

# 迅速な狭隘空間探査を実現する受動変形型細径スカラロボット —第2報 軽量長尺かつ挿入時の座屈を防ぐ復元力分布をもつ 多関節機構の実機具現化—

## Passive Deformable Slim SCARA Robot for Rapid Search in Narrow Spaces

- 2nd Report: Development and Basic Experimentation of a Lightweight, Long Articulated Mechanism with a Restoring Force Distribution to Prevent Buckling during Insertion -

○学 渡邊 悠人 正 渡辺 将広 正 阿部 一樹  
正 多田隈 建二郎 正 田所 諭 (東北大学)

Yuto WATANABE, Masahiro WATANABE, Kazuki ABE,  
Kenjiro TADAKUMA, Satoshi TADOKORO, Tohoku University

Our research group has been developing a flexible and buckling-preventing SCARA robot as a confined-space exploration robot that can be mounted on a quadruped robot. However, the constant restoring torque joint used in the proposed mechanism has a non-functional zone where no restoring torque is generated near the linear state of the joint, which is a factor that reduces stability. Therefore, in this study, we investigated the improvement of the mechanism and its implementation in a quadruped robot. To remove the non-functional zone in the joint mechanism, a joint mechanism using magnetic springs was implemented in an actual machine, and the partial removal of the non-functional zone and the improvement of stability and convergence of joint motion were confirmed through experiments on the actual machine. In addition, we selected composite materials for weight reduction and discussed and designed a reel mechanism to accommodate the proposed mechanism in a compact size.

**Key Words:** Search and rescue, Mechanism, SCARA

### 1. 緒言

国際共同研究開発プロジェクト SYNERGISE では、UAV や 4脚ロボット、その他先端 IT 技術を統合した災害現場環境計測ツールキットの開発を目指している[1]。当研究グループでは、災害現場において高いモビリティを有する4脚ロボットへ搭載可能な狭隘空間探査ロボットを開発し、上記のツールキットとしての探査範囲の更なる拡大を目指す(Fig.1)。

従来の狭隘空間探査ロボットとして、様々な方式の索状型、へび型ロボットが挙げられるが[2][3][4]、機構サイズや重量、駆動方式の観点から脚ロボットへの搭載が困難である。

これまで当研究グループでは、4脚ロボットへ搭載可能な狭隘空間探査ロボットとして、小型軽量、細径長尺、柔軟構造、座屈の防止を両立する指数的な復元性分布を有する水平多関節機構の原理創案、実機具現化を行ってきた[5](Fig.2)。

本稿では、はじめに機構のコンセプト、4脚ロボットへの搭載に向けた諸課題について述べる。次に課題に対する具体的な解決案を示す。最後に実機実験について説明する。



Fig.1 Concept of SYNERGISE project[1]

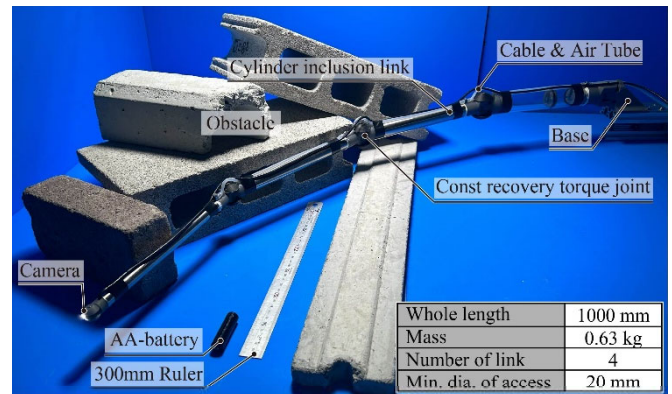


Fig.2 Prototype of the proposed mechanism

### 2. 指数的な復元性分布を有する水平多関節機構

#### 2.1 提案機構コンセプト

提案機構のコンセプト図を Fig.3 に示す。狭隘空間探査が可能なスコープ型の柔軟なロボットは狭隘空間へ押し込まれた際に、環境との摺動抵抗により送り出しを行うスコープの根元部分で座屈する恐れがある(Fig.3(a))。座屈が生じた際には、一度スコープを引き戻し再度環境へ押し込むことで座屈の解消が望めるが探査にかかる時間が増加してしまう懸念がある。

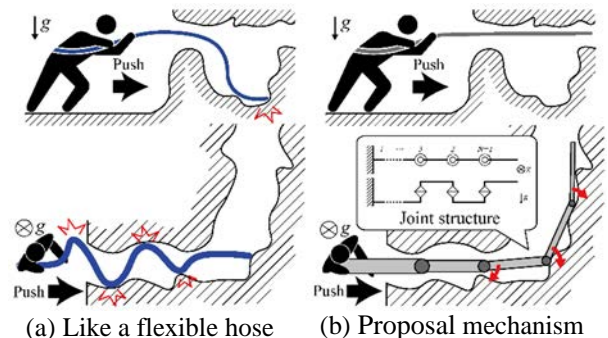


Fig.3 Concept of the proposed mechanism

提案機構は先端から根本にかけて指数的に増加する関節の復元トルクにより、環境と接触した箇所のみを屈曲させることができるため、座屈の防止と柔軟な構造の両立が望める (Fig.3(b)).

### 2.2 4脚ロボットへの搭載に向けた諸課題

これまでの提案機構の実機具現化や性能評価実験より知っていた4脚ロボットへの搭載にかかる諸課題について説明する。

#### 2.2.1 定復元トルク関節の不機能帯

定復元トルク関節機構はワイヤとプーリにより構成されている。ワイヤは関節機構同士をつなぐリンク機構に内包した空気圧シリンダによって牽引されており、関節機構が回転した際にワイヤがプーリに巻き付くことで関節角度によらず一定の復元トルクが発生する。Fig.4に定復元トルク関節機構の関節角度に対する復元トルクの計測結果を示す。関節角度が0°の時のみ復元トルクが0となりそれ以外の箇所では一定の復元トルクが発生することが理想だが、実際は-10~10°の区間で復元トルクが発生せず機構が機能していない領域が存在することがわかった。この不機能帯があることにより、提案機構が環境と接触していない際に機構の姿勢が一意に定まらないため、機構の制御性や姿勢の安定性の低下が懸念される。

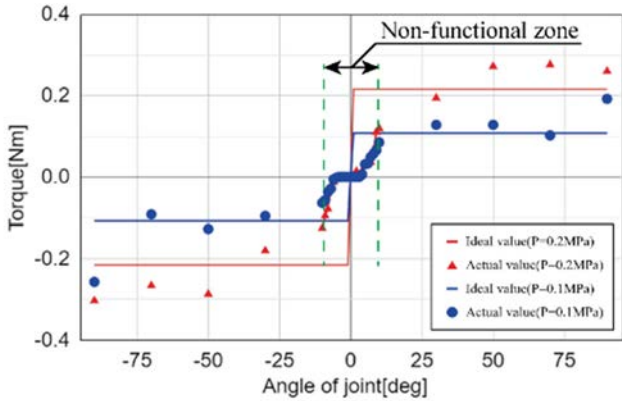


Fig.4 Torque measurement results

#### 2.2.2 4脚ロボットへの搭載性

本研究で提案する狭隘空間探索ロボットの4脚ロボットへの搭載を実現するために達成すべき項目として、以下の項目が挙げられる。

1. 更なる軽量化
2. 非探索時に小型に収納

1.により機構を伸展させた際のモーメントの増加を抑制することができるため、機構の更なる長尺化が望める。2.により、狭隘空間非探索時の4脚ロボットのモビリティの低下を防ぐことができる。

### 3. 移動体搭載のための実機具現化と検討

#### 3.1 磁気バネを活用した関節機構の実機具現化

磁気により駆動力を伝える磁気歯車や磁気カムについての研究がおこなわれている[6][7]。本研究で扱う関節機構の不機能帯の除去について、不機能帯の区間で磁気による駆動力を発生させることで不機能帯を除去することを図る。

Fig.5に実機具現化した磁気バネを活用した関節機構の概念図を示す。関節機構には磁石A(ネオジウム磁石(N40)、円柱型、Φ3.5x3(mm))、磁石B(ネオジウム磁石(N40)、円柱型、Φ3.5x6(mm))がそれぞれ2つずつの計4つ装着されており、磁石Bについては磁極方向にスライドする構成となっている。関節角度が0°近傍の際に磁石Bと磁石Aとが近づくことで吸引力が働き復元トルクが生成できる。関節角度が0°となると磁石Bがスライドし吸着しあうため関節機構角度の位置が

確実に定まる。スライドする磁石Bについて

また、関節機構が任意の角度から直線状態(0°)へ戻る時、定復元トルク関節の不機能帯により、関節角度θは直線状態へ収束せず定常偏差θ<sub>error</sub>が発生してしまう。関節が磁気バネを搭載することで、関節角度の定常偏差θ<sub>error</sub>を低減できるほか、収束にかかる時間も短縮できると考える。これらの収束性向上は提案機構をより多関節化した際に、姿勢の安定化や制御性の向上が望める。

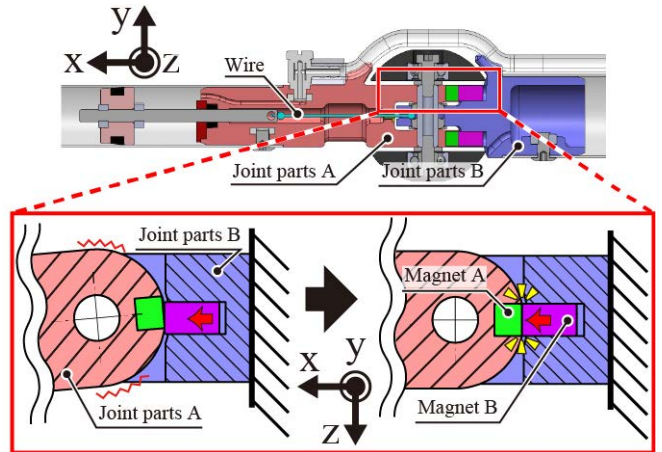


Fig.5 Concept of joint mechanism utilizing magnetic

#### 3.2 提案機構の軽量化、収納方法の検討

提案機構のような多関節機構をコンパクトに収納する方式として、重力方向と直行する回転軸を有したリールへ、機構をらせん状に巻きつける手法が挙げられる[8][9]。提案機構は水平多関節機構であるため、4脚ロボット上部に取り付けた重力方向に垂直なリールへらせん状に巻きつけることで収納を実現する。Fig.6に4脚ロボットへ搭載する提案機構と収納のためのリールCAD図を示す。リール機構はリール、リールガイドからなり、それぞれをモータにより駆動することで提案機構の伸展、戻し動作や4脚ロボットに対する提案機構の伸展方向の制御を行う。提案機構はらせん状に巻きつけられているため各リンクのレイヤーが重ならないよう、提案機構の重力方向へリンク軸のオフセットを設けている。

これまでの提案機構試作機では、リンクを構成するパイプ材として、パイプ内側の表面性状や入手性の観点から薄肉研

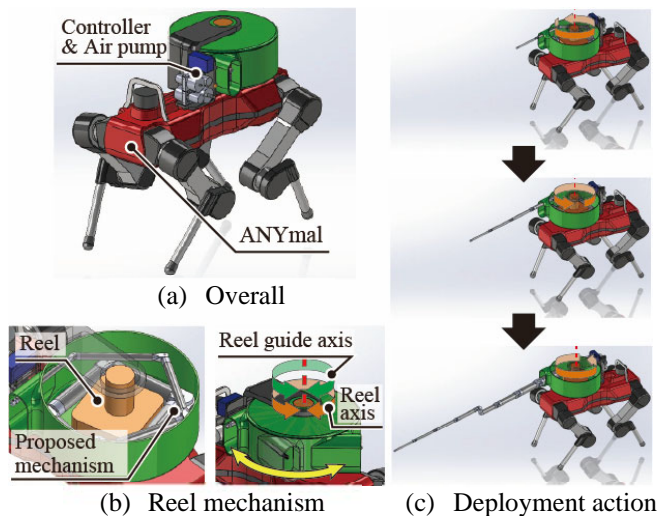


Fig.6 Integration of the proposed mechanism housed in the reel with ANYmal

磨ステンレスパイプ(SUS304)を用いてきた。パイプ材は提案機構全体重量の約 40%を占めているため、パイプ材により軽量な材料を選定することは機構の軽量化に効果的である。パイプ材の SUS304 と比較し高強度かつ低比重な材料として CFRP が挙げられる。しかし、提案機構ではパイプ内側面をシリンダとして利用するため表面性状や耐摩耗性の観点から CFRP パイプを用いることは現実的ではない。そこで CFRP パイプ表面に GFRP をコーティングした CFRP、GFRP の複合材をパイプ材として用いる。GFRP は CFRP に比べ低摩擦、耐摩耗性に優れているためシリンダとして問題なく運用できると考える。

#### 4. 実機実験

##### 4.1 磁気バネによる不機能帯への影響

3.1 節で述べた磁気バネを活用した定復元トルク関節機構について関節角度に対する復元トルクを計測することで、関節機構の不機能帯への影響を確認する。

<実験条件>

- 提案機構の先端関節 (Joint1) を対象
- 計測関節角度:  $-90\sim 90^\circ$  (関節可動域全域)
- 空気圧: 0.1, 0.2MPa

Fig.7 に計測結果を示す。横軸が関節角度、縦軸が復元トルクである。不機能帯以外の区間では磁気バネの有無に関わらず理論値に対しおおむね一定の復元トルクが発生している。不機能帯と定義する $-10\sim 10^\circ$ の区間については磁気バネを用いた場合、磁気バネを用いていない場合に比べ復元トルクが生成されていることが分かった。しかし、理論値を完全に補償する復元トルクを生成することはできていない。原因として、関節機構へ搭載可能なサイズの磁石の磁力不足が挙げられるため、磁石自体の性能向上やヨーク等を用いた有効な磁気回路の設計により磁力を向上させより大きい復元トルクを生成することができる可能性がある。

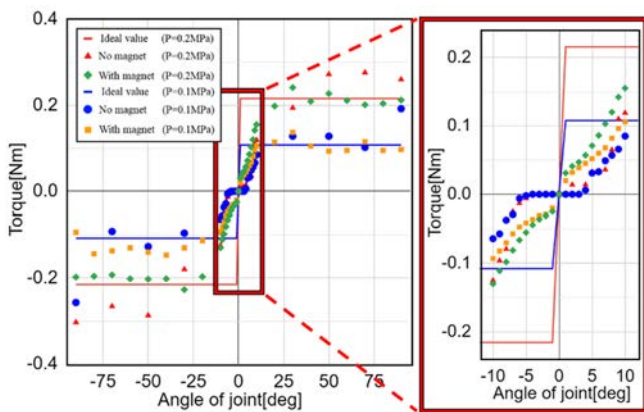


Fig.7 Effects of magnetic springs on non-functional zone

##### 4.2 直線状態への収束性の検証

磁気バネによる関節角度の収束性への影響を任意の角度から直線状態へ復帰する際の関節角度を計測することで評価を行う。計測機器には今後多関節化した際の動作計測も想定し、モーションキャプチャ (OptiTrack V120: Trio. Natural Point Inc., USA.)を用いる (Fig.8)。

<実験条件>

- 提案機構の先端関節 (Joint1) を対象
- 初期関節角度  $\theta_{initial}$ :  $\pm 50^\circ, \pm 90^\circ$
- 空気圧: 0.1MPa

Fig.9 に磁気バネを活用した場合とそうでない場合の関節角度の遷移を示す。結果から、磁気バネを活用しない場合、定常

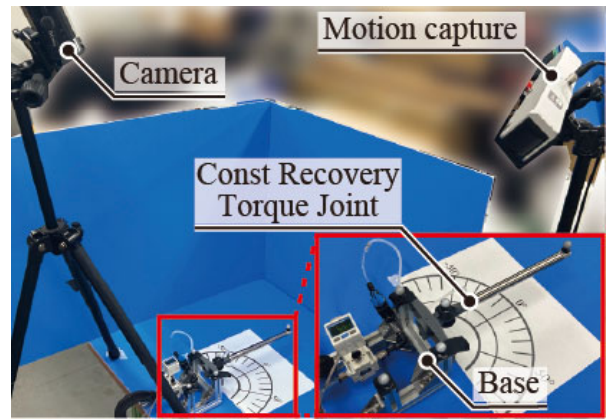
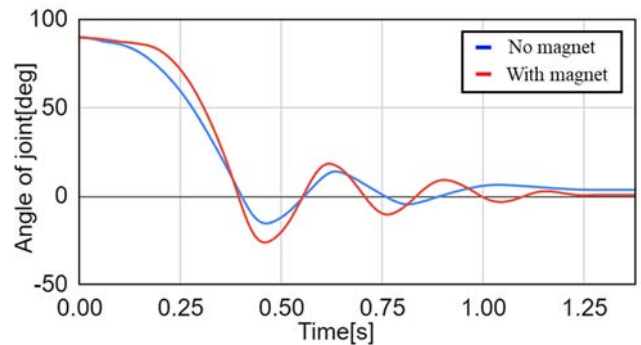
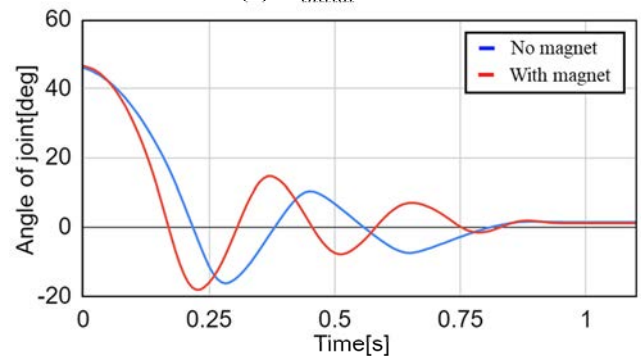


Fig.8 Measurement Environment

偏差  $\theta_{error}$  が約  $4^\circ$  発生しているほか、初期角度によって収束する角度が一意に定まっていなかったことがわかる。一方で磁気バネを活用した場合、 $\theta_{error}$  は約  $0.84^\circ$  と未活用の場合と比較し 21%減少しており、収束角度も初期角度によらずほぼ一定となっていることがわかる。また、収束する時間についても磁気バネにより短縮できることを確認した。



(a)  $\theta_{initial} = 90^\circ$



(b)  $\theta_{initial} = 50^\circ$

Fig.9 Effect of magnetic spring on joint angle

#### 5. 結言

本稿では、4脚ロボットへ搭載可能な狭隘空間探索ロボットとして当研究グループが開発する指数的な復元性分布を有する水平多関節機構について、コンセプトや移動体へ搭載するための諸課題を述べ、不機能帯除去のため磁気バネを活用した関節の実機具現化や、提案機構の軽量化、収納方法について検討し、実験により磁気バネによる関節機構の性能向上を示した。今後は、検討を行った提案機構の収納を行うリール機構の実機具現化を行う。

#### 参考文献

- [1] SYNERGISE Project <https://www.synergise-project.eu/> (Accessed '24/3/15)

- [2] T. Fujioka, G. Endo, K. Suzumori, and H. Nabae, "Proposal of tendondriven elastic telescopic arm and initial bending experiment," IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 017, p. 164-169.
- [3] A. Ishii, Y. Ambe, Y. Yamauchi, H. Ando, M. Konyo, K. Tadakuma, and S. Tadokoro, "Design and development of biaxial active nozzle with flexible flow channel for air floating active scope camera," IEEE/RSJ Int. conf, Intell. Robots Syst. (IROS), Oct. 2018, pp. 442-449.
- [4] Linga Srujan, Roy Binayak, Harry Asada, Daniela Rus, "An Optical External Localization System and Applications to Indoor Tracking", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 2008, pp.1127-1132.
- [5] 渡邊悠人, 高橋知也, 渡辺将広, 阿部一樹, 多田隈建二郎, 田所諭, "迅速な狭隘空間探査を実現する受動変形型細径スカラロボット", 第24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 (SI2023), pp. 1448-1452, 2023.
- [6] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jørgensen and O. Nielsen, Development of a High-Performance Magnetic Gear, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, pp. 764-770, 2005.
- [7] Toyoki Takazakura, Toshio Morita, and Toshihiko Sugiura "Numerical Analysis of Dynamics of Non-contact Driving Cam Using Permanent Magnets", Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, Vol. 23, pp. 62-67.
- [8] 渡辺祥広, 広瀬茂男, "原発の水中点検と補修を行う中性浮力型多関節アーム Neutra-I の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-M02, 2013
- [9] 横田開, 高橋 隆行, "低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-B12, 2023