。これにより、三次元構造を有する物体の高解像度での観察が困難であった。

そこで、先行研究として特徴点追跡による移動量推定を用いたモザイクングと、輝度の局所分散値を利用した合焦位置推定を行い、観察視野および被写界深度の拡張を試みた[2]。さらに、光軸方向への観察面の移動を推定することにより、マイクロ形状の三次元再構成に応用した[3]。しかし、再構成には観察面の三次元的な走査が必要とされ、光学顕微鏡の高スループット性が生かされていない。そこで、本研究では従来の写真測量でもちいられてきた Depth From Defocus 法[4]を顕微鏡画像に適用し、1枚の画像からマイクロ形状の再構成を行うことを目的としている。本報告では、一般的に被写界深度が浅くコントラストが低い顕微鏡画像に適した、ロバストなデフォーカス量推定の方法を提案する。

## 2. Depth From Defocus 法

Depth From Defocus 法は、画像中のデフォーカス量を元に、試料の奥行き情報を取得する手法である。これにより、1枚の画像から試料の三次元形状を復元することが可能である。本節では、従来の Depth From Defocus 法[4]について説明する。

画像におけるデフォーカスは、一般的に thin lens model としてモデル化される。つまり、図 1 のように、焦点面における一点はセンサ平面においても一点で結像される。一方、焦点の外れた面における一点は、広がりをもった円として結像される。この円は錯乱円と呼ばれ、錯乱円半径は焦点面からの距離に比例する。したがって、画像中の各点における錯乱円半径を推定することにより、試料の奥行き情報が取得される。

また、錯乱円によるデフォーカスカーネルとして、一般的にガウス関数が用いられる。そこで、パラメータの既知なガウシアンカーネルによって画像を再度ぼかし、元画像との勾配の比をとることにより、テクスチャに依存しないデフォーカス量の算出が可能となる。

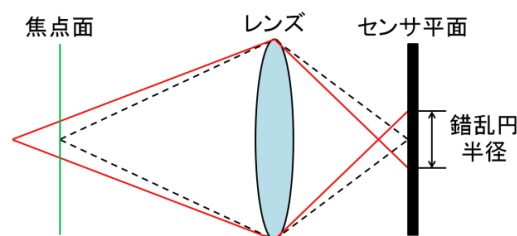


図 1 thin lens model の概略図

つまり、画像中のエッジ  $f(x)$  は、ステップ関数  $u(x)$  をもちいて、

$$f(x) = Au(x) + B \quad (1)$$

として表される。ここで  $A$  および  $B$  は定数である。したがって、錯乱円によるデフォーカス (ガウシアンパラメータ  $\sigma$ ) を含んだエッジの勾配  $\nabla i(x)$  は、

$$\nabla i(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

となる。さらに、既知のパラメータ  $\sigma_0$  によって再度ぼかしたエッジの勾配  $\nabla i_0(x)$  は、

$$\nabla i_0(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi(\sigma^2 + \sigma_0^2)}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma^2 + \sigma_0^2)}\right) \quad (3)$$

である。よって、エッジ位置 ( $x = 0$ ) における 2 つの勾配の比  $R$  は、

$$R = \frac{|\nabla i(0)|}{|\nabla i_0(0)|} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + \sigma_0^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

となり、したがって、錯乱円によるデフォーカスのガウシアンパラメータは、

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{R^2 - 1}} \sigma_0 \quad (5)$$

と算出される。ここで、この値は  $A$  には依存せず、テクスチャに無関係なデフォーカス量であることがわかる。なお、勾配については、 $x$  方向および  $y$  方向それぞれにおけるソーベルエッジ値の 2 乗和の正の平方根を用いる。

### 3. デフォーカス量推定手法の提案

光学顕微鏡は一般的に被写界深度が浅く、コントラストが低い。さらに画像中には多くのノイズが混入する。よって、従来の Depth From Defocus 法では距離計測が困難である。そこで、Depth From Defocus 法において従来とは異なる勾配の算出方法を提案し、ロバストにデフォーカス量を推定する。

従来のようにソーベルフィルタを用いた場合、注目画素の 8 近傍の画素値をもちいるが、より多くの近傍画素を用いることでロバスト性の向上を図る。そこで、式(6)で示される局所差分をもちいる。画素  $(m, n)$  における輝度を  $I(m, n)$  とすると、局所差分  $LD(m, n)$  は、

$$LD(m, n) = \frac{1}{W} \sum_{p=-W_x}^{W_x} \sum_{q=-W_y}^{W_y} |I(m+p, n+q-1) - I(m+p, n+q)| \\ + |I(m+p-1, n+q) - I(m+p, n+q)| \\ + |I(m+p+1, n+q) - I(m+p, n+q)| \\ + |I(m+p, n+q+1) - I(m+p, n+q)| \quad (6)$$

ここで、 $W_x$ 、 $W_y$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$  方向の局所領域サイズ、 $W = (2W_x + 1)(2W_y + 1)$  は局所領域の面積である。差分を用いているため、ソーベルフィルタと同じオーダーの値となると考えられる。さらに、エッジが多い領域では局所領域サイズを小さく、エッジが少ない領域では大きく、といったように適応的に用いることで、よりロバスト性の向上が見込まれる。

また、式(7)で示される局所分散を用いることで勾配検出の感度を向上させることも可能である。距離との線形性は失われるが、事前のキャリブレーションを行うことで対応が可能である。局所分散  $LV(m, n)$  は、

$$LV(m, n) = \frac{1}{W} \sum_{p=-W_x}^{W_x} \sum_{q=-W_y}^{W_y} |I(m+p, n+q) - \bar{I}(m, n)|^2 \quad (7)$$

ここで、

$$\bar{I}(m, n) = \frac{1}{W} \sum_{p=-W_x}^{W_x} \sum_{q=-W_y}^{W_y} I(m+p, n+q) \quad (8)$$

は局所領域内の画素値の平均値である。

### 4. 顕微鏡画像への適用結果

ここでは、提案した勾配算出方法を用いて、顕微鏡画像に Depth From Defocus 法を適用した結果をデプスマップとして示す。入力画像として、図 2 に示すような回路基板の一部の段差形状の画像を用いる。

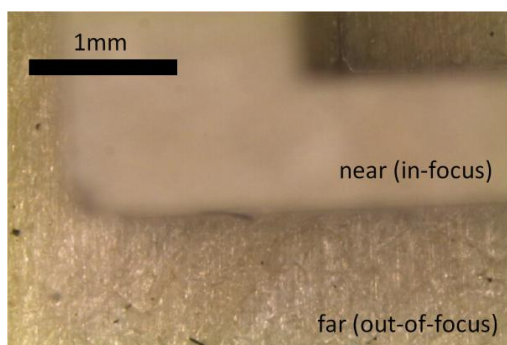


図 2 入力画像

図 3, 4, 5 に、勾配算出法としてソーベルフィルタを用いた結果、適応的な局所領域の差分を用いた結果、局所領域サイズが  $W_x = W_y = 5$  の局所分散を用いた結果をそれぞれ示す。

従来手法では疎なデプスマップであるが、提案手法では密なマップが得られた。適応的な局所領域の差分を用いると、焦点の合っていない領域が平坦化された結果となった。また、局所分散を用いるとデフォーカス量の差がより顕著に表れた。

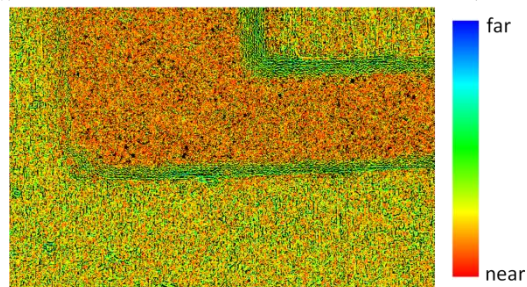


図 3 ソーベルフィルタを用いた結果

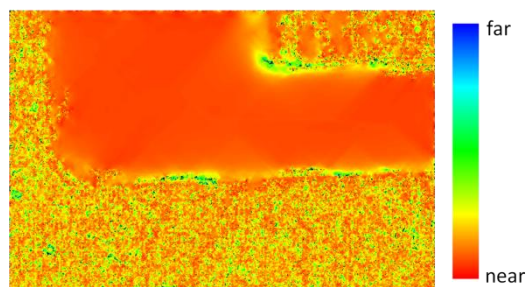


図 4 適応的な局所領域の差分を用いた結果

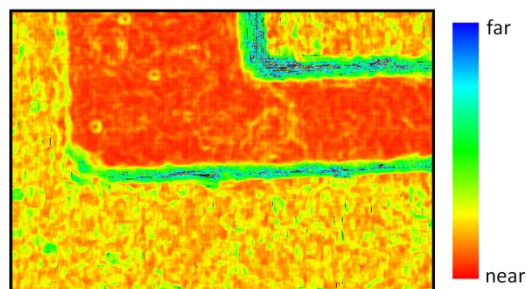


図 5 局所領域サイズ 5 の局所分散を用いた結果

### 5. まとめ

光学顕微鏡画像に対して Depth From Defocus 法を適用した。勾配値の算出において、局所差分や局所分散を用いた方法を提案し、適用結果の比較を行った。今後は、提案手法の理論的な検証と既知の段差試料を用いた定量評価を行う。

### 参考文献

- [1] 三浦憲二郎, 河内陽介, 白杵深, 3D 顕微鏡計測データを用いたナノ・マイクロ形状モデリング: *Modeling Nano*, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 113-134, 2011.
- [2] 白杵深, 萬立洋次郎, 三浦憲二郎, 顕微鏡動画の広域合焦位置推定による三次元形状再構成, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 287-288, 2012.
- [3] 萬立洋次郎, 白杵深, 三浦憲二郎, 顕微鏡動画からのマイクロ形状再構成—観察面の光軸方向への移動推定方法の提案—, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 873-874, 2013.
- [4] S. Zhuo et al., Defocus map estimation from a single image, *Pattern Recognition*, Vol. 4, Issue. 9, pp. 1852-1858, 2011