

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14949

研究課題名（和文）板バネとDDモータによる周期運動のための高効率小型並列弾性アクチュエータの研究

研究課題名（英文）Study on efficient compact parallel elastic actuators using plate spring and DD motor for periodic movement

研究代表者

加古川 篤 (Kakogawa, Atsushi)

立命館大学・理工学部・講師

研究者番号：50755486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：板バネ式並列弾性アクチュエータを用いたヘビ型ロボットのエネルギー効率をシミュレーションと実機実験により検証した。まず、板バネの剛性をRBSM法（Rigid Body Spring Model）と呼ばれる離散モデルと数値計算によってモデル化し、ヘビ型ロボットの動力学モデルを構築した。これらを用いて、関節トルクを最小化するような、板バネの剛性、ロボットの移動速度などをシミュレーションにより明らかにした。最後に、ヘビ型ロボットを開発し、運動効率をCoT（Cost of Transport）と呼ばれる指標によって評価した。最大で約50%のエネルギー効率向上を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周期運動を伴うロボットに弾性体を取り付けて運動を効率化する並列弾性アクチュエータはこれまでも数多く研究されてきたが、本体が複雑化、大型化する傾向にあった。一方、本研究で提案した板バネ式並列弾性アクチュエータは薄板金属である板バネを取り付けるだけなので構造がシンプルでほとんど大型化せずに済む。また、板バネは薄い長方形という単純な形状でありながら、板厚、長さ、幅、材料などを変更するだけで簡単に剛性を変化させられるため、低価格化や設計自由度の向上などにもつながる。本研究の成果により、ピックアンドプレイス、歩行、蛇行などの往復運動を行う小型のロボットや機械装置の高効率化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The energy efficiency of a snake-like robot with plate-springed parallel elastic actuators was verified by simulation and experiments. First, the stiffness of the plate spring was modeled using a discrete model called the Rigid Body Spring Model (RBSM) method and numerical calculations, and a dynamics of the snake-like robot was modeled. Based on these models, the stiffness of the plate spring and the movement speed of the robot to minimize the joint torque were clarified by simulation. Finally, a snake-like robot was developed and its motion efficiency was evaluated using a CoT (Cost of Transport). The maximum energy efficiency improvement of about 50% was achieved.

研究分野：ロボティクス

キーワード：並列弾性アクチュエータ 共振 板バネ 周期運動 変分法

1. 研究開始当初の背景

近年の急速な情報通信技術の発展に伴うロボット技術の進歩は目覚ましく、北米、西欧州、日本を含む東アジアを中心に世界各国で競争が激化している。しかし、その多くはロボットシステムを稼働させるためのエネルギー源が無尽蔵に存在することを前提としており、省エネルギー化は二の次とされてきた。

ロボットの動力源であるアクチュエータには、油空圧アクチュエータなどの特殊なものが一部で存在するが、その多くは専ら電気モータである。電気モータは熱による損失が大きく、一般的なものは低速・高トルク化させるために減速機を取り付ける必要があるため、機械的な損失も増加傾向にある。とりわけ、工場内でピックアンドプレイスを繰り返すマニピュレータ、人型ロボットや四脚型ロボットなどの脚歩行ロボット、身体を蛇行させながら移動するヘビ型ロボットや魚型ロボット等々ではしばしば関節の周期運動が要求され、モータの回転方向を変えるとときに消費エネルギーは大きくなる。

これらの周期運動を行うロボットのエネルギー効率を向上させる方法として並列弾性アクチュエータ (PEA: Parallel Elastic Actuator) と呼ばれる機構が存在する (図1)。この機構は、モータなどの一般的なアクチュエータの出力にバネなどの弾性体を干渉させ、ある固有の周波数に合わせて動かしたときに起こる共振現象の原理を利用してエネルギー効率の向上を実現している。これまでの通説において、並列弾性アクチュエータは弾性体の共振周波数と同期したときに効率は向上するものの、ギアヘッドなどによる機械的な損失が著しく影響するため、これらの損失を含めた全体の効率を考慮すると実用的ではなかった。また、弾性体には特性が明確で扱いやすいコイルバネが広く用いられてきた。しかし、バネが筐体の外部へ露出してしまうため、防塵防水のために密閉するとロボットが大型化する傾向にあった。

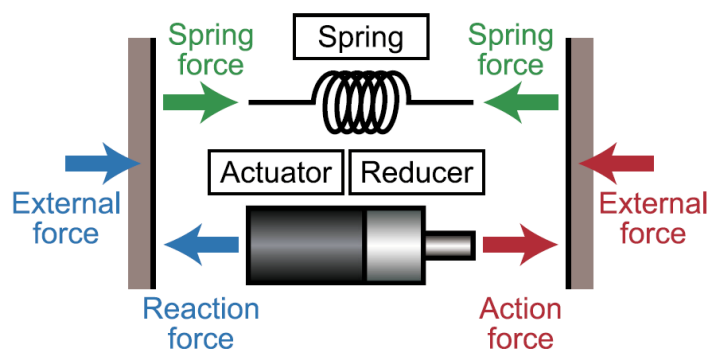


図1：並列弾性アクチュエータの模式図

2. 研究の目的

本研究では、ギアヘッドを用いないDD (ダイレクトドライブ) モータや摩擦によるエネルギー損失の小さいギアードモータを用いた並列弾性アクチュエータに着目し、周期運動を伴うロボットシステムの劇的な高効率化やそのために必要な条件の解明を主な目的とした。また、並列弾性アクチュエータの弾性体にはコイルバネを用いるのではなく、板バネを採用することにより大幅な小型化を目指すと共に、板幅や板厚などを変えるだけでバネ剛性を自由に変更できる板バネの特徴を活かした設計自由度の高い並列弾性アクチュエータ (PSPEA: Plate-Springed Parallel Elastic Actuator) の開発を試みた。

3. 研究の方法

本研究では、周期運動を行うロボットの一例としてヘビ型ロボットを対象とした。ヘビ型ロボットでは、各関節に位相の異なる正弦波の目標角度を入力しているため、典型的な周期運動と言える。まず初めに、ヘビ型ロボットの蛇行運動を高効率化するための板バネ剛性の組み合わせの解明に取り組んだ。

一般的に板バネは形状が連続的であるため曲げ剛性の導出が複雑になる傾向にある。今回のように関節の運動に対して並列に力が発生するよう板バネを取り付けた場合の力学モデルは、有限要素法 (FEM) によっても構築できる。しかし、一般的に計算負荷が大きい。そこで本研究では、RBSM (Rigid Body Spring Model) 法と呼ばれる手法 (板バネを剛体とねじりコイルバネの離散モデルとして扱い変形状やバネ剛性を推定する方法) と静力学を用いて板バネの形状や曲げ剛性をモデル化した (図2)。

さらに、並列弾性アクチュエータをヘビ型ロボット全体の動力学モデルを構築し、蛇行運動時の効率を向上させるためのパラメータ (関節の運動周波数、板バネの長さ、幅、板厚など) をシミュレーションにより明らかにした。最後に実機実験を行い、CoT (Cost of Transport) と呼ばれる評価指標を用いてヘビ型ロボットの運動効率を評価した。

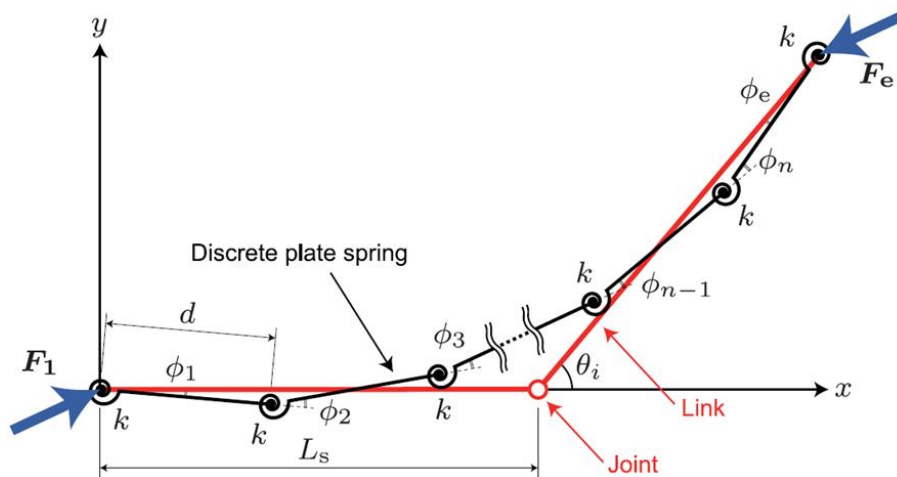


図2：RBSM法による関節に取り付けられた板バネの再現

4. 研究成果

まず初めに、RBSM法と静力学モデルから求めた板バネの剛性をヘビ型ロボットの動力学モデルに適用し、ロボットのエネルギー消費が最小になるような移動速度と板バネの寸法パラメータ（長さ、幅、板厚）の関係を求めた。また、PSPEAを用いて図3に示すようなヘビ型ロボットの初号機を開発し、実験によって動力学シミュレーションの結果の信憑性を検証した。これらの結果をまとめ、IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019)にて発表を行った[1]。また、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方法についてもヘビの体の形態を変える方法を提案し、システム制御情報学会論文誌で発表した[2]。

しかし、初号機では、以下の課題が残されていた。

1. RBSM法と静力学モデルで求めた剛性の検証ができておらず、板バネの寸法パラメータ（長さ、幅、板厚）と剛性の関係が不確かであった
2. モータ自体の待機電力などが大きく、板バネによる効率化の効果がロボット全体としてとらえると小さかった
3. 運動効率をエネルギー消費量でしか検証していなかったため、移動距離も取り入れる必要があった
4. 板バネにステンレス材料を用いていたため、板厚が薄くなると塑性変形が起こり、変位量が弾性変形領域外に入ってしまった

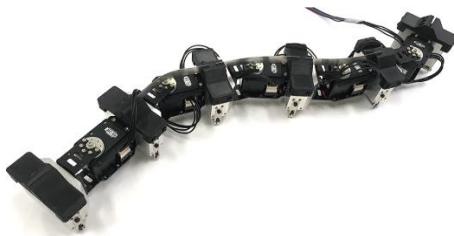


図3：初号機

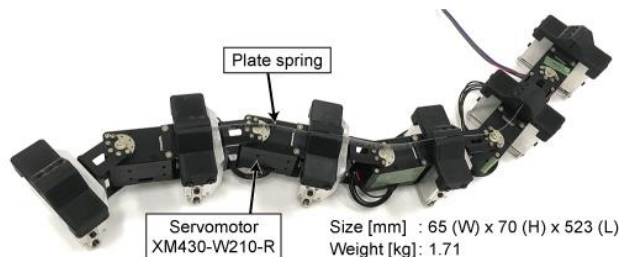


図4：2号機

そこで図4に示す2号機を開発し、これらの問題を解決した。まず、図5に示すテストリグを製作し、板バネの寸法パラメータ（長さ、幅、板厚）と剛性の関係を実験により検証した。

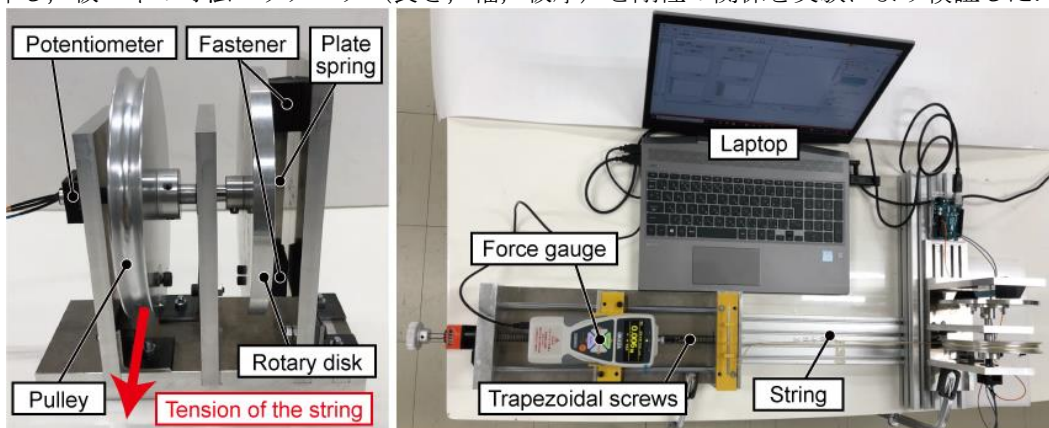


図5：板バネの寸法パラメータ（長さ、幅、板厚）と剛性の関係を調べるためのテストリグ

実験により、全体的な傾向はモデルと一致するものの、ヤング率が正確でないことや板バネの端点の固定方法が緩いため、実際には理論値よりも少し小さい剛性が計測された。そのため、ヤング率を実際の板バネに合わせることでヘビ型ロボットの動力学モデルへ適用できるようにキャリブレーションを行った。板バネの剛性の計測結果を図6に示す。板バネの公称ヤング率には大小 15%ほどのばらつきがあり、ロボットに搭載する場合には、予め剛性の真値を調べた方がエネルギー消費を抑制できることがわかった。

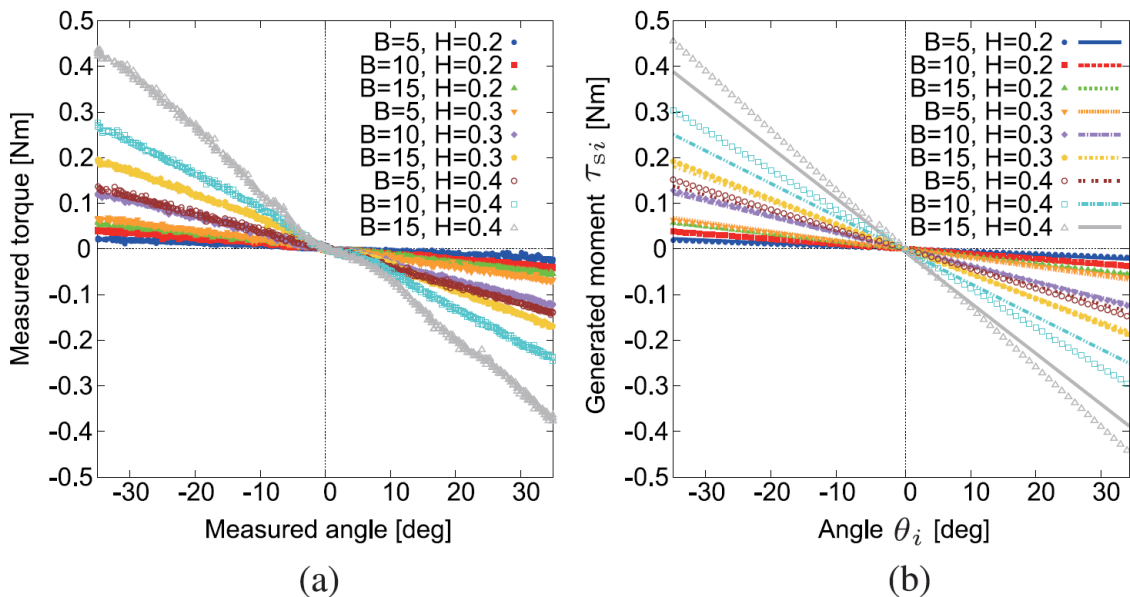


図6：板バネの剛性の計測結果
 ((a)：テストリグによる実験結果, (b)：実験結果を最小二乗法により線形近似した結果 (直線) とシミュレーション結果 (点)),
 Bは板幅を, Hは板厚を表している (それぞれ単位はmm)

以上で得られたバネ剛性をヘビ型ロボットの動力学モデルに適用し、板バネの剛性、移動速度、コスト関数の関係を調べた。コスト関数は以下の式 (1) で定義した。 T_{ci} は周期運動を行っているときの1周期の時間を、 τ_{mi} は各関節のトルクを表している。図7にヘビ型ロボットの動力学シミュレーションによって得られたコスト関数の計算結果を示す。

$$J_i = \int_0^{T_{ci}} |\tau_{mi}| dt \quad \dots (1)$$

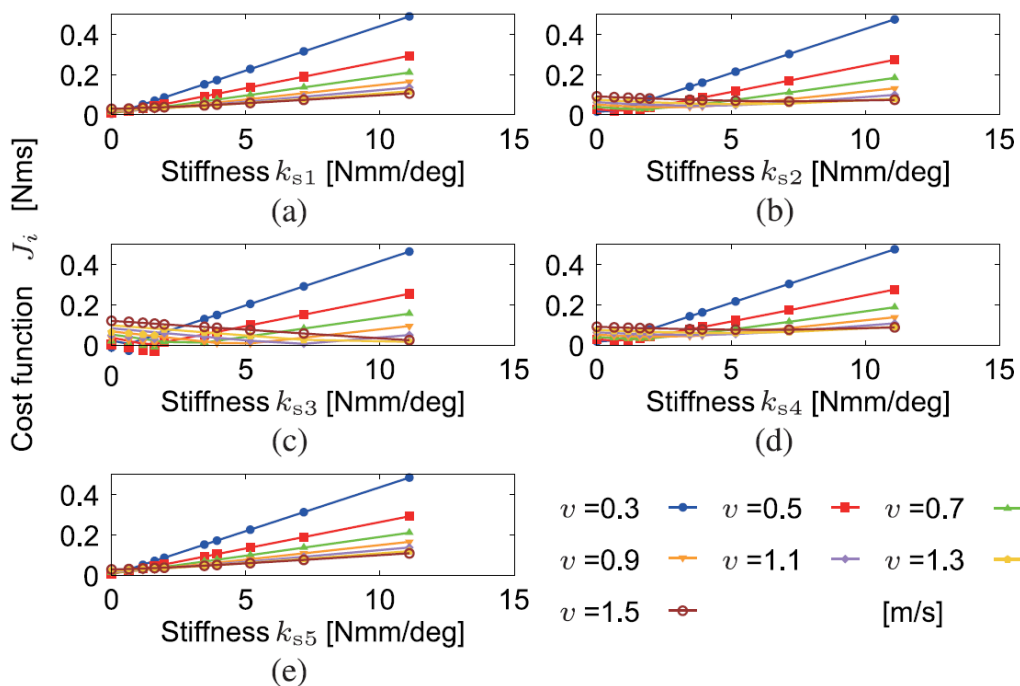


図7：各関節における移動速度とコスト関数の関係
 ((a)：関節1, (b)：関節2, (c)：関節3, (d)：関節4, (e)：関節5)

表 1 : コスト関数を最小化する板バネの剛性の組み合わせ

速度 v [m/s]	関節 1 k_{s1} [Nmm/deg]	関節 2 k_{s2} [Nmm/deg]	関節 3 k_{s3} [Nmm/deg]	関節 4 k_{s4} [Nmm/deg]	関節 5 k_{s5} [Nmm/deg]	組み合わせ
N/A	0	0	0	0	0	A
0.3	0	0	0.642	0	0	B
0.5	0	0.642	1.602	0.642	0	C
0.7	0	1.602	3.462	1.602	0	D
0.9	0	1.965	5.170	1.965	0	E
1.1	0	3.929	7.162	3.462	0	F
1.3	0	5.170	11.092	5.170	0	G
1.5	0	7.162	11.092	5.170	0	H

図 7 の結果をまとめると表 1 に示すようにコスト関数を最小化する板バネの剛性の組み合わせが得られる。この結果から速度 v に応じて A~H のバネ剛性の組み合わせを選べばモータの必要トルクが最小になることが明らかとなった。

次に、初号機で使用していた ROBOTIS 社製のサーボモータ (Dynamixel R X-24F) を最新の製品 (Dynamixel XM430-W210-R) に変更し、上記のバネ剛性の組み合わせがヘビ型ロボットのエネルギー効率を向上させるのかを検証した。従来のものと比較して 2 号機では待機電力が大幅に削減されたほか、関節間で独立して角度、速度、電流などの情報をフィードバックできる。そこで、2 号機では運動効率を以下の式 (2) に示す CoT (Cost of Transport) と呼ばれる指標を用いて評価した。

$$\text{CoT} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} P(t) dt}{Mg(D(T_2) - D(T_1))} \quad \dots (2)$$

時刻 T_1 から T_2 の間 (本実験では 2~3 秒の 1 秒間) に消費したエネルギーを重力 Mg とその間の移動距離 $D(T_2) - D(T_1)$ を掛けた値で割ったものを CoT と定義した。初号機では消費エネルギー量だけで評価されていたが、2 号機では移動距離の次元も評価指標に追加された。図 8 に実験結果により得られた CoT の結果を示す。なお、今回はロボットの移動量をモーションキャプチャシステムにより計測した。

さらに、板バネの材料をステンレスから塑性変形しにくいリボン鋼に変更した。結果から、組み合わせ A (バネを付けていない状態) を基準とした場合、最大で 50% 以上エネルギー効率を向上させられることが明らかとなった。これらの成果内容を学術誌 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics へ投稿し、採択された [4]。

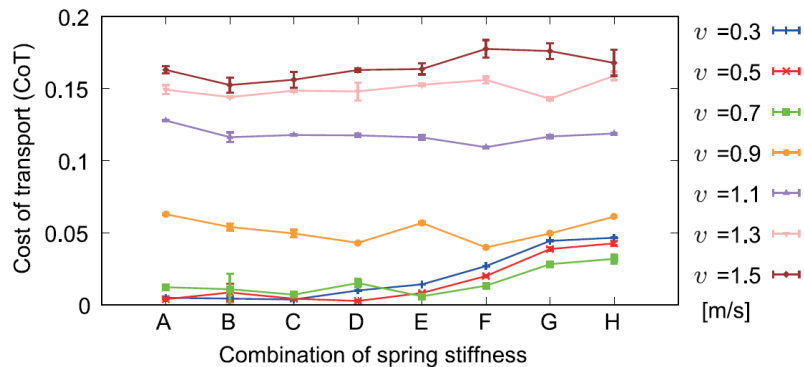


図 8 : それぞれの移動速度とバネ剛性の組み合わせにおけるヘビ型ロボットの CoT

表 2 : 実機実験により計測された CoT の結果

速度 v [m/s]	板バネの剛性の組み合わせ							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0.3	0%	-12.4%	-23.9%	100%	190%	449%	804%	856%
0.5	0%	130%	6.3%	-29.1%	109%	410%	887%	987%
0.7	0%	13%	-42.9%	20.1%	-54.7%	8.4%	126%	164%
0.9	0%	-12.8%	-19%	-31.0%	-8.4%	-37.2%	-20.7%	-1.6%
1.1	0%	-8.4%	-8.1%	-7.8%	-9.4%	-14.6%	-8.5%	-7.1%
1.3	0%	-4.6%	-1.4%	0%	1.7%	-4.4%	-5.1%	6.2%
1.5	0%	-5.1%	-2.7%	0.2%	1.4%	9.4%	-9.0%	5.2%

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsushi Kakogawa, Yuki Komurasaki, and Shugen Ma	4. 巻 31
2. 論文標題 Shadow-based Operation Assistant for a Pipeline-inspection Robot using a Variance Value of the Image Histogram	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 772-780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2019.p0772	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 該当する

1. 著者名 加古川篤, 川端泰平, 馬書根	4. 巻 32
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 227-233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.227	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 該当する

1. 著者名 Atsushi Kakogawa, Yuki Kaizu, and Shugen Ma	4. 巻 8
2. 論文標題 Sensor-less and Control-less Underactuated Grippers with Pull-in Mechanisms for Grasping Various Objects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI Soft Robotics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.631242	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

1. 著者名 Atsushi Kakogawa, Taihei Kawabata, and Shugen Ma	4. 巻 Early access
2. 論文標題 Plate-springed Parallel Elastic Actuator for Efficient Snake Robot Movement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2021.3052037	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 該当する

1. 著者名 加古川篤, 川村貞夫, 武居直行, 徳永晋也, 深澤俊樹, 山本章, 徳田貴司, 栗本直彰	4. 巻 39
2. 論文標題 機械的接触を基盤とするロボットの事業化に向けて～低摩擦ギアード電動モータからのアプローチ～	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 125-131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.125	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Atsushi Kakogawa, Taihei Kawabata, and Shugen Ma
2. 発表標題 Plate Springed Parallel Elastic Actuators for Efficient Movement of a Planar Snake Robot
3. 学会等名 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sera Fumiya, Atsushi Kakogawa, and Shugen Ma
2. 発表標題 Joint Angle Control of an 8-inch Gas Pipeline Inspection Robot to Pass through Bends
3. 学会等名 The 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Kakogawa and Shugen Ma
2. 発表標題 An In-pipe Inspection Module with an Omnidirectional Bent-pipe Self-adaptation Mechanism using a Joint Torque Control
3. 学会等名 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guoteng Zhang, Yang Tian, Shugen Ma and Atsushi Kakogawa
2. 発表標題 Control System Design for the Quadruped Walking Platform TITAN-VIII
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田大地, 馬書根, 加古川篤
2. 発表標題 ペルヌーイの原理を利用した非接触水中壁面吸着機構の吸着力のモデル構築
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沈雅怡, 馬書根, 加古川篤, 田陽, 張国騰, 井上脩也
2. 発表標題 水中における偏心パドル機構の新たな水泳方法の提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 世良文哉, 加古川篤, 馬書根
2. 発表標題 8インチガスパ管内検査ロボットの曲管走行のための関節角度制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海津祐貴, 加古川篤, 馬書根
2. 発表標題 把持と引き上げ動作が可能な空気圧グリッパーの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植村充典, 加古川篤
2. 発表標題 連続炭素繊維3Dプリンターを用いた高逆可動な軽量減速機の試作
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児島隆弘, 住友尚樹, 加古川篤, 川村貞夫
2. 発表標題 バックドライバビリティを有する水中ロボットアームの製作
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立花京, 西田亮介, 加古川篤, 川村貞夫
2. 発表標題 多様な形状物品の高密度平面充填可能な軽量エンドエフェクタ開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井拓磨, 加古川篤, 川村貞夫
2. 発表標題 高分子材料を用いた直列非線形弾性拮抗駆動による可変剛性関節の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川恭平, 加古川篤, 馬書根
2. 発表標題 ロボット用せん断支持型高分子弾性要素の機械特性
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝間洋平, 加古川篤, 馬書根
2. 発表標題 バイナリ制御を用いたヘビ型ロボットの高効率な運動の検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫛谷侑太郎, 加古川篤, 馬書根
2. 発表標題 1自由度能動関節のみを用いた連結車輪型管内移動ロボットのT字管走行
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加古川篤, 川村貞夫, 徳永晋也, 深澤俊樹, 山本章, 徳田貴司, 栗本直彰, 武居直行
2. 発表標題 準DDモータを用いた機械的接触基盤ロボット技術
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Kakogawa and Shugen Ma
2. 発表標題 A Multi-link In-pipe Inspection Robot Composed of Active and Passive Compliant Joints
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Atsushi Kakogawa and Shugen Ma	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IntechOpen "Unmanned Robotic Systems and Applications"	5. 総ページ数 14
3. 書名 Robotic Search and Rescue through In-pipe Movement	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 管内走行装置	発明者 馬書根・加古川篤	権利者 学校法人立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特開2020-196439	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 把持装置	発明者 馬書根, 加古川篤, 海津祐貴	権利者 学校法人立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-213940	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 弾性機構並びにそれを用いたアクチュエータ及び関節機構	発明者 川村貞夫, 加古川篤, 松井琢磨	権利者 学校法人立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-030044	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 エンドエフェクタとハンドリングロボット及びエンドフェスタによる物品の挟み込み保持方法	発明者 川村貞夫, 立花京, 西田亮介, 加古川篤	権利者 株式会社チトセ ロボティクス
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-091774	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------