

博士学位論文審査要旨

2022年7月12日

論文題目： Development of control methods for ultrasonic liquid crystal lens
(超音波液晶レンズの制御手法の開発)

学位申請者： JESSICA MIEKO DIAS ONAKA

審査委員：

主査：	理工学研究科	教授	松川	真美
副査：	理工学研究科	教授	大谷	直毅
副査：	理工学研究科	教授	小山	大介

要旨：

ヒトの水晶体のように、レンズを動かすことなく焦点距離の制御を行うため、本論文では複屈折性をもつ液晶材料を利用した小型かつ薄型で耐環境性の高い可変焦点レンズ（液晶レンズ）の開発を目指している。特に、従来のように液晶の分子配向制御に電界を用いず、超音波振動により分子配向を静的に制御する手法の開発とそのメカニズムの解明を目的とする。

この目的のため、まず、本論文ではガラス基板間の円形の液晶薄層にアニュラ型の圧電振動子を装着して、液晶周囲から超音波を駆動し、その音響放射力を利用して液晶を制御する手法について検討している。実際に有限要素法を用いて設計した液晶レンズを作成し、超音波駆動による変化を電気的かつ光学的に評価し、レンズの焦点を制御できることを示した。次に、実効レンズ径を制御するため、分割型アニュラ圧電振動子の導入を提案し、各分割振動子の位相制御によるレンズ径拡大を実験的に確認した。加えて、焦点の3次元制御を目指し、各分割振動子の入力信号の振幅制御を行った。その結果、非軸対称な振動励起により、光軸方向のみならずレンズ径方向にも焦点位置を制御できる可能性を示した。また、液晶層を多層化するアイデアを提案し、二層構造の液晶レンズを作成した。このレンズではより大きな屈折率変化が生じ、単層より効果的に光制御が可能であることを示した。以上のように、超音波振動を用いて液晶薄層の分子配向を制御することにより、実用化に不可欠な有効レンズ径の制御、焦点の径方向制御、焦点距離変化幅の拡大が可能であることを示すとともに、その動作メカニズムを明らかにした。

このレンズは小型かつ薄型であり、耐環境性の面からも、従来の機械的な可動部を持つレンズシステムを凌駕する可能性が期待できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

総合試験結果の要旨

2022年7月12日

論文題目： Development of control methods for ultrasonic liquid crystal lens
(超音波液晶レンズの制御手法の開発)

学位申請者： JESSICA MIEKO DIAS ONAKA

審査委員：

主査：	理工学研究科	教授	松川 真美
副査：	理工学研究科	教授	大谷 直毅
副査：	理工学研究科	教授	小山 大介

要 旨：

本論文の提出者は2020年9月に本学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程後期課程ISTCコースに入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容はOptics letters Vol.46, (2021), Applied Optics, Vol.60,(2021), Proc. 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium, Journal of Applied Physics, Vol.131,(2022)に掲載済みであり、すでに十分な評価を受けている。

2022年7月11日午後3時より2時間にわたり、提出論文に関する公聴会が開かれた。講演後、種々の質疑が行われたが、提出者の的確な説明により十分な理解が得られた。公聴会終了後、学力確認のため、審査委員による口頭試験を実施したところ、提出者の十分な学力を確認できた。提出者の母語はポルトガル語であるが、第一著者として国際会議で3件の英語の発表を行っており、高い英語能力を有するものと認められる。

以上より、論文提出者の専門分野における学力ならびに語学力は十分であることが確認された。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： Development of control methods for ultrasonic liquid crystal lens
(超音波液晶レンズの制御手法の開発)

氏名： JESSICA MIEKO DIAS ONAKA

要旨：

近年スマートフォンに代表される電子デバイスにとってカメラなどの光学素子はその製品の性能を表す重要な要素と言える。これらの製品に搭載される一般的なカメラモジュールは、複数枚のプラスチックやガラス製の固形レンズとアクチュエータ、ギア機構によって構成され、ピントや倍率を調整するためにはこれらのレンズの1, 2枚を光軸方向に移動させる必要がある。しかしながら、これらの機械的可動部の存在はカメラモジュール全体の大型化に繋がり、将来的なデバイスの小型・薄型化や車載デバイスなどへの応用時における耐震性を考慮すると、機械的可動部を持たず、より簡素かつ薄型化可能な可変焦点レンズが求められる。一方よく知られる様に、我々人間の眼はレンズの役割を果たす水晶体を毛様体によって変形することでその焦点を制御する可変焦点レンズである。この動作機構にヒントを得て、既にいくつかの研究グループによって、レンズ位置を動かすことなく、レンズの形状や屈折率分布を変化させ、その焦点距離の制御を行う可変焦点レンズが多種報告されている。その中でも、複屈折性を有する液晶材料を用いた可変焦点レンズ（液晶レンズ）は小型・薄型化や耐環境性の面からも従来の機械式レンズに取って替わる有望な候補と言える。

液晶材料は固体と液体の中間状態の物質であり、電気磁気双極子を持つ細長い分子構造からなるため光学的異方性を有する。液晶材料はその分子構造によっていくつかの種類に分類されるが、その中でも特にネマチック液晶は高い流動性を持ち、比較的配向制御が容易であるため、ディスプレイなど広い産業分野において活用されている。これらの液晶デバイスでは、液晶層に対して外部からの強制力としての電界を加え、液晶分子の配向を揃えることでその透過光を制御するが、電圧印加のためにはレアメタルを含む酸化インジウムスズなどの透明電極を要する。一方で、従来の液晶デバイスでは必須の透明電極を用いることなく、超音波振動によって液晶分子配向を静的に制御する手法が報告されており、本手法を応用した液晶レンズ（超音波液晶レンズ）も発表されている。しかしながら、超音波振動によって引き起こされる液晶分子配向変化の詳細なメカニズムについてはほとんど議論がなされておらず、これを明らかにすることは今後の産業応用面のみならず学術面においても非常に重要である。

そこで本研究では、超音波液晶レンズについて、その動作メカニズムを理解すると共に、従来の機械式レンズでは実現困難な多機能性について主に実験的に検討を行った。以下に本論文の構成を示す。

第一章では、研究背景および、これまで報告されている液晶レンズの開発状況と問題点、本研究の目的、構成について述べた。

第二章では、光学レンズの発展の歴史、液晶材料の基礎知識、ネマチック液晶の電気磁気および弾性特性、一般的な液晶デバイスの構造および動作特性、従来の液晶レンズの構造と種類について簡単に紹介した。

第三章では、光音響技術の歴史とその基礎について紹介した。また本研究において重要な役割を果たす、圧電超音波振動子、非線形音響効果の一つである音響放射力の原理について詳述するとともに、音響放射力を活用した光音響素子である超音波レンズについて、その種類、構造、お

よびこれまで明らかにされている動作特性を紹介した。さらに、超音波による液晶配向制御技術とこれまでの超音波液晶レンズについて紹介することにより、本研究の新規性と立ち位置を明らかにした。

第四章では、超音波液晶レンズの作製および評価手法について詳述した。超音波レンズは2枚のガラス基板間に作製した液晶層とアニュラ型圧電超音波振動子から成る、機械的可動部を持たない簡素な構造である。本研究では、様々な形状の超音波液晶レンズを試作しており、これらの設計には有限要素法による数値シミュレーションによる振動解析を援用した。超音波液晶レンズの作製について、各工程における諸パラメータの条件について記述した。また、作製した超音波液晶レンズの電氣的、光学的評価手法について詳述した。

第五章では、超音波液晶レンズのレンズ径制御手法について検討した。従来の超音波液晶レンズでは、レンズに発生するたわみ共振を利用するため、基板、液晶層、および振動子形状によって、駆動周波数と液晶層中においてレンズ効果が現れる有効レンズ径が決定されてしまう問題点があった。ここでは、レンズの超音波振動子を周方向に分割し、各振動子への入力電気信号の位相差を制御し、レンズ周方向に超音波たわみ進行波を伝搬することによって、従来手法である同相駆動による超音波たわみ定在波発生時と比較してレンズ径の拡大を狙った。試作したレンズの超音波振動分布を光学的に測定した結果、提案する駆動方法によって所望の超音波たわみ進行波が発生していることが確認された。また、Shack-Hartmann 波面センサによって、超音波液晶レンズの透過光強度分布および位相分布を測定した結果、進行波励振時では定在波励振時と比較して、同じ超音波振動振幅が励振されている際の焦点距離変化は小さいものの、レンズ径は約2倍に拡大することが明らかとなった。偏光顕微鏡を用いたレンズ透過光の観測結果においてもほぼ同値が得られた。すなわちこれらの結果は、同一レンズ形状において、入力信号の周波数と位相を制御することによって、有効レンズ径を離散的に制御可能であることを意味している。また、本測定系を用いて、超音波液晶レンズの光学収差および超音波振動下における液晶傾斜角度を定量的に評価した。

第六章では、超音波液晶レンズの径方向への焦点制御について検討した。従来の可変焦点レンズでは光軸方向への焦点変化のみが可能であるが、これに加えて光軸方向に対して垂直な径方向への焦点制御が実現できれば、今後3次元空間の焦点制御が期待できる。有限要素法による数値シミュレーション結果より、超音波液晶レンズの複数の振動子に異なる振幅の電気信号を入力することによって、レンズ中心部分に非軸対称なたわみ振動を励振できることが予測され、実際に試作機によってシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。またクロスニコル条件下において非軸対称振動モード発生時におけるレンズ透過光分布を測定することにより、液晶分子配向は超音波振動分布と共にレンズ径方向に移動し、その傾斜角度は従来の超音波液晶レンズ同様、超音波振動分布の空間勾配と相関関係にあることが認められた。さらに、開発した超音波液晶レンズと光学顕微鏡を組み合わせ撮影した光学顕微画像に含まれる高周波成分（すなわちシャープネス）を評価した結果、レンズ焦点の径方向制御機能の有効性が認められた。

第七章では、超音波液晶レンズの液晶層多層化について検討した。液晶レンズの場合、レンズ透過光における最大位相差は液晶層厚みと液晶材料の複屈折によって決まる。そのため、より大きなレンズ効果を得るためには、液晶層厚みを増大する必要がある。しかしながら、一般的な電界型液晶デバイスでは、液晶層の増大に伴い強制力による配向変化の応答速度が低下することや、液晶層厚み中央部の分子配向が困難であるため数 μm 程度の液晶層が採用される。ここでは、より大きなレンズの焦点距離変化幅を得るため、2つの液晶層を有する超音波液晶レンズを作製、比較することによって、液晶層多層化の有効性について検討した。2層液晶レンズの光学的評価手法として、複屈折プロファイラを用いて評価した。また、2種の液晶材料を用いることにより、液晶材料の物性とその光学特性に与える影響についても評価した。2層の液晶層厚みの合計値が等しくなる単層レンズと比較して、2層レンズはより低い入力電圧でより大きな屈折率変化、す

なわちより大きなレンズ効果が得られることがわかった。これは、基板の超音波振動が表裏両面2層の液晶層に伝搬することにより、単層レンズと比較してより効率的に振動エネルギーを活用していることを意味している。

第八章では、各章の総括と今後の展望について述べた。

本研究では、超音波と液晶材料を組み合わせた可変焦点光学レンズについて、従来の光学レンズでは為し得なかった多機能性に焦点を当てた検討を行った。特に、これまで実用面から課題とされていた有効レンズ径の制御、焦点の径方向制御、焦点距離変化幅の拡大について検討した。これらの機能を組み合わせることにより、今後例えば機械的可動部を必要としない手振れ補正機能の実現など、将来的な実用化を考慮した際に有効な制御手法となることが期待できる。