

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04158

研究課題名(和文) シア干渉計による非定常三次元屈折率分布計測システム

研究課題名(英文) Three-dimensional refractive index measurement system using shear interferometer

研究代表者

富岡 智 (Tomioka, Satoshi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：40237110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：屈折率の三次元分布を非接触に計測するために、複数の方向から測定対象による波面の遅れをシア干渉計により計測した干渉画像から算出し、これらをコンピュータトモグラフィーにより三次元再構成する方法を採用した。シア干渉計は、一般的な測定対象と通過する物体光と通過しない参照光を干渉させる二光束と比べ、入射方向を変えても干渉条件が崩れにくく、さらに、入射方向変更時の振動の影響を受けにくいことを実証した。また、ろうソク火炎近傍気体の屈折率三次元分布計測を行い、定性的に妥当な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気体の密度(温度)や液体の濃度等は屈折率に依存するため、屈折率の三次元分布の計測ができれば、間接的にこれらの量の三次元分布を計測できる。従来の三次元屈折率分布を計測する手法としては、物体光と参照光を用いた二光束干渉計とコンピュータトモグラフィーの利用が数少ない例であった。その理由は二光束干渉計では、複数方向からの干渉計測が容易でなかったためと考えられるが、本研究で採用したシア干渉計は、方向を変更した場合でも、干渉条件を常に満たし、かつ、振動の影響を受けないため測定体系の構築が容易になる。今後、多くの測定対象の三次元計測に期待できる。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the three-dimensional refractive index distribution, a coupling method of interferometer and computed tomography can be used. As the interferometer to measure delay of wavefront due to object from different incident angles, we adopted a shearing interferometer, which always satisfies interference condition during changing incident angle since the shearing interferometer does not use a reference wave. We demonstrated that interferograms obtained with the shearing interferometer are not affected by vibration caused by changing of the incident direction. In addition, we measured the three-dimensional distribution of the refractive index of the gas near the candle flame, and the reconstructed result was qualitative agreed.

研究分野：計算科学

キーワード：屈折率分布 三次元非接触計測 シア干渉計 コンピュータトモグラフィー 位相計測

1. 研究開始当初の背景

屈折率は媒質の電子密度に関連するため、屈折率の三次元分布が解れば、プラズマの電子密度分布、気体の密度(温度)分布、溶液の濃度分布などを間接的に求めることができる。気体の温度分布の計測はバーナー火炎の燃焼効率の向上等への応用に期待できる。また、近年、大気圧プラズマの生体への応用も研究されはじめており、電子、イオン、あるいは、励起種の三次元密度分布計測手法の開発が待たれている。溶液中の濃度分布が計測できれば、溶液中の対流現象の解明や、電気化学における化学反応の状態を調べるためにも有用となるであろう。プラズマ、気体、液体等が測定対象の場合には、センサーを挿入することにより内部の対流等の状態が変わらないような非接触計測手法が必要であるが、これを実現できる測定方法はほとんどなかった。

三次元の非接触計測としては、X線を用いたコンピュータトモグラフィ(CT)が、医学診断において非侵襲三次元診断として、工学分野でも固体のサンプルに対する非破壊三次元計測として既に産業応用されている。X線CTでは、測定対象をカバーする太さのX線ビームを複数方向から入射して得られるそれぞれの方向についての透過画像(レントゲン写真)を基に、計算機により内部の三次元分布を計測する。

X線は測定対象を通過する際に途中で吸収係数の線積分に応じて減衰を受ける。つまりCTでは、複数方向からの未知の吸収係数分布の線積分された画像を既知量として計測し、それを計算機により処理し吸収係数分布を再構成している。屈折率分布の三次元計測においても、屈折率の線積分が計測できれば、内部の屈折率の三次元分布をX線CTと同様のアルゴリズムにより再構成が可能である。

屈折率の線積分画像を取得する方法として干渉計の利用が知られている。一般的な干渉計は測定対象をカバーできる範囲に広げたレーザ光を二つに分け一方を測定対象を通る物体光、他方を通らない参照光とし再び重ね合わせ干渉させれば、物体光と参照光の位相差すなわち屈折率の線積分の差の情報を含む干渉縞画像を取得できる。三次元屈折率計測のためには、測定対象への入射方向を変える、あるいは、測定対象を回転させれば良いが、測定対象が気体の場合には入射方向を変えざるを得ない。我々の以前の研究において、干渉計を構成する4つのミラーの位置移動と反射面の回転が可能な入射方向可変干渉計を構築し、火災近傍気体の屈折率分布の計測を通して温度分布を計測に成功している。

しかし、この体系には大きな二つの難点が存在していた。一つ目は、アライメントの調整が難しい点である。これは、あらゆる入射方向の場合でも干渉縞が得られるように物体光と参照光がほぼ平行となるように光軸調整がなされる必要があり、そのためには多大な時間と労力が必要であった。二つ目は、ミラーの振動の問題である。ミラー移動と回転の際に各ミラーが独立に振動するため、干渉縞が激しく動いてしまい、それが収まるまでの数秒間は、干渉画像を取得できない。CTでの再構成のためには百方向程度の干渉画像を取得する必要があり、すべての方向からの干渉画像を取得するには数百秒の測定時間が必要となり、その間測定対象の状態が変わらないことが要請された。これを避ける方法の一つとして、干渉縞計測時間(カメラの撮影時間)を短くする方法もあるが、その場合は、画像が暗くなるためカメラの増幅率を上げる必要があり信号対雑音比が小さくなってしまい、ノイズな干渉画像となり、データ処理が困難となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、従来の物体光と参照光を用いた干渉計で問題となった振動の影響を受けにくい一光束のシア干渉計を採用する。シア干渉計では、参照光は用いず、測定対象を通過後の物体光を、物体光自身と、光軸に対して平行移動させた物体光のシフト光に分け、それらを干渉させる。物体光の分離には、光軸に対して傾けて配置した有限厚さの平板ガラス基板の表面反射と裏面反射を用いる。この体系では、光源から出た光は、入射方向を変えるための入射側可動ミラー、測定対象、透過光を元の方向に戻すための可動ミラー、物体光を分離するためのガラス基板を経由して、カメラにて撮影される。この内、二つの可動ミラーは振動の影響を受けるが、物体光の方向が若干変わるのみで、ガラス基板の表面と裏面に反射される元の物体光とシフト光は同一位相で振動するので、二つの光の位相差は振動の影響を受けないため、入射方向を変えるためのミラーの移動を高速で行うことができるはずである。その実証がハード面の目的である。

また、シア干渉計により得られた干渉縞画像に含まれる情報は、一般的な二光束干渉計での干渉縞画像のものとは異なる。二光束干渉計の干渉縞画像では、物体光と参照光の位相差の余弦関数となっている。位相差を求めるためには、逆余弦関数を用いれば良いがこれは多対一に写像される多価関数になるため、主値(0~2)しか求められないため、2 毎の不連続性

が発生し、それを取り除くために位相アンラッピング処理が必要となる。シア干渉計でも同様の処理により、位相差を算出できる。しかし得られた位相差は物体光自身とそのシフト光の位相差であるため、それから物体光の位相を求めるための処理の追加が必要となる。このアルゴリズムの開発も目的である。

3. 研究の方法

ハードウェアの評価のために、図1のようなシア干渉計を実際に構築し、干渉縞の振動の影響を確かめた。

得られたシア干渉縞に対して、従来の干渉縞解析に位相差を求めるアルゴリズムに加え、位相差から物体光の位相（屈折率の光路に沿った線積分）を求める手法を新たに開発した。広く用いられている位相差を求めるアルゴリズムも、背景干渉縞の空間周波数の検出、背景干渉縞の除去、位相差主値、連続な位相差への位相アンラッピングの複数の手順が必要であるが、図1のシア干渉計では、シフト光を作るための平板ガラス基板（FM3）の裏面反射光が表面で再び基板内に戻る多重反射が大きな誤差を含むことが解ったため、これを除去する手法も採用した。また、深層学習を用いて干渉縞画像から位相差画像を直接求める方法の開発も行った。また、位相アンラッピングアルゴリズムについても新たな手法を提案した。これらのシア干渉計から得られた結果は二光束干渉計と同時に取得できるシステムを構築しそれらの比較を行った。

図1の体系では、一般的なCTに必要な全周方向からの、投影画像（位相画像）が得られない。それを緩和するために、図1の水平方向のビームを加え、上記の方法により各入射方向の位相画像を取得した。

三次元の屈折率分布を再構成には、入射角度に欠測域が存在する場合でも誤差が小さな重み付きCTを採用した。

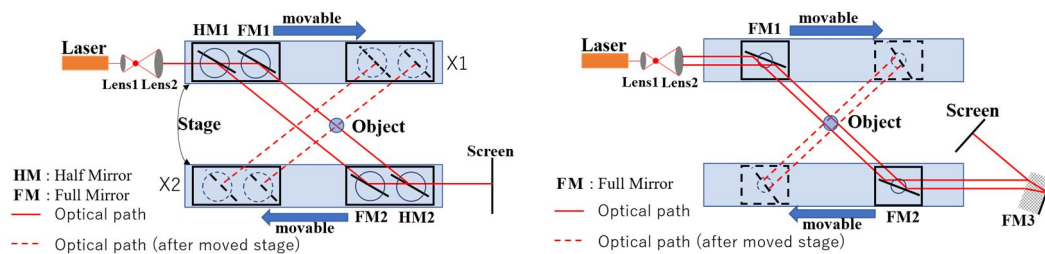


図1：入射方向可変干渉体系の比較（左：従来の二光束干渉計、右：シア干渉計）

4. 研究成果

前述の方法により得られた結果の一例を示す。

図2に従来型の二光束干渉計とシア干渉計により得られた干渉縞の入射方向変更にもとまる振動の影響を示す。二光束干渉計では、ほぼ同じ入射角度であるにもかかわらず背景干渉縞のパターンが大きく異なり、特に左の二つの干渉縞画像は背景干渉縞の周期が小さく、これから位相差を求めることは困難である。それに対して、シア干渉計の結果では、背景干渉縞の間隔はほとんど変わらずまた、その周期を十分に求めることができることが判る。

干渉縞画像から算出した物体光の位相の誤差を評価するために、測定対象としてろうそく火炎を選び、入射方向を固定して、二光束干渉計とシア干渉計で同一時刻の同一測定条件で計測できるような干渉計を改造した。図3にそれらの物体光の位相画像の算出結果を示す。光学系は移動させていないため、手順の少ない二光束干渉計の結果が最も正しい結果であるが、多重反射の除去処理をしない場合、火炎部近傍（ $h=100$ pixel 付近）の屈折率が極大となる部分で、波打つ様子が見られる。それに対して、多重反射除去処理をした場合はこの波打ちは低減されている。ただし、火炎部の上端で不自然な盛り上がりがあり、これを改善するために別のアルゴリズムも検討した。現時点では、次元解析の結果のみが得られており、その結果の公表を準備している。

なお、深層学習については、学習データに屈折率分布を仮定しシミュレーションにより求めた二光束干渉計の数千のパターンの干渉縞を用いて訓練したニューラルネットワークによりその性能を比較した。その結果、干渉縞の一部が密になっているようなパターンでも解析できることが判った（論文発表済）。しかし、シア干渉計の多重反射の効果をシミュレーションに組み込むことは難しくシア干渉計の干渉縞画像の解析への応用は、多重反射を起こさないようなハード面での改善をしない限り難しそうである。

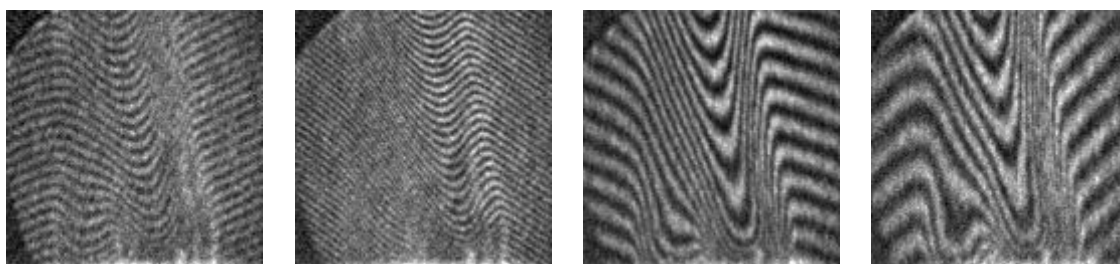
また、詳細な結果は省略するが、不連続な主値位相画像から連続位相に変換するための位相アンラッピングアルゴリズムにおいて干渉縞画像が隣接点での位相変化が大きい場合には、簡単なアルゴリズムでは位相の計算ができない。これを解決するために偏微分方程式からポテン

シャル勾配を直接求める方法を提案し、さらにその高精度化を図った（論文発表済 2 件、投稿中 1 件）。

図 4 には、複数方向からの位相画像を入力として重み付き CT により再構成した三次元屈折率分布を示す。火炎中心から離れたところに局所的な屈折率の低下部が見られるが、単一炎の分布としては、概ね正しい結果が得られている。局所的な低下部の原因は位相アンラッピングの問題と位相差から物体光の位相の算出による誤差が原因と考えられる。

成果をまとめると、屈折率の三次元分布を計測するための干渉計と CT の併用において、入射方向を変える際の干渉縞画像に対する振動の除去には、シア干渉計は効果的であることを実証できた。ただし、定量的な屈折率の三次元再構成のためには、得られた干渉縞画像の処理に、まだ改善の余地があることも判った。研究の背景で述べたように三次元屈折率分布計測手法はほとんどないが、これは振動の問題のみならず、入射方向を変えた際にも干渉条件を満足するようにアライメント調整が困難なためである。今回の研究により、シア干渉計はアライメントの制約からも解放され、かつ、振動の影響を受けないことも示すことができたので、位相算出の問題が解決すれば、気体の密度（温度）分布以外の溶液の濃度分布やプラズマの密度分布等の計測に応用が広がるものと予想される。

(a) 二光束干渉計



(b) シア干渉計

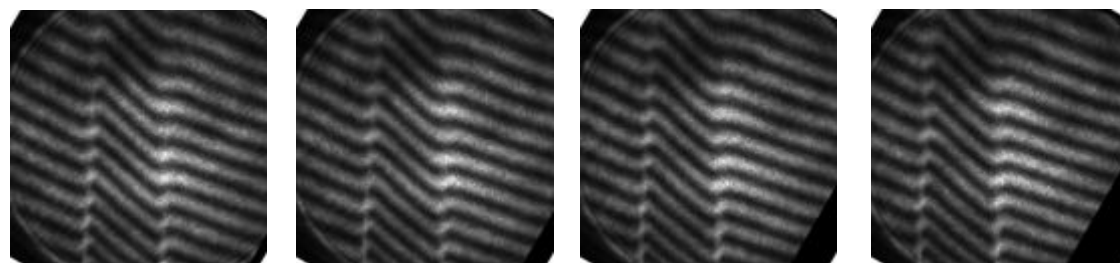


図 2 入射方向変更中の干渉縞画像（それぞれの画像間の撮影時刻差は約 0.2 秒、入射角差は約 1 度）

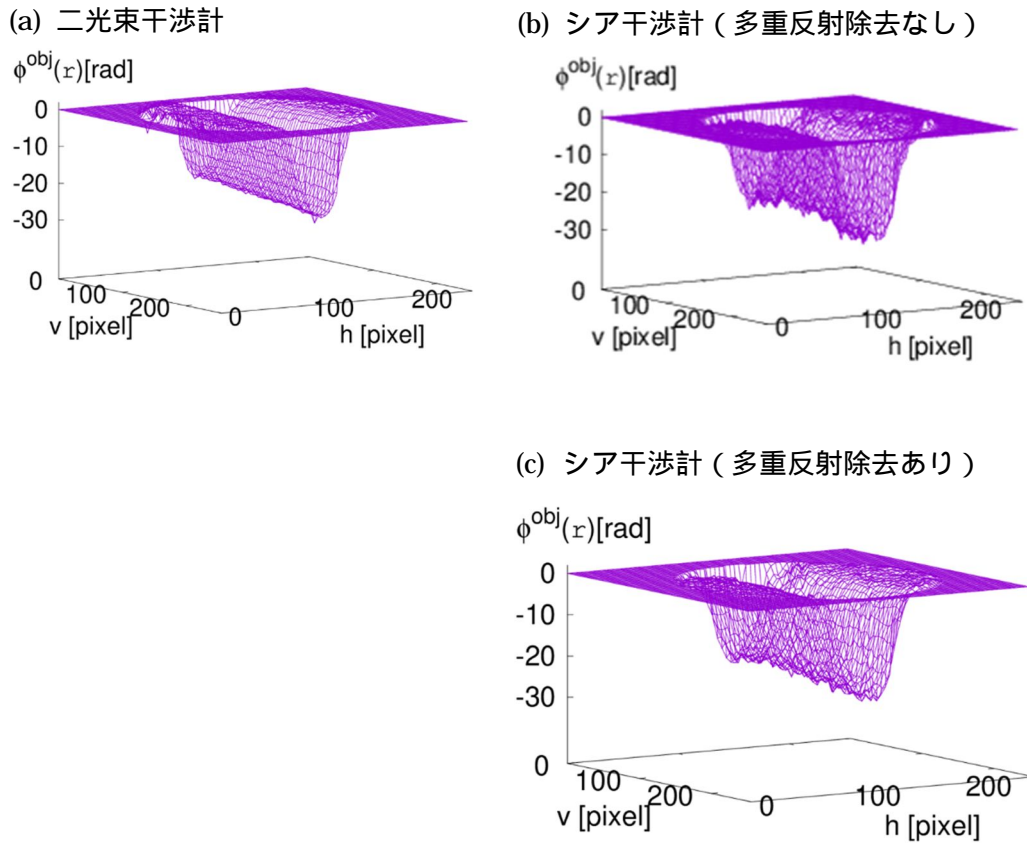


図3 物体光の位相画像の比較

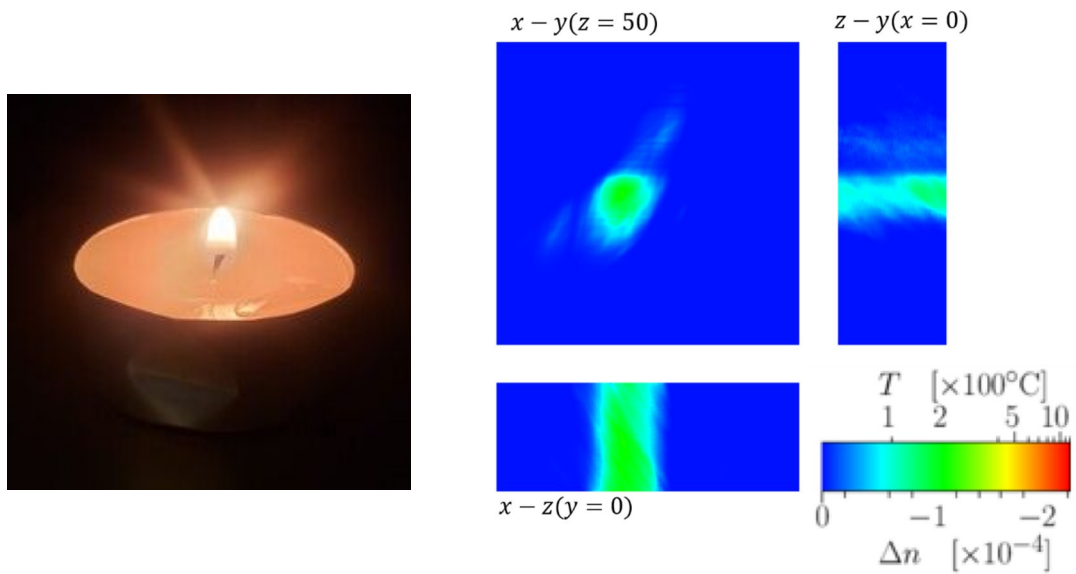


図4 ろうそく火炎近傍の三次元屈折率分布計測結果
(左：測定対象、右：屈折率分布)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kando Daichi, Tomioka Satoshi, Miyamoto Naoki, Ueda Ryosuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Phase Extraction from Single Interferogram Including Closed-Fringe Using Deep Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3529 ~ 3529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9173529	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 -

1. 著者名 Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, Yutaka Matsumoto, Naoki Miyamoto	4. 巻 106
2. 論文標題 Desingularization of matrix equations employing hypersingular integrals in boundary element methods using double nodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Analysis with Boundary Elements	6. 最初と最後の頁 493 ~ 504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enganabound.2019.06.003	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 -

1. 著者名 Arata Hirokami, Samia Heshmat, Satoshi Tomioka	4. 巻 (印刷中)
2. 論文標題 Accurate Numerical Method to Solve Flux Distribution of Poisson's Equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematics and Computers in Simulation	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) なし	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 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 貫洞 大地, 柳瀬 佳亮, 富岡 智, 宮本 直樹, 上田 亮介, Samia Heshmat
2. 発表標題 三次元屈折率計測用位相抽出における実測データによる畳み込みニューラルネットワークの学習
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sinnji Motoi, Satoshi Tomioka, Kikuo Umegaki, Naoki Miyamoto
2. 発表標題 Time-dependent weighted reconstruction method with insufficient projection data for mobile target
3. 学会等名 第115回日本医学物理学学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 広上新, 富岡智
2. 発表標題 二次元ポアソン方程式のフラックスの高精度数値解析法
3. 学会等名 電磁界理論研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Miyamoto, Naoki Matsumoto, Ryusuke Suzuki, Seishin Takao, Taeko Matsuura, Takaaki Fujii, Shusuke Hirayama, Satoshi Tomioka, Shinichi Shimizu, Kikuo Umegaki, Hiroki Shirato
2. 発表標題 Real-time volumetric image generation with CT image deformation driven by displacement of internal fiducial markers
3. 学会等名 2018 AAPM Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Arata Hirokami, Satoshi Tomioka
2. 発表標題 Direct Flux Method to Solve Flux Distribution of Two-dimensional Poisson's Equation
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daichi Kando, Satoshi Tomioka
2. 発表標題 Phase extraction from interferogram using machine learning
3. 学会等名 2019 IS&T International Symposium on Electronic Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富岡 智
2. 発表標題 屈折率の三次元分布計測法
3. 学会等名 先進電磁波イメージング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Risa Hayashi, Naoki Miyamoto, Kouhei Yokokawa, Seishin Takao, Koichi Miyazaki, Kikuo Umegaki
2. 発表標題 Real time volumetric image generation based on CT image deformation driven by displacement of internal fiducial markers
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Miyamoto
2. 発表標題 Real time adaptive radiotherapy with internal fiducial markers and real time imaging technique
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第33回学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	宮本 直樹 (Miyamoto Naoki) (00552879)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	西山 修輔 (Nishiyama Shusuke) (30333628)	日本医療大学・保健医療学部・教授 (30127)	
研究分担者	松本 裕 (Matsumoto Yutaka) (40360929)	北海道大学・工学研究院・助教 (10101)	

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		
エジプト	Aswan University		