

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04915

研究課題名（和文）非定常熱流体解析に基づいた熱感知型センサーの多種物理量の同時測定化の研究

研究課題名（英文）Study of heat sensor for simultaneously measuring multiple physical quantities by computational analysis of unsteady heat-fluid flows

研究代表者

大上 芳文 (Ogami, Yoshifumi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30203722

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）：センサーに与えられた様々な運動（加速度運動、回転運動など）によって、センサー内の気体（空気など）の温度分布が変化する。その温度変化を測定することで、与えられた加速度や回転速度などの異なる物理量を同時に測定する運動センサーの測定原理、方法などを、コンピューターによるさまざまなシミュレーションによって明らかにした。シミュレーションには簡易的な円筒状の形状のものと、より詳細な形状を模したものの2種類を用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

例えばxyz方向の加速度を測定するセンサーは、x軸方向のみに加速される場合は、y軸やz軸の加速度が検出されることは望ましくないと考えられている（他軸感度と呼ばれる）。しかし、本研究では他軸感度を積極的に利用することで、測定領域の大幅な増加や、加速度だけではなく回転速度や回転中心の座標を同時に測定することが可能であることを示した。このような研究は国内外でも見られず、その学術的意義は大きいと言える。また、センサーはできるだけ小さく、部品数も少ない方が望ましい。本研究で得られた結果を利用すれば、そのようなセンサーの作成は可能であり、社会的意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：The temperature distribution of the gas (e.g., air) in the sensor varies when an acceleration is added to the sensor and/or the sensor is rotated. The values of the acceleration and the rotation speed can be simultaneously obtained by measuring the temperature. In this research, the principle of the simultaneous measurement of the multiple physical quantities and the method for this are studied by computational simulations using a simple circular cylindrical sensor model and a realistic model with complicated structure.

研究分野：流体力学

キーワード：熱検知型運動センサー 多種物理量の同時測定 回転速度 直進加速度 温度変化 3次元逆関数グラフ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

極小の集積回路や機械装置の作成が可能となる MEMS 技術の発達により、温度センサーや加速度センサーなどの様々な用途の超小型センサーが実用化されている。さらなる小型化や多機能化を可能とする一手法は、一つのセンサーで複数の物理量を同時に測定することであるが、そのような研究は見当たらない。そのために、独創性、新規性のある研究として、多種物理量の同時測定化の原理や手法の研究を行うこととした。

2. 研究の目的

熱検知型加速度センサーを改良し、加速度だけではなく角速度、角加速度、自転の中心座標などの物理量を同時に測定する装置として実用化するための原理・手法を明らかにする。そのためにコンピューターを用いた一連の熱流体解析によってデータ解析を行い、多種物理量の同時測定が可能となる運動センサーの基本アルゴリズムの作成とデータの蓄積を行なう。

3. 研究の方法

コンピューター解析に用いるモデルは、複雑な構造を再現した詳細モデルと、より計算時間が短縮でき多くの状態が再現できる簡単な円筒形の簡易モデルの二種類を用いる。これらのモデルに直進加速度、角速度、回転中心座標などの値を様々に組み合わせて与え、モデル内の温度変化を数カ所で測定する。その出力値を解析することで、モデルに与えられた直進加速度、角速度、回転中心座標を逆算することが可能かどうかを確かめる。それが可能となる各物理量の大きさの範囲が、多種物理量の同時測定ができる運動センサーの測定可能範囲と決定できる。

4. 研究成果

**4-1 詳細モデルの解析** 図1~3に詳細モデルの説明図を示す。図1は熱を発生させる4つのヒーター（赤色の円弧の部分）と8つの温度センサー（橙色の円弧の部分）を示す。図2はコンピューター解析の領域を示しており、図1の部品は Heater と書かれた箇所に設置される。図3は詳細モデルの各部寸法を示しており  $L=1\text{mm}$  である。X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2 は温度センサーの位置を示す（■印。Z3, Z4 は略）。ヒーターは赤で示している。また、総メッシュ数は約 67 万であり、ひとつの解析に数日から数週間かかる。

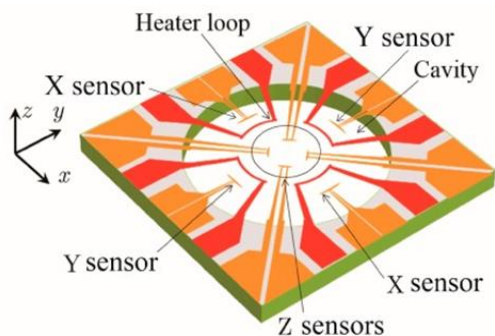


図1 運動センサー内のヒーター（赤）と温度センサー（橙）

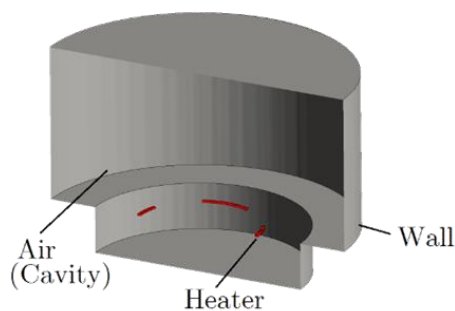


図2 解析領域の鉛直断面図

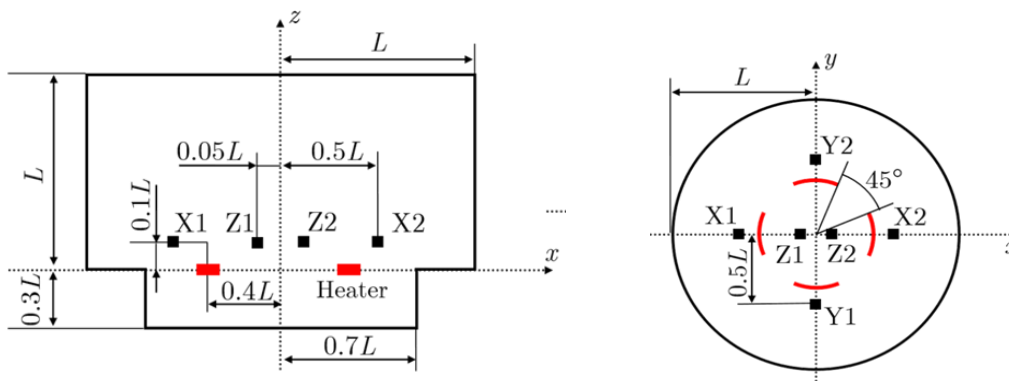


図3 運動センサーの各部寸法 ( $L=1\text{mm}$ )

**4-1-1 角速度を与えた場合** 一例として図4に詳細モデルを x 軸, y 軸周りに同時にそれぞれ 0rad/s から 1000rad/s まで回転させ, X1 センサーで得られた温度変化の周期 T と振幅 A を 3次元グラフで示す. これらには二つの異なる物理量の情報が混在していることになる. これらのデータを逆解析し, X1 センサーで得られた温度変化の周期 T と振幅 A から逆算した回転速度  $\omega_x$  と  $\omega_y$  を図5に示す. このデータを運動センサーの基本ソフトに組み込めば, 同時に2軸回転を行う場合のそれぞれの回転速度を計測することが出来る.

ここで重要なことは図5において, ある一組の T と A に対応する回転速度  $\omega_x$  または  $\omega_y$  が一意に決まらなければならないことである (図5には一意でない箇所が存在する). 新たな知見として, この条件はどの温度センサーの出力値を用いるのかで決まることが明らかとなった. それをまとめると  $\omega_x$  のみ,  $\omega_y$  のみを測定する場合や  $\omega_x$  と  $\omega_y$  を同時に測定する場合は温度センサーZ1 を用いれば一意のデータが得られること. さらに,  $\omega_y$  のみ,  $\omega_y$  と  $\omega_z$  を同時に測定する場合は温度センサーX1 を用い,  $\omega_x$  のみ,  $\omega_x$  と  $\omega_z$  を同時に測定する場合は温度センサーY1 を用いなければならないことが明らかとなった.

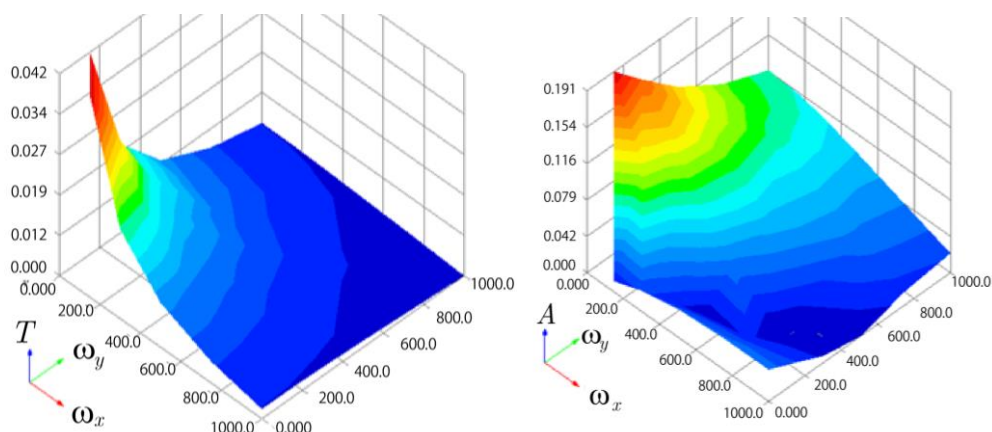


図4 詳細モデルを x 軸と y 軸周りに回転させたとき X1 センサーで得られた周期 T と振幅 A

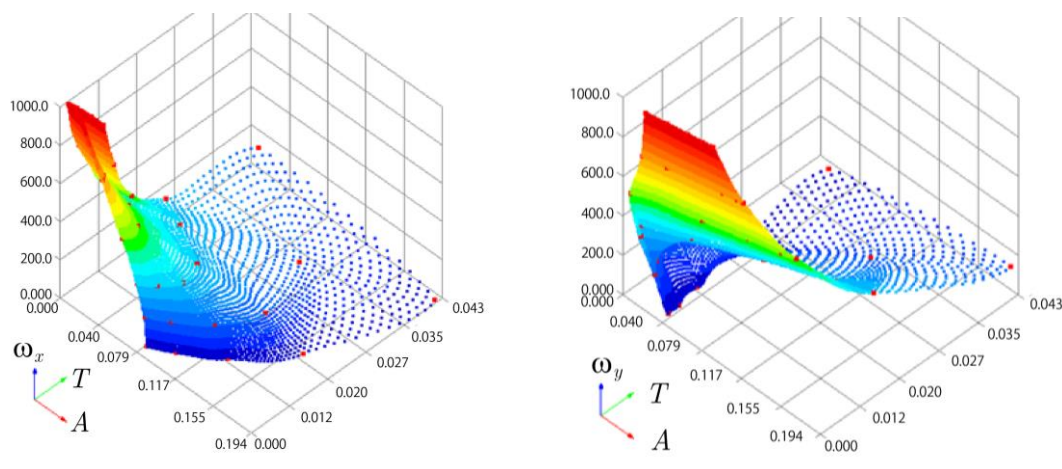


図5 図4の周期 T と振幅 A から逆算した回転速度  $\omega_x$  と  $\omega_y$

**4-1-2 直進加速度と角速度を与えた場合** 次に詳細モデルに直進加速度と角速度を同時に与えた場合の結果を示す. 一例として図6に詳細モデルを x 軸方向に 10g から 150g で加速し, 同時に z 軸周りに 0rad/s から 1000rad/s まで回転させ, X1 センサーで得られた温度変化の周期 T と振幅 A を 3次元グラフで示す. また, 図7には図6のデータを逆解析した結果を示す. この解析では全ての領域で1対1の対応が見られた.

**4-2 簡易モデルの解析** 前節の詳細モデルの総メッシュ数は約 67 万と大きいため, 1 ケースの計算に数日から数週間程度かかることがある. これは現象が非定常なため, 定常解に収束するのに時間がかかるためである. これでは限られた運動の組み合わせしか扱えず, 物理量の種類が限られてしまう. これを解消するためにより簡易なモデルを導入する.

図8(左)には簡易モデルのメッシュ構造を示す. 半径 1cm, 高さ 1cm の計算領域であり, メッシュ総数は約 7 万である. ヒーターやセンサーはその形状をメッシュ内に再生するのではなく, それらが存在する座標のメッシュの番号でプログラミングすることとした. 図8(右)はヒーター

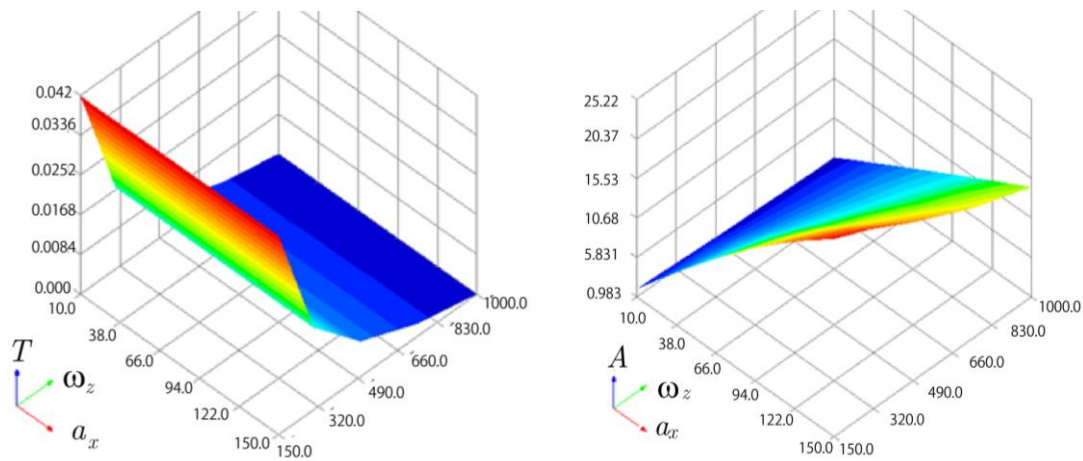


図6 詳細モデルをx軸方向に加速，y軸周りに回転させたときX1センサーで得られる周期Tと振幅A

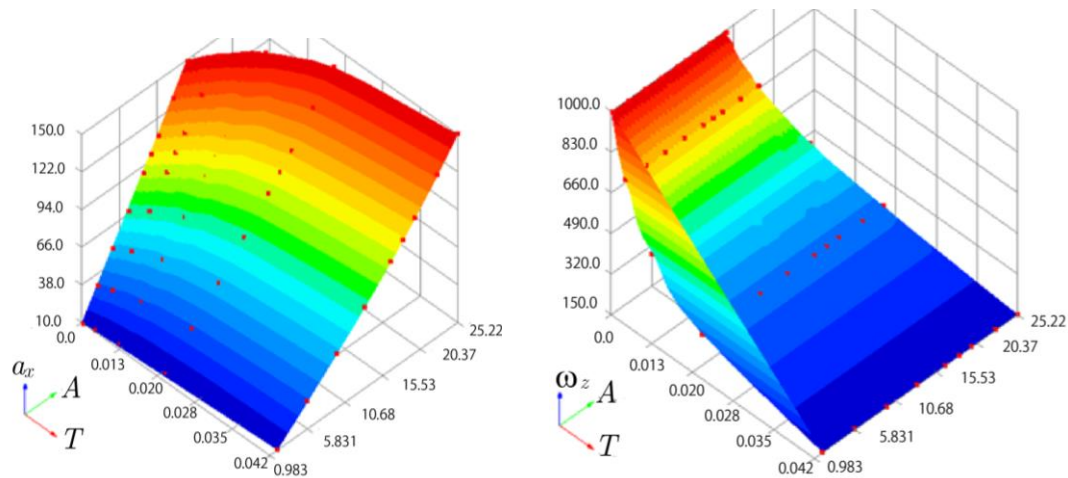


図7 図6の周期Tと振幅Aから逆算した加速度axと回転速度ωz

の位置（赤丸）とセンサーの位置（黒丸）を示す。

コンピューター解析では詳細モデルと同様に，加速度や回転速度を与えたが，その結果は詳細モデルと重複するためここでは割愛する．詳細モデルでは回転軸は必ずモデルの中心を通していたが，ここでは詳細モデルでは扱われなかった例として回転軸がモデルの中心から外れた場合を示す．すなわち，回転軸の座標が異種物理量の一つとなる．

図9に示すように，簡易モデルはx軸上の黒点（ $x=0, -0.01, -0.02, -0.04$  m）を中心に $\omega=0, 0.1, 1, 10, 40$  rad/sの回転速度で公転する．すなわち，公転の中心座標と回転速度が測定すべき物理量となる．ヒーターは0.1Wの熱を発生し，簡易モデルの運動によって温度変化が生じ，センサーS1とS2でその変化 $\Delta T_{S1}$ と $\Delta T_{S2}$ を測定する．この測定データをもとに，公転速度 $\omega$ とその中心座標xという全く種類の異なる物理量が逆算できることを示すのが図10である．

**4-3 まとめ** コンピューター解析によって，加速度だけではなく角速度，公転の中心座標などの異種の物理量の混在する膨大な測定データを収集した．このデータを逆解析することによって，異種の物理量の同時計測が可能となる運動センサーの基本ソフトのデータを蓄積することが出来た．また，新たな知見として運動形態と逆解析の解が1対1対応するための条件も明らかにすることができた．

このような研究は国内外でも例がなく，センサーの設計開発の分野では獨創性，新規性のある研究であり，センサーのより一層の小型化，多機能化に寄与するものである．

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計6件）

- ① 伊達 駿斗，浅田 啓幸，大上 芳文，熱検知型3軸加速度センサーの熱流体解析，日本機械学会 関西支部第95期定時総会講演会，2020
- ② 小澤 風馬，浅田 啓幸，大上 芳文，3軸型流体式ジャイロスコープを用いた多種物理量の測定原理の解明，日本機械学会 関西支部第95期定時総会講演会，2020
- ③ 清水 綾人，小澤風馬，浅田啓幸，大上芳文，3軸型流体式ジャイロスコープを用いた多種物理量の測定と実機開発，日本機械学会 関西学生会 2019年度学生員卒業研究発表講演会，2020

- ④ 小澤 風馬, 浅田 啓幸, 大上 芳文, 3 軸型流体式ジャイロスコープの数値解析, 日本機械学会 関西支部第 94 期定時総会講演会, 2019
- ⑤ 伊達駿斗, 浅田啓幸, 大上芳文, 熱感知型 3 軸加速度センサーの熱流体解析, 日本機械学会 関西学生会 2018 年度学生員卒業研究発表講演会, 2019
- ⑥ Yoshifumi Ogami (Invited), Computational Experiments on the Step and Frequency Responses of a Three-Axis Thermal Accelerometer, and Application to Measurement of Multiple Physical Quantities, 7th Global Nanotechnology Congress and Expo, 2019

[図書] (計 1 件)

- ① Yoshifumi Ogami 他, Computational Experiments on the Step and Frequency Responses of a Three-Axis Thermal Accelerometer. In: Xin-Wei Yao, Editor. Prime Archives in Sensors. Hyderabad, India: Vide Leaf. 2020, 1-26

## 6. 研究組織

浅田 啓幸, 立命館大学・理工学部・助教, 00822800

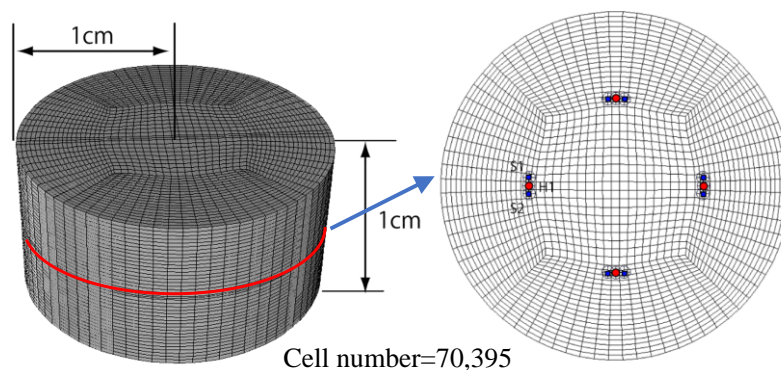


図 8 簡易モデルのメッシュ構造とその水平断面図

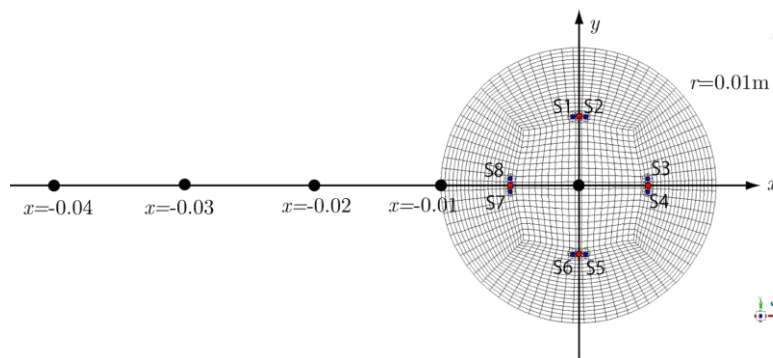


図 9 簡易モデルは x 軸上の黒点を中心に公転する

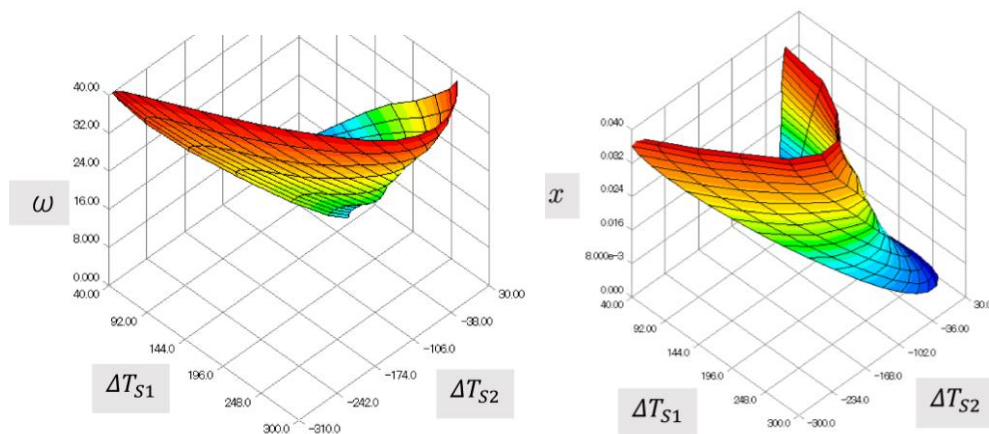


図 10 温度センサー S1 と S2 で測定された温度変化  $\Delta T_{S1}$  と  $\Delta T_{S2}$  から公転速度  $\omega$  と公転中心  $x$  が決定できる

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoshifumi Ogami
2. 発表標題 Computational Experiments on the Step and Frequency Responses of a Three-Axis Thermal Accelerometer, and Application to Measurement of Multiple Physical Quantities
3. 学会等名 7th Global Nanotechnology Congress and Expo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤 風馬, 浅田啓幸, 大上芳文
2. 発表標題 3軸型流体式ジャイロスコープを用いた多種物理量の測定原理の解明
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第95期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 綾人, 小澤 風馬, 浅田啓幸, 大上芳文
2. 発表標題 3軸型流体式ジャイロスコープを用いた多種物理量の測定と実機開発
3. 学会等名 2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊達 駿斗, 浅田啓幸, 大上芳文
2. 発表標題 熱検知型3軸加速度センサーの熱流体解析
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第95期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤 風馬, 浅田 啓幸, 大上芳文
2. 発表標題 3軸型流体式ジャイロスコープの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第94期定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊達 駿斗, 浅田 啓幸, 大上芳文
2. 発表標題 熱感知型3軸加速度センサーの熱流体解析
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2018年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yoshifumi Ogami, Naoya Murakita and Koji Fukudome	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Vide Leaf	5. 総ページ数 26
3. 書名 Computational Experiments on the Step and Frequency Responses of a Three-Axis Thermal Accelerometer. In: Xin-Wei Yao, Editor. Prime Archives in Sensors	

〔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	浅田 啓幸  (ASADA HIROYUKI)  (00822800)	立命館大学・理工学部・助教   (34315)	

6. 研究組織（つづき）

	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	吉岡 修哉  (YOSHIOKA SHUUYA)  (80375146)	立命館大学・理工学部・准教授    (34315)	

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