

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04380

研究課題名（和文）複雑環境における3次元ヘビ型ロボットの適応的振る舞い生成

研究課題名（英文）Adaptive Behavior Generation for 3D Snake Robots in Complex Environments

研究代表者

亀川 哲志（Kamegawa, Tetsushi）

岡山大学・ヘルスシステム統合科学学域・准教授

研究者番号：80432623

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：形状ベースコンプライアンス制御を配管内で螺旋捻転運動をするヘビ型ロボットへ適用した。ここで、形状ベースコンプライアンス制御に用いるパラメータは、粒子群最適化のアルゴリズムを用いて、シミュレーター内に構築したヘビ型ロボットにより探索した。また、ロボットの頭部側と尾部側で形状を別々に適応させることによって、配管径が変化する場合において両方の配管径に局所的に適応させることが可能となることを実機実験にて実証した。さらに、ヘビ型ロボットを適用する際の特殊な環境や条件として、高所からの落下する際の衝撃力の分析、密集配管での運動生成、柔らかい床の上を移動する際のCPGパラメータの設定に関する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

細長い構造であるヘビ型ロボットは狭隘地や複雑な構造物に進入して探索をするロボットとしての応用が期待される。本研究の目的は、ヘビ型ロボットを移動させるためのモーションを事前計画するだけでなく、ロボットと環境との力学的相互作用の中で適切に生成することである。環境との接触を積極的に利用して推進するヘビ型ロボットが実現されれば、本来期待されている用途でのヘビ型ロボットの実用化が加速する。本研究では3次元運動が可能なヘビ型ロボットのすべてのリンクに全周の圧力を測定するためのセンサを搭載し、このセンサ情報を利用した局所的アドミッタンス制御により適応的に環境を走破するヘビ型ロボットを実現することができた。

研究成果の概要（英文）：Shape-based compliance control was applied to a snake robot performing a helicoidal rolling motion in a pipe. The parameters used for the shape-based compliance control were explored by a snake robot built in a simulator using a particle swarm optimization algorithm. In addition, it was demonstrated that the robot can locally adapt to both pipe diameters when the pipe diameter changes by adapting the shape of the head side and the tail side separately in an actual experiment. In addition, as special environments and conditions for applications of snake robots, we analyzed the impact force of a fall from a high place, generated motion in dense piping, and studied the setting of CPG parameters when moving on a soft floor.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヘビ型ロボット 形状ベースコンプライアンス制御 環境適応

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災により被害をうけた福島第一原発の廃炉作業は今なお続いており、さらに、近年においても、西日本豪雨災害など、甚大な被害をもたらす災害が次々と発生している。レスキュー隊員などの人間にとって過酷な災害現場において、情報収集や作業を行う災害ロボットの活躍が期待される一方で、災害現場の非常に複雑な環境を動き回るためのロボット技術は発展途上であり、今後ますます研究開発をする必要がある。複雑な環境にロボットが適応して移動するためには、ロボット自身がその複雑さを認識できなくてはならず、そのため、ロボットが環境を感じるためのセンサをロボットに実装することが必須である。研究代表者は2014年度から2016年度にかけて、内閣府「革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) タフ・ロボティクス・チャレンジ」に参画しており、そこで全周圧力センサを搭載したヘビ型ロボットを開発した。さらに、その他のカメラなどのセンサも含めてヘビ型ロボットを運用するためのシステム全体を統合する技術開発を行っていた。本研究では、そこで培った技術を発展させて、ヘビ型ロボットの制御に適用した。特に、ロボットマニピュレータを外力にしたがって柔軟に制御するための手法であるアドミッタンス制御をヘビ型ロボットにも応用することで、ヘビ型ロボット全体の形状を複雑環境において適切に制御できることの可能性について、研究室で開発したヘビ型ロボットを用いて実験的に検証することとした。

なお、国内外においてヘビ型ロボットの発展的な研究がいくつか行われている。例えば Carnegie Mellon University で開発されたヘビ型ロボットは、カルマンフィルタを用いた状態推定を行い、ロボット形状へ推定結果をフィードバックすることで、環境に対する柔軟な移動制御を実現している。また、HiBot Corporation では、これまでに様々なヘビ型ロボットの研究開発がなされており、開発されたヘビ型ロボットの一部は福島第一原発の廃炉作業にも使われている。このように、ヘビ型ロボットの研究開発は世界的にも行われており、産業応用への期待も高い。本研究におけるヘビ型ロボットのハードウェア面での特徴は、ロボット全周の圧力を測定するためのセンサがヘビ型ロボットに実装されていることであり、これはこれまでのヘビ型ロボットにはない大きな特徴である。また、ソフトウェア面での特徴は、上述の圧力センサを有するヘビ型ロボットに対して、アドミッタンス制御を導入することで、ロボット形状全体を柔らかく制御するための方策を開発し、これを実機実装して実証することである。

2. 研究の目的

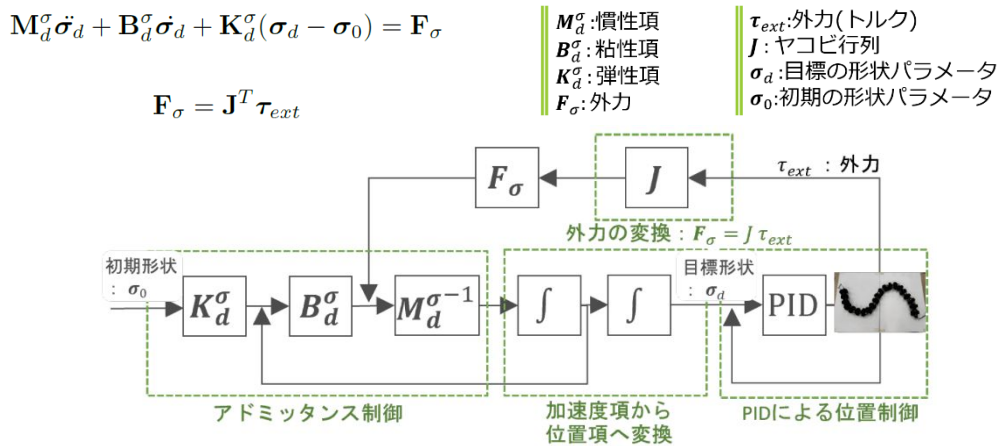
本研究の目的は、ヘビ型ロボットを移動させるためのモーションを事前計画することなく、ロボットと環境との力学的相互作用の中で、適切に移動するためのモーションを創発的に生成することである。一般の移動ロボットの運動生成においては、障害物を避ける運動が計画されることが多いが、本研究においては障害物との接触により生ずる反力に応じて適切な運動を生成して推進するヘビ型ロボットの実現を目指している。これは、ヘビ型ロボットの適用が期待されるのは狭隘な環境であることが多く、環境とロボットとの接触は不可避であるからである。環境との接触を適切に処理して推進するヘビ型ロボットが実現されれば、本来期待されている用途でのヘビ型ロボットの実用化が加速することが期待できる。

従来のモデルベース制御を規範としたロボット制御ではなく、環境との相互作用に着目したロボット制御手法として、身体性認知科学と呼ばれる分野がある。そこでは、センサからの入力を複雑な思考や計画なしにダイレクトにモータ出力へとつなぐことでロボットが反射的な振る舞いを生成する設計手法が提案されている。研究代表者はこれまでに、ヘビ型ロボットにおける反射的な振る舞い生成に関する研究も行っており、比較的単純な環境においては、反射行動によるロボットの振る舞い生成は一定の効果があることを確認している。しかしながら、実環境にロボットを適用することを考えると、より複雑な問題に取り組みなくてはならない。そのためには、ロボット自身も実環境の複雑さに釣り合う複雑さを備える必要がある。例えば、3次元環境を適切に走破するためには、ロボット自身も3次元形状を生成できる構成でなくてはならない。そこで、研究代表者の研究室では、これまでに3次元運動可能なヘビ型ロボットに関する研究開発を進めてきた。特に最近では、ロボットの全周の圧力を測定することのできるセンサを装備したヘビ型ロボットを試作している。以上に示したとおり、単純なモデルによる検証にとどまらず、実環境への適用を考慮した複雑なモデルが制御対象になると、制御アルゴリズムもこれらに合わせて高度化する必要がある。本研究では3次元ヘビ型ロボットを対象に複雑環境において適切な振る舞いを生成する制御アルゴリズムを構築することを目指す。

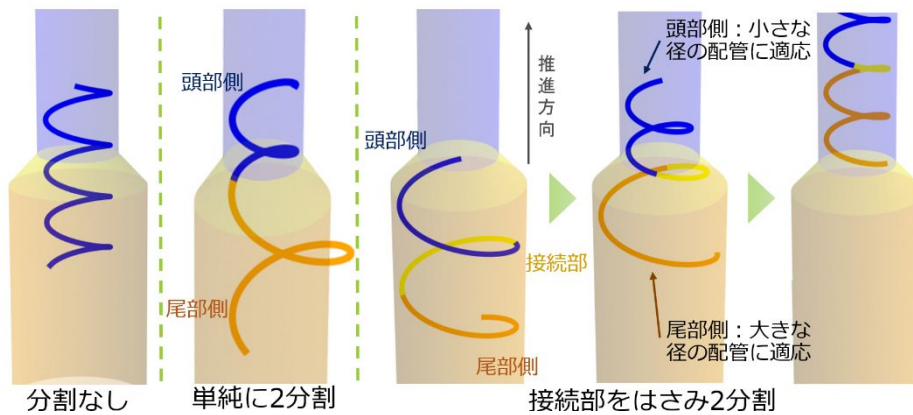
3. 研究の方法

本研究ではアドミッタンス制御に注目し、これをヘビ型ロボットの体幹に局所的に実装することによって、接触状態による頻繁な切り替わりを防ぎ、適切に環境を押し返すことができるようになると考えた。アドミッタンス制御とは、ロボットマニピュレータの手先部に加わる力を測定してロボットの関節目標値を求める制御手法であり、これによりロボットの手先の位置を柔らかく変化させるものである。研究代表者の試作しているロボット全周の圧力を測定することができるヘビ型ロボットにおいては、ロボット体幹の圧力を直接測定できるため、アドミッタンス制御を実装することができる。本研究では全周の圧力を測定できるヘビ型ロボットを用いて、アドミッタンス制御を応用した形状ベースコンプライアンス制御を適用することで、径の変化する配管に適応してヘビ型ロボットを推進させた。

(1) 形状ベースコンプライアンス制御: 形状ベースコンプライアンス制御 (Shape-based compliance control (SBC), 以下 SBC とする) は、アドミッタンス制御をベースとした制御である。ヘビ型ロボットの形状パラメータに対してアドミッタンス制御を行うことで SBC が実現される。SBC の数式とブロック線図は以下のように表される。



(2) ヘビ型ロボット形状の分割: ヘビ型ロボットの頭部側と尾部側で形状を分割する際、頭部側の形状と尾部側の形状を滑らかかつ螺旋の中心軸を一致させるように連結する必要がある。そこで、下図に示すように、複数の螺旋形状を連結して、滑らかかつ螺旋の中心軸を一致させるようにした。



まず、ヘビ型ロボットの形状を頭部側と尾部側で単純に分割すると、図の左側で示すように、頭部側と尾部側で螺旋の中心軸がずれてしまい径の変化する配管を推進するにあたって不適切な形状になってしまう。そのため、ヘビ型ロボットの頭部側と尾部側で形状を分割する際、中心軸を一致させるように連結することが必要である。そこで、ヘビ型ロボットの頭部側と尾部側を接続するための接続部を導入する。ヘビ型ロボットの頭部側、接続部、尾部側に色分けして表示したものを図の右側に示す。なお、接続部の形状を決定するパラメータは幾何学的に求めることができる。

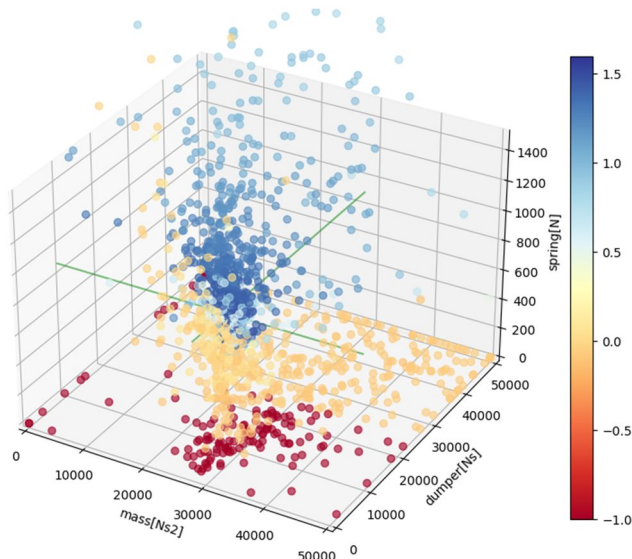
(3) 粒子群最適化 (PSO) を用いた SBC パラメータの探索: 粒子群最適化を用いて、SBC の応答を調整するパラメータである慣性、粘性、弾性のより良い値を求めた。粒子群最適化には、scikit-opt というライブラリーを用いた。粒子群最適化における目的関数として、本研究では、次式を最大化するように設定した。これは、ヘビ型ロボットが配管内を螺旋捻転運動で移動する際の移動速度を、移動に必要であったトルクの積算値で除したものになっている。つまり、移動

速度が早く、かつ、トルクの積算値が小さいほど、効率よく推進できていて評価が高いとみなす。

シミュレータ内に構築したヘビ型ロボットを用いてパラメータの探索を行った。探索結果の一

$$f(X) = \frac{V}{\sum_{i=1}^{N-1} \int_0^T T_i(t) dt}$$

例を以下に示す。下図は、慣性、粘性、弾性の3つのパラメータを軸として、その評価値について色を付けてプロットしたものである。青くなるほど評価が良く、赤くなるほど評価が悪い。青色のプロットがあるところに集中して集まっていることが分かる。最適化なパラメータから、少しでも弾性の値が小さくなると黄色に変化しており、ヘビ型ロボットが配管に突っ張るぎりぎ



りの力で推進できるパラメータを探索できていると考えられる。なお、実機に適用するパラメータとしては、安全マージンを考慮して、評価値の高い青色のパラメータの中から、多少のパラメータの前後があっても評価値が急に悪くならないものを選択することとした。

(4) 実機実験： 本研究に用いるヘビ型ロボットと実験環境を下図に示す。

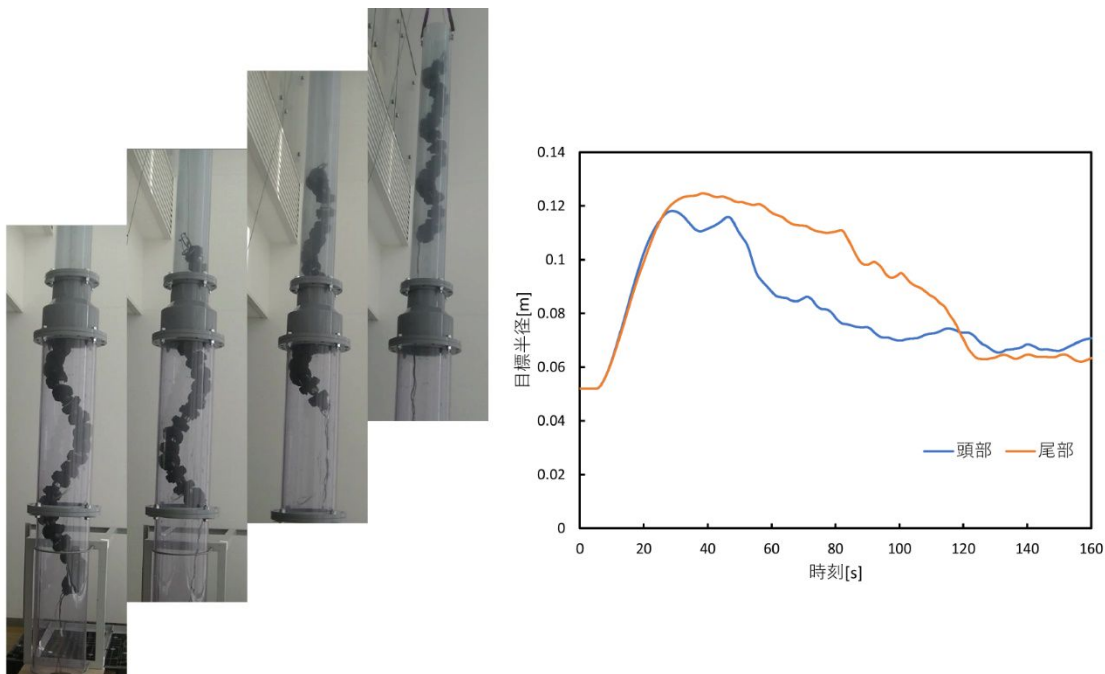


ヘビ型ロボットを構成するリンクの長さは0.09mであり、胴体の直径は238mmである。実機のヘビ型ロボットの場合もシミュレータ内のヘビ型ロボットと同様に、関節数は20個で、ピッチ軸とヨー軸を交互に連結して構築されている。先頭から7関節を頭部、その後の4関節を接続部、残りの9関節を尾部としている。関節を駆動するサーボモータにはROBOTIS社製Dynamixel MX-106を採用している。また、実機の各リンクには全周の圧力を測定するためにCoP (Center of Pressure) センサが実装されている。さらに、配管と適切に接触して摩擦力を得るために、CoPセンサの上から、すきまテープを2周巻きつけている。実験において、操縦者は、ジョイスティックコントローラによって制御用PCに特定の入力を行い、入力された値をPC内のROS (Robot Operating System)上で処理し、2関節ごとに配置されているマイクロコントローラ(SEED-MS1A)とPCが通信している。また、SEED-MS1AがDynamixelと通信している。Dynamixelとの通信により、関節のPID制御をする際の目標角度を指定したり、関節駆動の際の電流値を取得したり

することができる。また、CoP センサの値の取得についても SEED-MS1A を介して通信することにより測定値を得ている。また、ヘビ型ロボットは尻尾部分に接続されたケーブルにより、有線で電源供給されている。実験において、ヘビ型ロボットが移動する環境は、内径 200mm の配管と内径 300mm の配管とを、インクリーザという部材を用いて接続することで構成されている。初期状態から、インクリーザを超えて、違う径の配管へ移動していく際に、提案アルゴリズムで適切に移動することが出来るかどうかを検証する。

4. 研究成果

検証実験において、内径 200mm の配管から移動をはじめて、内径 300mm の配管へ適応する場合には、提案アルゴリズムにより特に問題なく径の変化に適応して配管内を移動できることが確認できた。しかしながら、内径 300mm の配管から移動をはじめて、内径 200mm の配管へ適応する場合には、接続部がインクリーザ部に引っかかって、これを乗り越えることが出来ずに、移動を継続することができなかった。これは、接続部は形状ベースコンプライアンス制御の適用対象外であるのが原因であった。そこで、接続部の CoP センサで大きな圧力が測定されたとき、それも加味して尾部の形状を変化するようにアルゴリズムを改良した。これにより、接続部が引っかかって負荷が作用したときに、尾部の螺旋形状の目標径を小さくすることで、間接的に接続部の径を小さくしてインクリーザを乗り越えることができるようになった。実験によりヘビ型ロボットが径のちがう配管を乗り越えている様子を下図の左側に示す。また、このときの頭部と尾部の目標半径の変化の様子を下図の右側に示す。目標半径が配管径によって変化していることが分かり、提案アルゴリズムの有効性が示された。



以上で詳細に説明したものは、本研究で主に取り組んだ、径の違う配管に対してヘビ型ロボットが適応する問題であった。これに限らず、さらに、本研究においては、ヘビ型ロボットを適用する際の特殊な環境や条件として、高所からの落下する際の衝撃力の分析、密集配管での運動生成、柔らかい床の上を移動する際の CPG パラメータの設定に関する研究も行った。これらの研究成果については、学会などで発表を行った。

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 2件）

1. 著者名 Tamura Hajime, Kamegawa Tetsushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Parameter search of a CPG network using a genetic algorithm for a snake robot with tactile sensors moving on a soft floor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	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） 10.3389/frobot.2023.1138019	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 Wang Yongdong, Kamegawa Tetsushi	4. 巻 22
2. 論文標題 Realization of Crowded Pipes Climbing Locomotion of Snake Robot Using Hybrid Force?Position Control Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	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） 10.3390/s22229016	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 Wang Yongdong, Kamegawa Tetsushi, Matsuda Eriko, Gofuku Akio	4. 巻 36
2. 論文標題 Motion planning of a snake robot that moves in crowded pipes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 781 ~ 793
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2022.2095225	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20件（うち招待講演 0件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yongdong Wang, Tetsushi Kamegawa and Akio Gofuku
2. 発表標題 Study on propulsion of a snake robot with torque propagation based on modified curvature derivatives
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yongdong Wang, Yuya Shimizu, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku
2. 発表標題 Joint States Feedback Adapt Control for Snake Robots That Move on Random Poles Environments
3. 学会等名 Proceedings of the Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuya Shimizu, Yuina Kadowaki, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku
2. 発表標題 Experiment and Simulation Verification of Damage to a Snake Robot Falling from a Height
3. 学会等名 Proceedings of the Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuina Kadowaki, Yuya Shimizu, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku
2. 発表標題 Study and Experimental Verification of the Landing Posture of a Falling Snake Robot
3. 学会等名 Proceedings of the Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾 頼, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 分岐配管推進時におけるヘビ型ロボットの曲螺旋捻転運動方向の補正
3. 学会等名 第23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(SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇津見 圭亮, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 ヘビ型ロボットにおけるPSOを用いたSBCパラメータの最適化
3. 学会等名 ヘビ型ロボットにおけるPSOを用いたSBCパラメータの最適化
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 優椰, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 ヘビ型ロボットが自由落下する際の地面との衝突のシミュレーション
3. 学会等名 第23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(SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田 祐基, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 拡張カルマンフィルタを用いたヘビ型ロボットの歩容パラメータの推定と関節の可動範囲を考慮した配管内移動
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野 大輝, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 径の変化する配管における形状ベースコンプライアンス制御と単純形状の連結によるヘビ型ロボットの環境適応
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'22)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Yongdong Wang, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku
2 . 発表標題 Hybrid Force-position Control Method for a Snake Robot Climbing in Crowded Pipes
3 . 学会等名 Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Hajime Tamura, Tetsushi Kamegawa, Yongdong Wang, Taiga Teshima, Sota Nakano, Yuki Tada, Daiki Nakano, Yuichi Sasaki, Taiga Sekito, Yuya Shimizu, Keisuke Utsumi, Rai Nagao, Mizuki Semba
2 . 発表標題 Development of a snake robot manipulator and image processing application for the World Robot Summit 2020 Disaster Robotics Category: Plant Disaster Prevention Challenge
3 . 学会等名 Proceedings of the Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Yuki Tada, Tetsushi Kamegawa and Akio Gofuku
2 . 発表標題 Estimating Gait Parameters of a Snake Robot Using an Extended Kalman Filter for Moving in a Pipe
3 . 学会等名 The 15th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems 2021 and The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Daiki Nakano, Tetsushi Kamegawa, Toru Kishutani and Akio Gofuku
2 . 発表標題 Shape-Based Compliance Control for a Snake Robot Moving in a Pipe with Different Diameter
3 . 学会等名 The 15th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems 2021 and The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 多田 祐基, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 拡張カルマンフィルタを用いたヘビ型ロボットの歩容パラメータの推定と配管内移動
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI ' 21)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野 大輝, 亀川 哲志, 紀洲谷 暢, 五福 明夫
2. 発表標題 径の変化する配管における形状ベースコンプライアンス制御を用いたヘビ型ロボットの環境適応
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI ' 21)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久戸瀬 広修, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 螺旋捻転運動で配管に進入するためのヘビ型ロボットの移動形態の推移
3. 学会等名 螺旋捻転運動で配管に進入するためのヘビ型ロボットの移動形態の推移
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 WANG Yongdong, 亀川 哲志, 松田 絵梨子, 五福 明夫
2. 発表標題 ヘビ型ロボットによる密集配管移動手法の提案と実証
3. 学会等名 第21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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村 玄, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 CPGネットワークを導入したヘビ型ロボットによるサイドワインディングの生成
3. 学会等名 第21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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 紀洲谷 暢, 中野 大輝, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 ヘビ型ロボットにおける活性化ウィンドウを用いた局所的形状生成
3. 学会等名 第21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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 能勢 瑛士, 亀川 哲志, 五福 明夫
2. 発表標題 螺旋捻転で移動するヘビ型ロボットの重力方向を考慮した先頭リンク運動計画
3. 学会等名 第21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(SI2020)
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

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