

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 2 5 年 5 月 2 9 日現在

機関番号：34310
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760220
 研究課題名（和文）超音波駆動によるミリ秒可変焦点レンズと高速光デバイスへの応用
 研究課題名（英文）Milliseconds-response optical lenses and high-speed optical devices using ultrasound
 研究代表者
 小山 大介（KOYAMA DAISUKE）
 同志社大学・理工学部・准教授
 研究者番号：50401518

研究成果の概要（和文）：本研究では、屈折率の異なる 2 液界面が音波の放射力により高速変形する現象を利用した可変焦点レンズを開発した。駆動電圧によって焦点距離を制御可能で、機械式アクチュエータを用いた従来型と比較して一桁程度速い最速応答時間 6.7 ms を得た。焦点位置を周波数 1 kHz で光軸方向に高速走査することにより、被写界深度の大きい共焦点画像が撮影できた。また、レンズを非軸対称に変形し、3 次元的に焦点位置を変化可能な可変焦点レンズを作成した。

研究成果の概要（英文）：An ultrasonic variable optical focus lens which utilizes the refractive index difference of two immiscible liquids was developed. The profile of interface between the two liquids can change by radiation force of ultrasound so that the lens can act as a variable focus lens. The focal point could be controlled by the driving voltage, and the shortest response time of 6.7 ms could be achieved. The confocal image could be captured by sweeping the focal point in the light axis at 1 kHz. Three dimensional focal scanning could be also achieved by non-axisymmetric sound pressure field.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：アクチュエータ工学、超音波工学、計測工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：可変焦点レンズ、光学レンズ、超音波、ソフトアクチュエータ、圧電材料

1. 研究開始当初の背景

高速で移動する物体をカメラで撮影する場合、常に撮影対象にピントを合わせる必要があり、そのためにはアクチュエータ機構を通じてレンズを連続的に光軸方向に移動させなければならない。一部の一眼レフカメラでは、そのアクチュエータ機構として高速応答可能な超音波モータを用いているものの、耐久性の問題が生じる。一方で、小型携帯機器などにカメラモジュールを組み込む場合、カメラ用レンズを光軸方向に移動させるためのアクチュエータとギア機構などが必要

となるため大型化する傾向がある。

2. 研究の目的

本研究では、機械的可動部が不要で、音波の放射力によりレンズ自体を変形させる小型液体レンズの開発を行う。特に以下の項目について検討する。

- (1) 簡素な構造で小型化可能なレンズの試作
- (2) 従来の機械式カメラモジュールに比べて一桁程度早い応答速度 1 ms の高速可変焦点レンズの作成
- (3) 奥行き方向への高速焦点走査による共焦

点画像（奥行き方向に対して全焦点を持つ被写体深度の深い画像）撮影技術の開発

- (4) 光軸方向、径方向を含めた3次元走査可能な可変焦点レンズの開発
- (5) 耐熱性に優れたレンズの開発

3. 研究の方法

- (1) 混ざり合わない2液体の屈折率差を利用して径数 mm の小型高速可変焦点レンズの開発を行う。2液界面がレンズの役割を果たし、界面を超音波の放射力によって高速変形することにより焦点位置を変化させる。小型化により界面張力効果が増大することから応答速度の向上が期待できる。
- (2) レンズの挙動に関する理論式を導出し、高速応答に最適な液体物性、レンズ構造を明らかにする。有限要素解析と光線追跡法を組み合わせたレンズ形状の推定、およびその設計手法の可能性について検討する。
- (3) カメラと組み合わせ、焦点位置を光軸方向に高速スキャンすることにより、奥行き方向に対して全焦点を持つ被写体深度の深い画像の撮影を試みる。レンズを非軸対称に変形することにより、径方向を含めた3次元的に焦点位置を変化可能なレンズを作製する。
- (4) 2液体の代わりに、温度安定性を有するゲルをレンズ材料に用いることにより、使用環境温度に依存しないレンズの動作特性を実現する。

4. 研究成果

- (1) 機械的可動部のない小型レンズの試作
提案するレンズは2つの混ざり合わない液体の屈折率の差を利用する。図1はレンズの構造であり、径6 mm のアルミニウム製円筒型セル内を2種の屈折率の異なる液体で満たし、厚み方向に分極されたアニユラ型 PZT 振動子を一端に接着している。セルの另一端および振動子中央はガラス円板によってシーリングすることにより光軸方向に光が透過する（図1(b)）。レンズ内の液体は水（屈折率1.33）と動粘度が異なるシリコンオイル（屈折率1.391~1.403）を用いた。水滴半球の高さが1.5 mm になるようにマイクロピペッタを用いてセル内凹部に水を注入した（図1(c)）。レンズを密閉した場合、水滴半球とガラス板間に働くファンデルワールス力により、レンズを反転しても水滴半球、すなわちレンズの形状はほとんど変化しない。
- (2) レンズ応答の理論モデル
レンズの応答時間は液体の界面張力、粘性、密度などに依存すると考えられる。超音波によるレンズ内の液滴半球の振動について、一次元のばね-質量-ダンパによる理論モデルを導出した。液滴振動の過渡応答の時間をレンズの応答時間と定義するならば、臨界条

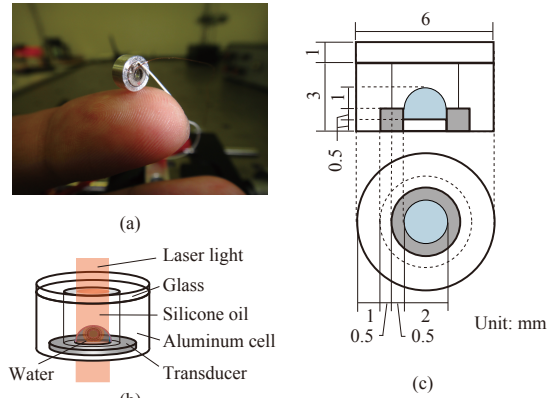


図1 2液性超音波液式体レンズ

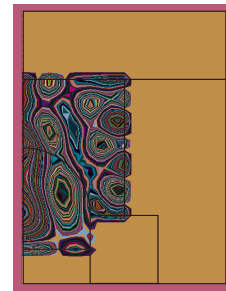


図2 レンズ音場(有限要素解析結果)

件において、最も短い応答時間が得られる。これよりレンズを小型化し、水滴の質量を小さくすることにより速い応答速度が得られることを明らかにした。

(3) レンズ内音場シミュレーション

オイラー水界面は振動子からの音響放射力によって変形する。光軸上の2液界面を変形させるためには、レンズ中心軸上の音圧を大きくする必要がある。レンズ内の音場分布を有限要素解析によって計算した。図2は共振周波数1.62 MHzでのレンズ内部の音圧分布であり、レンズ内には複雑な定在波音場が発生し、特に中心軸上で音圧値が大きいことがわかる。

(4) レンズ動作特性

試作機を用いて液体レンズの可変焦点レンズとしての光学特性を検討した。図3は光コヒーレンストモグラフィにより観測した共振周波数1.62 MHz、駆動電圧0から51 V時における径方向の2液界面形状、および光線追跡による透過光分布である。駆動電圧の増加に伴い、音響放射力によって中心軸上の2液界面が水側に向かって変形することがわかる。2液界面は音響エネルギー密度の高いオイル側から、音響エネルギー密度の低いオイル側に向かって変形する。この軸対称な変形が可変焦点レンズとして作用する。レンズに入射した光は2液界面において屈折し、透過光分布が変形する様子がわかる。特に、44、51 V 駆動時は透過光が集束しており、駆動

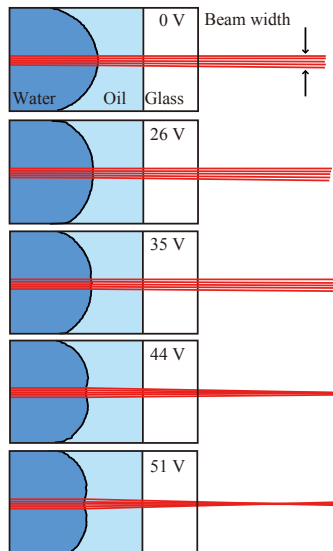


図3 駆動電圧によるレンズ透過光分布の変化

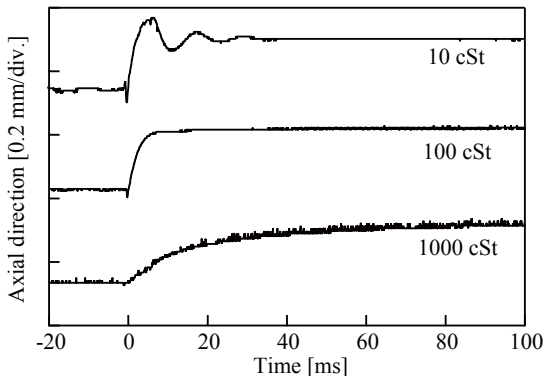


図4 レンズの過渡応答

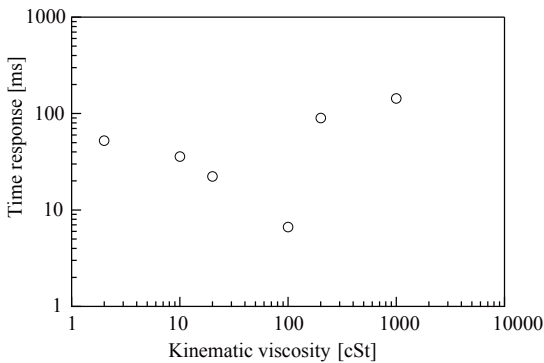


図5 オイルの動粘度とレンズの応答時間の関係

電圧によって焦点距離を制御できることがわかる。駆動電圧の増加に伴い焦点はレンズ表面に近づき、電圧が44 Vから減少するに従い焦点は無限遠に近づく。図4はオイルの動粘度を変化した場合の2液界面の過渡応答である。動粘度が小さい場合は減衰振動が見られるものの、過渡応答の時定数は小さい。逆に動粘度が大きい場合、減衰振動は発生しないものの、時定数は大きくなりレンズの応答速度は遅くなる。これらの結果は(2)節の理論通り、速い応答速度を得るのに適した動

粘度が存在することを示唆している。図5はオイルの動粘度とレンズの応答時間の関係であり、動粘度100 cStの時、最短応答時間は6.7 msであった。この結果はレンズの焦点距離を4.1 mmから無限遠まで6.7 msで変化できることを意味しており、この値は従来法である機械式と比較しておよそ1桁程度速い。

(5) 光軸方向焦点走査

被写界深度の大きい共焦点画像を得るため、焦点の高速走査を行った。レンズをAM変調信号で駆動し、2液界面を振動させることにより光軸方向に焦点位置を走査できる。図6は変調周波数500Hzにおけるレンズ界面の時間応答を表している。搬送信号は周波数1.47 MHz、15 Vの連続正弦波であり、変調度は100%である。同図より、界面は変調周波数に同期した振動を繰り返すことがわかる。 $t=0$ の瞬間に超音波駆動をオフにすると、界面は急速に非駆動時の初期位置に戻る。これより、レンズは変調周波数に同期して、焦点を周期的に走査することがわかる。図7は変調周波数1 kHzで搬送信号の電圧振幅を変化した場合の走査範囲の変化を表しており、グレー部分は焦点走査範囲である。駆動電圧の増加と共に走査範囲は減少するものの、最短焦点距離は小さくなり、1 kHzの高速焦点走査に成功した。

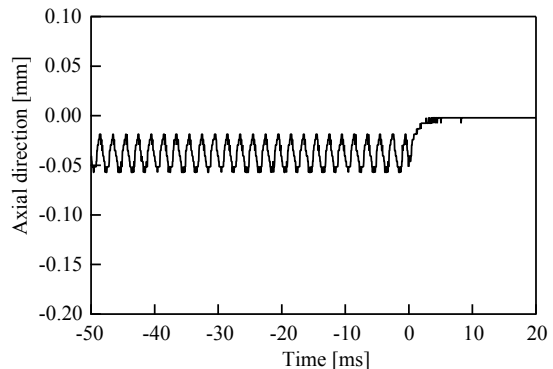


図6 AM駆動時のレンズ応答

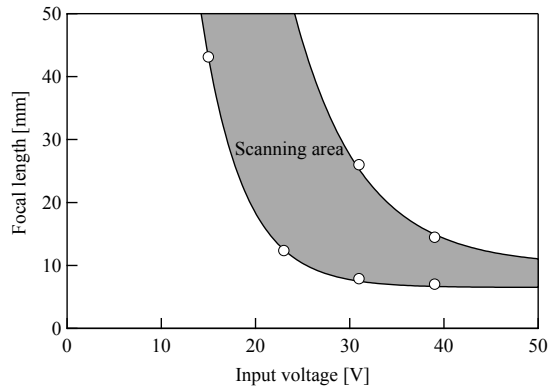


図7 AM駆動時の焦点走査範囲

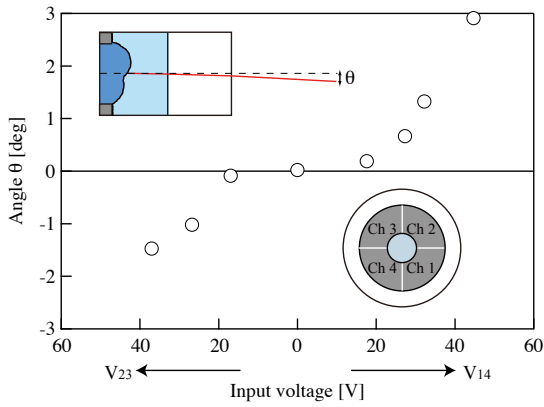


図8 駆動電圧と径方向屈折角の関係

(6) 径方向焦点走査

光軸方向に加え、径方向にも高速焦点走査できると、広視野での共焦点画像がリアルタイムに取得できる。レンズ内に非軸対称な音場を発生させ、レンズ形状を非軸対称に変形させるため、振動子の電極を周方向に4分割(Ch.1~4)することにより、それぞれに異なる電圧を印加可能である。図8は入力電圧と透過光の屈折角 θ の関係を表している。駆動電圧は周波数 1.9 MHz の連続正弦波であり、 V_{14} は Ch.1 と 4 のみの入力電圧振幅値を表しており、この場合 Ch.2 と 3 には電圧は印加しない。 V_{23} はこの場合と逆である。 V_{14} を印加した場合、レンズ内には非軸対称な音響定在波が発生し、片側の音圧値がもう片側に比べて大きいと考えられる。音響放射力がオイル側から水側に向かって働くことから、非軸対称に大きく変形した。4つ全ての電極を同じ条件で駆動すると、前節の様にレンズは軸対称に変形する。透過光は V_{14} 、 V_{23} の印加によりそれぞれ図中下側と上側に屈折することがわかる。 $V_{23}=27$ V の場合、透過光はレンズ表面から光軸方向に 10mm、径方向に中心軸から 0.22 mm の位置に焦点を持った。 V_{14} および V_{23} の増加に伴い屈折角も増加することがわかる。最大屈折角は $V_{14}=45$ V の時 2.9° であった。これらの結果より振動子入力電圧により液体レンズの焦点位置と透過光屈折角は光軸および径方向に制御できることがわかる。また前節同様、AM 信号で駆動することにより、径方向に焦点位置を連続走査することができる。

(7) 透明ゲルを用いたレンズ

より単純な構造で温度安定性を有する透明ゲルを用いた超音波駆動式可変焦点レンズについて検討した。図9はゲルレンズの構造であり、アニュラ型超音波振動子(PZT、内径 15 mm、外形 30 mm、厚さ 2 mm)の片端に厚さ 0.1 mm のPET フィルムを接着し、中心部にレンズの役割を果たす透明シリコンゲル(KE-1052(A/B)、屈折率 1.4、信越シリ

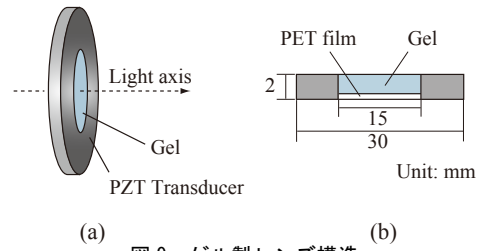


図9 ゲル製レンズ構造

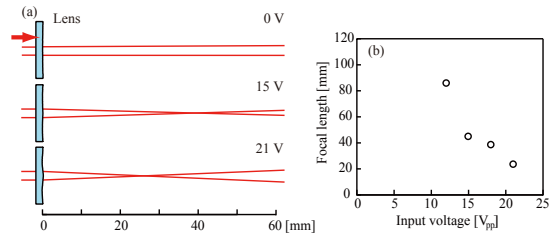


図10 ゲル製レンズの光学特性

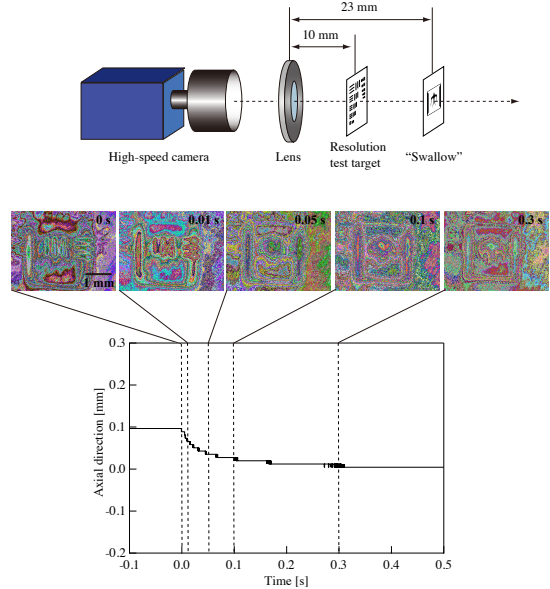


図11 ゲル製レンズの光学特性

コン)を充填する。ゲルに流動性はなく、レンズを傾けてもその形状はほとんど変化しない。振動子が径方向振動する共振周波数で駆動すると、ゲル中に音響定在波が発生する。ゲルと周囲空気の境界に音響エネルギー密度差が生じ、エネルギー密度の大きいゲル側から小さい空気側に向かって音響放射力が働き、レンズは空気側に静的に変形する。図10(a)は駆動周波数 226 kHz で電圧値を 0 ~ 21 V まで変化した場合のゲルの形状変化と光線追跡結果である。駆動電圧の増加に伴いレンズ表面の変位は増加し、透過光が集束することがわかる。また同図(b)は入力電圧と焦点距離の関係を表しており、電圧の増加に伴い焦点距離はレンズに近づくことがわかる。図11は高速度カメラによって試作したレンズを通して撮影した画像であり、焦点位置は 10 mm から 23 mm の位置へ 0.3 s で

移動する。応答時間はゲルの粘弾性特性に大きく依存すると考えられ、今後応答時間の減少を目指したい。

(8) まとめ

本研究では音響放射力を用いた小型で高速応答可能な液体レンズを開発した。レンズは厚み4 mm、径6 mmであり、水、シリコンオイル、超音波振動子で構成される。水-オイル界面が音響放射力により高速に変形し、可変焦点レンズとして作用する。レンズ応答を一次元モデルとして理論的に検討し、速い応答速度を得るのに最適なオイルの動粘度が存在することを示した。FEAによってレンズ内の音場解析を行った。印加電圧の制御によってレンズは可変焦点レンズとして動作し、従来型と比較して1桁程度応答速度の速い最速応答時間6.7 msを得た。AM信号で駆動することにより3次元焦点走査可能なことを実験的に証明した。またより単純な構造で温度安定性を有する透明ゲルを用いたレンズを作製し、可変焦点レンズとして動作させることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

(1) D. Koyama, M. Hatanaka, K. Nakamura, and M. Matsukawa, Ultrasonic optical lens array with variable focal length and pitch, *Opt. Lett.*, Vol. 37, No. 24, pp. 5256-5258 (2012), doi: 10.1364/OL.37.005256, 査読有

(2) D. Koyama, R. Isago and K. Nakamura, Ultrasonic variable-focus optical lens using viscoelastic material, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 100, No. 9, p. 091102 (2012), doi: 10.1063/1.3688937, 査読有

(3) D. Koyama, R. Isago and K. Nakamura, Three-dimensional variable-focus liquid lens using acoustic radiation force, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 58, No. 12, pp. 2720-2726 (2011), doi: 10.1109/TUFFC.2011.2134, 査読有

[学会発表] (計13件)

(1) D. Koyama, R. Isago, and K. Nakamura, "Varifocal imaging using an ultrasonic optical lens with viscoelastic material," *Proc., Optical Fiber Sensors*, pp. 84212N-1-4, 中国 (2012)

(2) D. Koyama and K. Nakamura, "Ultrasonic high-speed variable-focus optical lens," *Proc. The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2012*, pp. 54-55, 日本 (2012)

(3) D. Koyama, R. Isago and K. Nakamura, "Three-dimensional focus scanning by an acoustic variable-focus optical liquid lens," *Proc. the 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, pp. 355-358, 日本 (2012)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 超音波式可変焦点レンズアレイ及びその制御方法

発明者: 小山大介、中村健太郎

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許出願2012-4312号

出願年月日: 2012年01月12日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計1件)

名称: 可変焦点レンズ及びその焦点制御方法

発明者: 小山大介、中村健太郎

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許公開2013-061549号

取得年月日: 2013年04月04日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://use.doshisha.ac.jp/use/Welcome2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山大介 (KOYAMA DAISUKE)

同志社大学・理工学部電気工学科・准教授

研究者番号: 50401518