

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03903

研究課題名(和文)熱歩行機構の動作性能改善に関する研究

研究課題名(英文)Performance improvement of thermally-driven walking mechanisms

研究代表者

山本 晃生 (Yamamoto, Akio)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40313035

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)：バイメタルの熱自励振動を活用することで環境の熱エネルギーのみで動作できる熱歩行機構に関して、その性能向上や新機構の開発に取り組んだ。二足歩行機構については、既存の機構に関して傾斜面での性能調査を行い、スロープの登坂が可能であることを確認し、その条件を明らかにした。また、従来機構とは異なる足裏形状を提案・実験し、歩行時の歩幅を大幅に増大することに成功した。一方、二足歩行よりも効率的な移動の実現をめざし、新たに車輪型の自走機構を提案した。提案機構は熱歩行機構同様に、バイメタルを用いて環境の熱エネルギーのみで動作する。試作した二輪機構では、自重と同程度の荷重を運搬することが可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究がターゲットとした熱歩行機構や、新たに提案した熱車輪機構は、環境の熱エネルギー、より具体的には高温の地面からの熱だけを用いて動作する新しいタイプの機構である。将来的には、既存の電動ロボットと巧みに組み合わせることで、夏の屋外など地面が高温となる環境において、低消費エネルギーの動作を実現することが期待される。あるいは、日中のみ自動的に動作するバッテリーレスの巡回ロボットなどとしての利用も可能である。本技術は、環境エネルギーを回収・再利用するエナジーハーベスティング技術の一種とみなすこともでき、エナジーハーベスティングの新しい提案している点において学術的意義も見いだせる。

研究成果の概要(英文)：The thermal bipedal walker reported in a previous work can walk using thermally-excited vibration of a bimetal sheet. It only needs environmental heat energy for walking. This project aimed at improving the thermal bipedal walker, as well as developing new thermally-driven locomotion mechanisms. For the bipedal walker, this work investigated its performance on inclined surfaces, and confirmed that it can climb up a slope in a certain condition. This work proposed a new feet shape for the walking mechanism to improve the gait, which realized much larger walking stride than the previous thermal walkers. This work also proposed a wheel-type mechanism to realize more efficient movement than bipedal walking. The proposed wheel-type mechanism also uses bimetal sheets and can propel only with thermal energy from the environment. A two-wheeled prototype could carry a load that is equivalent to its own weight.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：エナジーハーベスト 二足歩行 車輪機構 受動歩行 熱エネルギー バイメタル 自励振動

## 1. 研究開始当初の背景

二足歩行ロボットの歩行動作は、ロボット関節に設置された電動モータを用いて実現することが一般的である。しかし、そうした既存の歩行ロボットは必ずしも移動の効率に優れず、バッテリー容量により動作持続可能な時間にも制約を受ける。一方、人などの生体の動作に目を向けると、ロボットと比べて効率的な歩行が実現されていることがわかる。例えば、坂道を下る場合に既存の歩行ロボットは水平面の歩行時とほぼ同様にエネルギーを消費するのに対し、人は坂道の持つ特性、すなわち、坂道という環境に内包された重力エネルギーを巧みに利用することで、少ないエネルギーで歩行できる。これまでのロボット研究の中でも同様の歩行動作を実現する研究がなされており、それらは受動歩行機構として知られている。受動歩行機構は、センサもモータもコントローラも機構内に有しておらず、機構自体の巧みな特性によって重力エネルギーのみを利用して坂道を下る。そうした受動歩行機構の仕組みや構成については、McGeer らの研究[1]を皮切りにこれまで多く研究がなされてきた。将来的には、受動歩行の仕組みを既存のロボットに巧みに取り入れることで、ロボットの歩行に必要なエネルギーを低減することが期待できる。

しかし、一般の受動歩行機構は重力エネルギーを利用するため、下り坂以外を歩行することは難しい。これに対し本研究代表者は、床面(地面)の熱エネルギーを利用して二足歩行可能な熱歩行機構を提案した(図1)[2]。現状のプロトタイプ機構は床面に極めて高い温度(外気との温度差100度程度)を必要とするが、歩行は床面の熱エネルギーのみで実現されており水平面上でも歩行が可能である。この機構は一種の受動歩行機構であり、通常受動歩行機構と同様、センサもモータも有していない。その歩行動作は、環境熱によるバイメタルシートの自励振動[3]と、機構そのものが持つ特性のみによって実現されている。具体的には、機構の足底面にバイメタルシート(熱膨張率の異なる2枚の金属板を貼り合わせたもの)が貼り付けられており、このバイメタルシートが高温の床面と接することで局所変形し自励振動を発生する。それに伴う機構の揺動を利用して歩行動作が実現される。

この機構は、環境に偏在する熱エネルギーを活用して動作することから、将来的には従来のバッテリー動作の電動ロボットと巧みに組み合わせることで、特に屋外における歩行時の消費エネルギー低減に役立つ可能性がある。あるいは、地面が高温となる夏の日中などに自動的に動作を行うバッテリーレスの巡回ロボットとしての活用も期待できる。また、本機構は環境の熱エネルギーを運動として再利用するものであり、エナジーハーベストの新形態の一つとしても興味深い。

## 2. 研究の目的

環境エネルギーを活用した新しい移動機構である熱歩行機構は、既存ロボットと組み合わせることでの消費エネルギー低減や、環境エネルギー活用の新手法として期待が持てるが、まだ提案されたばかりであり、その特性はほとんど明らかとなっていない。これまでの報告では、水平面上での歩行が報告されているだけであり、その歩容は一步あたりの歩幅が短く歩行速度も遅い。将来的な応用に向けては、この機構の特性をより多くの条件下で明らかにするとともに、その特性を改善していくことが重要である。そこで本研究においては、①既存の熱歩行機構の動作特性を明らかにすること、②動作特性を改善する新機構等を検討すること、を研究の主な目的とした。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の4つのアプローチで研究を行った。

(1)【斜面での歩行性能検証】これまで上記の熱歩行機構は水平面上でのみ歩行実験が行われてきた。しかし、現実の歩行環境は水平面であるとは限らず、将来的な応用を考えると斜面上での歩行性能を検証することが重要である。また、機構の特性をより良く理解するうえでも、斜面上での歩行特性を明らかにすることは不可欠である。そこで、傾斜した平面において歩行実験を行い、その特性を検証した。

(2)【新しい足裏形状の検討】従来の熱歩行機構は、バイメタルシートの熱自励振動により機構を横揺れさせて歩行を行っていた。振動が歩行と直交する方向に励振されているため、脚の振り出しには直接的には寄与せず、結果として達成される歩容は一般の二足歩行と比べて歩幅が短い。歩幅を増大するためには、歩行方向に向けて熱自励振動を励振することが良いと考えられる。機体の振動の方向は足裏形状によって定まることから、歩幅増大に向けて振動方向の異なる複数の足裏形状を検討した。

(3)【バイメタル自励振動の解析】熱歩行機構は、バイメタルシートの熱自励振動と、機構設計の2つの要素で歩行を実現している。よって、その設計や性能向上のためには、機構特性や形状の理解だけでなく、バイメタル自励振動の挙動そのものについて、より良く理解することが必要である。そこで、バイメタル自励振動のシミュレーションモデルを作成し、その特性を検討した。

(4) 【車輪型自走機構の提案】 バイメタル熱自励振動の移動機構への活用方法は、二足歩行だけでは限らない。移動性能や搬送性能の向上を狙うのであれば、二足歩行よりも車輪による移動の方が効率的と考えられる。これまでに、バイメタルの熱自励振動を連続的な回転運動へと拡張できることが明らかとなっているが[4]、それを移動機構の車輪として活用する検討は全くなされてこなかった。具体的には、既存のバイメタル回転動作はバイメタルシートを丸めた中空構造のリングで示されているだけであり、移動機構への応用に不可欠な車軸の設置方法が明らかとなっていない。そこで、中空リングへの車軸設置方法を検討し、バイメタルの熱自励振動を活用した車輪型移動機構の実現を検討した。

#### 4. 研究成果

上記の各項目に対する具体的成果を以下に報告する。

##### (1) 【斜面での歩行性能検証】

図1に従来の熱歩行機構の一例を、図2に歩行原理を示す。円筒形状の足裏にはバイメタルシートが貼り付けられており、高温熱源上に置くと、バイメタルシートの局所的な熱変形により機構は横方向に傾くように自励振動する。この自励振動によって機体が横方向に交互に傾き、それにより脚が交互に持ち上がる。それぞれの脚は踵に重りが設置されていることから、脚が持ち上がると重力により脚が前方に振り出され歩行が実現される。

この機構では、歩行動作が機構の姿勢と脚の重心位置に影響されるため、床面が傾斜した場合には歩行性能が変化する。そこで、歩行方向（上り斜面/下り斜面）と、それに直交する横方向（右斜面/左斜面）に傾斜を持たせた面上で歩行性能を計測した。ここでは、前後傾斜面で歩幅を計測した結果について図3に示す。各曲線は、脚重心が、それぞれ踵側に表記の角度だけずれるよう錘を設置した場合の歩幅である。前後の傾斜に対しては、傾斜角度に対しておおよそ直線的な関係で歩幅が変化すること、重心を踵側にずらすほど下り斜面の歩行が困難になることがわかる。上り斜面では、多くの場合に機構が後退してしまっているが、一部の条件では斜面を登坂できることが確認された。しかし、そうした条件では、下り斜面での歩行性能が落ちており、上りと下りでは最適な重心位置が異なることが明らかとなった。



図1 熱歩行機構  
(高さ約17cm)

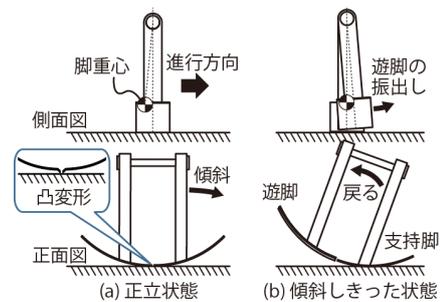


図2 熱歩行機構の動作

##### (2) 【新しい足裏形状の検討】

従来の熱歩行機構は、機構を横から見た場合に足裏が直線形状となっている。そのため、脚の振り出し時に踵部分が地面に干渉し、歩幅を大きくとることが難しい。そもそも歩行のエネルギー源である熱による振動を、歩行と直接関係しない横揺れに用いているという点も、歩行の効率化の観点からは望ましくない。床面温度を上げて熱自励振動の振幅を増大しても、歩幅の増大には一切つながらない。

そこで、歩幅を広げることと、バイメタルの自励振動をより直接的に歩行に活用することを目指して、図4左のいわゆるコンパス型の機構を検討した。この機構は、足底面が進行方向に向かって円弧を描いており、機体の前後方向に傾斜するよう自励振動する。これにより中央脚と、(一つに接続された)左右脚が交互に振り出す。実験機では着地点に置き石をおいた水平面上で短距離の歩行を実現した。しかし、実験機は膝関節を持たないことから歩行には置き石が必須であり、その調整の難しさから限られた歩数(2歩)しか確認できなかった。通常の受動歩行機構では膝関節を設けて置き石を不要とする例は多くあるが、コンパス型熱歩行

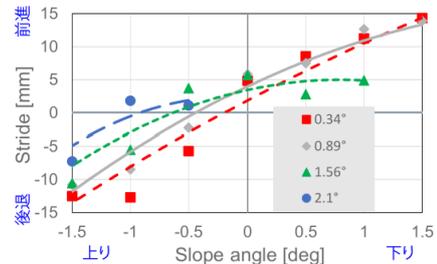


図3 前後傾斜面での歩幅  
(第2象限が斜面を登坂)



図4 二種の歩行機構

機構では、歩行開始前に熱自励振動を徐々に成長させていく必要があり、設置と同時に坂道を下り始める受動歩行機構とは、歩き始めの状況が大きく異なる。そのため、受動歩行機構同様の膝関節を設けることは容易ではなく、コンパス型の活用は困難であることが明らかとなった。

上記の結果をふまえて、振動を斜め方向に発生させる機構として、図4右に示す機構を考案した。この機構では、従来、主に円筒面としてきた足底形状を、ラグビーボールのような（おおよその）楕円球面形状の一部とした。横方向断面の曲率が、前後方向断面の曲率よりも大きい（半径が小さい）ことから、自励振動は、まず振動しやすい横方向に励振される。機体の腰部分には重心が前方に傾くように錘がとりつけてあり、機体が横に傾斜するにしたがって前方への傾斜が加わる。結果として機体は斜め方向に傾き脚が大きく振り出される。足裏が前後方向にも曲面を描いているため、踵が地面と干渉することなく歩幅が増大できる。

実験の結果、従来よりも広い歩幅での歩行が確認できた（図5）。実現された歩幅は脚長の22%であり、10%以下であった従来の機構と比べ大幅な改善を達成した。一方、従来の円筒面の足裏形状と比較して楕円球面型は機体が転倒しやすく、重心位置の微調整や、実験者の手技による初期バランスの調整が必要であった。しかし、これら一連の結果は、足裏形状の設計次第で熱歩行機構が様々な歩容を実現可能であることを示しており、今後、足裏面の幾何学的形状を数理的に解析していくことで安定かつ高性能な歩行が実現できる可能性が明らかとなった。

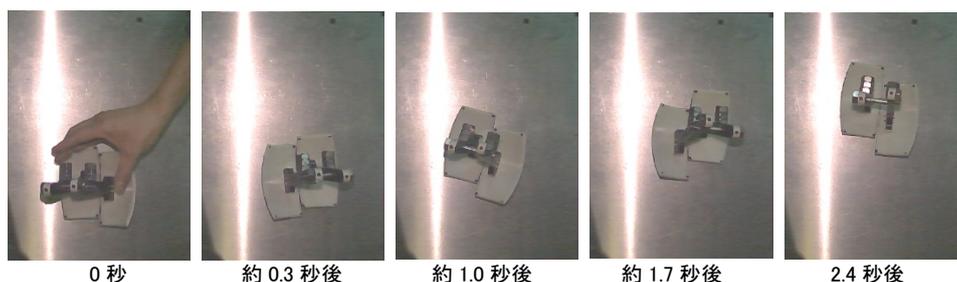


図5 楕円球面型での歩行の様子(上から)  
床面温度 130 度, 室温 20~25 度

### (3) 【バイメタル自励振動の解析】

環境熱で動作する熱歩行機構の設計には、動力源となるバイメタルシート自励振動に関する特性理解が重要であるが、従来、その特性は十分には理解できていなかった。そこで、バイメタル自励振動のシミュレーションモデルを構築し、バイメタルシートの形状等が自励振動の特性に与える影響を検討した。具体的には円弧状に湾曲したバイメタルシートを高温水平面上に配置したモデルについて、シート内の熱伝導からシートの温度分布と熱変形状を求め、それに伴う重心位置の移動から運動をシミュレーションした。

図6に結果の一例を示す。シミュレーションでは自励振動が成長し続けるため、グラフでは自励振動1周期後の振幅（初期振幅）を示している。赤点がシミュレーション結果で、青線は近似曲線である。図6上はバイメタルシートの厚さを変えた場合であり、シートが薄いほど大きな自励振動が得られることがわかる。一方、図6下は床面温度（と室温の温度差）を変えた場合の結果であり、温度が高いほど自励振動が起きやすいことを示している。

床面温度に関しては、高いほど大きな振動が得られることは以前より実験的にも確認できていたが、シート厚みに関しては、これまでは十分な知見は得られていなかった。この結果を定性的に確認するため、条件は異なるが、厚みを変えた場合の自励振動を実験的にも確認した。シミュレーションでは、半円形のバイメタルシート単体の挙動を計算したが、実験では偏心金属円筒にバイメタルを貼りつけて挙動を観察した（図7）。圧延ローラでバイメタルシートを薄く引き伸ばすことで異なる厚みのシートを作成し、それぞれの厚みで挙動を観察した。結果を図8に示す。条件が異なるためシミュレーションとの定量

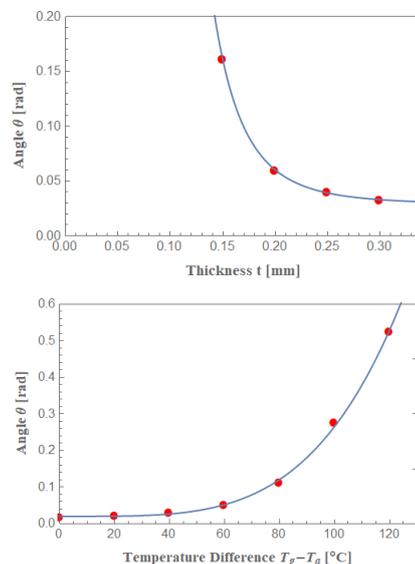


図6 シミュレーションでの自励振動初期振幅  
(上)バイメタル厚, (下)床面温度(と室温の差)  
を変化させた場合の結果



図7 実験に用いたバイメタルシート  
偏心金属円筒に半円形にバイメタルを貼付

的な比較は行えないが、実験的にも薄いバイメタルシートが大きな振動を発生する様子が確認できた。

現在、熱歩行機構に用いているバイメタルシートは市販の最も薄いものであり、さらに薄いバイメタルシートは現状では入手が困難である。しかし、今回の結果から、バイメタルシートを薄くしていくことで振動振幅が増大できることが理論的にも実験的にも確認できたため、将来的に薄いバイメタルシートを活用することで、現在よりも低い床面温度で歩行が実現できる可能性が明らかとなった。

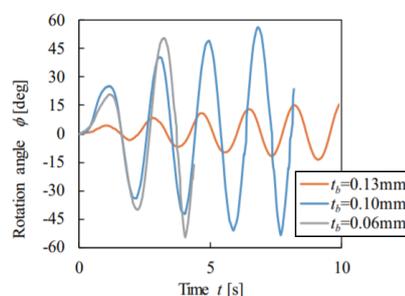


図8 異なるバイメタルシート厚を用いて実験的に観察した自励振動の様子

#### (4) 【車輪型自走機構の提案】

上記の(2)の実験でも示唆されるように、「歩行」という移動形態では、性能を良くするために自励振動による傾斜を大きくしたい一方で、傾斜を大きくすると転倒などのリスクが増えて安定性が下がる、というジレンマがある。そこで、より効率的な移動を実現するために、歩行だけに拘らず、連続回転運動による自走機構の可能性についても検討を行った。

熱自励振動の延長として、バイメタルシートをリング状に丸めたものが熱で連続的な回転運動をすることが明らかになっている[4]。よって、この回転運動を自走機構に活用することを考えた。報告されている回転動作は、単にシートをリング状に丸めた中空リングが転がるだけであり、これを機構の車輪として活用するには、中空構造の中に車軸を設置しなくてはならない。しかし、車軸を設置するためにバイメタルリングの内部に硬い構造物を設置すると、バイメタルの熱変形が阻害され回転運動が行えなくなる懸念がある。そこで、図9に示す2種の構造を試作し回転性能を比較した。左の構造は、リングの変形を阻害しないよう柔軟なスポンジをリング内にはめ込み、その中央に車軸をつけたもの。右の構造は、リングより小径の亚克力円板を入れたものであり、円板の直径をリングの半分から同径程度まで変えたものを複数用意し比較した。車軸に荷重をかけて高温床面上での回転動作を検証したところ、左のスポンジタイプでは、回転速度は速いが軸にかけられる荷重が小さく、右のタイプでは、速度は左のタイプに劣るが、より大きな荷重の下でも動作可能であることが確認できた。特に、内部に設置する円板の半径が大きいほど最大荷重は増加した。この結果をもとに図10の二輪自走機構を試作した。直径約90mmのバイメタルリングの中に、その約97%の直径を持つ亚克力円板を設置したものを車輪として用い、2個の車輪を荷台となるフレームで結合した。室温より約100度高温のホットプレート上に静置したところ、自重と同等の約200gの錘をのせた状態においても熱エネルギーのみで毎秒5cm程度の速度で走行することが確認できた。これにより運搬機構として活用できる可能性が明らかとなった。

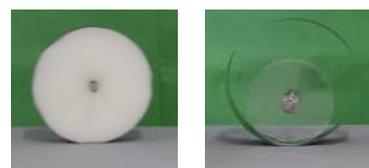


図9 比較した車輪構造

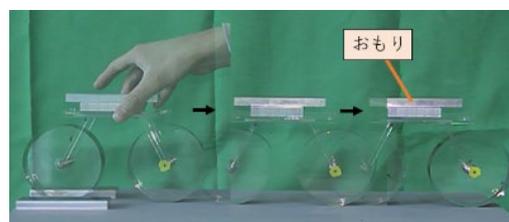


図10 二輪型熱自走機構と、その走行の様子

以上、本研究では、環境中の熱エネルギーを利用して移動するロボット機構の実現と高性能化をめざし、バイメタル熱自励振動を用いた複数の移動機構に関して性能検証と構造提案を行った。二足歩行機構については、水平面だけでなく登坂も可能であることを確認したほか、足裏形状の工夫により歩幅の増大に成功した。一方、新たに提案した車輪型自走機構については、荷重をかけて走行可能な二輪機構を実現し、荷物運搬などの実作業への利用可能性を示した。これらにより、「環境熱エネルギーを用いてロボットを動かす」というコンセプトが持つ可能性を示すことができた。今後、いずれの機構においても、さらなる移動の効率化を進めていくことが重要である。

#### <引用文献>

- [1] T. McGeer, “Passive dynamic walking”, International Journal of Robotics Research, 9(2), pp. 62-82 (1990)
- [2] T. Nemoto and A. Yamamoto, “Thermobot: A Bipedal Walker Driven by Constant Heating”, Proc. IEEE/RSJ IROS 2015, pp. 983-988 (2015)
- [3] 原田他, 「熱変形を利用したアクチュエータの開発」, 2006 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 803-804 (2006)
- [4] T. Higuchi and T. Ueno, “Development of New Actuators for Special Environment”, in T. Higuchi et al. (eds.), Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Springer, pp. 351-362 (2010)

## 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 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoki Chada, Shunsuke Yoshimoto, Akio Yamamoto	4. 巻 91
2. 論文標題 A Thermally-Driven Bipedal Walker with Rugby Ball Shaped Feet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanisms and Machine Science: Advances in Italian Mechanism Science, Proceedings of the 3rd International Conference of IFToMM Italy	6. 最初と最後の頁 626 - 634
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-55807-9_70	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lingchao Su, Takeru Nemoto, Akio Yamamoto	4. 巻 16
2. 論文標題 Performance of a thermal bipedal walker on inclined surfaces with different leg CoMs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Bionic Engineering	6. 最初と最後の頁 540-549
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42235-019-0044-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lingchao Su, Takeru Nemoto, Akio Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Performance of a Thermal Bipedal Walker on Inclined Surfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Trends in Medical and Service Robotics, Proc. 6th International Workshop on New Trends in Medical and Service Robotics	6. 最初と最後の頁 17~24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-00329-6_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 奥野瑛, 吉元俊輔, 山本晃生
2. 発表標題 バイメタル熱自励運動のモデル化及び特性評価
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥野瑛, 吉元俊輔, 山本晃生
2. 発表標題 リング状バイメタルを用いた熱移動機構
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茶田智来, 小田桐央拓, 吉元俊輔, 山本晃生
2. 発表標題 バイメタル自励振動を用いたコンパス型熱歩行機構
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田切央拓, 山本晃生
2. 発表標題 進行方向へのバイメタル自励振動を用いた高温水平面上歩行機構の検討
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018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

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
---------	---------