

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04403

研究課題名（和文）柔軟関節を有する狭隘空間探査モジュールロボットの開発

研究課題名（英文）Development of Narrow Space Exploration Modular Robot using Soft Joint

研究代表者

内田 敬久（Uchida, Yoshihisa）

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：20367626

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、柔軟関節を有する狭隘空間探査モジュールロボットの開発を目的として研究を行った。ジャミンググリッパと双腕から構成される柔軟関節により自動脱着、協調移動、物体把持を実現した。柔軟関節を有するモジュールロボットはこれまでの専用ロボットを超える移動性能を持つと共に探査性能を持ち合わせることに成功した。シミュレーション及び実機により基本評価を行い、データを蓄積できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔軟関節を有する狭隘空間探査モジュールロボットの提案は、探査ロボットの研究分野での新しいアプローチであり専用ロボットを超える移動性能の可能性を秘めている。さらにその重要な要素となる柔軟関節は、ソフトロボティクスの分野の新たな応用を生むものであると考える。このロボットの実現は、現在の日本における重要な課題である老朽化した社会インフラの検査や補修・交換に大きく貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a new type of modular narrow space exploration robot with soft joints is developed. The developed soft joint consisting of two arms with jamming grippers attached to their tips realized automatic attachment/detachment, coordinated movement, and object grasping. The modular robots with the soft joints have achieved locomotion and search performance that surpass conventional dedicated robots. We have evaluated the robot through simulations and demonstration experiments, and have accumulated basic data.

研究分野：ロボティクス

キーワード：モジュールロボット 探査ロボット 自動脱着 柔軟関節 ジャミング転移

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、地震や豪雨など自然災害が毎年のように繰り返し発生し多くの人命が失われている。建物の倒壊時、狭隘空間に閉じ込められた要救助者の救出には、要救助者の位置や怪我の状態、倒壊した建物の状況の把握が必要である。また、戦後整備された社会インフラの上下水道管などは老朽化が進んでいる。老朽化した管が漏れや破裂などに発展すると多大な被害や不便を強いることとなるため、検査や補修・交換が必要である。このように狭隘空間を移動可能な探査ロボットの開発は現在の日本における重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、柔軟関節を有する狭隘空間探査モジュールロボットの開発を目的とする。配管のような狭隘空間を探査するため、形態の変更ができるモジュールロボットに注目し、モジュールが分離と接続を繰り返すことで専用ロボットを超える移動性能を持つロボットを開発する。また、これまでのロボットのような硬いロボットではなく、モジュールには柔らかい素材を用いた柔軟関節を搭載し、ロボットの柔軟性を高め狭く屈曲した空間での移動を可能とする。そこで本研究では、分離と接続を繰り返す新しい移動方法と柔軟関節による狭隘空間適応性を確立することで、配管を対象とした探査ロボットを実現する。

3. 研究の方法

本研究では、柔軟関節を有するモジュール型狭隘空間探査ロボットの試作を達成するために「柔軟関節を有する小型モジュールの設計製作」、「分離接続のためのセンシングシステムの設計製作」、「形態変更を伴う移動方法の提案」の3つの重点項目を置き研究を進める。

(1)柔軟関節を有する小型モジュールの設計製作

柔軟関節機構の設計製作、アーム及びハンドの設計製作

(2)分離接続のためのセンシングシステムの設計製作

トルクによる接触力・把持力の推定、カメラとIMUによる位置・姿勢センシング、音源推定

(3)形態変更を伴う移動方法の提案

制御システムの設計、分離時の単一モジュールの移動制御、接続時のモジュールの連動制御

(4)研究総括

4. 研究成果

(1)柔軟関節を有する小型モジュールの設計製作

柔軟関節を有する小型モジュールの設計において、接続機能を持つモジュール柔軟関節部分の設計が開発の最重要課題となる。求められる要件は、接触対象物の形状に合わせて変形すること、関節としての強度をもつこと、制御により硬さを制御することである。そこで、ジャミング転移を用いる。ジャミング転移とは、風船のようなゴム状の袋に粉体を充填し、その内部の空気を制御することで、加圧時は粉体が空間を自由に移動できるため柔らかく、減圧時は粉体同士の摩擦により固く剛性を変化させることが可能である。一般にジャミンググリッパは形状の異なる軽量物を掴むために用いられており、これを本研究では接続機構として応用した。

設計製作した柔軟関節を有するモジュールロボットの写真を図1に示す。接続機構として使用するため、ジャミンググリッパを先端に搭載した双腕型とし、アーム部分は3自由度で三次元的に任意の位置での接続に対応し自由度を高めている。ジャミンググリッパを2つ用いて対象物を挟み込み接続する形状となっている。単一のグリッパより把持力を向上させることで柔軟関節に必要な把持力を実現した。また、粉体材料にプラスチック樹脂を用いることで重力による内部粉体の偏りを静電気力により軽減すること、グリッパ内部の構造を多層型にすることでジャミング転移の問題点でもある粉体の偏りによる把持力の低下を抑える機構も設計製作し、その有効性を確認した。

また、モジュールの前面に取り付けられた双腕型柔軟関節は、モジュール単体移動時には移動方向を決めるガイドとしての役割を持ち、接続時には関節自体を接続機構の一部とすることで

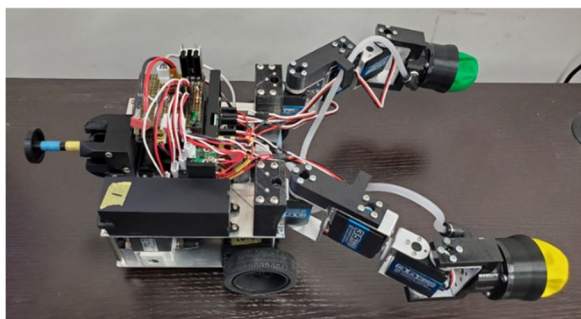


図1 モジュールロボット



図2 グリッパによる把持例

柔軟性により反力を低減し、接続移動時には関節と接続機構が同一となり小型化に寄与するところは、特筆すべき点である。さらに作業用のハンドへの併用も視野に入れており、図2に例を示すように様々な形状の対象物の把持を実現した。採用したジャミンググリッパは、柔軟関節としてだけでなく探査に必要なサンプル採取として微小片や薄板の把持も実現した。

(2)分離接続のためのセンシングシステムの設計製作

分離接続のためのセンシングシステムの設計製作において、試作した圧力センサと真空ポンプによる把持力制御システムを実装した。図3は代表的なグリッパ圧力に対する把持力の特性を示したものである。また、モータに流れる電流を測定することでトルクを推定しアーム先端のジャミンググリッパとアームのモータの負荷を計測するシステムを構築した。これらを小型化のうでロボットに実装した。把持力制御からの信号を用いて逆運動学によりグリッパ位置から関節角を導出し各関節のローカルフィードバック制御とアーム全体のフィードフォワード制御を実現した。

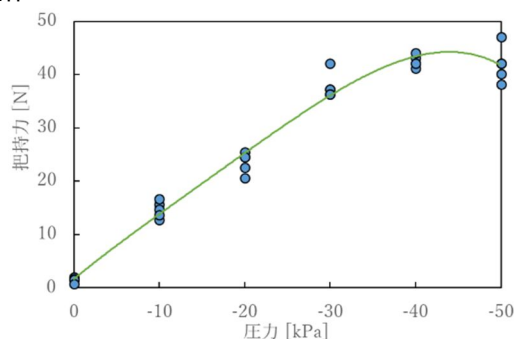


図3 グリッパ圧力と把持力の関係

外界認識システムにおいて、モジュールに対して着脱式の3自由度のマニピュレータの先端にステレオカメラを搭載した。マニピュレータとすることで狭隘空間に対応し、画像情報から接続対象のロボットを機械学習により認識し、相対位置及び姿勢の推定を行うことで自動脱着を実現した。また、ロボットのみならず、撮影した画像から把持対象物やひび割れなどの検知も実現した。

試作として、カメラと慣性測定装置 (IMU) からの3次元位置情報を用いたロボットの自己位置推定と他のモジュールや障害物、把持対象物などの位置や形状情報を取得するシステムを構築した。さらに狭隘空間では、カメラによる視覚のみでは、十分な外界情報を得られないことが考えられるため、追加の機能としてモジュールロボット用小型音源方向・種類推定装置を開発した。モジュール搭載を考慮し単一モジュールに対して2つのマイクロフォンのみを使用した簡易システムとした。音の周波数と位相をIIRデジタルフィルタ、FFT解析、連続ウェーブレット変換により分別し強度差と時間差から複数音源の方向推定、機械学習のサポートベクトルマシンによる音の種類判別を実現した。

(3)形態変更を伴う移動方法の提案

形態変更を伴う移動方法の設計について、センシングシステムと関節、アームなどの様々アクチュエータとの連携が重要である。そこでモジュールロボットの制御システム構築にはROS (Robot Operating System) を用いた。ROSを用いることでモジュールロボットでは必要なセンサ・アクチュエータの電気・機械要素の追加・削除、連携を実現した。

単一モジュールロボットの移動機構は対向二輪型とし二輪の独立駆動による移動制御を実現した。さらに図4に示すように柔軟関節の双腕を用いることで、車輪のみでは登れない高さに対しても踏破を可能とし、3次元的移動能力を付与することができた。また、これらの移動を実現するため、センサシステムからの位置等情報を取り込み、アームの制御、気圧センサを用いたグリッパの制御を実装した。

次に2台のモジュールの協調動作による段差移動方法を提案し評価した。図4に協調動作による段差踏破の例を示す。協調動作では、狭隘空間を想定しロボットの前面サイズを維持した状態で、接続用として搭載しているアームを用いて、モジュールを押し出したり、引き上げたりすることで、単体モジュールでは実現できなかった高さの段差の踏破を実現した。

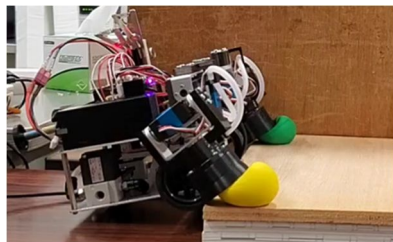


図4 単一動作例

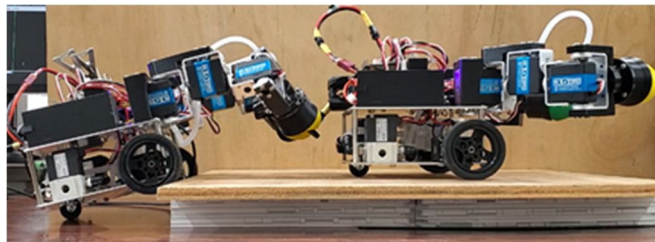


図5 協調動作例

(4)研究総括

研究期間全体を通じた研究総括として、柔軟関節を有する小型モジュールの設計製作を行い、ジャミンググリッパと双腕から構成される柔軟関節による自動脱着、協調移動、物体把持を実現した。柔軟関節を有するモジュールロボットはこれまでの専用ロボットを超える移動性能を持つと共に探査性能を持ち合わせることに成功した。シミュレーション及び実機により基本評価を行い、データを蓄積できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小林聖英, 内田敬久
2. 発表標題 からくり機構及び電子制御による無人搬送車の消費電力量の比較
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神林恭平, 白井雄太, 新宮瑞樹, 内田敬久
2. 発表標題 草刈ロボットにおける画像認識を用いた衝突回避性能の評価
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木翔也, 平畑満騎, 吉兼巧, 内田敬久
2. 発表標題 閉リンク機構を有したロボットハンドの提案
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林聖英, 松下尚平, 吉田悠乃, 内田敬久
2. 発表標題 カム操舵機構を用いたからくりによる無人搬送車の開発
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林聖英, 高橋瞳和, 内田敬久
2. 発表標題 クランク機構による操舵機構を用いたからくりによる無人搬送車の開発
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東優, 内田敬久
2. 発表標題 ジャミング転移を用いたモジュールロボット用粉体多層型接続機構の提案
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木翔也, 後藤健汰, 内田敬久
2. 発表標題 モジュールロボット用小型音源方向推定装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東優, 岡田尊信, 渡邊亜久里, 内田敬久
2. 発表標題 ジャミング転移を用いた二指型グリッパの開発
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤健汰, 木島啓稀, 臼田みづき, 内田敬久
2. 発表標題 2つのマイクロフォンを使用したFFT解析による複数音源方向推定装置の性能評価
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東優, 内田敬久
2. 発表標題 受動関節を有する対向2輪型モジュールロボットの移動制御方法の提案
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Goto, Hiroki Kijima, Mizuki Usuda, Yoshihisa Uchida
2. 発表標題 Development of Portable Sound Source Direction Estimation Device
3. 学会等名 Proceeding of 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東優, 山田祐己, 内田敬久
2. 発表標題 自動接続モジュールロボットの鉤爪型接続機構の提案
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2021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
---------	---------