

[研究助成 (B)]

超音波ゲルレンズの開発と高速光計測技術への展開

2231901

研究代表者
(助成金受領者)

同志社大学 理工学部

教授

小 山 大 介

共同研究者

同志社大学 理工学部

教授

松 川 真 美

[研究の目的]

将来的な車輛の自動運転技術の発展のためには、高速かつ広範囲に周囲情報を取得する技術が必須である。従来のカメラで画面奥行き方向に高速で移動する物体に常にピントを合わせて撮影する場合、アクチュエータを通じて連続的かつ高速にレンズを光軸方向へ移動させて、レンズの焦点を移動させなければならず、走査速度と走査範囲はアクチュエータの機械的性能によって決定づけられる。本研究では、音速で伝搬する超音波によって、透明ゲルの形状および屈折率を高速かつ大振幅で変化させることにより、従来手法の限界を超えた、光を空間的・時間的に高速制御可能な光デバイスと、これを利用した光計測技術について検討する。

我々人間の眼の水晶体は自身の形状を変形することにより焦点位置を制御している。本研究ではこれにヒントを得、第一段階として、超音波による透明ゲル材料の形状制御技術を検討すると共に、これを利用した高速光計測に適したゲル材料の選定を行う。第二段階として、本技術を利用した光学デバイスとして、焦点位置を3次元的に高速に制御可能な光学レンズを開発する。本レンズは従来技術の様に、焦点変化時にレンズの位置を動かすのではなく、超音波の放射力によって自身の形状を変化させ、その焦点位置を任意位置に高速に変化可能な可変焦点レンズである。また、レンズ内に非軸対称な圧力分布を発生することで、その焦点位置を軸上

のみならず径方向にも制御する。提案するレンズはレンズの役割を果たす透明ゲル材料と超音波を発生させる圧電素子のみで構成される機械的可動部を持たない簡素な構造であるため、小型・薄型化可能であり、車輛用デバイスに求められる耐震性にも優れる。また、レンズ中を音速で伝搬する超音波の放射力によりその形状が変化するため、従来技術の機械式レンズと比較して1桁程度短い時間応答が期待でき、応答時間 10 ms を目指す。

[研究の内容、成果]

1. 超音波ゲルレンズの開発

本研究では、焦点位置を制御可能な超音波ゲルレンズを開発した(図1)。レンズは円形ガラス基板(直径 30 mm, 厚み 1.1 mm)、厚み方向に分極したアニユラ型圧電超音波振動子(内径 20 mm, 外径 30 mm, 厚み 1 mm, PZT, C-213, 富士セラミックス)、レンズの役割を果たす透明なゲル膜で構成される。レンズへの

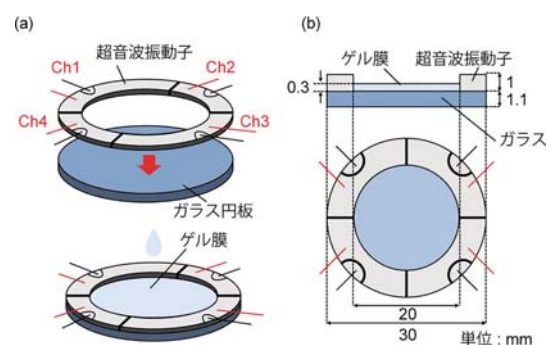


図1 超音波ゲルレンズ

入力信号によってレンズ形状を制御するため、超音波振動子は周方向 90°ごとに4分割されており、それぞれが電氣的に独立している（Ch 1～4 とする）。透明ゲルとして粘弾性体であるシリコーンゲル（KE-1052(A/B)，信越化学工業）を使用した。気泡を含まない様に主剤と硬化剤を15分間混合し、脱気後にガラス円板上の凹部に250 mlのゲルを塗布し、24時間乾燥を行った。レンズの姿勢によらずゲル膜表面（すなわちレンズ表面）形状は安定しており、重力による影響はほとんど受けない。

2. レンズ径調整機能の評価

機械的可動部を持たず有効レンズ径を調整可能な可変焦点レンズを開発した。本レンズは周波数 20～250 Hz の範囲において複数の共振モードを有し、本研究では節円のみが存在する軸対称な同心円状の共振モードを利用した。図2はこれらの振動モードを示しており、(a) 41, (b) 102, (c) 189 kHz の4つの振動子を同相駆動して発生する凸レンズモードと、(d) 26, (e) 66, (f) 148, (g) 233 kHz の各振動子の駆動位相差を 90°とした凹レンズモードを利用した。レンズのガラス円板にこれらの振動モードが励振されると、その上に塗布されたゲル膜の表面に超音波の静圧である音響放射力が作用することでゲルは静的に変形する。図3はゲルレンズ表面の変形形状断面図の一例であり、周波数 41 kHz の振動モードで駆動した場合の結果である（実際はゲル膜の付加質量の影響により 39 kHz で共振する）。同図より、非駆動時（0 V）はゲルの表面張力によって凹形状であるが、

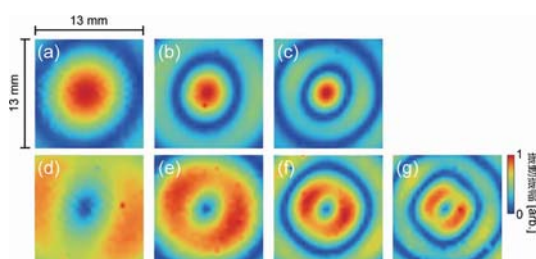


図2 ゲルレンズの各振動モード

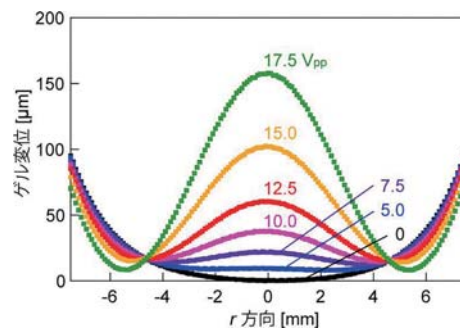


図3 ゲルレンズの振動分布

超音波駆動によって図2(a)の振動分布と同様にレンズ中心部分（ $r=0$ mm）が凸状に変化することがわかる。入力電圧振幅と共に振動振幅が増加し、ゲル表面に作用する音響放射力も増加することから、それによってゲルの変位も非線形的に増加する。また共振周波数が高いほど（すなわちモード次数が大きいほど）、ガラス円板に発生する超音波たわみ振動の波長が短くなるため、ゲル表面に発生する凸レンズの有効径は小さくなる。すなわち、共振モードの切替によって離散的に可変焦点レンズの有効径を制御できる。

図4は超音波振動子への入力電圧振幅を変化させた時のゲルレンズの焦点距離の変化を表しており、ここでは図2(a), (b), (c)に示した3つの凸レンズモードの結果を示している。いずれの共振モードにおいても入力電圧の増加と共に焦点距離は小さくなる。これは図3に示した通り、電圧の増加に伴い凸レンズの曲率半径が小さくなるためである。本結果より、いずれの共振モードにおいても入力電圧によって焦点距離を制御可能であることがわかる。また、光線

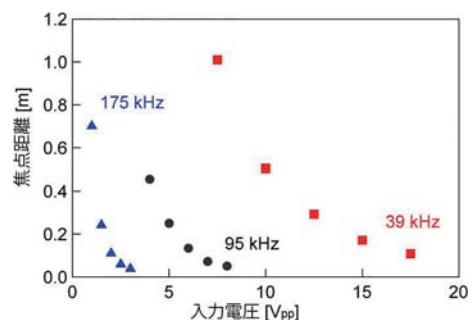


図4 入力電圧と焦点距離の関係

追跡によってレンズの光学性能を定量的に評価した。球面収差はレンズの光学性能を表す最も重要な指標のひとつであり、レンズを透過する光線が1点に集束する度合いを表すパラメータである。この値が小さいほど凸レンズとしての光学性能は優れていることを意味する（0%の場合、レンズを透過する全ての光線が1点に集束する）。図5は各凸レンズモードにおける入力電圧とレンズの平均球面収差の関係を表している。同図に示す通り、いずれの共振モードにおいても入力電圧の増加と共に平均球面収差は減少する結果となった。

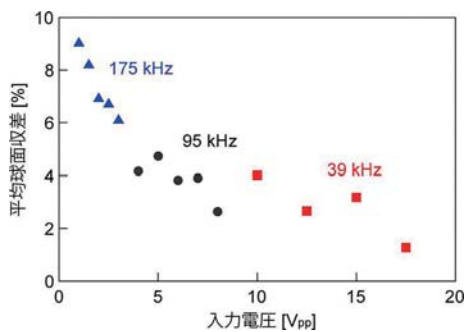


図5 入力電圧と平均球面収差の関係

3. 径方向焦点制御の評価

光軸方向（画面奥行き）のみならず、径方向（画面横方向）にも焦点制御可能なゲルレンズについて検討した。本機能はカメラの手振れ補正機能に活用することが可能である。図6はCh1~4への電圧振幅の和を $36 V_{pp}$ 一定とし、

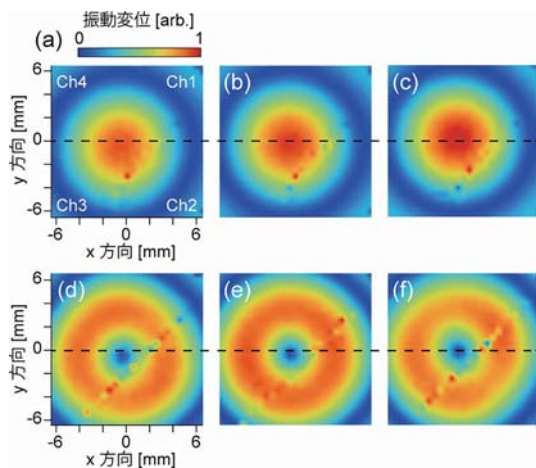


図6 ゲルレンズの振動分布

それらの比を変化した時の振動分布であり、同図(a)~(c)は各振動子を同相で駆動した凸レンズモードの場合の振動分布を、同図(d)~(f)は駆動位相差を 90° とした場合の凹レンズモードの結果を表している。全ての振動子を $9 V$ で駆動した時 $((9, 9, 9, 9) V_{pp})$ において両駆動方式のいずれにおいても振動中心とレンズの中心が一致し、電圧比を変化させると振動腹部および振動節部は低電圧入力振動子側に近づく方向に移動する。これらの結果は、各振動子への入力電圧比を制御することによってゲルレンズの径方向形状制御が可能であることを意味している。

図7は実際にCh1~4への電圧振幅の和を一定とし、それらの比を変化した時の焦点位置であり、同図(a)は凸レンズモード時、同図(b)は凹レンズモード時の結果を表している。図6の振動分布と同じ様に、両駆動方式のいずれにおいても、電圧比を変化させると焦点位置は径方向（y方向）の低電圧入力振動子側に近づく方向に移動することがわかる。特に、焦点の径方向制御時において、光軸方向（z方向）には焦点距離はほとんど変化していないことから、焦点距離は径方向に水平移動していると理解出来る。これらの結果より、4つの各振動子への入力電圧比を制御することによってゲルレンズ

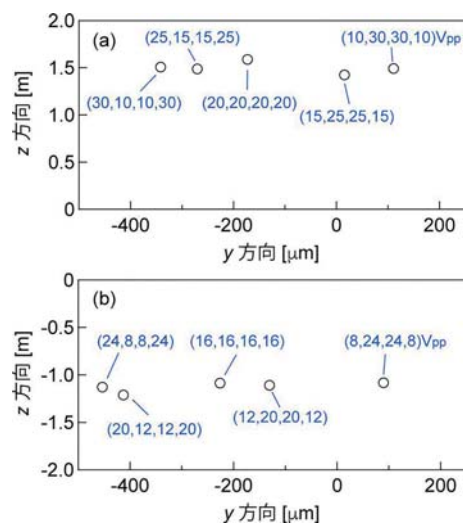


図7 径方向への焦点移動特性

の径方向焦点制御が可能であることがわかる。

4. 応答時間の改善

焦点変化時のレンズの応答時間は可変焦点レンズの性能として極めて重要な指標である。ゲルレンズの応答時間はゲルの粘弾性に強く依存する。そのため本研究では、従来のゲル膜に加えてその内部に液体を有するゲル・液体のハイブリッドレンズを開発した。

図8はハイブリッドレンズの構造を表しており、円筒型の圧電超音波振動子の一端にガラス円板を接着し、振動子中央部に液体（水）で満たし、その上にゲル膜で蓋をした構造である。ゲル膜厚 d に対する応答時間の変化を評価するため、本研究では厚さの異なる3つのハイブリッドレンズを試作した。

周波数 190 kHz において、ハイブリッドレンズのゲル膜部分に最低次のたわみ振動が励振された。これにより3つ全てのハイブリッドレンズが可変焦点凸レンズとして動作することが確認できた。図9(a)はゲル膜厚が異なる3つのハイブリッドレンズとゲルレンズ ($d=2$ mm) の時間応答を表している。グラフ縦軸はレンズを通して観測した顕微鏡画像の画像輝度値示しており、 $t=0$ s においてそれぞれ超音波駆動を開始している。同図より、ゲル膜厚 d が小さいほど画像輝度が定常状態に達するまでの時間が短い、すなわち応答速度が速いことがわかる。ここではこれらの応答曲線を指数関数

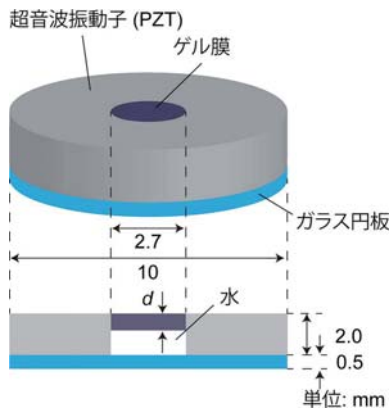


図8 ハイブリッドレンズの構造

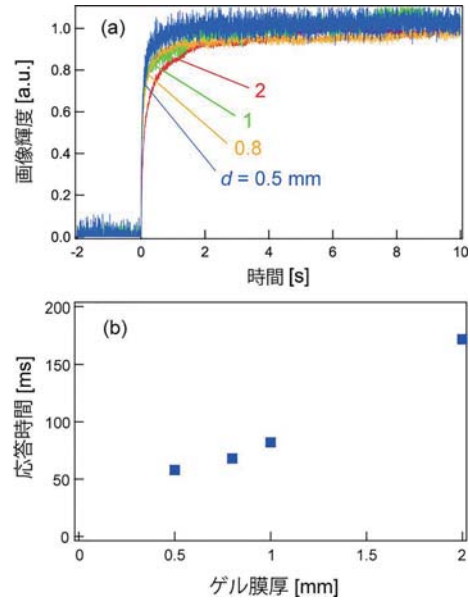


図9 (a) ハイブリッドレンズの時間応答と
(b) ゲル膜厚と応答時間の関係

で近似し、その時定数を応答時間と定義した。図9(b)はハイブリッドレンズのゲル膜厚 d と応答時間の関係を表している。ゲル膜厚 $d=1, 0.8, 0.5$ mm のレンズの時定数はそれぞれ 82, 68, 58 ms であり、ゲル膜厚が薄いほど応答時間は減少した（ゲルレンズ ($d=2$ mm) と比較して $d=0.5$ mm のレンズの応答時間は 34% 短縮された）。これらの結果より、ハイブリッド構造によって、ゲルレンズの問題点であった応答時間を改善できることが明らかとなった。

[謝 辞]

本研究の一部は立石科学技術振興財団による研究助成によって行われた。

[成果の発表、論文など]

原著論文

- ・ K. Nakamura, Y. Harada, H. Miki, K. Tagashira, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasonic aperture-tunable gel lens, Appl. Opt. Vol. 63, No. 21, pp. 5778-5784 (2024)
- ・ K. Tagashira, Y. Harada, K. Nakamura, H. Miki, M. Matsukawa, D. Koyama: Focus control of a concave-convex ultrasonic gel lens in the radial direction, J. Appl. Phys., Vol. 136, No. 11, p. 113101 (2024)

- ・ H. Miki, K. Nakamura, Y. Harada, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasound liquid-gel hybrid lens using acoustic radiation forces, Appl. Opt. Vol. 64. No. 4, pp. 821-827 (2025)

国内学会発表

- ・ 三木陽斗, 原田裕生, 中村光佑, 松川真美, 小山大介: 粘弾性ゲル膜と音響放射力を用いた超音波液体レンズ, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2023.6)
- ・ 田頭幸吉, 中村光佑, 三木陽斗, 小山大介: 凹型超音波ゲルレンズの径方向制御, 日本音響学会第 150 回 (2023 年秋季) 研究発表会 (2023.9)
- ・ 中村光佑, 原田裕生, 三木陽斗, 黒田悠真, 小山大介: 超音波ゲルレンズの光学特性評価, 日本音響学会第 150 回 (2023 年秋季) 研究発表会 (2023.9)
- ・ 田頭幸吉, 中村光佑, 原田裕生, 小山大介: 凹凸両用超音波ゲルレンズの径方向焦点制御, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2023.12)
- ・ 三木陽斗, 原田裕生, 中村光佑, 小山大介: 粘弾性ゲル膜と音響放射力を用いた超音波液体レンズのフォーカシング特性, 日本音響学会第 151 回 (2024 年春季) 研究発表会 (2024.3)
- ・ 三木陽斗, 中村光佑, 原田裕生, 小山大介: 超音波ゲルレンズの透過光波面解析, 日本音響学会第 152 回 (2024 年秋季) 研究発表会 (2024.9)
- ・ 富田理紗子, 岩青葉, 小山大介: 円筒のたわみ進行

波によって発生する流体中の旋回流と光デバイスへの応用, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2024.12)

- ・ 小山大介: 超音波による可変焦点光学レンズ, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2025.2)

国際学会発表

- ・ H. Miki, Y. Harada, K. Nakamura, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasound Liquid Lens Using a Viscoelastic Gel Film and Acoustic Radiation Force, IEEE International Ultrasonics Symposium 2023 (2023.9)
- ・ K. Tagashira, Y. Harada, K. Nakamura, D. Koyama: Focus control of a concave ultrasonic gel lens, 185th Meeting of the Acoustical Society of America (2023.12)
- ・ H. Miki, Y. Harada, K. Nakamura, D. Koyama: Focusing Characteristics of Ultrasound Liquid Lens Using a Viscoelastic Gel Film and Acoustic Radiation Force, 21st International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (2024.7)
- ・ H. Miki, K. Nakamura, Y. Harada, M. Matsukawa, D. Koyama: Optical Characteristics of an Ultrasound Gel Lens, 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control joint Symposium (2024.9)