

論文 可変焦点レンズを用いた長焦点深度視覚機構*

Optical Microscope Expanded Depth of Field using Dynamic Focusing Lens for Micro Parts Assembling

金子 卓 大矢信之 川原伸章
Takashi KANEKO Nobuyuki OHYA Nobuaki KAWAHARA

We have developed a microscope using a dynamic focusing lens suitable for micro parts assembling. With the microscope, real-time observation of three-dimensional micro parts was achieved. The dynamic focusing lens consists of a thin glass diaphragm having a specific thickness profile, a metal diaphragm with a glass plate, transparent liquid, and PZT unimorph actuators. When the actuators push the metal diaphragm, the pressure of the transparent liquid bends the glass diaphragm. Therefore, the curvature of the lens is changed according to the applied voltage of the actuators. When the actuator is activated at high frequency, the focal plane of the lens is rapidly shifted, and many images of different focus are obtained in a short time. When the lens is activated at 60 Hz, an image of the entire object is obtained, as if the depth of field is expanded. It is caused by the afterimage of human visual perception. By the mechanism, the depth of field is expanded about four times.

Key Words : Optical Microscope, Expanded Depth of Field, Dynamic Focusing Lens, PZT unimorph actuators, Micromachine

1. はじめに

マイクロマシン技術によって扱われる1 mm以下の微小な部品の組み立てや、できあがったマイクロマシンの動作を確認する道具として、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、作業領域を観察したりワークの位置決めなどを行うために、顕微鏡など人間の視覚を補助するための視覚機構が必要となる。この視覚機構としては、取り扱いやすさやリアルタイム観察が可能であるといった点から光学顕微鏡が多く用いられている。しかしながら、光学顕微鏡は倍率が高くなるほど焦点深度が限られてくるため、複雑な3次元の形状のすべての位置に焦点を合わせることが困難な場合が多い。特にマイクロマシンのような微細な3次元形状の部品の組み立てや、動作の確認などを行う際において、光学顕微鏡の焦点深度拡大に対する要求が大きい。

この光学顕微鏡の焦点深度を拡大する方法として、コンピュータによる画像処理を用いて複数の画像から焦点の合っている画素を抽出する研究などが行われて

いる³⁾⁴⁾。しかしながら、画像処理に時間を要するため、組み立て作業や動作確認などリアルタイム観察が必要な用途には使えないといった問題がある。このリアルタイム観察を可能にするといった点を考慮すると、画像処理を用いない構成で焦点深度を拡大する手法が望まれる。

そこで我々は、顕微鏡の対物レンズの焦点距離を高速で変化させた場合に得られる物体のさまざまな位置の像を、人間の眼の持つ残像現象を利用して重ね合わせることにより、リアルタイムで焦点深度の深い像を得る新しい視覚機構を提案する。そして、対物レンズの焦点距離を高速で変化させる機構として、薄いガラスダイヤフラムと、透明動作液、および、その液体に圧力を加えるためのアクチュエータから構成される可変焦点レンズを新たに開発した。このレンズは人間の眼の水晶体のようにレンズの形状を直接変形させるため、レンズや観察物の位置を移動して焦点を合わせていた従来の光学系に比べて質量の移動量が非常に小さく、焦点面の高速移動を可能にするものである。

本報告では、圧電ユニモルフ構造のアクチュエータを用いて可変焦点レンズを構成し、これを対物レンズに組み込んだ顕微鏡の光学特性を評価した結果につい

*電気学会マイクロマシン研究会資料(1997)より加筆転載

て報告する。さらに、顕微鏡や CCD カメラ等への搭載性の向上を図るため、リング形状の圧電バイモルフアクチュエータを用いた小型可変焦点レンズを試作し、応答速度などの基本性能の評価を行ったので、その結果についても述べる。

2. 焦点深度拡大の原理

本研究における顕微鏡の構成を Fig. 1 に示す。この顕微鏡の特徴は、対物レンズに物体側の焦点面を移動させる焦点面移動機構が組み込まれていることである。この焦点面移動機構により、観察物のそれぞれの部分に最低 1 回焦点が合うように周期的に焦点面を移動させる。観察者は接眼レンズやテレビモニターを通して観察物の各部に連続的に焦点の合った像を観察する。ここで、焦点面の移動の周期を 60 Hz 以上にすると、視覚が持つ残像現象により全ての像が重ね合わされて、観察物全体の像をリアルタイムで得ることができるものである。また、接眼レンズを用いずに CCD カメラで撮像する場合でも、CCD が 1 フレームを撮像する間に焦点面を 1 周期以上移動することにより、CCD 素子の持つ残像現象を利用して焦点深度が拡大された画像を取り込むことが可能である。さらに、この手法では対物レンズから接眼レンズまで光学的に構成できるため、レンズ系を 2 系列配置するだけで両眼による立体視顕微鏡装置の構築が非常に容易にできるといった長所があり、立体的な部品のハンドリングにおいてワークやマニピュレータの位置を空間的に把握することが可能となる。

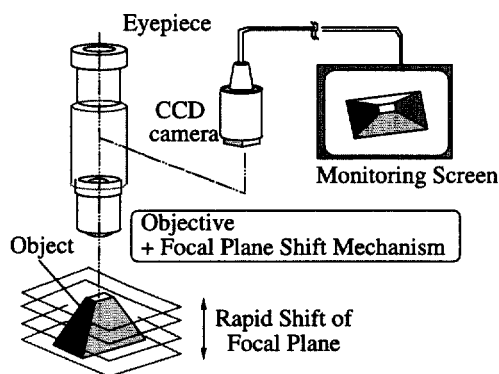


Fig. 1 Structure of microscope with expanded depth of field

3. 可変焦点レンズによる焦点面移動機構

3.1 可変焦点レンズの構造

我々が提案する焦点深度を拡大する手法においては、

対物レンズの焦点面位置を高速で移動する機構が重要となる。対物レンズの焦点面位置を移動する方法としては、物体との相対距離をアクチュエータなどを用いて変える方法が一般的である。しかしながら、大きな質量移動を伴うため、高速移動を行おうとすると振動の発生が大きな問題となる。そこで本研究では焦点面の移動機構として人間の目の水晶体のようにレンズ面の形状を変えることにより焦点距離を連続的に変化させることが可能な可変焦点レンズを開発した⁵⁾。

この可変焦点レンズは、屈折面の形状をわずかに変化させることで動作するため、振動をほとんど発生することなく大きな範囲にわたって焦点距離を変えることができるという特徴を持っている。

今回製作した可変焦点レンズの断面図を Fig. 2 に、外観を Fig. 3 に示す。この可変焦点レンズでは、 ϕ 10 mm、平均膜厚 11 μ m の透明ダイアフラムと、中央部に光を透過させるためのガラス平板を取り付けた板厚

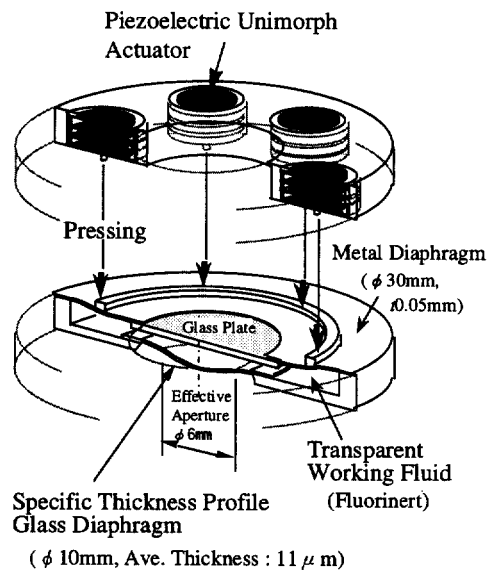


Fig. 2 Dynamic focusing lens cross sectional view

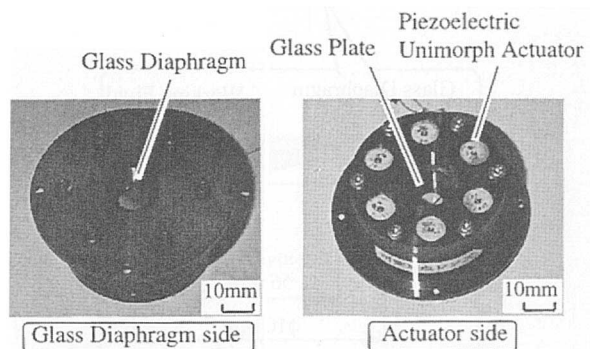


Fig. 3 Photos of dynamic focusing lens

50 μm のステンレス製加圧用ダイヤフラムとの間に、透明動作液としてフッリナート (FC-43, 屈折率: 1.291, 動粘度: 2.6 cSt) を封入した構成となっている。

透明ダイヤフラムには重力等の外力により不要な変形をしないようにヤング率の大きなガラスを用いている。この可変焦点レンズでは、加圧用ダイヤフラムを外部から押して透明動作液に圧力を加えることにより、Fig. 2 に示すように透明ダイヤフラムが凸曲面状に変形し凸レンズとして作用する。今回製作した可変焦点レンズでは、透明動作液の圧力が 0 Pa のとき焦点距離が無限大となり、 $7 \times 10^3 \text{ Pa}$ の圧力を掛けることにより焦点距離を 250 mm まで変化させることができる。

ここで、均一な膜厚の透明ダイヤフラムに圧力を掛けた場合、その変形形状は高次の係数を含む非球面形状となり、光学的な収差の発生原因となる。そこで、この透明ダイヤフラムには Fig. 4 に示すように、中心部 $\phi 6 \text{ mm}$ の範囲において超精密研削によって微小な膜厚分布を持たせてある。この膜厚分布により中心部 $\phi 6 \text{ mm}$ における凸曲面変形時の形状をより球面に近くなるように制御し、膜厚分布をつけないダイヤフラムと比較して収差の低減を実現している⁹⁾。

透明動作液を加圧するためのアクチュエータには、高速動作と、透明ダイヤフラムを変形させるための大きな変位量が必要となる。従来より小型で発生力の大きなアクチュエータとして、板状の圧電素子を積み重ねたアクチュエータが知られているが、十分な変位を得るためには多数の圧電素子の積層が必要となり、全長が長くなってしまいう問題がある。また、この圧電素子の変位を拡大する構造として圧電ユニモルフ

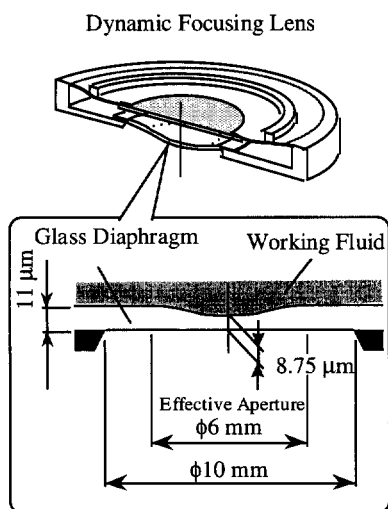
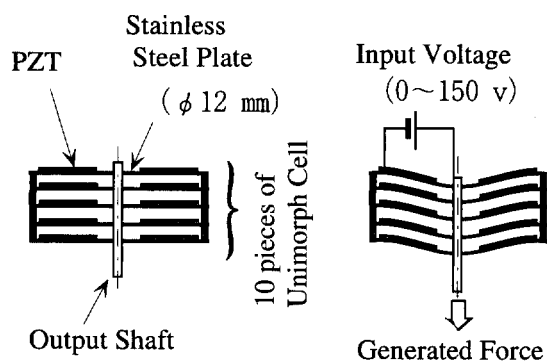


Fig. 4 Glass diaphragm with specific thickness profile

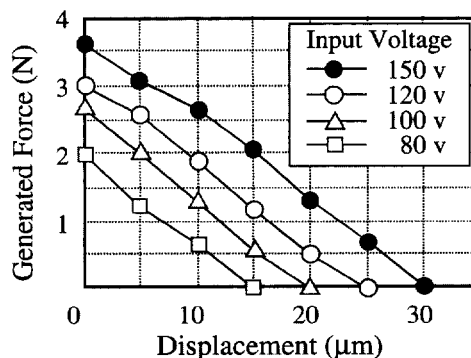
構造が知られているが、反面発生力が低下してしまうといった問題がある。そこで、Fig. 5 (a) に示すように、出力軸に対して圧電ユニモルフセルを積層して取り付けることにより、発生力を合成する力積層型アクチュエータを開発した⁹⁾。今回ポンプ機構に用いたアクチュエータでは圧電ユニモルフセルを 10 枚積層した構造となっており、 $\phi 12 \text{ mm}$ 、長さ 5 mm の体格ながら Fig. 5 (b) に示すように 100 V の印加電圧時に、発生力 1.3 N、変位量 10 μm を得ることができる。さらに今回試作した可変焦点レンズでは、Fig. 2 に示すように透明ダイヤフラムの面積の 9 倍の面積を持つ加圧用ダイヤフラムを用いることによりアクチュエータの変位を拡大するようにしている。なお、この変位の拡大のためにアクチュエータに要求される発生力が増加するため、合計 6 個のアクチュエータを加圧用ダイヤフラムの上側に配置して透明動作液を加圧する構造とした。

3.2 視覚機構の構造

可変焦点レンズを用いた長焦点深度視覚機構の外観および構成を Fig. 6 に示す。観察者は CCD カメラによって撮像された映像をテレビモニターを通して観察する構成とした。対物レンズには焦点距離 $f = 25 \text{ mm}$ 、物体



(a) Motion of PZT Unimorph Actuator



(b) Characteristics of Generated Force vs. Displacement

Fig. 5 Characteristics of actuator

空間焦点距離 64.5 mm の接写レンズを用い、この接写レンズの前側 10 mm の位置に可変焦点レンズを配置した。顕微鏡の倍率は 15 インチモニター上で約 50 倍である。

可変焦点レンズと接写レンズを組み合わせた光学系において焦点面の移動範囲を幾何光学に基づき計算した結果、可変焦点レンズの焦点距離を無限遠から最短の 250 mm まで変化させた場合に、焦点面は対物レンズに近づく方向に約 8 mm 移動することがわかった。

なお、各アクチュエータの発生変位のばらつきによって、加圧用ダイヤフラムのガラス平板が光軸に対して 1.67×10^{-4} deg の傾きを生じることが実験にて計測された。この傾きにより光軸の偏向が生じるが、その量は CCD の撮像面で $5 \mu\text{m}$ 以下と計算され、CCD 画素サイズ以下であり光学特性に影響を与えないと考えられる。

4. 実験結果

4.1 可変焦点レンズの周波数特性

可変焦点レンズの高速応答性を確認するため、周波数特性を測定した。実験方法としては圧電ユニモルフアクチュエータに 0 ~ +20 V の正弦波を入力し、その時のガラスダイヤフラム中心の変位をレーザー変位計で測定した。その結果、Fig. 7 に示すように、約 150 Hz までフラットな特性を示しており、焦点深度拡大のために必要となる 60 Hz での駆動が十分可能であることが明らかになった。ここで、500 Hz 付近の共振点は加圧用ダイヤフラムの共振によるものである。

4.2 視覚機構の光学特性

長焦点深度視覚機構の光学特性は、可変焦点レンズと接写レンズを含めたレンズ系における MTF (Modulation Transfer Function) を測定し、コントラストが

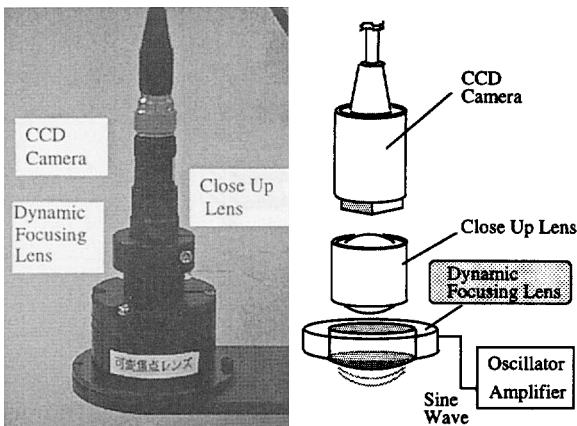


Fig. 6 Microscope with dynamic focusing lens

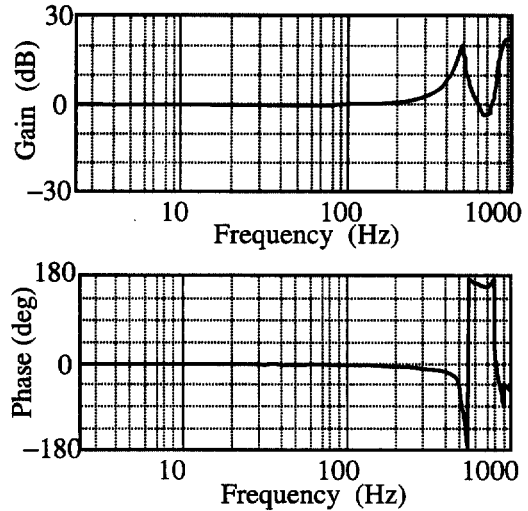
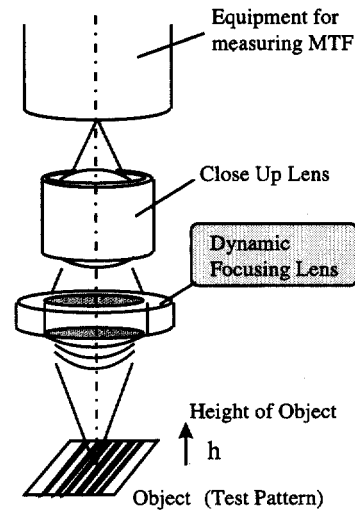
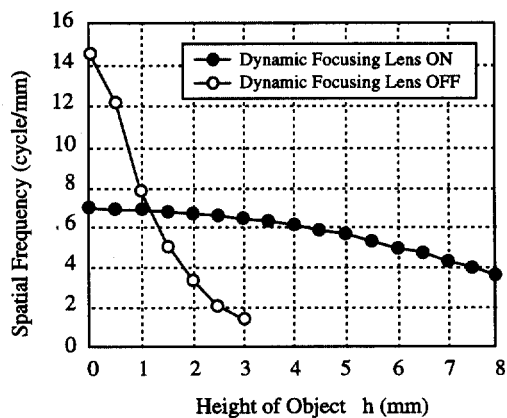


Fig. 7 Frequency characteristics of dynamic focusing lens



(a) Measuring method of optical characteristics



(b) Optical Characteristics of The Microscope

Fig. 8 Experimental results of optical characteristics of microscope

0.5となる空間周波数をレンズの解像力として評価した。測定方法の概略を Fig. 8 (a)に示す。実験ではアクチュエータを周波数 60 Hz, 0 ~ +100 V の正弦波によって駆動し、焦点面を約 8 mm のストロークで高速移動させた状態において、観察物の Z 座標を 0 mm から 8 mm まで光軸方向にシフトさせていった時に、解像できる空間周波数がどのように変化するかを測定した。この測定では CCD によって画像を撮る場合と同様に、MTF 測定器のサンプリング時間を可変焦点レンズの駆動周期とほぼ等しく設定し、高速焦点移動によりサンプリング時間内に変動する受光素子上の光の強度の積分値を計測した。

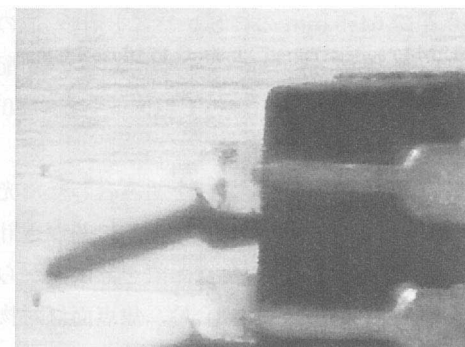
光学特性の測定結果を Fig. 8 (b)に示す。可変焦点レンズを動作させない場合には焦点面での解像力は高いものの、焦点面から観察物の位置がずれるにしたがって解像力が急激に低下し、物体の高さが約 2 mm を越えたあたりから解像力がほとんど無くなっている。それに対して可変焦点レンズを動作させた場合には、物体の高さ約 8 mm 程度まで観察可能であり、焦点深度が約 4 倍に拡大されていることが明らかになった。ここで、解像力の最大値が低下するのは、焦点面の高速移動により焦点が合っていない部分の像が重ね合わされるためである。

長焦点深度視覚機構によって観察した例を Fig. 9 に示す。観察物は DIP タイプの IC パッケージで、約 8 mm の間隔を持つ入出力ピンを側面から観察したものである。可変焦点レンズの駆動周波数は 60 Hz で、CCD カメラによって撮影された 1 フレームの像をフレームメモリーに取り込んで出力したものである。写真に示すように可変焦点レンズを動作させない場合には、片側のピンしか観察できないのに対して、可変焦点レンズを動作させた場合には両側のピンが観察できており、焦点面の高速移動による焦点深度拡大の効果が確認された。

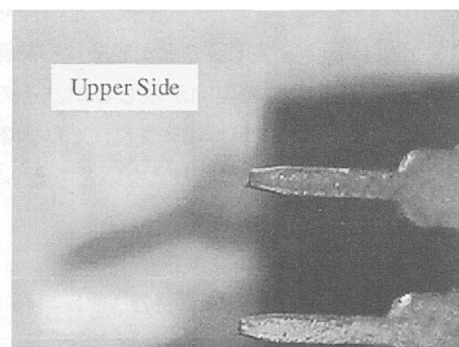
5. 可変焦点レンズの小型化

5.1 小型可変焦点レンズの構造

前節で報告した可変焦点レンズでは、透明ダイヤフラムの変形量を大きくするため、面積の大きい加圧用ダイヤフラムを用いており、これが可変焦点レンズの全体径を大きくする要因となっている。可変焦点レンズを小型化するためには加圧用ダイヤフラムの径を小さくする必要があるが、それに伴いアクチュエータに対する変位量の要求が大きくなる。そこで、圧電



(a) Dynamic Focusing Lens was rapidly operated



(b) Dynamic Focusing Lens did not work

Fig. 9 Example of observation

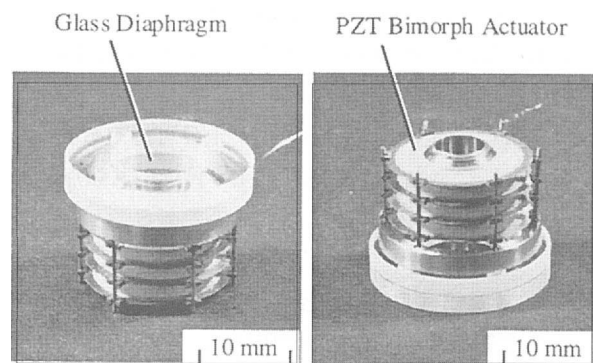


Fig. 10 Photos of small size dynamic focusing lens

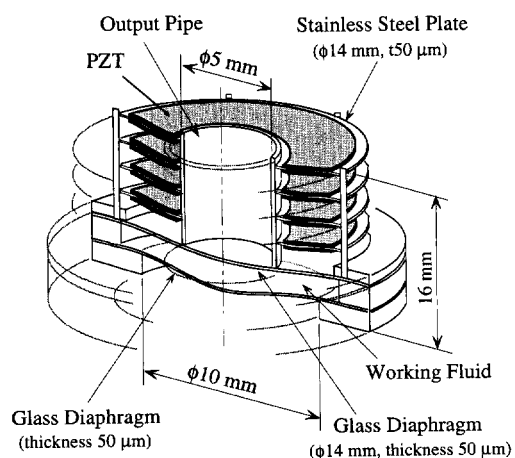


Fig. 11 Small size dynamic focusing lens

素子の外径を大きくすることと、弾性板の両面に圧電素子を接合した圧電バイモルフ構造にすることで、アクチュエータの発生変位を大きくできることに着目し、小型の変焦点レンズを新たに開発した。

Fig. 10 および Fig. 11 に小型変焦点レンズの写真と断面構造をそれぞれ示す。この小型変焦点レンズでは、 $\phi 10$ mm の透明ダイヤフラムと $\phi 14$ mm の加圧用ダイヤフラムにおいて、膜厚 $50 \mu\text{m}$ のガラス板を用いている。透明動作液としてはガラスダイヤフラムとの界面における光の散乱をできるだけ低減するため、屈折率 1.50 のシリコンオイルを用いている。なお、今回の試作機では透明ダイヤフラムに膜厚分布加工を施していない。

今回開発したバイモルフアクチュエータは $\phi 14$ mm の圧電バイモルフセルの中央部に $\phi 5$ mm の穴を設け

たリング形状となっており、レンズから入射する光を透過する構造となっている。さらに、このリング形状のバイモルフセルを中心の出力パイプに対して 4 枚取り付ける力積層構造により、透明動作液の加圧に必要な力を発生するようにした。このバイモルフアクチュエータは正負の印加電圧に対して、加圧用ダイヤフラムを押し引きする動作を行うため、Fig. 12 に示すようにレンズの形状を $0 \text{ V} \sim +30 \text{ V}$ の正電圧印加時に凸レンズ状、また、 $-30 \text{ V} \sim 0 \text{ V}$ の負電圧印加時に凹レンズ状に変形させることができる。

Fig. 13 に圧電バイモルフアクチュエータの発生力特性を示す。 $-30 \text{ V} \sim +30 \text{ V}$ の電圧によって最大 $\pm 20 \mu\text{m}$ の変位を発生することが明らかになった。実際にレンズを駆動させた場合には、 $\pm 15 \mu\text{m}$ の範囲で変位する。このとき 2 枚のガラスダイヤフラムの面積比により、 $\phi 10$ mm のダイヤフラムの中心部においては $\pm 30 \mu\text{m}$ の変位に拡大される。

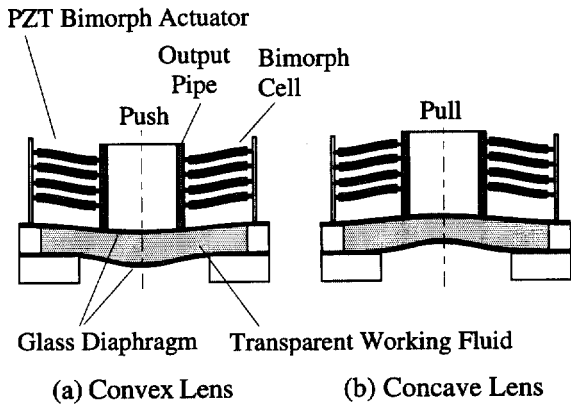


Fig. 12 Principle of small size of dynamic focusing lens

5.2 小型変焦点レンズの特性

焦点面移動機構に用いる場合の基本的な性能を把握するため、小型変焦点レンズの周波数応答特性の評価を行った。

測定方法としては、アクチュエータに $\pm 20 \text{ V}$ の正弦波を入力した場合の透明ダイヤフラム中心における変位をレーザー変位計によって計測した。その結果、Fig. 14 に示すように 350 Hz 付近および 1500 Hz 付近に共振点が観察されたものの、前節の変焦点レンズと同様に 60 Hz での焦点面移動が可能であることが明らかになった。

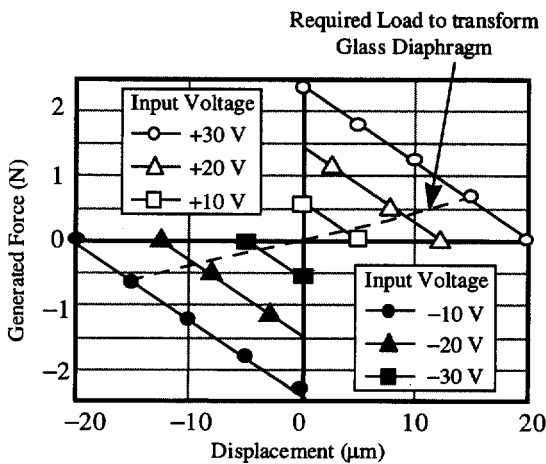


Fig. 13 Characteristics of ring-shaped bimorph actuator

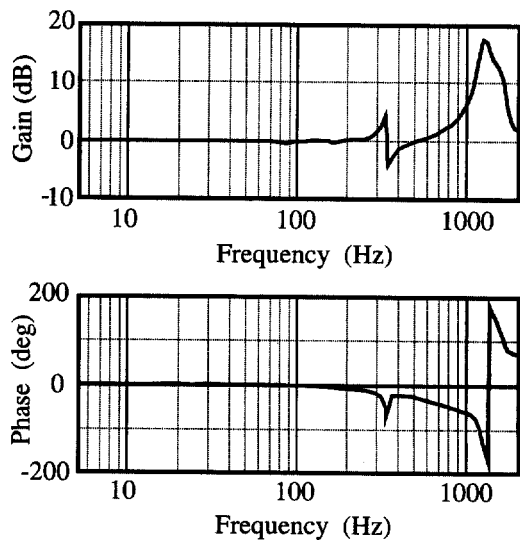


Fig. 14 Frequency characteristics of small size dynamic focusing lens

6. む す び

本論文の特長を要約すると、次のようである。

(1) 物体側の焦点面を高速で移動することにより、光学顕微鏡の焦点深度を拡大する手法を考案した。この手法における焦点面の移動機構として、圧電ユニモルフアクチュエータを用いた可変焦点レンズを開発し、対物レンズに組み込むことにより、焦点深度を約4倍に拡大できることを確認した。

(2) 視覚機構の小型化に向けて、リング形状の圧電バイモルフアクチュエータを組み込んだ小型可変焦点レンズを新たに開発し、60 Hzでの焦点面の移動が可能であることを確認した。

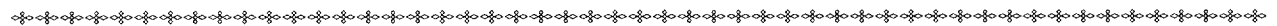
謝 辞

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

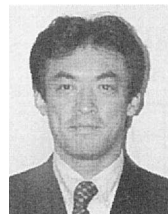
Worlds", Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.3(1993), p.1674.
 2) T. Tanikawa, T. Arai, and P. Ojala: "Two-Finger Micro Hand", Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3(1995), p.1674.
 3) G. Indebetown, and H. Bai: "Imaging with Fresnel Zone Pupil Masks-Extended depth of field", Appl. Opt., Vol.23, No.23(1984), p. 4299-4302.
 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, Vol.60, No.8(1994), p.1112.
 5) T. Kaneko, Y. Yamagata, T. Idogaki, T. Hattori, and T. Higuchi: "3-Dimensional Specific Thickness Glass Diaphragm Lens for Dynamic Focusing", IEICE Trans. on Electron., Vol. E 78-C, No.2(1995), p.123.
 6) S. Kawakita, T. Isogai, N. Ohya and N. Kawahara: "Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator", Proc. of 1997 Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, Oct. 5-8(1997), p.73.



<著 者>



金子 卓 (かねこ たかし)
研究1部
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)
研究1部
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



大矢 信之 (おおや のぶゆき)
研究1部
マイクロセンサ関連の要素技術研究に従事。