

キロヘルツオーダーで応答可能な高速ビジョンチップ用可変焦点レンズの構造

奥 寛雅*・石川 正俊**

*東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

**東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

Structure of Dynamic Focusing Lens with kHz Order Response for High-Speed Vision System

Hiromasa OKU* and Masatoshi ISHIKAWA**

*Department of Mathematical Engineering and Information Physics, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

**Department of Information Physics and Computing, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

With the development of high-speed image sensors that capture and process an image with frame rate 1 kHz, quick dynamic focusing lenses have become important. Although several prior papers have reported on dynamic focusing lens systems, their response speeds (150 Hz) have not been adequate for high-speed image sensors. This paper proposes a new structure of a dynamic focusing lens that provides kHz order response. The proposed lens uses transparent oil as both a light medium and a transmitter of force to move the surface of the lens. This structure has a motion amplifire using oil pressure so that it enables a piezostack actuator, with high frequency response but narrow working range, to move the lens surface adequately. Experimental results that the proposed dynamic focusing lens responses at 1 kHz are shown.

Key words: high-speed vision, optical device, dynamic focusing lens, high-speed response

1. はじめに

近年、1 kHz のフレームレートで高速に画像を取得・処理することができる高速視覚として、S³PE (simple and smart sensory processing elements)¹⁾に代表される超並列・超高速ビジョンチップが注目されている。石川らはその応用システムについて研究を進めており、ロボット制御²⁾や顕微鏡下の作業³⁾に有用であることが示されている。高速視覚システムは一般的なビジョンシステムと同様に、写真レンズや顕微鏡などの結像光学系を用いて対象の画像を結像させている。

一方、従来からビジョンシステムの分野では結像光学系の特徴を利用して画像処理をする研究が行われている。例えば、結像光学系の焦点距離を動的に変化させると対象までの距離などが計測でき、さまざまな手法が提案されてきた^{4,5)}。このように、光学系の特性を動的に変化させると

通常の画像処理では得ることが難しい量が計測できるため、ビジョンシステム的应用を考えると、結像光学系はひとつの重要な要素である。

一般に結像光学系の特性を動的に変化させて対象を計測する場合、1つの量を計測するのに複数枚の画像を必要とするので、撮像速度が遅いと計測のサンプリングレートが遅くなるという問題が存在する。これに対し、高速視覚システムは従来の多くのビジョンシステム (30 Hz) に比べて約 30 倍の速度で画像を取得・処理できるので、1回の計測に複数枚の画像が必要な場合でもリアルタイムに処理ができ、動的な光学系を用いた画像処理に適している。

ところが、従来の一般的な合焦機構やズーム機構といった動的な光学系の応答は高速視覚のフレームレートである 1 kHz に比べて遅く、高速視覚の高速性を損なうものである。このために高速な応答をもつ動的な光学系の実現が

E-mail: okusan@k2.t.u-tokyo.ac.jp

要求されており、特に、高速視覚システムのフレームごとに異なる光学特性で対象を撮像するためには、動的な光学系も1 kHz以上の応答をもつことが必要である。

結像光学系は複数のレンズから構成されるので、1 kHz以上の応答をもつ可変焦点レンズが実現できれば、高速な応答をもつ動的な光学系を構成できることが予想される。このことから、1 kHz以上の応答をもつ可変焦点レンズが重要であると考えられる。

そこで、本論文では、従来の動的な光学系の欠点を解決する、1 kHzの応答速度をもつ可変焦点レンズの構造を提案し、その設計にあたって考慮すべき点を説明する。次に、特に応答速度の検証を目的とした試作について説明し、試作品の応答測定実験から提案した構造が実際に1 kHzで応答可能であることを示す。

2. キロヘルツオーダーの応答をもつ可変焦点レンズの構造

結像を目的とする可変焦点レンズの方式として、(i) 液晶レンズを利用する方式、(ii) レンズ位置を動かす方式、(iii) レンズ表面を歪める方式、の3つがあげられる。(i) の液晶レンズを利用する方式では、電圧の印加・除去に対する液晶自身の応答が遅いために高速にすることは難しい⁶⁾。(ii) のレンズ位置を動かす方法では、動かすレンズ自体の質量を非常に軽くしない限りその位置をキロヘルツオーダーで正確に制御することは不可能である。しかし、撮像素子の大きさに必要な結像面の大きさが決定されるため、レンズの大きさを極端に小さくすることは難しく、質量を軽く保つことには限界があるのでこの手法も難しい。一方、(iii) のレンズ表面を歪める方式では、透明な薄膜の横振動を用いることで高速な応答を実現できることが予想される。そこで本論文では (iii) のレンズ表面を歪める方式がキロヘルツオーダーの可変焦点レンズを実現

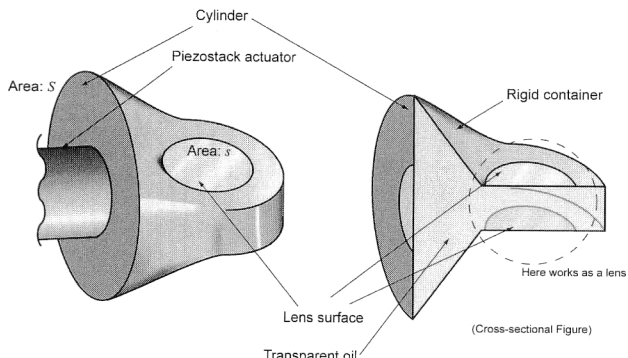


Fig. 1 Schematic figure of the proposed dynamic focusing lens: Area of the cylinder part $S \gg$ Area of the lens surface s .

する方法として適していると考える。

従来から、このようなレンズ表面を歪める方式の可変焦点レンズは研究されてきているが、キロヘルツオーダーの応答をもつものはない。高速な応答を目指した可変焦点レンズの研究⁷⁾もあるが、その応答速度は最高で約150 Hzであり、高速視覚の速度に比べて一桁小さい。

高速応答の実現を難しくしている原因として、このような可変焦点レンズの制御に適したアクチュエーターが存在しないことがあげられる。高速に可変焦点面を駆動するアクチュエーターには高速な応答とレンズ駆動に十分な可動範囲が要求される。これに対し、高速な応答をもつアクチュエーターは一般的に可動範囲が小さくなる傾向にあるので、焦点距離を十分に变化させることができなくなる。例えば、積層型 piezo アクチュエーターのうち、数十 kHz の固有振動数をもつものの、可動範囲は $10 \mu\text{m}$ 程度であり、直接レンズ表面を駆動するためには可動範囲が狭すぎる。

可動範囲が狭いアクチュエーターに、変位を増幅する機構を組み合わせることでこの問題は解決できるはずである。ところが、従来の変位を増幅する機構は固有振動数が低いためにアクチュエーターの高速性が失われてしまい、キロヘルツオーダーで制御が可能なものは存在しない。市販の積層型 piezo アクチュエーターにアクチュエーター変位を増幅して伝達する機構を取り付けたものは、変位を拡大する機構の共振周波数が数百 Hz のために、キロヘルツオーダーで制御することはできない。

そこで、アクチュエーターの変位をキロヘルツオーダーで増幅可能な機構をもつ可変焦点レンズの構造を提案する。アクチュエーターとしては、高速な応答と高精度な位置決め精度をもつ積層型 piezo アクチュエーターを想定する。提案する構造の概念図を Fig. 1 に、可変焦点の原理を Fig. 2 にそれぞれ示す。

この可変焦点レンズは十分に堅い容器の内部に透明な液

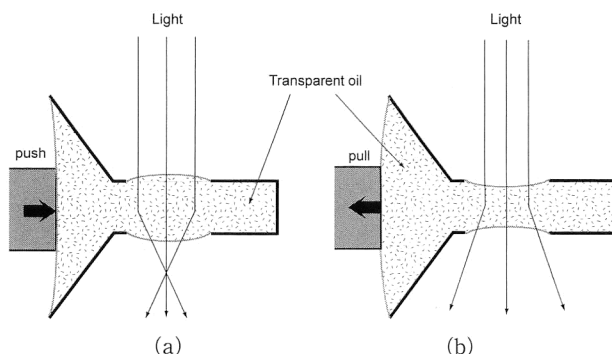


Fig. 2 Mechanism of dynamic focusing. (a) Convex lens, (b) concave lens.

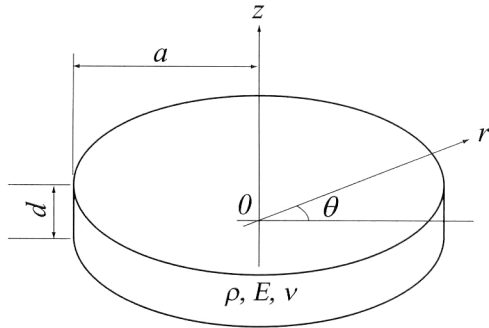


Fig. 3 Parameters of a disk.

体を密封する構造をもち、容器の表面に可塑性をもつ円形の薄く透明な板を取り付けて、これをレンズ表面とする。また、レンズ表面とは別にアクチュエーターが内部の液体に圧力を加えるための可塑性をもつ隔壁を取り付ける。本論文ではこの隔壁をシリンダー部とよぶ。シリンダー部の断面積はレンズ表面積の数十倍になるように設計する。このため、シリンダー部に加わる歪みは数十倍に拡大されてレンズ表面に伝わり、アクチュエーター変位を拡大してレンズ表面に伝えることができ、かつ容器を適切に設計することで高速な応答を確保できる。また、レンズ表面の変位はアクチュエーターの変位から見積もることができるため、レンズの光学的特性はアクチュエーターに高速な位置センサーを取り付けることで測定できる。この構造により、キロヘルツオーダーの応答を実現する。

3. 提案する可変焦点レンズの設計

実際に提案した構造を用いて可変焦点レンズを設計する場合に、各部分をどのように設計すべきなのかを議論する。これからはレンズ表面部分を1 kHzで制御することを目的として、議論を進める。

3.1 レンズ表面部分・シリンダー部分

可変焦点レンズの可動部分であるレンズ表面とシリンダー部分の設計では、一次の固有振動数を高く、かつ可塑性を大きく設計することが必要である。レンズ表面部分を最高1 kHzの周波数で制御するためには、レンズ表面部分の共振を避けるために一次の固有振動数が10 kHz程度であることが望ましい。そのため、レンズ表面部分の一次の固有振動数が十分高くなるように設計することが必要である。一般に固有振動数を高くすると物体は堅くなるので、一次の固有振動数を単純に高く設計するとレンズ表面が十分に变形しなくなる。同様のことがシリンダー部分にもあてはまる。このような理由から、どのように設計すれば一次の固有振動数を高くすると同時に大きな可塑性を実現できるかを考察する。

なお、今後誌面節約のため、一次の固有振動数のことを単に固有振動数と記述する。

3.1.1 周辺固定円盤の固有振動数

レンズ表面部分とシリンダー部分の形状は、周辺が固定されている一様な円盤を想定し、周辺支持円盤の振動特性を考察する。円盤で、半径 a [m] (>0)、厚み d [m]、材質の密度が ρ [kg/m³]、ヤング率 E [Pa]、ポアソン比 ν のものを考える。この円盤を Fig. 3 に示す。

弾性体の振動論の結果を用いる⁸⁾と、この円盤周囲を完全に固定した場合の固有振動数 ω は

$$\omega_{m,n} = k_{m,n}^2 \sqrt{\frac{D}{\mu}} \quad (m, n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

である。ただし

$$\mu = \rho d, \quad D = \frac{Ed^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

とする。 $k_{m,n}$ は

$$I_m(ka)J_{m-1}(ka) - J_m(ka)I_{m-1}(ka) = 0 \quad (3)$$

I_m : m 次の変形された第一種ベッセル関数

J_m : m 次の第一種ベッセル関数

のゼロ以外の解を小さい順に $n=0, 1, 2, \dots$ と番号を振ったものに対応する。本論文では、一次の固有振動数のみに注目しているので、 $m=0, n=0$ のときのみを考えることとし、以後簡単に $k(=k_{0,0})$ 、 $\omega(=\omega_{0,0})$ と記述する。 k は式 (3) の解であるから

$$k \propto \frac{1}{a} \quad (4)$$

を満たす。

3.1.2 周辺支持円盤の光学的な可塑性

次にこの円盤の片方の面に静的な圧力 P [Pa] が加わった場合に円盤中心がなす曲率と、その曲率をもつ平凸レンズの焦点距離について導出し、それをもとに周辺支持円盤の光学的な可塑性の指標を定義する。

円盤の中心を原点として z 軸が円盤に直交するように円筒座標系 (r, θ, z) を置く。一様な円盤に時間に関して一定の圧力 P [Pa] が $+z$ 方向に印加され、かつ変形が十分小さいとみなせるとする。弾性体の理論⁸⁾より円盤の z 方向の変形 $R(r)$ は半径 r にも依存し、次の微分方程式を満たす。

$$-D \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} \right) R + P = 0 \quad (5)$$

円盤が境界で完全に固定されている境界条件は

$$R|_{r=a} = 0, \quad \frac{\partial R}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0 \quad (6)$$

で表され、この条件下での解は

$$R(r) = \frac{P}{64D} (r+a)^2 (r-a)^2 \quad (7)$$

となる。これから曲面中央の曲率半径 r_c は

$$r_c = \frac{16D}{a^2 P} \quad (8)$$

で表される。この曲率をもつ平凸レンズで、レンズ内部の屈折率を n 、外部を空気（屈折率 1）とすると、その焦点距離 f は

$$\frac{1}{f} = \frac{a^2(n-1)}{16D} P \quad (9)$$

の関係を満たす。レンズ表面が平坦な場合は焦点距離が ∞ になるので、 $1/f$ はゼロである。レンズ表面が少し歪むと焦点距離は有限の大きな値になり、 $1/f$ は微小な数となる。つまり $1/f$ は大きいほどレンズ表面が変形していることを表す。式 (9) から $1/f$ は圧力 P に比例しており、その比例係数は圧力に対する焦点距離の変化の度合いを表していると考えられる。そこで、単位圧力に対する光学的な可塑性の指標 $S(a, D)$ を

$$S(a, D) = \frac{1}{f} \frac{1}{P} = \frac{a^2(n-1)}{16D} \quad (10)$$

のように定義する。

3.1.3 レンズ部分、シリンダー部分の設計方針

円盤のパラメーターとして設計で選べるのは、半径 a 、厚み d 、材料 (E, ρ, ν) である。円盤の固有振動数 (式 (1)) をこれらのパラメーターで書き下すと、式 (2)、(4) より

$$\begin{aligned} \omega(a, d; E, \rho, \nu) &= k^2 d \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}} \\ &\propto \frac{d}{a^2} \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \end{aligned} \quad (11)$$

となり、可塑性の指標である式 (10) は

$$\begin{aligned} S(a, d; E, \nu) &= \frac{3}{4} (n-1) \frac{(1-\nu^2) a^2}{E d^3} \\ &\propto \frac{(1-\nu^2) a^2}{E d^3} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。この結果からわかる固有振動数・可塑性の指標と各パラメーターとの関係を Table 1 にまとめる。なお、一般にポアソン比 ν は他の値 E, ρ に比べて材料による値のばらつきが小さいので、簡単のためにここでは定数とみなす。ここで、半径 a 、厚み d は独立に設計できるのに対し、材料のパラメーター (E, ρ, ν) は独立には選べないことを指摘しておく。

この結果から、例として固有振動数を 4 倍にする場合について考える。半径を調節して固有振動数をあげる場合は、半径を 1/2 倍する必要があり、可塑性の指標は 1/4 倍になる。厚みを調節する場合は、厚みを 4 倍にする必要があり、可塑性の指標は 1/64 倍になる。材質については後で述べる。これから、半径を調節した場合は可塑性の指標

Table 1 Relation between characteristics of the disk and parameters.

	Radius a	Thickness d	Material E, ρ
Natural frequency ω	$\propto \frac{1}{a}$	$\propto d$	$\propto \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Characteristic of plasticity S	$\propto a^2$	$\propto \frac{1}{d^3}$	$\propto \frac{1}{E}$

は 1/4 倍小さくなるが、厚みを調節すると可塑性の指標は 1/64 倍も小さくなることがわかる。

結論として、可塑性を保ちながら固有振動数をあげるためには、半径を優先的に小さくするほうがよいことがわかる。

3.2 円盤の材質

次に、高い固有振動数と大きな可塑性を実現できる材質について議論する。代表的な物質⁹⁾ について、横軸に固有振動数に比例する量、縦軸に可塑性の指標をとってプロットしたものを Fig. 4 に示す。

図中右上のほうにある物質が材質として適しており、ガラスやプラスチック類が適していることがわかる。これらの物質はレンズの材料としても一般的なものである。つまり、レンズの薄膜形成技術などの従来技術を応用可能であるということであり、提案する可変焦点レンズは従来のレンズ加工技術の適用が容易である。

3.3 圧力伝達用液体

容器の中に封入される透明な液体は、光の媒質と圧力伝達の 2 つの役割をもつ。光の媒質としては、可視光の透過率が高く、屈折率の選択の範囲が大きいことが重要である。効率的な圧力の伝達のためには圧縮率が低いことが重要である。圧縮率が大きいと圧力によって液体が圧縮されてしまい、液体の体積が減少するため、アクチュエーターの変位の増幅率が悪くなる。一般的に液体は圧縮率が低いので、この条件は満たされる傾向にある。

4. 試作品による高速応答確認実験

4.1 設 計

これらの方針に基づいて、実際に可変焦点レンズを試作する。本試作では応答性能について検証することを目的として、光学性能については考慮していない。試作した可変焦点レンズの構造を Fig. 5 に示す。

レンズ表面部分とシリンダー部分は 1 kHz で十分に制御ができるように、一次の共振周波数が 8.0 kHz 程度になることを目標として設計する。

レンズ表面部分は薄く研磨されたガラス板で作る。市販の小型デジタルカメラの光学系から、実用となるレンズ

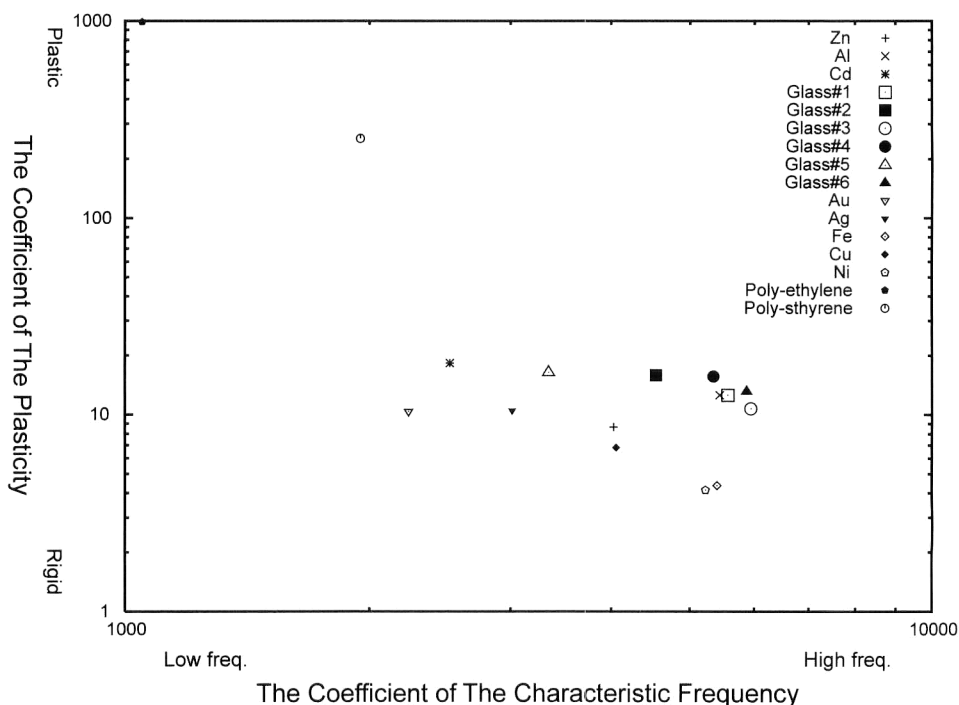


Fig. 4 Scatter diagram of materials.

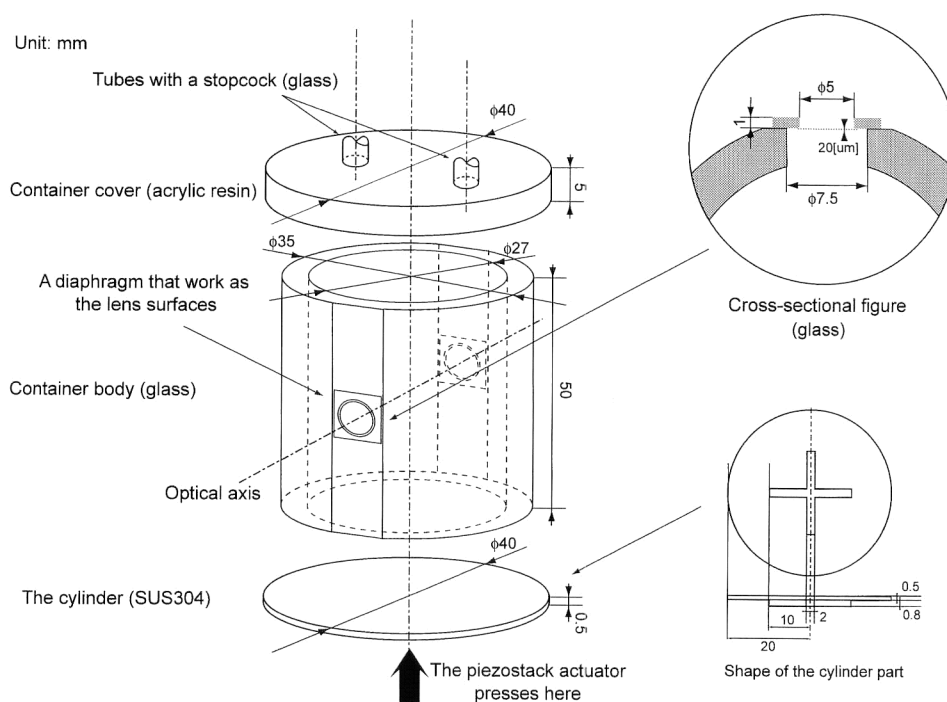


Fig. 5 Schematic design of the proposed dynamic focusing lens.

半径の下限は 2.5 mm と仮定し、共振周波数をあげるためにレンズ半径は下限の 2.5 mm とする。この半径で共振周波数が約 8.0 kHz になるレンズ表面部の厚みを検討した結果、厚みは 20 μm とする。半径 2.5 mm、厚さ 20 μm のガラス製円盤の周辺を完全に固定した場合、一次の共振周波数の理論値は 8.2 kHz である。

シリンダー部分の半径はレンズ部分の半径の約 6 倍として 13.5 mm とする。面積比は長さの比の 2 乗で変化するためにシリンダー部分の面積はレンズ部分の面積の約 29 倍になる。仮にレンズ表面部分とシリンダー部分が相似な形状を保って歪むとすれば、アクチュエーターの変位は理想的には約 29 倍に増幅されてレンズ表面を歪める。シリ

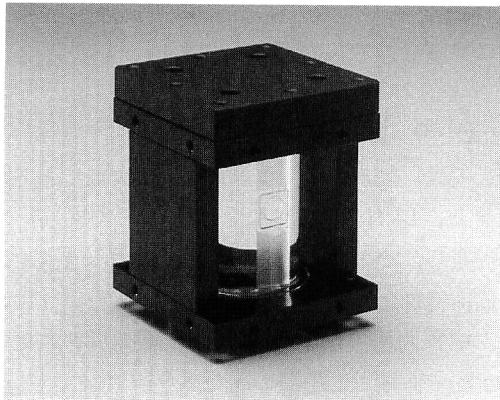


Fig. 6 Body of the prototype fixed in a holder.

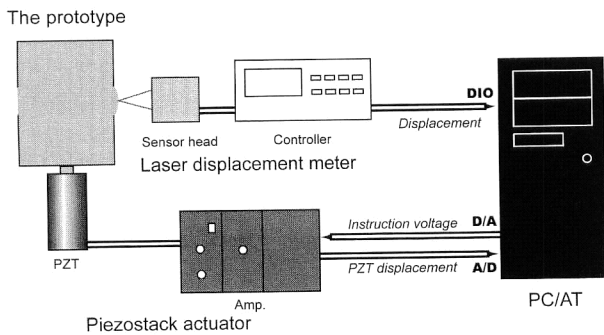


Fig. 7 Schematic diagram of the experimet setup to measure frequency response of the prototype.

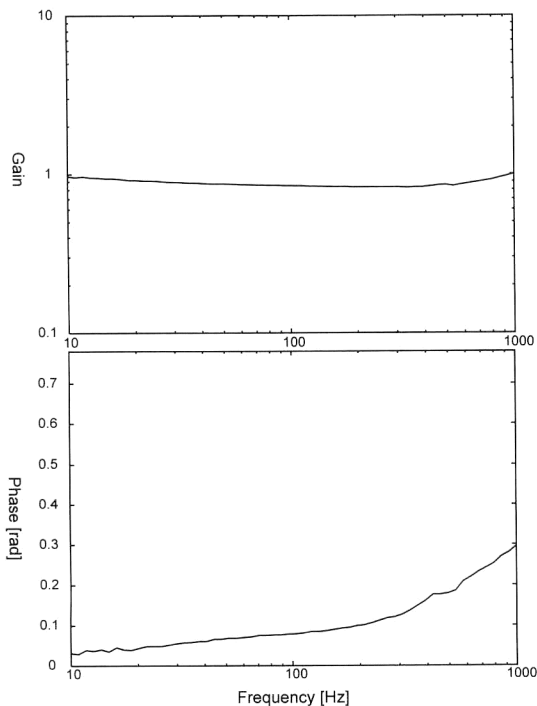


Fig. 8 Bode plot of frequency response.

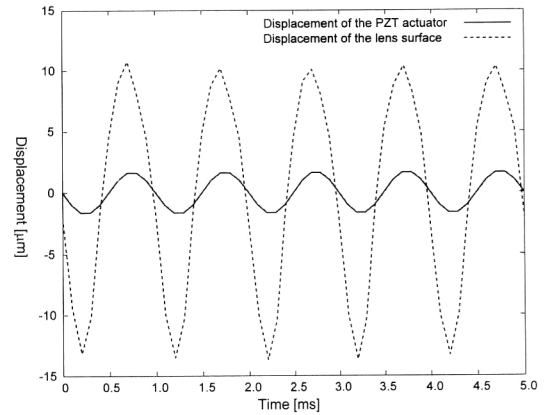


Fig. 9 Input 1 kHz sinusoidal wave PZT actuator displacement and the lens surface displacement responds to the input.

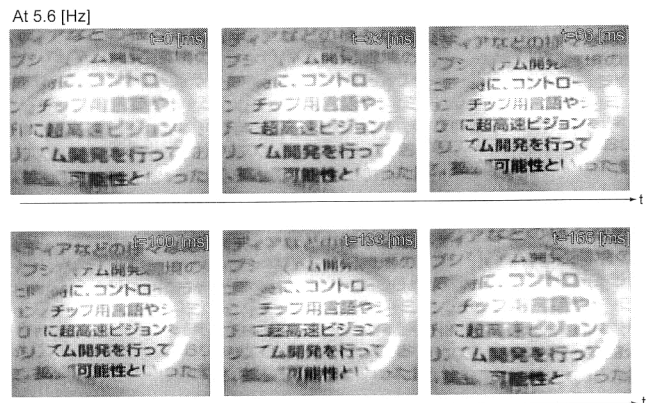


Fig. 10 Images captured by CCD for monitoring with 5.6 Hz sinusoidal input.

ンダー部分は自由に構造を設計することができるので、Fig. 5 に示したように効率よく液体を押せるよう十字型の突起をつけることとし、加工の容易さを考えてステンレスで製作する。有限要素法によって見積もると、シリンダー部分の一次の共振周波数は 7.7 kHz である。

製作を簡単にするために全体は筒状の形状とし、筒の側面に正対する円形の穴をあけてレンズ表面を取り付ける。片側を可変焦点のためのレンズ表面とし、もう片方には厚さ 1 mm のガラス板を取り付けて、平凸、平凹レンズとして変形するようにする。筒の 2 つの開口は、片側はシリンダー部分となる板を取り付け、もう片方はコック付きのガラス管を取り付けた蓋で封をする。本試作では光学性能を考慮しないため、透明な液体として入手が容易な油浸対物レンズ用エマルジョンオイルを用いる。ホルダーで固定された試作品の本体部分の写真を Fig. 6 に示す。

4.2 応答測定実験

この試作品がキロヘルツオーダーの応答性能をもつことを確認するために、 piezoアクチュエーターの変位を入力

とし、レンズ表面中心の変位を出力として周波数応答を計測した。実験系の接続図を Fig. 7 に示す。

レンズ表面中心の変位はレーザー測距計 LC-2430 (キーエンス製、応答周波数 20 kHz) を用いて測定した。ピエゾアクチュエーターは P-841.10 (PI-Polytec 製、一次の共振周波数 18 kHz、可動範囲 15 μm 、歪みセンサー内蔵) を用いた。これら全体の制御、計測のために PC/AT 機を用い、制御周期 0.1 ms で計測を行った。

計測した周波数応答のボード線図を Fig. 8 に示す。これから、1 kHz まで応答特性がほぼ変化しないことがわかり、提案した可変焦点レンズの構造はキロヘルツオーダーで応答可能であることが確認できる。

次に 1 kHz のときの入力アクチュエーター変位とレンズ表面の変位出力を Fig. 9 に示す。設計ではアクチュエーターの変位は約 29 倍増幅されてレンズ表面に伝達されるはずであるが、この結果では変位の増幅は約 4 倍であることが読み取れる。これは油の密封に用いているコックの密封性が悪いことが原因と考えられる。本試作では市販のコックを用いたが、このコックは浸透圧を発生させていることが予備実験からわかっており、完全な密封が実現できていないことが原因であると考えられる。密封方法を改良すればこの問題は克服できると予想される。

また、CCD (charge coupled device) カメラの直前に可変焦点レンズを置き、可変焦点レンズを 5.6 Hz で振動させながら文字を計測した場合の画像系列を Fig. 10 に示す。これから可変焦点レンズの光学特性が変化していることがわかる。レンズパワーが大きいときに文字が歪むのは結像性能を考慮していないことが原因である。

以上の実験結果から、試作品は 1 kHz まで応答特性が変わらないことがわかる。このことから、本論文で提案す

る可変焦点レンズの構造は、1 kHz の高速な応答を実際に可能にするものである。

5. おわりに

本論文では、従来の可変焦点レンズの欠点である低速性を解決する、1 kHz の応答速度をもつ可変焦点レンズの構造を提案し、その設計にあたって考慮すべき点を説明した。次に、特に応答速度の検証を目的とした試作について説明し、応答測定実験から提案した構造が実際に 1 kHz で応答可能であることを示した。

文 献

- 1) 石川正俊：“超並列・超高速視覚情報システム—汎用ビジョンチップと階層型光電子ビジョンシステム—”，応用物理，**67** (1998) 33-38.
- 2) A. Namiki, Y. Nakabo, I. Ishii and M. Ishikawa: “High speed grasping using visual and force feedback,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (1999) pp. 3195-3200.
- 3) 奥 寛雅, 石井 抱, 石川正俊：“マイクロビジュアルフィードバックシステム”，電子情報通信学会誌，D-II，**J84-D-II** (2001) 994-1002.
- 4) P. Grossmann: “Depth from focus,” Pattern Recognit. Lett., **5** (1987) 63-69.
- 5) A. P. Pentland: “A new sense for depth of field,” IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., **PAMI-9** (1987) 523-531.
- 6) S. Sato: “Application of liquid crystals to variable focusing lenses,” Opt. Rev., **6** (1999) 471-485.
- 7) T. Kaneko, T. Ohmi, N. Ohya, N. Kawahara and T. Hattori: “A new, compact and quick-response dynamic focusing lens,” Transducers '97, 1 (1997) pp. 63-66.
- 8) 近藤恭平：“平板の曲げ振動,” 振動論工学基礎 (培風館, 1993) pp. 195-240.
- 9) 国立天文台編：理科年表 (丸善, 1996).