

## 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 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656176

研究課題名（和文） 液体を多層カプセル化した超軽量可変焦点レンズ

研究課題名（英文） Lightweight varifocal lens with multi-capsulated liquid

研究代表者

高畑 智之 (TOMOYUKI TAKAHATA)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：80529652

研究成果の概要（和文）：人間の水晶体のように外力による変形を利用して焦点調節することのできる液体レンズの設計指針を得るため、水晶体の光学的シミュレーション、および液体レンズの変形の力学的シミュレーションを行った。また、液体レンズの型を作製するためのシリコン三次元加工において、最大深さ 300  $\mu\text{m}$  で、高低差 100  $\mu\text{m}$  の任意曲面を作製できるプロセスを開発した。

研究成果の概要（英文）：Optical simulation of a human crystalline lens and mechanical simulation of liquid lenses deformation were performed to obtain design guideline of liquid lenses that can be deformed and varies its focal length by an external force. A silicon three-dimensional process that enables 300  $\mu\text{m}$  maximum depth and 100- $\mu\text{m}$ -deep arbitrary curves was developed for making molds of liquid lenses.

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	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：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：知能機械、マイクロ・ナノデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットなどの知能機械において、カメラは外界の情報を取得する手段として広く用いられている。これらの自身が移動する機械では個々の部品が十分な性能を持った上で小型・軽量であることが求められる。カメラのレンズ系にとっての性能とは、良好な結像特性を持つことに加えて、焦点調節ができることが求められる。一般のカメラの焦点調節機構はレンズ群を光軸方向に動かして合成焦点距離を変化させる方法がとられる。この方法はレンズの外部にモータなどのアクチュエータを配置する必要があり、小型化には適していない。

一方で、ヒトの眼を考えると、上記の小型、軽量、焦点調節可能という要求を満たしており、参考にすべき点が多い。水晶体は毛様体の収縮に応じて水晶体が変形して焦点距離を変えており、この時にも像の歪みが少ない。この水晶体の特性を理解し、工学的に応用して従来にない超軽量の可変焦点レンズを実現することができると思われる。

## 2. 研究の目的

ヒトの眼の水晶体と同程度に軽量かつ結像性能がよく、焦点調節機能を持つレンズを実現するために、水晶体と同様に液体を有機

膜で多層にカプセル化した構造を有するレンズの研究を行う。

まずヒトの水晶体の特性を理解するために、多層構造になっていることの効果、各層の液体の屈折率の違いの効果、非球面の形状の効果、およびレンズが変形したときの光学特性の変化を解明する。この知見をもとに、工学的に応用するためのレンズ作製方法と変形方法を検討する。

### 3. 研究の方法

液体をカプセル化した可変焦点レンズの設計指針を得るために以下の研究を行う。

#### (1) 水晶体を模した液体レンズの特性

人間の水晶体を模した、液体を膜で覆った液体レンズの光学的、力学的特性を調べた。既存の水晶体の光学的モデルを出発点として、レンズの前面と後面の曲率半径、レンズ厚さなどのパラメータを変えて光学特性のシミュレーションを行った。次に、液体レンズの周囲に引っ張り力を加えたときのレンズの変形を、有限要素法を用いて解析した。

#### (2) レンズの作製方法の研究

液体レンズの作製には、三次元形状に加工したシリコンの型を用いる方法を検討した。液体をパリレンやシリコンゴムで覆うことでレンズにする。パリレンは、化学気相成長法により成膜することができ、 $10\mu\text{m}$ 程度の均一な厚さの膜を作るのに向いている。シリコンゴムはヤング率が低く、レンズを変形させるのに有利であると考えられる。

#### (3) レンズの変形方法の検討

液体レンズは、周辺部を半径方向に引っ張ることで変形し、焦点距離を変える。レンズに対して所望の変形を与えるために必要な力の大きさを概算する。

### 4. 研究成果

#### (1) 水晶体を模した液体レンズの特性

光学シミュレーションについては、光学設計ソフトウェア CODE V を導入し、ヒトの水晶体の光学的モデルをもとに、光線追跡による光学特性のシミュレーションを行った。

図1に、一般的にヒトの眼のモデルとして用いられる Gullstrand 模型眼の光学シミュレーションの結果を示す。水晶体の前面と後面の曲率半径はそれぞれ  $10\text{mm}$  と  $6\text{mm}$  である。網膜が半径  $12\text{mm}$  の球面形状をしていると仮定した。様々な入射角度の光を網膜に結

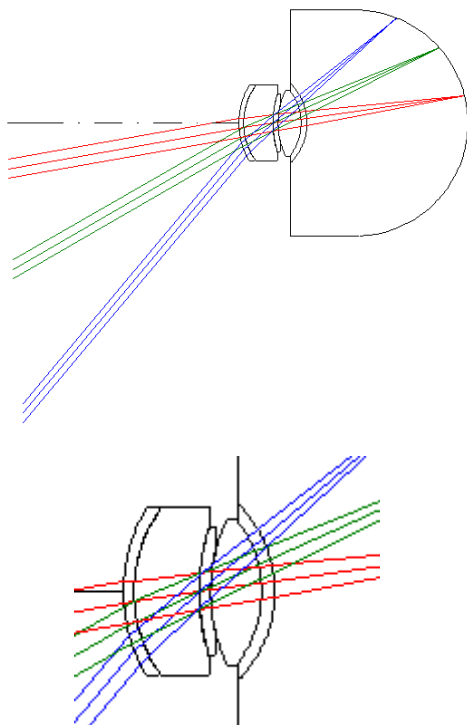


図1 : Gullstrand 模型眼の光線追跡結果。赤、緑、青の線は、それぞれ入射角度が  $10$  度、 $30$  度、 $50$  度の光線を示す。光源は無限遠にあるとした。

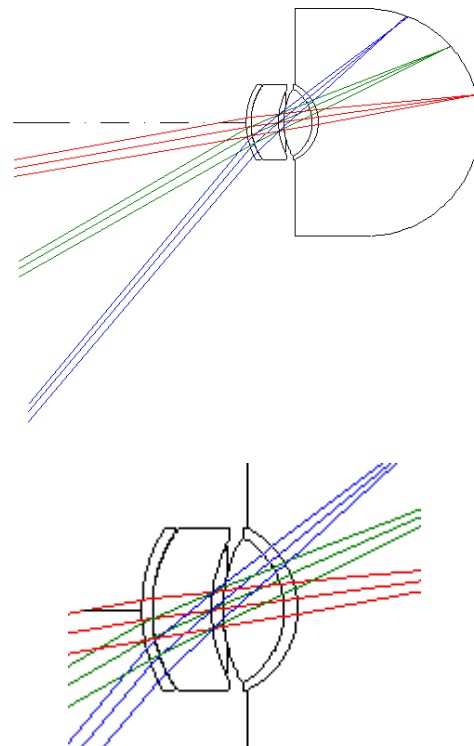


図2 : 物体までの距離が  $150\text{mm}$  のときの光線追跡結果。

像する性能があることがわかった。

人の眼は、光源までの距離が有限の値であるときには、水晶体を変形させてレンズの曲率を変化させて焦点距離を調節する。この状況を上記と同様のシミュレーションで確かめた。対象物から角膜前面までの距離が 150 mm という条件でシミュレーションをしたところ、水晶体の前面と後面の曲率半径がそれぞれ 7.2mm と 4.4mm のときに焦点を結んだ(図2)。

液体レンズの変形について、有限要素法解析のソフトウェアである COMSOL を用いて、レンズの側面にレンズの半径方向に引っ張る力を加えたときの変形を計算した。回転体に対して半径方向に力を加える条件であるため、2d axisymmetric モデルを用いた。

レンズの直径を 2 mm とし、初期状態で厚さを 500  $\mu\text{m}$  とした。膜のヤング率をパリの物性を参考に 2.8 GPa とし、厚さを 20  $\mu\text{m}$  として計算した。

まず、円を2つ組み合わせた形状(モデルA)について計算した。レンズの半径を 1 mm、前面と後面の曲率半径をそれぞれ 2 mm、1.2 mm とした。二つの円の接続点に 150 N/m の荷重をかけたときの変形を図3に示す。このモデルでは二つの円が不連続につながっており、その点に力をかけると、レンズの辺縁部のみが大きく変形してしまった。

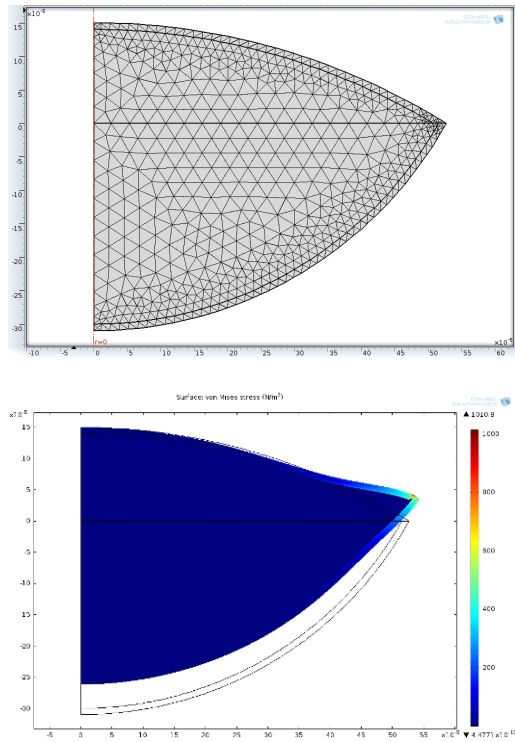


図3：モデルA(円の組み合わせ)のレンズの変形の計算結果。

次に、楕円の半分を2つ組み合わせた形状(モデルB)について計算した(図4)。レンズの半径(つまり楕円の長軸)を 1 mm とし、前面と後面の楕円の短軸をそれぞれ 0.4 mm、0.6 mm とした。二つの円の接続点に 1000 N/m の荷重をかけたときの変形を図4に示す。このとき二つの曲線はなめらかにつながっているため、モデルAのよりもレンズ全体が変形した。しかし、モデルAと同じ程度の変形をさせるのに、6.7倍の荷重が必要であった。

## (2) レンズの作製方法の研究

液体レンズの変形のシミュレーションから、液体レンズの形状は、レンズ前面の曲面とレンズ後面の曲面がなめらかに接続された形状でないと、きれいに変形しないことがわかった。液体レンズの形状を決めるために、シリコンを目的の非球面形状に加工しておき、それをテンプレートとしてレンズを形成する方法を考えた。

シリコンの三次元加工の方法を図5に示す。まずシリコン基板上に成膜した厚さ 100 nm のアルミニウム膜に対して、紫外線露光とウェットエッチングを施し、マスク開口を形成する。次に、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチングにより、マスクに開口があいた部分のシリコンを垂直にエッチングする。最後にマスクを取り除き、シリコンを等方的に

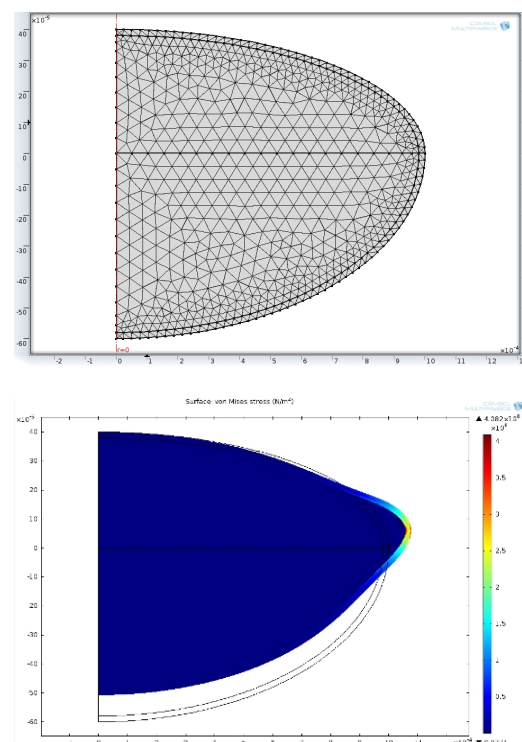
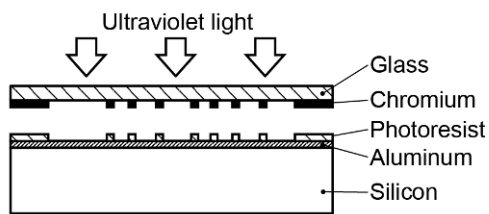


図4：モデルB(楕円の組み合わせ)のレンズの変形の計算結果の例。

(1) Pattern rectangular openings by photolithograph



(2) Etch silicon vertically by ICP-RIE



(3) Smoothen by SF<sub>6</sub> isotropic etching

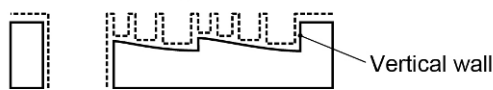


図5：レンズの型の作製のためのシリコンの三次元加工。

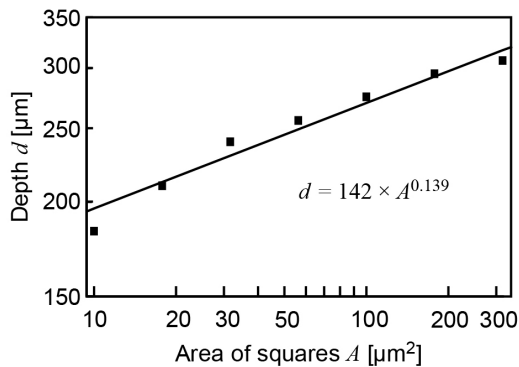


図6：エッチングマスクの開口面積とエッチング深さの関係。横軸は対数で示す。

エッチングして表面を滑らかにする。

従来の加工法では深さが最大で100 μmであったが、本研究では最大で厚さ400 μmのシリコンウエハを貫通するまで加工できるようにエッチング条件を調整した。具体的には、エッチングマスクを、従来のフォトレジストから、アルミニウム膜に変更することで、エッチングへの耐久性を向上した。これにより、曲面部の厚さが100 μmの型を作製できるようになった(図6)。

この結果は厚さ400 μmのシリコンウエハを用いたときのものであり、液体レンズの方の作製においては、所望のエッチング深さを得るのに十分な厚さのシリコンウエハを用いることで、設計した形状にシリコンを三次元的に加工することができる。

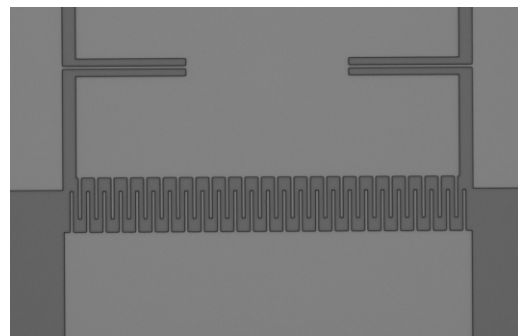


図7：試作した櫛歯型静電アクチュエータの写真。

(3) レンズの変形方法の検討

一般的なマイクロアクチュエータである、櫛歯型静電アクチュエータ(図7)により発生することのできる力を概算した。櫛歯の幅、厚さおよびギャップを全て10 μmとし、印加電圧を100 Vとすると、櫛歯1本が受ける力は、およそ10<sup>-7</sup> Nである。櫛歯のピッチが40 μmであるから、力の密度は2.5×10<sup>-3</sup> N/mと見積もることができる。

一方で、(1)の変形のシミュレーションでは、レンズを変形させるのに必要な力の大きさを150から1000 N/mであった。これは静電アクチュエータで発生する力では変形できない。液体を覆う膜がシリコンゴムであれば、ヤング率10 MPaのとき変形に必要な荷重は4 N/mとなり、ヤング率1 MPaのとき変形に必要な荷重は0.5 N/mとなる。この程度であれば、静電アクチュエータであっても、櫛歯の高密度化、櫛歯を高誘電率の材料で覆うなどの方法により駆動する可能性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高畑 智之 (TOMOYUKI TAKAHATA)  
 東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師  
 研究者番号：80529652

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。