

令和元年6月10日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14632

研究課題名(和文)狭隘環境のための小型差動弾性アクチュエータの研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of a Small Differential Elastic Actuator for Narrow Environments

研究代表者

加古川 篤 (Kakogawa, Atsushi)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：50755486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、移動ロボットが物体に接触した際に関節トルクを検知でき、外部環境に対して柔軟に適應できる弾性アクチュエータを開発した。トルクは出力軸に取り付けた弾性体の弾性係数と角度センサによって読み取られるその回転変位により計算され、耐トルク向上のために材料力学に基づき断面形状を設計した。2度の試作を経て、内径100ミリのパイプに入る大きさでありながら、約6Nmの連続関節トルクを達成した。この機構を用いてトルクを制御することにより垂直曲管や異形管への適應を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な弾性アクチュエータでは、弾性体の回転変位を入力側と出力側の2種類の角度センサの差分を用いて計測し、トルクを検知するのに対し、本研究開発では差動の原理を応用して1種類の角度センサのみで同様のトルク検知機能を実現している。これにより、環境に対して経路を事前に計画し、それに合わせて角度を制御するのではなく、環境との接触を前提としたトルク制御可能な小型の関節のみで環境適應できる。これは生物で例えるなら、目に頼らない環境適應方法であり、カメラなどを用いない新たなロボットの制御法が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, an elastic actuator that can detect joint torque when the mobile robot contacts an object and can flexibly adapt to the external environment. The torque is calculated from the stiffness of the elastomer attached to the output shaft and its rotational displacement read by the angle sensor. The cross-sectional shape based on material dynamics is designed to improve durability. Through two times prototyping, it is sized to enter a pipe with an inner diameter of 100 mm. It can adapt to a vertically bent pipe and a diameter change by controlling the joint torque using this mechanism (maximum continuous torque: approximately 6 Nm).

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット インフラ点検 ヘビ型ロボット 粘弾性体 アクチュエータ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高度経済成長期に建設されたインフラの老朽化が随所で顕在化しつつあり、その交換、補修が喫緊の課題となっている。特にライフラインの1つである配管はガス、水道、プラント、空調等々、都市システムを支える重要なインフラであるにも関わらず、保守管理がなごりにされ、ここ5年～10年で一斉に耐用年数超過を迎える。これら全てに対応するためには膨大な時間と労力を要するため、劣化箇所を素早く特定し、適材適所に交換、補修する必要がある。しかし、配管は高所や地下に設置されていることが多く、人海戦術のみでは効率的に点検できない。

そこで研究代表者は、小型化しやすく、曲管に対して高い適応性を有している多リンク連結車輪型ロボットに着目した。この種類の機構は、体全体をジグザグ形状に曲げながら配管内壁面に駆動輪を押し付けることにより、垂直管を登ることができる。研究代表者はこれまでにアクチュエータの代わりにねじりコイルばねを関節に用いて曲管や垂直管に適応するための設計理論を提案し、機能性を損なわずに小型化を実現した。しかし、T字管のように経路が分岐している配管内では、駆動輪と配管内壁面との接触が十分でないために滑りが発生してしまう。特に垂直かつ小口径のT字管における確実な走行は、世界中で活発に研究が行われているにも関わらず未だ達成されていない。また、重い検査装置を水平だけでなく垂直に牽引するための突っ張り力を受動ばねだけで実現できない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ロボットが配管などの狭隘環境を移動する際に接触力をどのように発生させるべきかを力学的に解明し、弾性体を活用することで配管という限られた空間内において可能な限り少ないアクチュエータで必要な接触力を実現することである。また、上記を達成するために差動機構と弾性体を組み合わせた小型弾性アクチュエータを新たに開発し、その有用性を検証することである。

### 3. 研究の方法

剛性の高いロボットが何らかの対象物に接触する際、上記のようなばねを用いた弾性受動関節であれば、接触力を吸収できるため大きな問題にならない。しかし、能動関節の場合、接触力を精密に制御しなければロボット側に大きな負荷が加わり故障につながる恐れがある。

研究代表者はこれまで1入力-1出力の伝達系に対して入力軸方向（並進運動の場合）あるいは入力軸周り（回転運動の場合）に出力を従動にすると差動機構の原理が実現できる特徴を活かし、様々なロボットを開発してきた。この原理を応用し、小型で単純な差動弾性アクチュエータを新たに提案し、その力学特性を明らかにするとともに実機実験によりその性能を評価する。

なお、本研究では体積または質量あたりの蓄積弾性エネルギーが金属よりも大きい高分子ゴム材料を利用することで小型化を図るとともに、金属ねじりコイルばね等では困難であった正転／逆転の両方向に対称な弾性係数を実現する。

### 4. 研究成果

本研究では、まず初めに狭隘環境に適用可能な大きさ（内径100mm以下の配管に挿入可能であること）の差動弾性アクチュエータ1号機（図1）を開発し、弾性体の弾性係数を変えたり、耐久性を向上させたりするための断面形状の設計を材料力学の基礎に基づき行った。

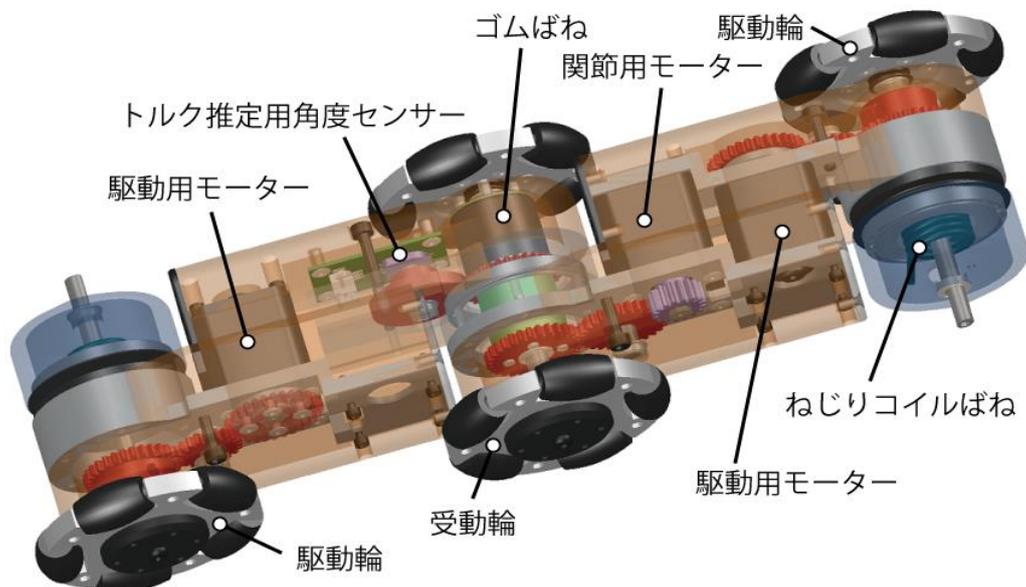


図1 狭隘環境に適用可能な小型差動弾性アクチュエータ1号機

今回は、弾性体の断面形状を1次円錐テーパと2次円錐テーパを用いてトルクと回転変位の関係を求めた。テーパ形状を持たない円筒状の高分子弾性体は回転中心から外側に向かってせん断方向の変形量が徐々に大きくなるため、部位によってひずみの差が生じ、耐久性が低かった。一般的にこの問題は1次円錐テーパ状の断面形状を用いることにより、せん断方向の変形量を分散させて解決することができる。しかしその他の形状については良く知られていなかった。そこで本研究では、2次円錐テーパの断面形状を表す関数をトルクと回転変位角の関係式に代入し(図2)、弾性係数を理論的に求めた(図3)。

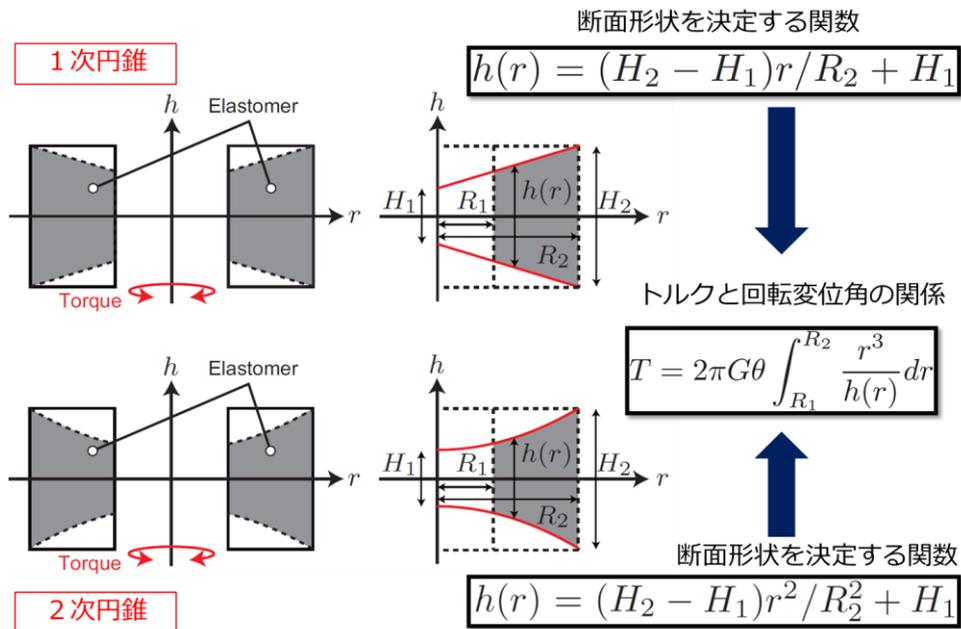


図2 1次円錐テーパ断面と2次円錐テーパ断面を用いた弾性体のトルクと回転変位の関係  
(T:トルク, G:弾性体の横弾性係数,  $\theta$ :回転変位角)

計算結果から、弾性体の半径にもよるが、2次円錐テーパの断面形状を用いた場合、最大で円筒形状の2倍程度のトルクを発生させられることが明らかになった(同角度変位のとき)。

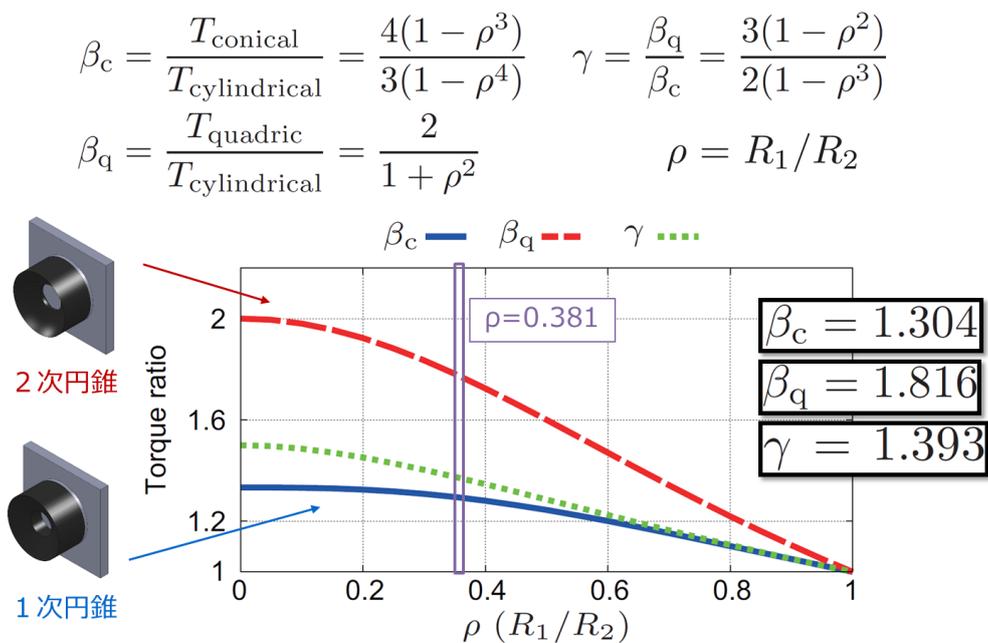


図3 ゴムばねの断面形状によって変化する発生トルクの増加率(理論値)

以上の結果を実験により確認した(図4)。今回、弾性体を Object 350 Connex 3 (米 Stratasys 社製の3Dプリンタ)を用いて Agilas 30 と呼ばれる材料で造形した。また、手作業によるシリコンゴムの弾性体の特性も検証した。手作業で造形したシリコンは最大で2倍近く理論値から

異なったが, Agilus30 では, ヒステリシスは残ったものの, 1 次円錐テーパの弾性係数, 2 次円錐テーパの弾性係数, これらの間の弾性係数の増加率のいずれの場合でも理論値通りの結果となった。

上記の実験により得られた弾性係数を用いてトルクの検知機能を試作機 1 号機により検証した (図 5)。実験から, ロボットの関節が環境に接触するとトルクの値が上昇することを確認できた。また, 正転/逆転方向に同じトルク検知機能を実現できることも確認できた。

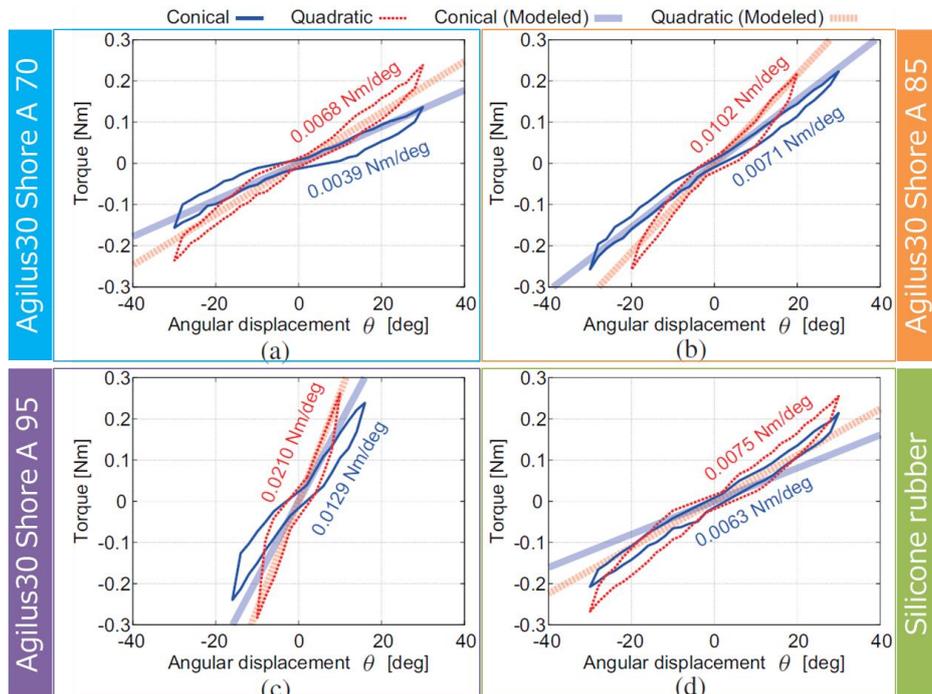


図 4 試作 1 号機による弾性体の角度変位とトルクの計測結果

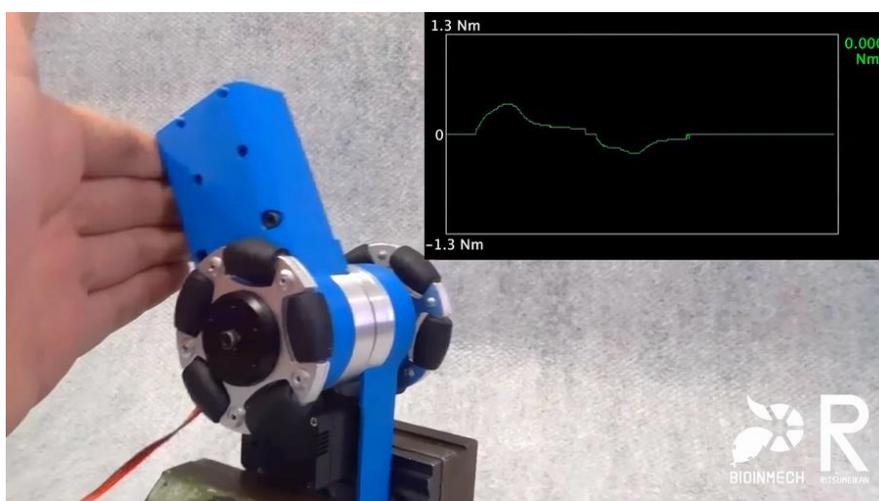


図 5 試作 1 号機によるトルク計測実験

試作 1 号機では差動弾性アクチュエータの基本原理を確認することができた。しかし, 発生トルクは移動ロボットに搭載するためには連続 0.6Nm 程度と小さく, 繰り返し実験を行うと弾性体が破断する問題を抱えていた。そこで, 2 号機 (図 6, 7) を新たに開発し, より大きな減速機付きモータと自作のドライブ回路により連続トルク 3.4Nm 以上を達成した。弾性体にはポリウレタン材料を用いて耐久性を向上させた。

最後に, 試作 2 号機を用いて水平直管・曲管, 垂直行管・曲管, および異径管における走破性の検証実験を行った。実験から, 本研究で開発した差動弾性アクチュエータにより, 関節トルクを一定に保ったまま配管内を走行できることが明らかとなった。曲管内は直管内よりも実質的な内径が増加するため一般的な角度制御の場合, 内径の情報を事前に知った上で正確に角度をしなければならぬのに対し, 提案した方法ではトルク制御のみで自動的に車輪と配管内壁との接触が保たれるため角度制御よりも優れた走破性を有することが判明した。この結果は垂直直管・曲管や異径管でも同様であり, トルク制御のみでこれらの配管に柔軟に適応することが可能になった。

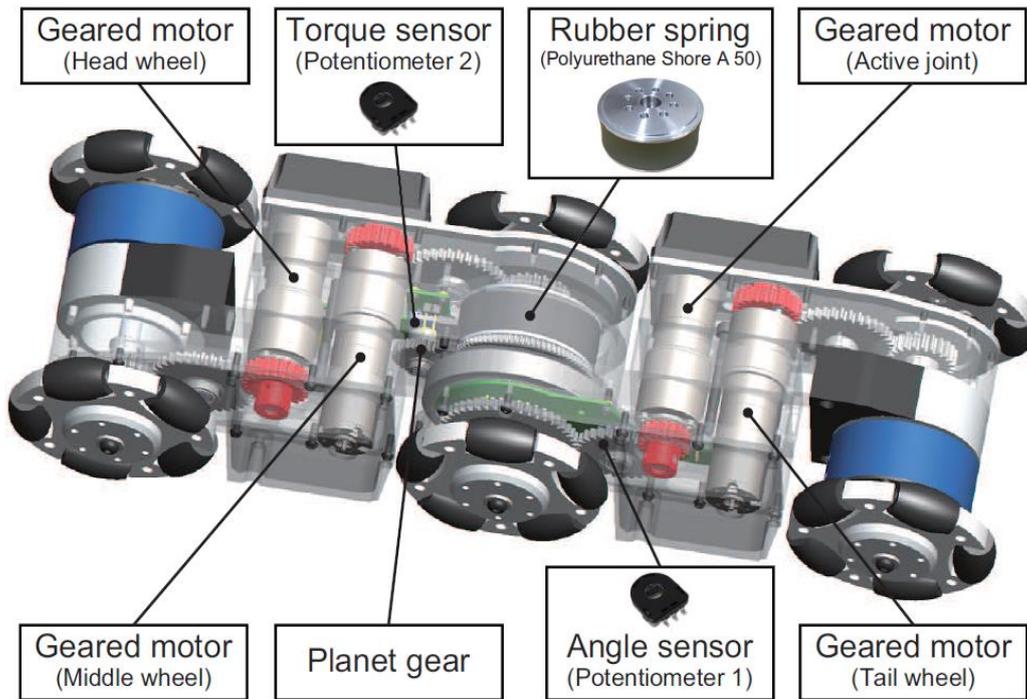


図 6 小型差動弾性アクチュエータ試作 2 号機の内部構造



図 7 小型差動弾性アクチュエータ試作 2 号機を用いた配管内移動ロボット

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

1. [加古川篤・川端泰平・馬書根](#), 並列弾性アクチュエータを用いたヘビ型ロボットの低速運動時におけるエネルギー消費抑制, システム制御情報学会論文誌, 32-6, pp. 227-233, 2019, 査読有
2. [Atsushi Kakogawa](#), Soo Jeon, and Shugen Ma, Stiffness Design of a Resonance-based Planar Snake Robot with Parallel Elastic Actuators, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), 3-2, pp. 1284-1291, 2018, 査読有, DOI: 10.1109/LRA.2018.2797261
3. [Atsushi Kakogawa](#) and Shugen Ma, Design of a Multilink-articulated Wheeled Pipeline Inspection Robot using Only Passive Elastic Joints, Advanced Robotics, 32-1, pp. 37-50, 2017, 査読有, DOI: 10.1080/01691864.2017.1393348

〔学会発表〕 (計 15 件)

1. [Atsushi Kakogawa](#), Taihei Kawabata, and Shugen Ma, Plate Springed Parallel Elastic Actuators for Efficient Movement of a Planar Snake Robot (Accepted), in Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019), 2019
2. [Atsushi Kakogawa](#) and Shugen Ma, A Differential Elastic Joint for Multi-linked

Pipeline Inspection Robots, IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2018), 2018

3. Yoshimichi Oka, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Development of a Multilink-articulated Wheeled In-pipe Robot with Differential Mechanisms in Wheel and Link Axes, IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2018), 2018
4. Atsushi Kakogawa, Yoshimichi Oka, and Shugen Ma, Multi-link Articulated Wheeled In-pipe Robot with Underactuated Twisting Joints, in Proc. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2018), 2018, (Toshio Fukuda Best Paper Award in Mechatronics)
5. Atsushi Kakogawa, Soo Jeon, and Shugen Ma, Stiffness Design of a Resonance-based Planar Snake Robot with Parallel Elastic Actuators, in Proc. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2018), 2018
6. Atsushi Kakogawa, Yuki Komurasaki and Shugen Ma, Anisotropic Shadow-based Operation Assistant for a Pipeline-inspection Robot using a Single Illuminator and Camera, in Proc. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2017), 2017
7. 大谷修生・加古川篤・馬書根・田陽, 直列弾性把持機構を有する配管外走行ロボットの段差走行性能および曲部走破性能に関する実験的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018
8. 加古川篤・小紫由基・馬書根, 影画像情報に基づく配管検査ロボットのエルボー管内自動走行システム 一第2報:影の認識方法の改良および連続エルボー管での実験一, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018
9. 大塚貴丈・井上脩也・馬捷・加古川篤・馬書根, 劣駆動型腱駆動アームを有する螺旋型円柱昇降ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018
10. 沈雅怡・馬書根・富田拓基・張国騰・田陽・加古川篤, 偏心パドル機構を備えた全地形対応ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018
11. 張国騰・川端泰平・馬書根・加古川篤, 誘電エラストマーアクチュエータで駆動するイモムシロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018
12. 加古川篤・馬書根, 並列弾性アクチュエータを用いた高効率2次元ヘビ型ロボットの剛性設計, 第62回システム制御情報学会研究発表講演会, 2018
13. 向井奨・馬書根・加古川篤, 剛体と弾性体を組み合わせた1自由度回転脚による地盤反力の変動抑制, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017
14. 岡義倫・加古川篤・馬書根, 車軸と体軸に差動機構を有する連結車輪型管内移動ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017
15. 加古川篤・小紫由基・馬書根, 2リンク車輪型空調ダクト内清掃ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017

※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、研究者個人に帰属されます。