

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04912

研究課題名（和文）光変調MEMSによる可視光と遠赤外光の同時計測

研究課題名（英文）Simultaneous measurement of visible and far infrared light with optical modulating MEMS

研究代表者

高畑 智之（Takahata, Tomoyuki）

東京大学・先端科学技術研究センター・特任准教授

研究者番号：80529652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,200,000円

研究成果の概要（和文）：可視光と遠赤外光（LWIR）の同時計測の原理検証に取り組み、可視光とLWIRの両方に感度を持つ検出素子であっても、可視光とLWIRを個別の周波数で変調するデュアル光変調によって、可視光とLWIRを独立して計測しうることを示した。また、ピエゾ抵抗素子の高周波における複素インピーダンスを考慮することでノイズレベルを低減して計測する方法を示した。さらに、可視光とLWIRの同時計測に必要な要素技術である可視画像とLWIR画像の同軸性の検証方法と、可視・LWIRキャリブレーションのための熱的にアクティブなキャリブレーションボードの設計を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトやモノの移動を支援するシステムとしてパーソナルモビリティや配送ロボットなどの自律移動ロボットの研究開発が盛んに行われており、その実用化のためには生活空間に多数存在するガラスを確実に検出できることが重要な課題となっている。これまでの研究により可視・LWIR同軸カメラによってガラスの検出が可能であることが示されてきた。本研究の成果は可視・LWIR同軸カメラを従来よりも格段に小型化して移動ロボットに容易に搭載することや、同軸性の保証や安定したキャリブレーションを提供することにつながるものであり、自律移動ロボットの安全性の向上に資すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We worked on the principle verification of simultaneous measurement of visible light and long wavelength infrared (LWIR) light, and showed that even a detector sensitive to both visible and LWIR light can measure them independently by dual optical modulation, in which visible and LWIR light are modulated at separate frequencies. We also showed how to reduce the noise level by taking into account the complex impedance of the piezoresistive device at high frequencies. Furthermore, as necessary elemental technologies for simultaneous visible and LWIR measurements, we showed how to verify the coaxiality of visible and LWIR images and a design of a thermally active calibration board for visible and LWIR calibration.

研究分野：機械情報学

キーワード：マイクロ・ナノデバイス 画像 長波長赤外 光変調器 キャリブレーション

1. 研究開始当初の背景

近年、ヒトやモノの移動を支援する移動ロボットの研究が盛んである。電動車椅子は基本的に搭乗者が操縦するものだが、ロボティクスを応用した歩行者や障害物との自律的衝突回避によって安全性能を向上できる。また、配送ロボットは自律移動によって荷物を指定された場所まで届けることが求められる。これらの用途には、周囲の環境認識の精度と確実性を高めることが重要である。環境認識には、可視画像に加えて、近赤外（short wavelength infrared, SWIR）光を使った距離画像の利用も盛んになっている。しかし、可視光や SWIR を利用する従来の方法では、その波長領域で透明なガラスなどを検知できないという課題があった。一方で、遠赤外（long wavelength infrared, LWIR）画像は、一般的には対象物の表面温度を画像化したものとして知られているが、実際には対象物の物性の情報も含んでいる。LWIR の波長は $10\ \mu\text{m}$ 程度で可視光の 10 倍以上であり、吸収率などの特性に大きな違いがある。そのため、可視画像と LWIR 画像では見え方が異なることが多い。例えば、可視光では透明であるガラスやプラスチックは、LWIR では吸収が大きく透明ではない。このことを利用して、可視画像と LWIR 画像の両方を用いることでガラスの検出ができるようになる。すなわち、従来の環境認識に用いられてきた可視画像に加えて LWIR 画像を利用することで、被写体の物性について質の異なる情報を取得することができ、認識性能を大きく向上させることができる。

距離画像に用いられる SWIR の波長は可視光に近いので、可視光と同じ光学材料を使ってコンパクトな光学系を構成することができる。一方で、LWIR は可視光とは波長が大きく異なるため、可視光と同じ光学材料は使えない。このことが可視光と LWIR を同時に計測することを困難にしている。従来の可視画像と LWIR 画像を融合して画像認識する研究では、個別のカメラを並べて撮影していた。この場合、2つのカメラの視点が違うために画像同士で対応する点が自明ではなく、2種類の画像を確実に位置合わせできなかった。

この課題を解決するために、これまでに可視光と LWIR を同一の光軸で結像するシリコン-ガラスハイブリッドレンズを考案、試作してきた。しかしながら、現状では可視光イメージャと LWIR イメージャは個別のものを使わざるを得ず、可視画像と LWIR 画像を同じ視点から撮影できるコンパクトな光学系を構成することはできていない。

2. 研究の目的

本研究の開始当初の目的は可視光と LWIR の両方を撮影できるイメージャを実現することであった。その方法として、入射光を2つの波長特性の異なる帯域除去型の光フィルタで順に変調し、1つの検出器で電気信号に変換し、それぞれの周波数で2つの信号として復調するシステムを提案した。これにより、従来の方法では不可能であった空間的にも時間的にも一致した可視光と LWIR の情報を得ることができるようになる。対象物の色画像と温度画像を同時に撮影することで、ガラス窓の認識など従来の環境認識の課題を解決することができ、自律移動モビリティロボットの安全性能の向上に資する。

3. 研究の方法

本研究ではまず(1)可視光と LWIR の同時計測の原理検証に取り組み、そこから派生した成果として(2)ピエゾ抵抗素子の高精度計測に取り組み、その後、イメージャの構成要素である帯域除去フィルタや変調器の設計を進めていたが、2020年度以降は新型コロナウイルスによる社会情勢の変化によって設計したフィルタ等の試作を行うことが困難な状況になった。そこで方針を大きく転換し、可視光と LWIR の同時計測に必要な要素技術である(3)可視画像と LWIR 画像の同軸性の検証方法、および(4)可視・LWIR のキャリブレーション方法の研究を実施した。以下にそれぞれの研究項目について述べる。

(1) 可視光と LWIR を空間上の同じ点で計測するための原理検証として、二種類の帯域除去フィルタを用いたデュアル光変調によって、単一の検出素子で可視光と LWIR の強度を独立に計測できることを示した。本研究で提案する計測方法の概念図を図1に示す。検出素子は可視光と LWIR の両方に感度を持つものである。光変調器1では入射する可視光を周波数 f_1 で変調し、光変調器2は LWIR を周波数 f_2 で変調する。検出素子の出力を周波数 f_1 で復調すると可視光に対応した出力が得られ、周波数 f_2 で復調すると LWIR に対応した出力が得られる。原理検証のための実験装置を試作した(図2)。光変調に用いた二種類のチョッパを図3に示す。可視光を除去するフィルタとして波長 $1.2\ \mu\text{m}$ 以下の光を透過しないシリコンウエハを用いて、LWIR を除去するフィルタとして波長 $2\ \mu\text{m}$ 以上の光を透過しないガラス板を用いた。変調周波数はそれぞれ $23\ \text{Hz}$ と $19\ \text{Hz}$ とした。検出素子として N 型半導体を用いて、その抵抗値変化を計測した。センサの出力をロックインアンプで復調して出力信号を得た。

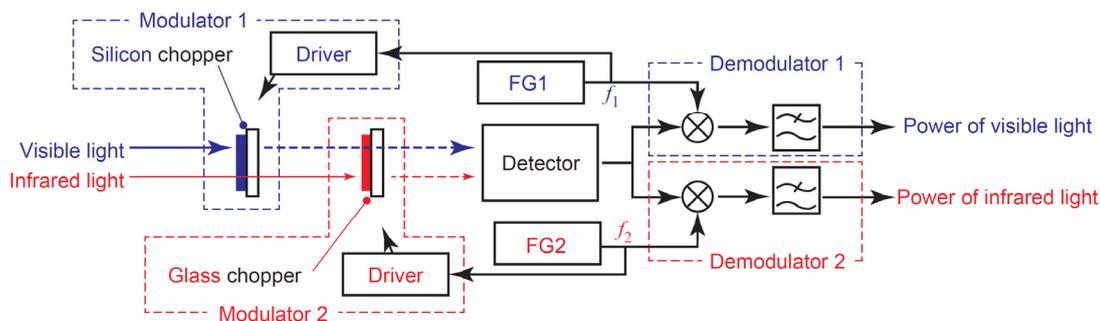


図1 デュアル光変調による可視光と LWIR の同時計測の概念図。

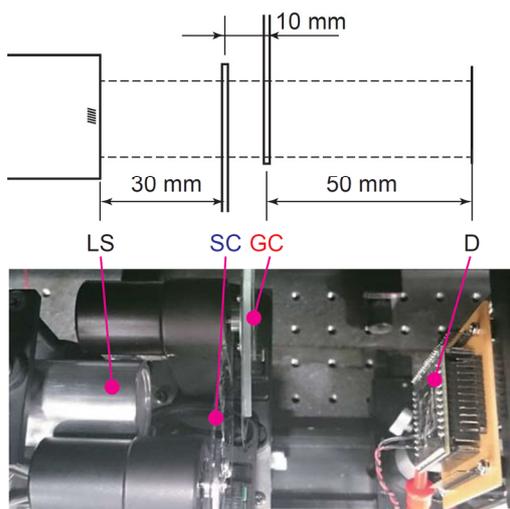


図2 原理検証のためのデュアル変調器。

LS: 光源、SC: シリコンチョッパ、GC: ガラスチョッパ、D: 検出素子。

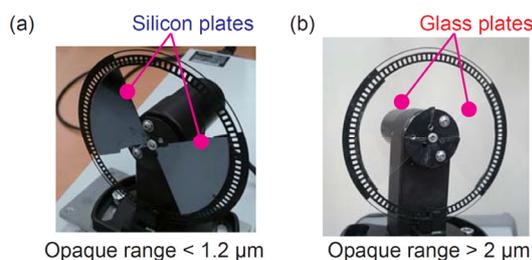


図3 (a)シリコンチョッパ、および (b)ガラスチョッパの写真。

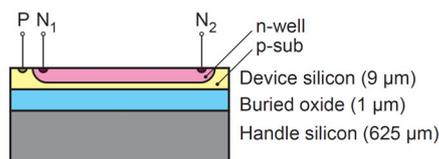


図4 使用した検出素子。

(2) ロックインアンプを使ったセンサ計測の知見を、様々な MEMS センサに利用されている piezo 抵抗素子の抵抗値測定の高精度化へと応用した。一般に、ノイズを低減して信号対雑音比 (S/N 比) を向上するために、ロックインアンプを用いて高周波の狭い帯域の信号のみを計測することが有効である。ロックインアンプによる piezo 抵抗の計測では、まず piezo 抵抗の抵抗値変化を電位差に変換するブリッジ回路に交流電圧をかけ、変調された 2 つの出力をロックインアンプに差動入力して、入力と同じ周波数で復調する。しかしながら、piezo 抵抗型センサは周波数が高い領域において理想的な抵抗器からのずれが大きくなり、インピーダンスが虚数成分をもつようになるため、ブリッジ回路を抵抗器で構成すると 2 つの出力に位相差が生じてしまい、ノイズ成分としてロックインアンプから出力されることが課題だった。そこで、本研究では、piezo 抵抗素子の複素インピーダンスを回路モデル (図5) で表現し、ブリッジのバランスをとることで、ノイズ成分を低減できることを実験により示した。

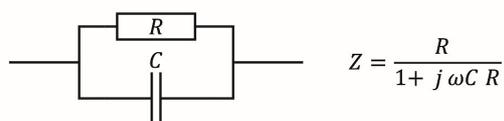


図5 piezo 抵抗の回路モデル。

(3) 同一視点から同一視野角で可視画像と LWIR 画像を撮像できるコンパクトな同軸カメラについて、光学系の同軸性を検証した。ハードウェアとソフトウェアの両方で画像の位置合わせをすることで、被写体までの距離によらず可視画像と LWIR 画像の重ね合わせができることを示した。対象とした同軸カメラは同心円状のシリコン-ガラスハイブリッドレンズを結像レンズとして用いたもので、このレンズにより可視光の像と LWIR の像をおおまかに同じ像面に結像することができる。レンズの後ろで波長分離ミラーにより像を分離し、それぞれ同じサイズの可視イメージャと LWIR イメージャで撮影することで、両方の画像の視野角を合わせた。同軸性の検証として、まず赤色から LWIR までの波長を放射する熱線式の光源を用いて、カメラから光源までの距離を 0.5 m、1 m、2 m の三種類とし、それぞれの距離においてカメラの画角内に光源を置いた画像を 9 枚ずつ撮影した。次に、光源の距離 1 m のときの画像を用いて、LWIR 画像を可視画像に重ね合わせるためのパラメータを推定した。

(4) 一般的な可視画像のキャリブレーションには黒白のパターンをもつボードが用いられる。これを発展させたものとして、従来の可視・LWIR 画像キャリブレーションでは色と放射率の両方が異なる塗料を使うものや、黒白の一方をあらかじめ冷やすまたは温める方法があったが、周辺環境の温度変化に影響を受ける等の課題があった。そこで本研究では、温度差を生じる仕組みを持たせた可視・LWIR キャリブレーションボードを設計した。

4. 研究成果

(1) 検出素子の N 型半導体の抵抗変化率を周波数 f_1 および f_2 で復調した結果を図 6 に示す。周波数 f_1 で復調した結果 (図 6 (a)) はシリコンチョップで変調された可視光に対応した計測値であり、周波数 f_2 で復調した結果 (図 6 (b)) はガラスチョップで変調された LWIR 対応した計測値であると考えられる。このことから、試作したデュアル光変調の計測方法によって、可視光と LWIR を独立して計測できる可能性が示された。図 6 (a) の赤点は光源に赤外線を通さないフィルタを取り付けたときの計測値である。フィルタの有無によらず同様の計測値が得られていることから、可視光のパワーに対応した計測値が得られたものと考えられる。一方で、図 6 (b) の緑点は光源に可視光を通さないフィルタを取り付けたときの計測値であり、計測値が 1×10^{-4} 程度変化した。この影響を低減するために、LWIR 波長域への感度を向上する必要があるが、これは素子の微細化によって基板との熱絶縁を改善することで可能であると考えられる。この成果は、可視光と LWIR の同時計測の基礎となるものである。

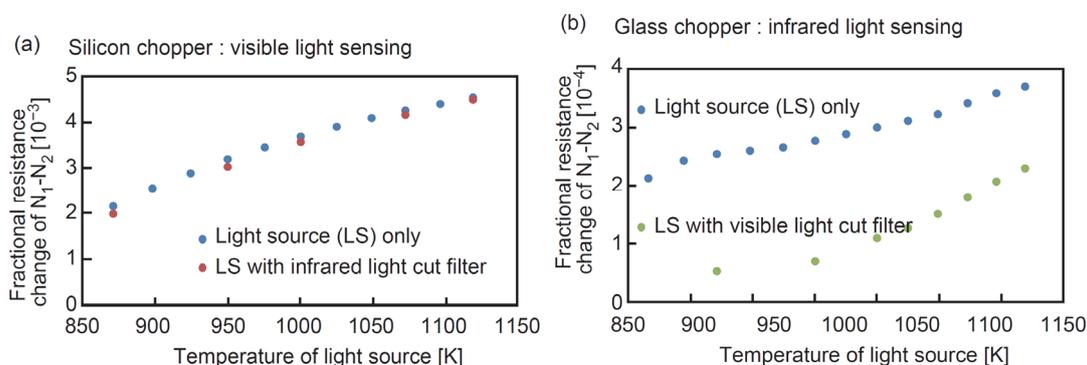


図 6 検出素子の出力。(a)周波数 f_1 、(b)周波数 f_2 でそれぞれ復調した結果。

(2) ピエゾ抵抗型センサの周波数特性を LCR メータで計測した結果を図 7 に示す。素子の複素インピーダンス Z は、周波数 10 kHz のときに $Z=997-5.27i \Omega$ 、周波数 100 kHz のときに $Z=995-46.3i \Omega$ であった。グラフに示されているように、数百 kHz の周波数においては純粋な抵抗素子のモデルから大きく乖離していくことを確認した。図 5 の回路モデルを用いて素子の定数を計算したところ、抵抗器の抵抗値 $R=998 \Omega$ であった。容量 C については、複素インピーダンスの位相を重視したとき $C=70 \text{ pF}$ 、複素インピーダンスの絶対値を重視したとき $C=50 \text{ pF}$ であった。計測した周波数の範囲においてインピーダンスの位相と絶対値の両方を合わせるためには、より素子数の多い回路モデルが必要になる。しかし本研究で目的とするロックインアンプを用いた計測においては、センサで計測したい信号の周波数の範囲が直流成分から f_0 までとし、変調周波数を f_m とすると、 $f_m \pm f_0$ の範囲の周波数の信号のみを計測できればよい。例えば $f_0=1 \text{ kHz}$ 、 $f_m=100 \text{ kHz}$ とすると、99 から 101 kHz の狭い範囲の信号を計測することに相当し、その範囲で複素インピーダンスを整合させることができれば十分である。この条件では前述のうち $C=70 \text{ pF}$ のモデルが適している。推定した回路モデルを用いてブリッジ回路を構成し、ロックインアンプで計測したところ、センサへの入力がないときの出力を 100 分の 1 未満にできることを示

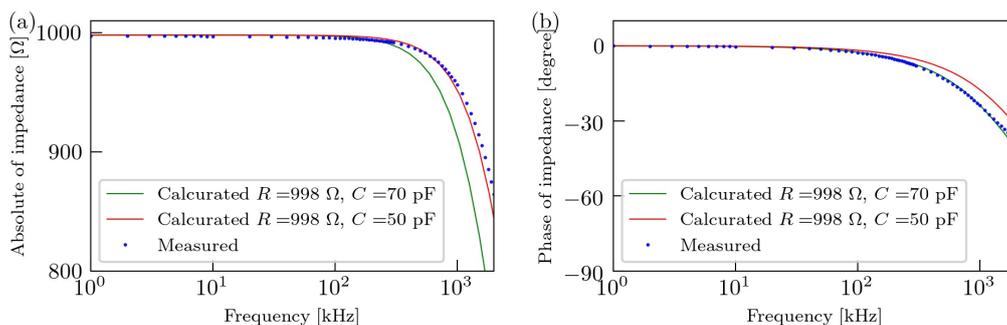


図 7 キャリブレーション後の可視画像 (青) および LWIR 画像 (赤) の像面上での光源の位置。カメラから光源までの距離が(a) 0.5 m、(b) 1 m、(c) 2 m のとき。

した。この成果は、本研究のように抵抗値変化を計測する用途に利用できるほか、ピエゾ抵抗効果が利用される圧力センサや触覚センサなど様々な用途に応用することができる。

(3) 同一視点から同一視野角で物体の可視画像と LWIR 画像の両方を撮像できるコンパクトな同軸カメラについて、光学系の同軸性を検証した。まず、ある光源が可視画像および LWIR 画像に作る像の座標をそれぞれのカメラの内部パラメータおよび外部パラメータを用いて表した (図 8)。光源を撮影した画像を用いてパラメータ推定をした結果、2つのカメラの内部パラメータおよび外部パラメータがおおむね一致していること、およびわずかなパラメータの差異は画像変換によって取り除けることを示した。カメラから 1 m の距離に置いた光源の可視・LWIR 画像ペアを利用して推定したパラメータを用いて、別の距離の光源の LWIR 画像も対応する可視画像に重ねられることを示した。本研究では可視光と LWIR でレンズが共通でイメージャが異なる構成の同軸カメラを用いたが、この同軸性の評価方法は他のタイプのカメラにも適用できるものである。

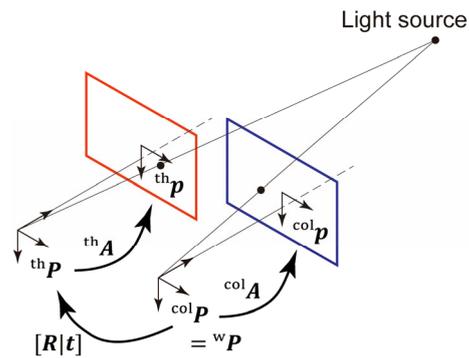


図 8 可視画像 (青) と LWIR 画像 (赤) の幾何学的関係。ずれを強調して図示した。

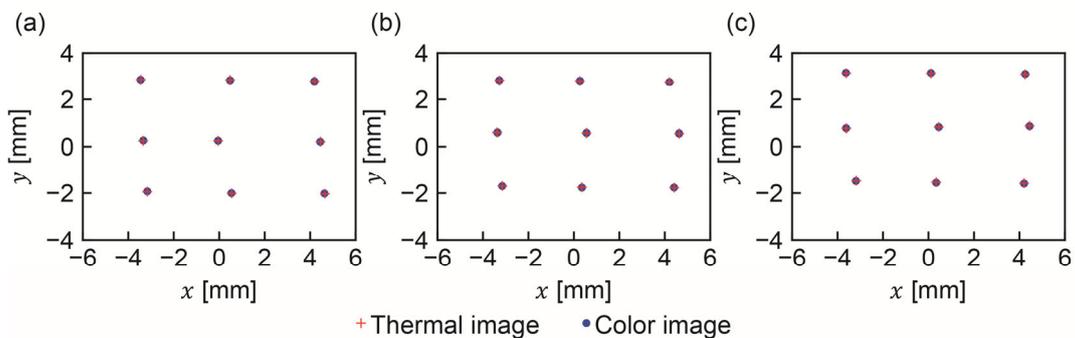


図 9 キャリブレーション後の可視画像 (青) および LWIR 画像 (赤) の像面上での光源の位置。カメラから光源までの距離が(a) 0.5 m、(b) 1 m、(c) 2 m のとき。

(4) 設計した可視・LWIR キャリブレーションボードを図に示す。黒色と白色の 2 層のアルミ板からなり、2 枚のアルミ板でペルチェ素子を挟むことで金属板にアクティブに温度差を生じさせることができる構成となっている。これにより、環境温度によらず安定して LWIR 画像のキャリブレーションを行うことができる。また、2 層のそれぞれを白と黒に塗り分けているため、可視画像に対するキャリブレーションを行うことができる。ペルチェ素子によって温度差が生じると同時に消費電力が熱に変換されるため、長時間の動作時にキャリブレーションボード全体が加熱されてしまう。これを解決するために、ボードの背面には冷却ファンを設けている。このキャリブレーションボードによって可視・LWIR 同軸カメラのキャリブレーションをより安定して行うことができるようになり、同軸カメラの実用化に寄与すると考えられる。

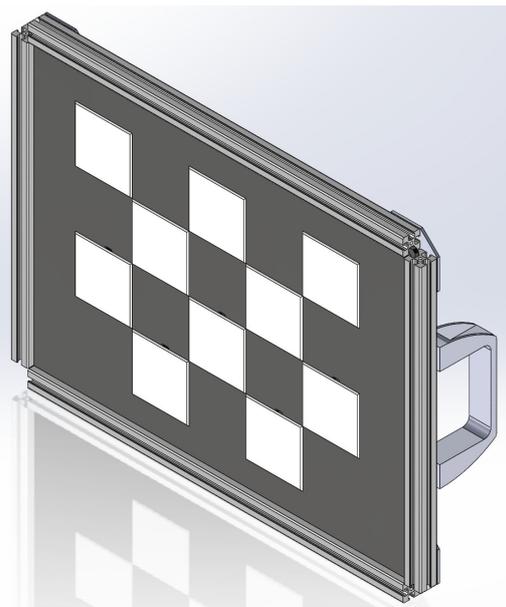


図 x 設計したキャリブレーションボード。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomoyuki Takahata	4. 巻 -
2. 論文標題 Coaxiality Evaluation of Coaxial Imaging System with Concentric Silicon-Glass Hybrid Lens for Thermal and Color Imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MDPI Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20205753	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高畑智之、下山勲
2. 発表標題 ピエゾ抵抗型センサの複素インピーダンスを考慮した計測下限の低減
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

coaxial imaging of color and thermal images https://t-tkht.github.io/takahata3.html
--

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------