

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686039

研究課題名(和文) MEMS 光学系による異種画像同一光軸撮像システム

研究課題名(英文) Coaxial multi-modal imaging system using optical MEMS

## 研究代表者

高畑 智之(Takahata, Tomoyuki)

東京大学・情報理工学(系)研究科・講師

研究者番号：80529652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクトな同軸光学系で、遠赤外光と可視光の二種の画像を得た。そのためにシリコンとガラスから成るハイブリッドレンズを新たに考案した。遠赤外光と可視光はシリコンウエハによるビームスプリッターで分割し、それぞれに対応したイメージャで撮影した。光学系としての基本的な機能の確認として、ハイブリッドレンズの位置によって焦点調節ができることを示した。

また、MEMSシリコン三次元加工によるシリコンフレネルレンズを用いてハイブリッドレンズを試作した。このハイブリッドレンズで点光源の像をスクリーンに結像し、遠赤外光と可視光のそれぞれの像が同じ位置に結像されることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A compact optical system to obtain thermal and color images simultaneously was proposed. The key is to use a silicon-glass hybrid lens, with which visible and far-infrared light can be focused. The focused light was split by a silicon plate. The thermal and color images were taken by a thermal and color imager, respectively. The focal plane was tuned by the position of the lens keeping the correspondence of thermal and color images.

Using MEMS silicon 3D fabrication process, a Fresnel lens was fabricated. Color and thermal images of a point light source were focused with the hybrid lens.

研究分野：MEMS, ロボティクス

キーワード：知能機械 マイクロ・ナノデバイス 同軸光学系 シリコン三次元加工

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はパーソナルモビリティロボット (PMR) の研究を通して、環境認識機能の必要性を強く感じた。PMR は操作性のよい一人乗りの電動の乗り物で、小回りが利き、屋内の狭い場所でも自由に移動することができるもので、移動を支援することができる。我が国の65歳以上人口の割合は2005年に20%を超えた (H17 国勢調査より)。誰でも年齢によらず健康で自立して暮らすことのできる社会を実現するために、生活を支援する科学技術がますます重要である。自分の意志で目的の場所まで移動できる能力は基本的日常生活動作能力の一つに位置づけられており、これを支援する需要は大きい。

この研究の過程で、PMR を実用化するための技術課題として、環境認識機能の必要性を強く感じた。例えば、家庭内でも PMR の周囲には、人間をはじめ、床や壁等の部屋の構造、テーブル等の家具、進路に落ちている物のように多様なものがある。特に人間の存在を見落とすことは重大な事故の要因となるおそれがある。人間を見つけない場合には対象物の温度を知ることが有効である。しかしながら、現状では色や温度といった異なる種類の画像を、同じの視野で撮影できるシステムは存在しない。従来は個別のカメラを並べて各種の画像を撮影していたが、画像間の対応点のマッチングを、あらゆる照明条件と対象物に対して誤りなく計算することはできなかった。そこで本研究の目的を、異種画像を同一光軸で撮影するシステムの実現に定めた。

### 2. 研究の目的

色、距離、温度の三種類の画像を同じ視野で1枚の画像として撮影するカメラを実現するために、可視光、近赤外光、遠赤外光という質の異なる光を同一の光軸で撮影する撮像システムの研究を行う。光軸が共通であることから、このシステムで得られる画像群は、対象物の各点の色、距離、温度の対応が自明であり、マッチング等の演算が必要ない。これにより、実環境に存在する多様な対象物の形状、位置、温度分布を正確に知り、認識の精度を向上することが可能になると考えられる。

本研究の開始後に色と距離の画像を撮影することのできるセンサとして、Microsoft 社の Kinect などが広く使われるようになった。これを受けて、本研究では、色と温度の二種類の画像を撮影することのできる、可視光と遠赤外光に対応した同軸光学系の研究に重点を置くことにした。

### 3. 研究の方法

可視光と遠赤外光を同軸で撮像することのできる光学系の構成として、ハイブリッドレンズ、ビームスプリッタ、それぞれの波長に対応したイメージャからなる構成を考案した (図1)。

ハイブリッドレンズは、周辺部がシリコン

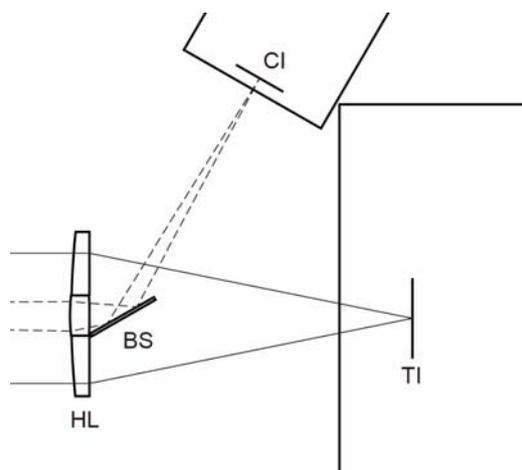


図1 コンパクトな遠赤外光、可視光同軸光学系。HL: シリコン-ガラスハイブリッドレンズ、BS: ビームスプリッタ、TI: 遠赤外イメージャ、CI: 可視イメージャ。

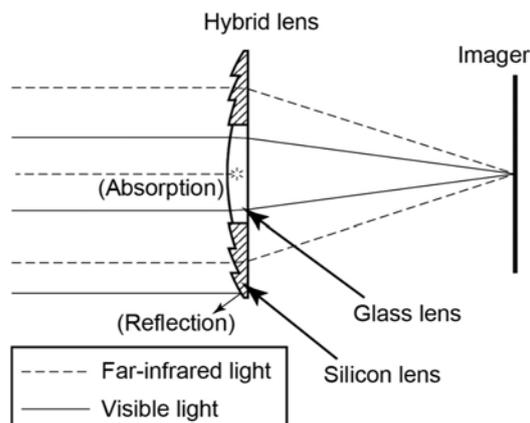


図2 シリコン-ガラスハイブリッドレンズ。遠赤外光と可視光を同一の光軸と視野角で結像することができる。

レンズで、中心部がガラスレンズである (図2)。シリコンは遠赤外光を透過するが、可視光は反射する。一方で、ガラスは可視光に対して透明であるが、遠赤外光を吸収する。ゆえに、周辺部のシリコンレンズは遠赤外光を結像し、中心部のガラスレンズは可視光を結像する。両者は互いに影響を及ぼすことはない。周辺部のシリコンの部分は、レンズの中央にガラスレンズをはめ込むための穴が開いたレンズである。

ビームスプリッタは、可視光と遠赤外光で透過率が大きく異なる材料であればよい。また、それぞれのイメージャとして、市販のカメラからレンズを取り外したものをを用いた。

光学系を評価するための実験には、遠赤外光から可視光までの広い範囲の波長の光を出すことのできる熱型の光源を用いた。これはコイル状の導線に電流を流して赤熱させることで発光するものである。熱型の光源は、温度に応じて、プランクの法則に従ったスペクトルの光を出す。広い範囲の波長の光を出すことができる。

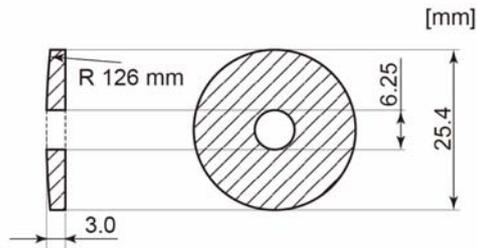


図3 機械加工シリコンレンズの設計寸法。

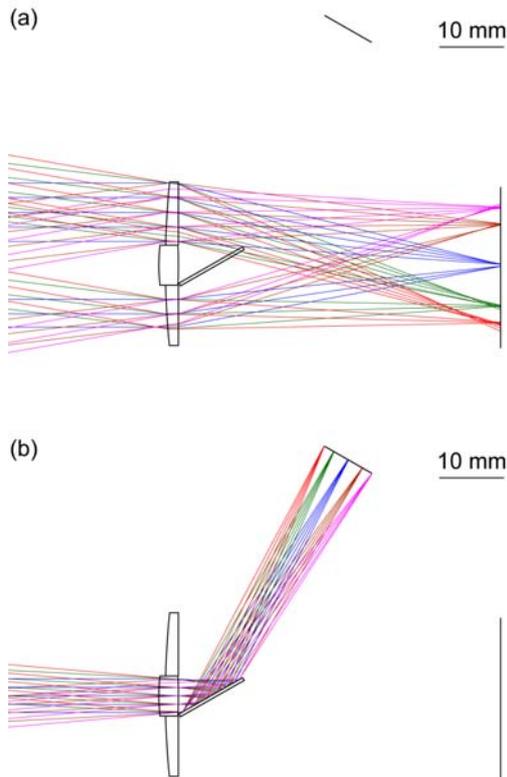


図4 光線追跡シミュレーションを用いた同軸光学系の設計。(a) 遠赤外光(波長  $10\ \mu\text{m}$ )。 (b) 可視光(波長  $633\ \text{nm}$ )。

#### 4. 研究成果

##### (1) 同軸光学系の設計

図1に示した同軸光学系を具体的に設計した。シリコンレンズは球面の平凸レンズとした。シリコンの屈折率が3.42であることから、曲率半径を126 mmにすることで、焦点距離が52 mmになるようにした(図3)。

ビームスプリッタにはシリコンウエハを用いた。表面を鏡面に研磨しておくことで、可視光を鏡のように反射する。ビームスプリッタは可視光を反射するものであるため、可視光の経路はカバーする必要がある。一方で、遠赤外光はビームスプリッタを通る必要はない。ビームスプリッタの大きさと位置は光学系全体の大きさを決める重要なパラメータである。以上の制約を考慮して、光学系を設計した(図4)。



図5 シリコン-ガラスハイブリッドレンズの写真。機械加工したシリコンレンズの中央の穴にガラスレンズをはめ込んだ。

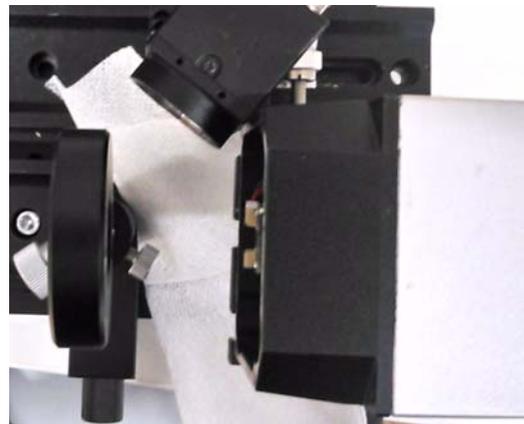


図6 試作した同軸光学系。

##### (2) 同軸光学系の試作・実験

シリコンレンズはシリコン単結晶を機械加工して作製したものである。その中央の穴にガラスレンズをはめ込んで接着剤で固定することでハイブリッドレンズを試作した(図5)。前述の設計のとおりビームスプリッタやイメージャを配置して同軸光学系を試作した(図6)。

同軸光学系の評価のために、遠赤外光と可視光の両方を発する光源を被写体とした撮像実験を行った。光源にはアイ・アール・システム社のIRS-001Cを用いた。光源はコイルと放物面ミラーからなり、遠赤外光から可視光までの平行光を発することができる。コイルには5 Vの電圧をかけて1.54 Aの電流を流した。光源の仕様によると、このときの温度は1200 Kとされている。

遠赤外光と可視光を同時に撮影した(図7)。遠赤外光の撮影範囲は可視光よりも大きい。これは、遠赤外光のイメージャのサイズが可視光のイメージャよりも大きいからである。光学系が同軸であるという特徴から、遠赤外光の画像をイメージャのサイズ比に合わせて切り取る(図(a)の点線部)だけで、二種の画像を重ね合わせることができる。画像におい

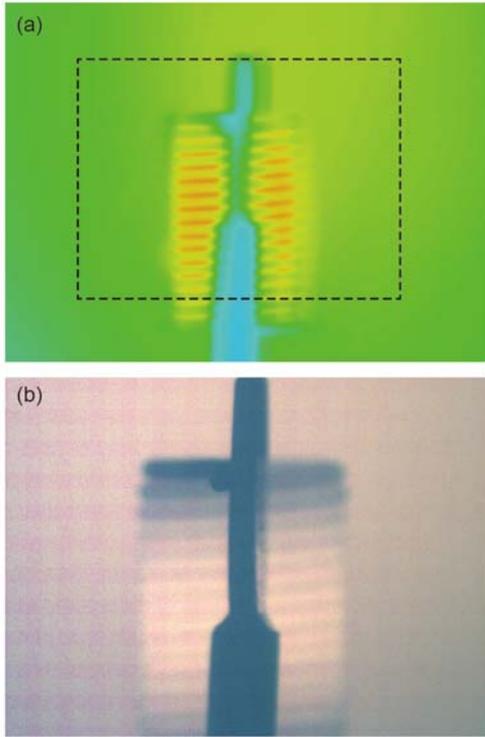


図 7 同軸光学系で撮影した画像の例。被写体は赤熱する熱型の光源。(a) 遠赤外光の画像。(b) 可視光の画像。

てコイルの周りが明るいのは、放物面ミラーによる平行光を撮影しているからである。

光源までの距離を変えて、それに伴い焦点のあうレンズの位置を計測したところ、レンズメーカーの式にあうことを確認した。

以上により、コンパクトな同軸光学系で、遠赤外光と可視光の二種の画像を得ることができた。また、光学系の基本的な機能としてレンズの位置によって焦点調節ができることを確認した。

### (3) MEMS ハイブリッドレンズ

機械加工によってシリコンレンズを作製するためには 1 枚ずつ時間をかけて切削や研磨などの工程を経なければならないため、同軸光学系の実用化に際して価格を下げられない要因となりかねない。そこで、一括作製でシリコンレンズを作製するために、MEMS シリコン三次元加工を応用することにした。すなわち、ハイブリッドレンズの周辺部はシリコンをフレネルレンズに三次元加工したものにして、遠赤外光を結像するために用いる。フレネルレンズの外形は一辺が 12 mm の正方形で、焦点距離が 10 mm になるように設計した。三次元加工により形状を球面に限らず設計できる利点を活かし、レンズの球面収差を抑えるために、曲率半径が中心部では 25 mm、周辺部では 35 mm とした。また、中央部は可視光用のガラスレンズを固定するための直径 5 mm の穴を開けた。同軸結像系の中心部には

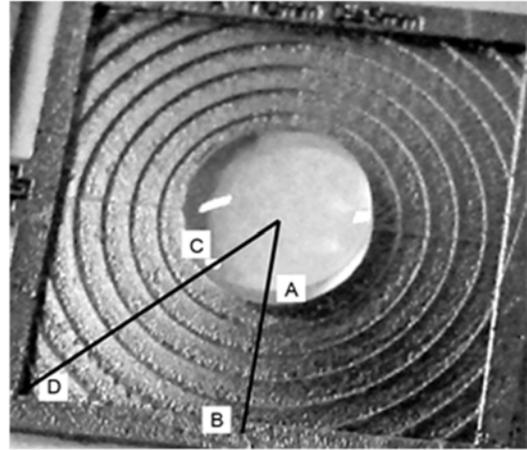


図 8 ハイブリッドレンズ (12mm 角) の写真。フレネルレンズの半径方向のピッチは 750  $\mu\text{m}$  である。

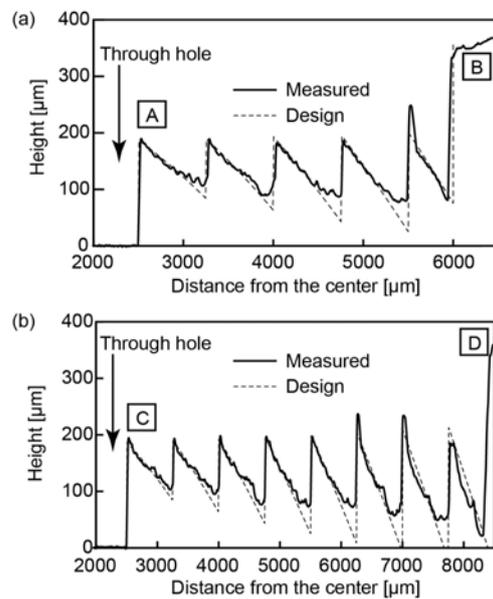


図 9 (a) 図 5 の A-B 方向および(b) C-D 方向のシリコンフレネルレンズのプロファイル。

市販のガラスレンズで直径が 5 mm、焦点距離が 10 mm ものを使用した。

シリコンレンズの作製プロセスは、既発表のシリコン三次元加工法を発展させたものである。主な変更点は、貫通穴を一体形成できるように最大エッチング深さを基板の厚さまで大きくしたことである。まず、フォトリソグラフィにより厚さ 100 nm のアルミ層をマスク開口の形状にパターニングした。次に、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング (ICP-RIE) により、シリコンを垂直にエッチングした。このとき、エッチング深さは長方形のマスク開口の面積とアスペクト比によって決まる。最後に、アルミのマスクを除去した後に  $\text{SF}_6$  ガスで ICP-RIE を行い、表面を滑らかにした。条件出しのための実験からフレネルレンズの作製に至るまで、マスクの幅は 2.5  $\mu\text{m}$  とした。本研究ではマスク開口の形状

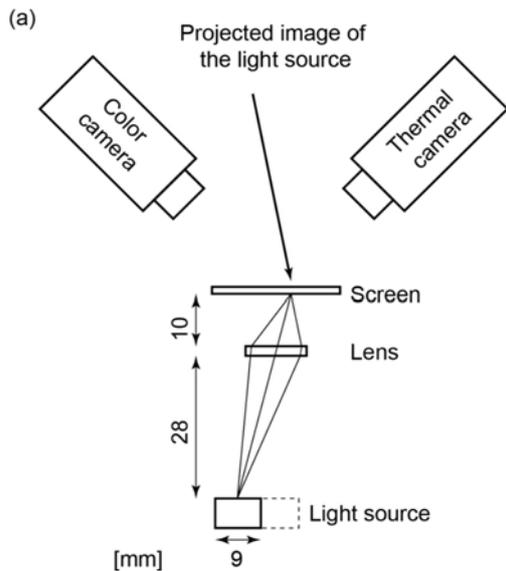


図 10 MEMS ハイブリッドレンズを用いた温度・色同時撮像実験のセットアップ。

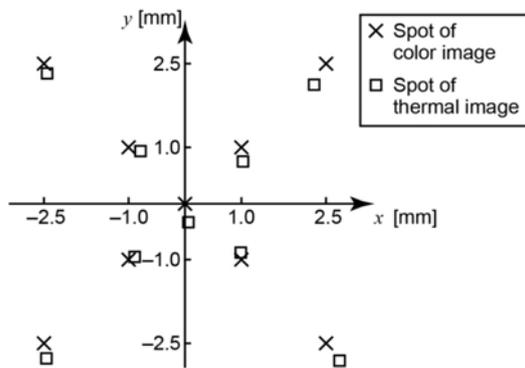


図 11 同時撮像実験の結果。

として長方形を採用した。長方形の面積およびアスペクト比とエッチング後の深さの関係をj知るための実験を行った。

フレネルレンズと中心部の穴を三次元加工で一括製作した(図8)。触診段差計を用いた形状計測で設計どおりに作製できたことを確認した(図9)。三次元形状の高低差は最大で180 μmであり、これまでの7.2倍を達成した。

温度画像と色画像を同時に結像できるかを確認するために、スクリーンに投影した像をスクリーンの裏から遠赤外光カメラと可視光カメラの二種類のカメラで観察するセットアップを構築した(図10)。光源にはZnSe窓を有するタングステン熱線式の光源を用いた。この光源は波長が0.6から20 μmの光を発する。光源の上方に紙のスクリーンを配置し、さらに上方に温度カメラ(Wuhan Guide Optical Electronic Co., Ltd, GUIDIR IR112)と色カメラ(Logicool, Qcam Orbit AF)を固定した。光源の位置は、色画像においてスクリーン上の像が(0, 0)、(1.0, 1.0)、(1.0, -1.0)、(-1.0, 1.0)、(-1.0, -1.0)、(2.5, 2.5)、(2.5, -2.5)、(-2.5, 2.5)、(-2.5, -2.5)となる位置とした。単位はmmであ

る。

スクリーン上に投影された像を、温度カメラと色カメラで撮影した。二つのカメラは向い合って配置したため、画像は互いに180°回転したものになった。

二種類のカメラで撮影した画像における像の位置を比較した(図11)。スクリーン上での像の位置ずれの最大値および平均値は、0.42 mmおよび0.26 mmであった。これを角度に換算すると、ずれの最大値および平均値は2.0°および1.2°となった。

#### (4) 研究成果の国内外における位置づけ

国内外における色と温度の画像を撮影できるシステムの研究では、色画像のカメラと温度画像のカメラを二台組み合わせた構成のものしか例がなく、本研究のようにレンズを一体としたものはない。レンズを一体とすることで光学系のサイズを小さくすることができるため、実用化に近づいたと考えられる。

一方で、画像処理の分野においては、温度カメラの価格が低下してきたことに伴って温度画像の利用が注目されている。このことは、研究代表者が本研究終了後の2015年3月に、精密工学会主催の動的画像処理実利用化ワークショップ(DIA2015)において「遠赤外線温度画像の特徴と応用」と題した招待講演をおこなったことから伺うことができる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] 高畑智之, 松本潔, 下山勲, “温度画像のための遠赤外線用フレネルレンズ,” 電気学会論文誌E, Vol. 133, No. 7, pp. 274–279, 2013. (査読有)

DOI : 10.1541/ieejsmas.133.274

〔学会発表〕(計3件)

[1] 高畑智之, 松本潔, 下山勲, “温度画像と色画像の同時取得のためのシリコン-ガラスハイブリッドレンズ,” 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, No. 5PM3-PSS-65, 仙台, 5–7 November, 2013. (査読有、優秀ポスター賞を受賞)

[2] Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, “A silicon-glass hybrid lens for simultaneous color-and-thermal imaging,” *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 1408–1411, Barcelona, Spain, 16–20 June, 2013. (査読有)

DOI : 10.1109/Transducers.2013.6627042

[3] 高畑智之, 松本潔, 下山勲, “温度画像のための遠赤外線用フレネルレンズ,” 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, No. 3F2-1, 北九州, 22–24 October, 2012. (査読有)

〔産業財産権〕

○取得状況（計1件）

名称：光学素子及び撮像装置

発明者：下山勲，松本潔，高畑智之，岩瀬英治，菅哲朗

権利者：東京大学

種類：特許

番号：第5445963号

出願年月日：2010年4月28日

取得年月日：2014年1月10日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/research/takahata/takahata3.html>

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。