

特集 | 可変焦点レンズを用いたデジタル全焦点顕微システム*

A Digital All-in-focus Microscope System using a Quick-Response Dynamic Focusing Lens

金子 卓

Takashi KANEKO

光本直樹

Naoki MITSUMOTO

川原伸章

Nobuaki KAWAHARA

We propose a new digital all-in-focus microscope system using a quick-response dynamic focusing lens suitable for micro parts assembling. This microscope system realizes real-time observation for micro parts with a deep depth of field, as well as three-dimensional shape measurement using only one image sensor. In this paper, we report a newly developed real-time algorithm called one pixel method for generating clear image having a deep depth of field. This method is able to process one original picture (640 x 480 pixels per frame) in approximately 1.0 ms. We also report the results of three-dimensional shape measurement in high accuracy using the contrast of brightness method.

Key Words : Dynamic Focusing Lens, All-in-focus Microscope System, Process one Original Picture, Three-Dimensional Shape Measurement, Micromachine

1. 序論

近年の微細な部品を取り扱うマイクロマニピュレータの研究が盛んに行われている¹⁾²⁾。このマイクロマニピュレータでは、部品を光学的に認識して位置決めを行ったり、出来上がった製品の検査を行うために顕微鏡や内視鏡のような拡大光学系が用いられている場合が多い。しかしながら、この拡大光学系においては、倍率が高くなるほど被写界深度が非常に浅くなり一度に観察できる範囲が制限されるため、複雑な3次元形状のすべての位置に被写界を合わせることが困難な場合が多い。

我々はTransducers 97において、可変焦点レンズ(Dynamic Focusing Lens, DFL)を用いたアナログ型の全焦点顕微システムを報告している³⁾。このアナログ全焦点顕微システムでは、可変焦点レンズによって対物レンズの焦点位置を高速で移動し、光学的に画像を重ね合わせて被写界深度を拡大しており、リアルタイムで被写界深度の深い画像が得られることを確認している。しかしながら、この方式では焦点の合った像と合っていない像が重なり合わされるため、解像力が低下するといった問題が残っていた。

この問題を解決する方法として、撮像素子から出力される焦点位置の異なる複数枚の画像をデジタル画像処理することにより、焦点の合っている部分だけを抽出してすべての位置に焦点が合った全焦点画像をリアルタイムで生成するデジタル全焦点顕微システムが考

えられる。ここで、焦点の合っている部分を抽出する手法として、従来から様々なアルゴリズムが提案されている⁴⁾。しかしながら、リアルタイム(ビデオレート, 16.6 ms / 1 フィールド)で全焦点画像を演算することは困難であり、高速処理が可能なアルゴリズムが強く求められていた。

そこで本報告では、リアルタイムでの画像処理を実現するために新しく開発した、「一点比較法(One Pixel Method, OPM)」と名付けた新規なアルゴリズムについて述べる。この一点比較法は従来の手法のようなコントラストの変化ではなく、画素ごとの輝度の変化によって焦点位置を判別することにより、大幅に処理時間を短縮することを可能にしている。

さらに、このデジタル全焦点顕微システムでは、可変焦点レンズのアクチュエータに印加する電圧をモニターすることにより焦点距離を求めることができるので、全焦点画像生成の際に焦点が合った位置をメモリーしておけば、物体までの距離を表示する3次元形状データを生成できるといったメリットがある。この3次元形状データ生成にあたり高精度の全焦点位置の判別アルゴリズムの検討を行ったので、その結果についても合わせて報告する。

この全焦点顕微システムは、マイクロマニピュレータやマイクロファクトリーなどにおいて、非常に有用な技術の一つになると思われる。

2000 IEEE. Reprinted, with permission, from "The 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000)"; 1/2000, held in Miyazaki, Japan, "A New Smart Vision System Using a Quick-Response Dynamic Focusing Lens" より和訳し、一部加筆して転載

2. 構造と原理

2.1 全焦点顕微システムの原理

本研究における全焦点顕微システムの構成とブロック図をFig.1に示す．本システムは主に，可変焦点レンズを含む光学系，撮像素子(CCD)および，画像処理部から構成される．

光学系のキーデバイスとなる可変焦点レンズは，マイクロアクチュエータによって高速で焦点位置を変化させることが可能である．この可変焦点レンズの外観をFig.2に示す．また，構造の概略をFig.3に示す．

このレンズは，厚さが50 μ m，直径がそれぞれ10mmと14mmの2枚のガラスダイヤフラムの中に透明動作液として屈折率1.50のシリコンオイルを封入したレンズ部と，圧電バイモルフを積層したアクチュエータ⁵⁾から構成される．アクチュエータによってレンズ部を変形させることにより，Fig.3に示すように焦点距離を連続的に高速で変化させることが可能である．

対物レンズとしては焦点距離 $f=25$ mm，物体空間焦点距離64.5mmの接写レンズを用いた．この対物レンズの被写界深度は約2mmである．ビジョンシステムの倍率は15インチモニタ上で約50倍となっている．焦点面の移動範囲は可変焦点レンズと接写レンズを組み合わせたレンズ系において計算した結果， ± 4 mmの範囲で焦点を移動できることがわかった．

画像処理部では，撮像素子から得られた複数の画像から焦点の合っている領域を抽出して組み合わせることにより，すべての位置に焦点が合った全焦点画像を生成する．リアルタイムで全焦点画像を生成するために開発した一点比較法については，次節で説明する．

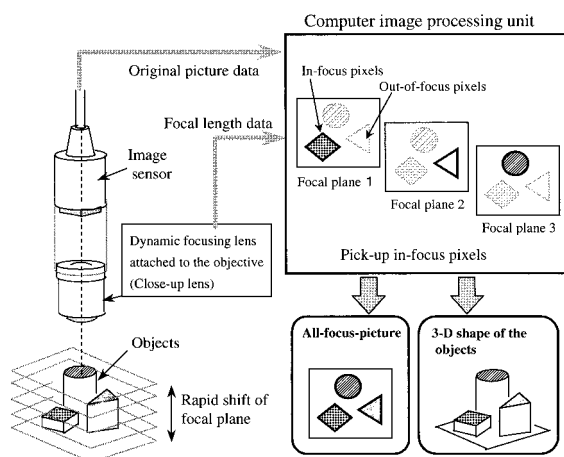


Fig. 1 Structure of the digital all-in-focus microscope system

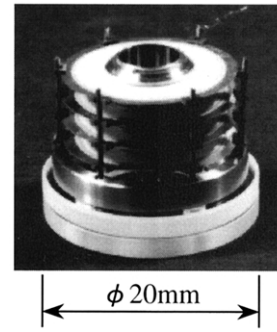


Fig. 2 Photo of DFL

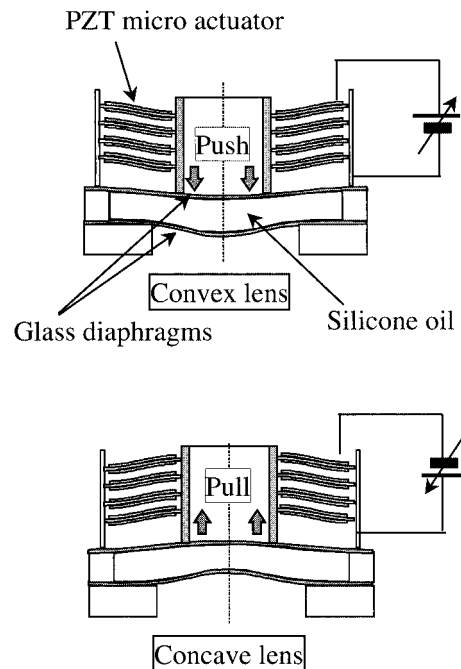


Fig. 3 Focal plane shift mechanism

2.2 一点比較法の原理

リアルタイムで全焦点演算を実現するため，一点比較法においては，従来のように領域内の画像のコントラストに基づいて行うのではなく，1画素における焦点距離と輝度値との相関に基づいて判別を行なっている．Fig.4に示すように，観察物上の白黒の模様を取り込んだ場合に，白と黒との境界近傍の画素においては，焦点の位置を境に輝度値に極値が現れることが確認された．

この現象を用いて，一点比較法ではFig.5に示すように二つの条件によって焦点の合っている画素を抽出していく．まず，焦点位置の異なる画像において，同じ座標にある画素の中から輝度値の最大値と最小値を抽出する．さらに，Fig.4(a)，および，Fig.4(c)のように極大値や極小値が一つだけ現れる場合には，

それらの極値における1次微分を求めて、微係数が0ではない画素を排除することにより、極値となる焦点位置を判別する。(条件1)

一方、白と黒とのほぼ境界上にある画素については、Fig.4(b)のように焦点位置近傍に極大値と極小値が現れるので、本手法では最大点のみを抽出することとした。(条件2)

この判定では極大値の位置が焦点位置ではない場合に、焦点位置を抽出することができず誤差になってしまう。ただし、本手法はリアルタイム表示を目指したアルゴリズムであるため、MPEGにおける画像圧縮のように、得られた全焦点画像を人間が見た場合に、この誤差が気にならなければ良いものと判断した。

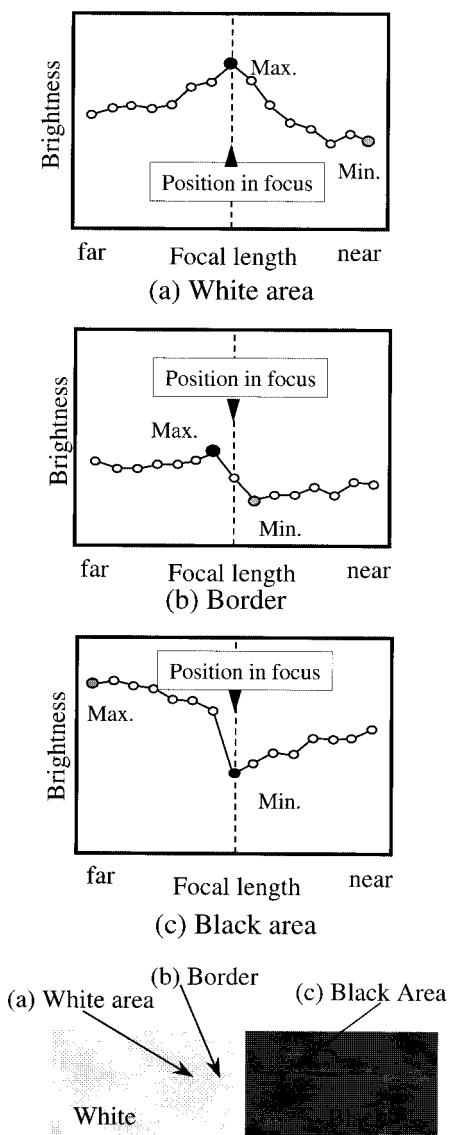


Fig. 4 Brightness change in response to focal length

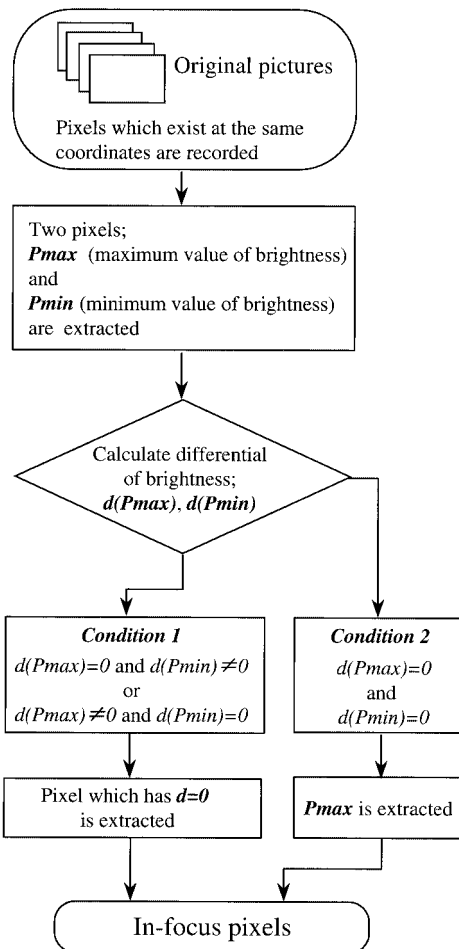


Fig. 5 Algorithm of one pixel method

2.3 3次元形状測定法

本ビジョンシステムでは可変焦点レンズに印加する電圧をモニターすることにより、レンズの焦点距離を求めることができる。よって、全焦点画像を生成する際にどの位置で焦点が合ったかをメモリーに格納しておくことで、物体までの距離情報を表示する3次元形状データを生成することが可能となる。

3次元形状を生成する際には焦点の合っている位置をきちんと判別する精度が重要となる。我々はこの精度をFig.6中に示す計算式によって「合焦点精度」として定義することとした。計算では5枚の原画像のうち、焦点位置で撮像した原画像3、および、それ以外の焦点の合っていない位置で撮像した原画像を1, 2, 4, 5 処理した場合に、合焦点画像として抽出された画素のうち、原画像3の画像がどの程度の割合で含まれているかを求めている。本研究においては、3次元形状データ生成の際に重要となるこの合焦点精度の目

標値を95%以上と設定した。

この3次元形状生成においては、合焦点精度を向上させるため一点比較法に代わって輝度振幅法(Contrast of Brightness Method)を用いることとした。特に95%以上の精度を確保するため、5×5画素のエリアに対して演算した輝度振幅の値において、そのエリアの周囲にある8つのエリアを含めた合計9つのエリアの平均を取ることによって、精度劣化の原因となるノイズを除去することを試みた。以下、この平均化を行った輝度振幅法を輝度振幅平均化法(Averaged Contrast of Brightness Method)と呼ぶこととする。

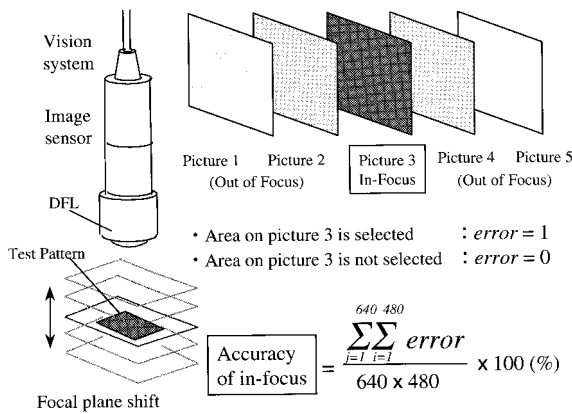


Fig. 6 Definition of the accuracy

3. 実験結果

3.1 一点比較法による全焦点演算

Fig.7に示すようなコインをずらして重ねた観察物に対して、焦点位置を変えて撮影したものをテストパターンとして合焦点演算の特性を評価した。処理速度においては、FPGA(Xilinx社製、XC4025E)を用いて演算回路をハードウェア化した場合について見積りを行った。

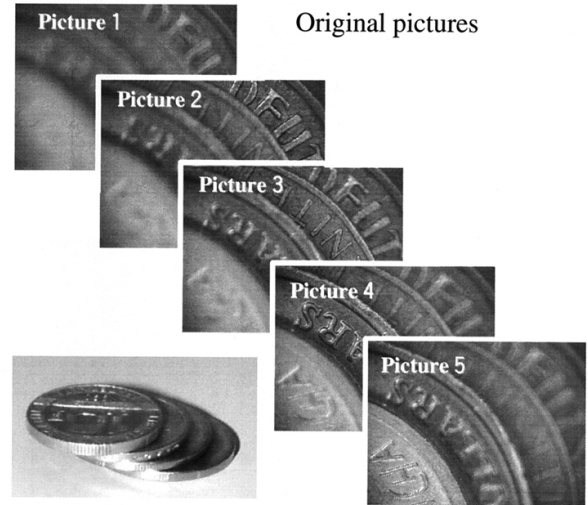


Fig. 7 Original pictures

結果をFig.8に示す。Fig.8(1)は新しいデジタル全焦点顕微システムによって構築した全焦点画像、Fig.8(2)は光学的に像を重ね合わせる従来のアナログ全焦点顕微システムによる画像、そして、Fig.8(3)は全焦点演算に用いた原画像のうちの1枚である。これより、焦点の合っていない部分も重ね合わされてしまうアナログ全焦点顕微システムによる画像と比較して、一点比較法で生成した全焦点画像は解像度が格段に向上されていることがわかる。

さらに、処理速度において、一点比較法は原画像1枚当たり1.0 msで全焦点演算を行うことができるため、焦点位置の異なる16枚の原画像からビデオレートで全焦点演算が可能であることが明らかになった。

3.2 3次元形状計測

3次元形状測定における合焦点精度について(1)一点比較法(OPM)(2)輝度振幅法(Contrast of Brightness Method)、および(3)輝度振幅平均化法



(1) Digital type (DFL + image processing (OPM))

(2) Analog type (DFL)

(3) Original picture (focus on one position)

Fig. 8 All-in-focus pictures

(Averaged Contrast of Brightness Method)の3つの手法を用いた場合の結果をTable 1に示す。

これより、輝度振幅平均化法を用いた場合に99%以上の合焦点精度を得られることが明らかになった。また、Fig.9に積み上げたコインを計測した場合の3次元形状の計測結果を示す。円形かつ階段状のコインの形状が測定されていることがわかる。これらの結果より、本デジタル全焦点顕微システムは全焦点画像の構築だけでなく3次元形状計測を、一つの撮像素子で行うことができることが明らかになった。

Table 1 Accuracy of 3 methods

| Processing method | Accuracy of in-focus(%) |
|--|-------------------------|
| OPM | 70 |
| Contrast of brightness method | 75 |
| Averaged contrast of brightness method | 99 |

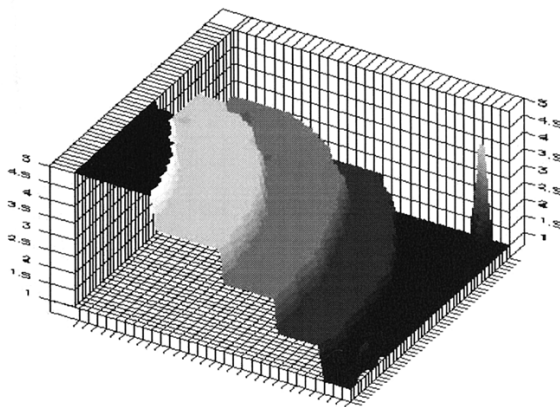


Fig. 9 3-D shape (piled coins)

4. 結論

高速動作が可能な可変焦点レンズを用いて、デジタル全焦点顕微システムを開発した。本システムを用いることにより、微小なマイクロパーツを観察する場合に、全焦点画像だけでなく3次元形状データを一つの撮像素子の画像から生成することができる。

原画像を高速で処理するために、一点比較法を提案した。この手法は全焦点画像の生成を1.0 msで行うことができる。また、3次元形状データを高精度で演算

ため輝度振幅平均化法を用いて、99%以上の精度で焦点位置を判別できることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)から委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として、実施したものである。

<参考文献>

- 1) T.Sato, K.Koyano, M.Nakao, and Y.Hatamura : " Novel Manipulator for Micro Object Handling as Interface between Micro and Human Worlds, " Proc.Int.Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.3(1993) p.674.
- 2) T. Tanikawa, T.Arai, and P.Ojala " Two-Finger Micro Hand, " Proc.Int.Conf.on Robotics and Automation, Vol.3(1995)p.1674.
- 3) T.Kaneko, T.Ohmi, N.Ohya, N.Kawahara and T. Hattori : " A New, Compact and Quick-Response Dynamic Focusing Lens, " Proc.9th Int.Conf.Solid-State Sensors and Actuators(Transducers 97)(1997) p.63.
- 4) T.Shiraishi, and K.Mitsui : " Image Processing System for Expanding Depth of Focus of Optical Microscope-Composition of Expanded Depth of Focus Image and Three Dimensional Expression of Shape, " JSPE, 60, 8, (1994) p.1112.
- 5) S.Kawakita, T.Isogai, N.Ohya and N.Kawahara : " Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator, " Proc. of 1997 Int. Symposium on Micromechanics and Human Science, Nagoya, Japan, Oct.5 8(1997) p.73.



< 著 者 >



金子 卓
(かねこ たかし)
基礎研究所
マイクロマシン関連の要素技術研究に従事。



川原 伸章
(かわはらのぶあき)
基礎研究所
マイクロマシン関連の要素技術研究およびシステム化技術研究に従事。
工学博士



光本 直樹
(みつもとなおき)
基礎研究所
マイクロマシン関連のシステム化技術研究に従事。
工学博士