

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05909

研究課題名(和文) 剛性可変機能を有する多関節マニピュレータ

研究課題名(英文) Multi-joint Manipulator with Variable Stiffness Mechanism

研究代表者

小金澤 鋼一 (Koganezawa, Koichi)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：10178246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究室でこれまで開発してきた多指多関節グリッパは、外乱の多く発生する場所や状況においても、安定した把持が可能であり、物体との非接触時でも自身の姿勢を安定させられる関節剛性調節機能を有していること、また、指部にセンサー等の電気部品を用いないことなどから、平成29年度においては、同大学海洋学部の坂上研究室で開発が進められている海中探査ロボットの作業用ハンドとして実装できるよう新たな設計改良を行い、コントローラを内装する水密容器ならびに動力伝達機構の開発を行い、一部基礎実験を行った。

研究成果の概要(英文)：In our previous studies, we have developed a multi-joint gripper (MJG) that has a function of controlling the stiffness of the joints by using the Differential Gear Mechanism (DGM) chain, which allows to grasp objects with no observing their physical information such as shape, weight, and softness. It also allows to be used in severe environments because of being no need of embedding any electric devices or sensors in the finger parts. In the study, we propose a waterproof design for installing it as a gripper for an underwater Remotely Operated Vehicle (ROV).

研究分野：ロボット工学

キーワード：多関節グリッパ 剛性可変 海底探査ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットは様々な場所で活躍をしている。中でも災害現場や水中など屋外で作業するロボットが多く研究されるようになってきている。それらのロボットには作業を行うためのロボットハンドが搭載されている。特に自然環境下、極限環境下で作業を行うロボットのハンドには未知の状況や予測しづらい外力に対応し、把持を行う能力を求められる。本研究の目的は自然環境下や極限環境下での動作を想定したエンドエフェクタとして、物体の形状に沿って巻き付く様に把持をする包み込み把持形式の多関節グリップ (Multi-joint gripper 以降MJGと称す) の開発である。包み込み把持形式のグリップの先駆けとして東京工業大学の広瀬らによる Soft Gripper (以降SG) 1)2)があり、広瀬らの研究を東北大学の吉田らは応用し水中で使用する試み3)を行っている。SGは多関節構造をしており、ワイヤとプーリを用いた機構である。しかし、SGの機構を用いると、関節剛性の可変が出来ない。自然環境下での作業を想定する場合、物体の柔らかさや状況に合わせた関節剛性の調整機能、物体と非接触時に安定して駆動することや、ロボットの姿勢によっては関節に自重が作用しながら安定に駆動することが求められる。従って、関節ごとに固有の屈曲トルクを出力できることが望ましい。

### 2. 研究の目的

本研究では次の項目を満たすべき条件とし、MJGの開発を行った。

(1) 物体と接触・非接触時における安定した駆動ができる。

(2) 関節剛性の調節ができる。

関節の剛性を調節して包み込み把持を行うロボットハンドの研究はいくつかあり4)5)、物体の把持に関節剛性の調整は有効であると考えられる。著者らは剛性可変機構 (Variable Stiffness Mechanism 以降VSM) と呼ばれる関節剛性の調節可能な機構を有したMJGを開発した。そして、把持性能の向上のためMJGを複数本用い、その1つをMJF (MultiJoint Finger) としたMJGを開発した。多指化することによって、ピンチング等の把持パターンを獲得できた6)-8)。

本研究では、MJGの環境適応性を活かし、同大学海洋学部の坂上研究室と共同研究を行い、坂上研究室で開発された海中探査ロボット (以降ROV) 9)にMJGを搭載し、水中で使用可能なMJGの開発を行った。

### 3. 研究の方法

本研究室で開発されたMJGをFig.1に示す。MJGは複数本のMJF (Fig.2)で構成され、それぞれ個別に制御される。MJFは差動歯車機構 (Differential gear mechanism 以下DGM)で

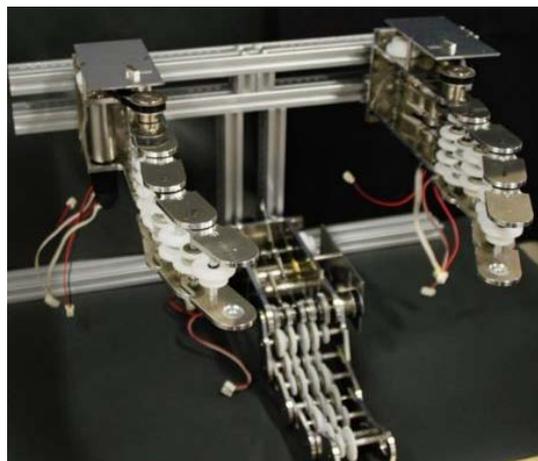


Fig.1 Experimental machine: Three fingers gripper; one finger has four joints

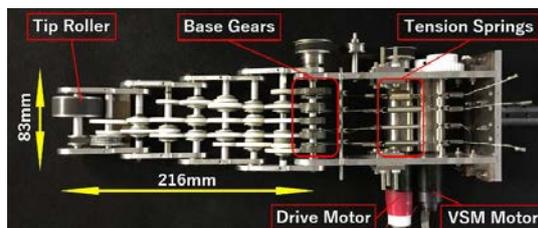


Fig.2 One finger has four joints

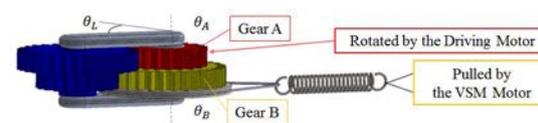


Fig.3 Differential gear mechanism

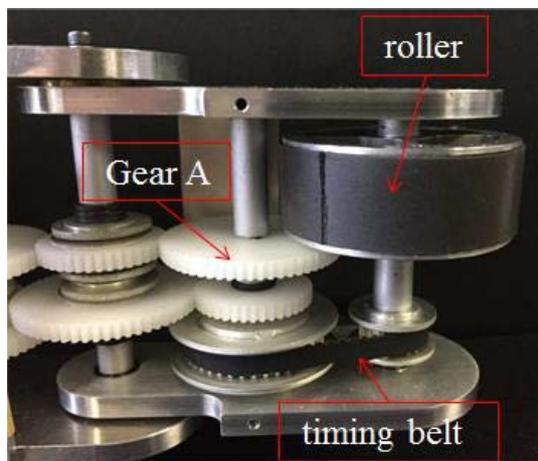


Fig.4 Tip roller mechanism

構成された4関節の指部と、それを制御する2つのモータを搭載したベース部で構成されている。ベース部に搭載されたモータは、1つは全ての関節を一斉に駆動させる Driving Motor で、もう一方は関節剛性を調節するための VSM Motor である。

MJFの指部に搭載されている機構であるDGMは2入力1出力の機構であり (Fig.3)、外界からの干渉と Driving Motorからの能動入力を融合させ出力するトランスミッタとして利用している。GearAはDriving Motorからトルクを与えられ各関節の屈曲伸展を行い、GearBはワイヤとプーリでバネに接続されており VSM Motor

でバネを牽引することによって張力を制御されている。それによりGearBの回転を拘束し関節剛性を得る。GearBの機構がVSMであり、現状のVSMは全関節一律に制御する。全ての関節がそれぞれに対応したDGMとVSMを持ち、それらが連続的に配置、連鎖駆動することによって指部の屈曲伸展を行っている。以降GearBをbase gear (BG) と呼称する。

また、指先の拡張機能として、先端ローラ機構 (Tip roller mechanism 以降 TRM) を取り付けた (Fig.4)。この機構は DGM の回転を利用し、MJG 先端にリンクの回転方向と同期して回転する軸に固定されたローラを配置することで離れた物体をピンチングした際に、物体を MJG の根本まで引き込み、ピンチングからの包み込み把持に移行するための機構である。このような把持物を引き込み根本まで引きよせる研究はいくつかあり (10)(11)有効であると考えられる。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 把持実験

MJF を 2 本使用した 2 指の MJG を用いて様々な形状の物体の把持実験を行った。実験結果を Fig.5 に示す。(a), (b), は各指の Driving Motor を同じ目標角度で設定し把持を行った。

(c), (d), は各指を個別に制御することによって MJG に対して小さい形状のものや複数の物体に対応して把持を行うことができた。MJG の指部にはセンサを用いておらず、簡単なフィードフォワード制御で包み込み把持を達成している。

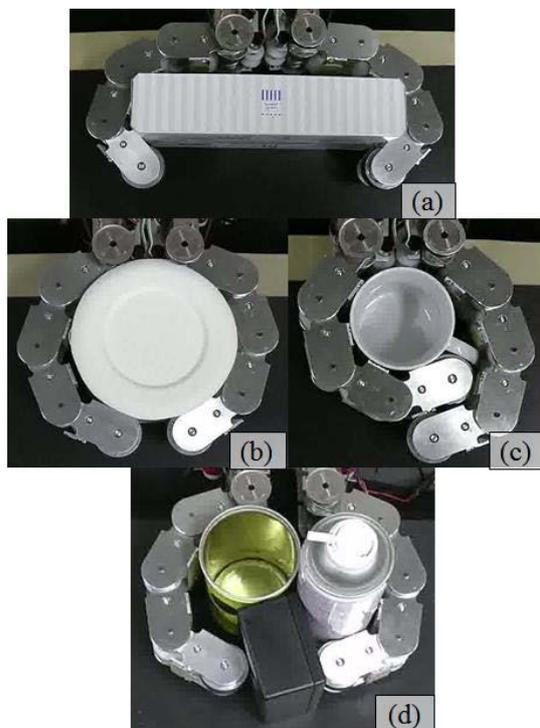


Fig.5 Grasping of various shape objects with two MJFs

##### 3.2 接触力と接触点の測定

各リンクに圧力センサを取り付け、2 指による挟み込むような形の包み込み把持を同一の制御で行い、各リンクの接触力と接触点の測定を行った。実際の MJG の駆動には、指部に一切センサを使用していない。MJG は、剛性可変機構のバネの並びによって挙動が異なるため、今回は二種類のバネの並びの Pattern A, B を用意し、実験を行った。リンクはベース部に最も近い根本を 1 とし、そこから先端にかけて 2~4 となっている。Pattern A は、MJG 先端バネ定数を高くし、Pattern B は先端から根本にかけて強くなるように配置し、片方の先端から見るとバネ定数の大きさが山なりになるように配置した。用意したバネ定数のパターンを表 1 に、実験の結果を、Pattern A を Fig.6 に、Pattern B を Fig.7 に示す。

Table 1. Pattern of spring modulus [N/mm]

Joint number	1st	2nd	3rd	4th
Pattern A	3.5	0.9	0.9	1.5
Pattern B	3.5	0.9	0.5	0.3

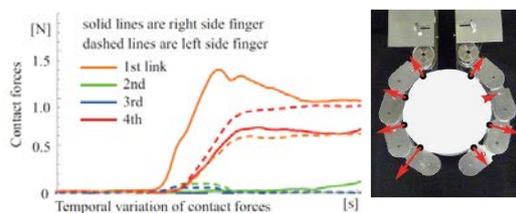


Fig.6 Pattern of spring modulus is A

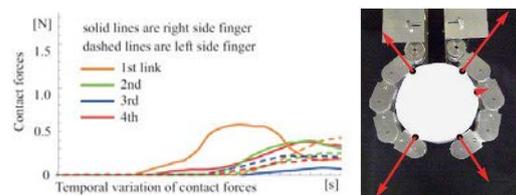


Fig.7 Pattern of spring modulus is B

##### 3.3 柔軟物の把持と把持物の引き寄せ

Table1 のパターンをそのまま引き継ぎ、物体を把持するときと考えられることである柔軟物の把持と遠方の物体の引き寄せを行った。実験開始前の状態を Fig.8 に、実験結果を Fig.9, Fig.10 に示す。実験結果より、Pattern A では柔軟物を潰してしまっているが、遠方の物体を引き寄せることができた。しかし、物体を根本まで引き寄せることはできず、ピンチングしている状態になってしまった。Pattern B では、柔軟物を潰さずに把持できているが、遠方の物体を引き寄せることができなかった。上記の結果を踏まえると、物体が遠方にあるときは Pattern A, そこから引き寄せて把持が完了間際になった時に Pattern B に切り替わることで、物体を引き寄せ、そこか

ら全点接触が行える。すなわち把持の状態によってバネ定数を切り替えることができれば、状況に応じた効率的な把持が可能であると考えられる。

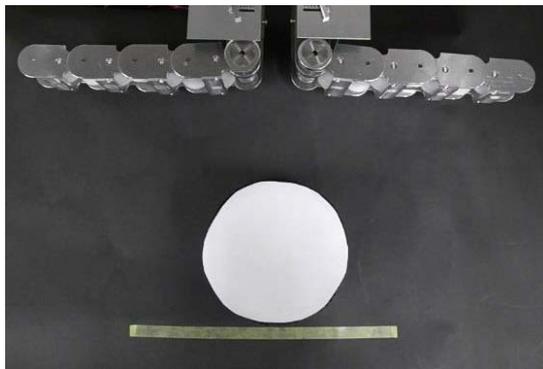


Fig.8 Initial state of grasping objects and MJF  
(Diameter and Weight of object: 125mm, 345g)

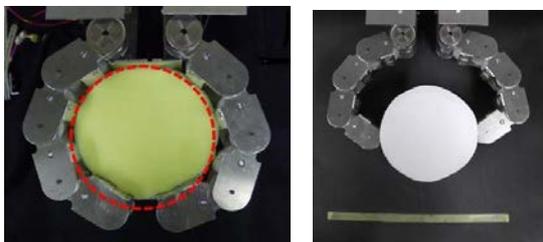


Fig.9 Result of grip test in the pattern A

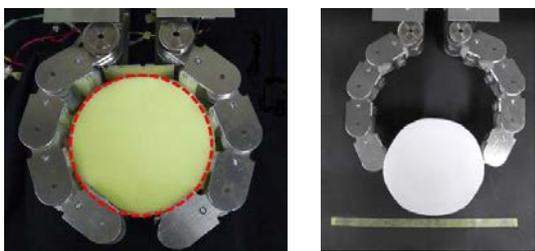


Fig.10 Result of grip test in the pattern B

#### 4.4 先端ローラ機構の有効性の検証

TRMにより物体のピンチングからの包み込み把持が行えるか実験を行った。実験の様子を Fig.11 に示す。実験では同一の制御で行っており、円柱と長方形の物体を根本までの引き込み、包み込み把持を行うことに成功した。実験により、TRM が物体のピンチングからの包み込み把持に対して有効であることが確認できた。そのことから、MJG の機能拡張として指部先端に着目することが有効であると考えられる。

#### 4.5 水中仕様の多関節グリッパの設計開発

これまでの研究により、本研究で開発された MJG は様々な環境下で有効に使用することが可能であることが示されている。しかし、現状では屋内での実験しか行われておらず、実際のフィールドでは実験が行われていない。

そこで、同大学海洋学部の坂上研究室で開発が進められている ROV に MJG を搭載し、水中での作業を行う事となった。

坂上研究室で開発された ROV を Fig.16 に、そ

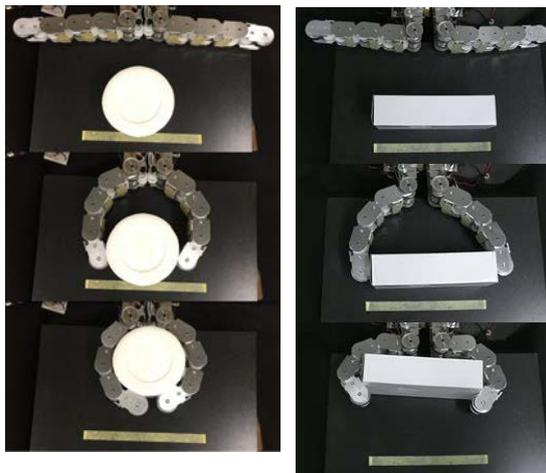


Fig.11 Test of the TRM for cylinder shape object and rectangular shape object

の概要を Table 2 に示す。ROV には複数のカメラが設置されており、海底の地形マッピングや遺跡の調査を行う。MJG 搭載した ROV の行う作業として物体の採集や操作、水流の速い場所において岩場に掴まり、自身を固定する事が想定されている。MJG の機能は、それらの作業を行うに辺り有効に作用すると考えられる。そのため、今までの MJG の機構を水中において使用可能にし、水中での動作を検証するために水中で使用可能な MJG を設計、開発する。設計した 3D モデルを Fig.12 に示す。水中仕様の MJG は把持を行う指部のみを水中に露出しベース部は箱に収め防水を行う。水中仕様の MJG の駆動機構と VSM を Fig.13 と Fig.14 に示す。駆動機構はベース内部に配置されたドライブモータを回転させ、ベースの壁面を隔ててトルクの伝達が行えるマグネットギアを用いてトルクの伝達を行う。VSM は水中に露出している BG とベース内部のバネとをつなぐワイヤの一部をシリンダに置き換え、シリンダ部がベースに開けた穴を直動する。浸水しないよう穴にシール加工を施し、ベースの水密性の向上を図った。

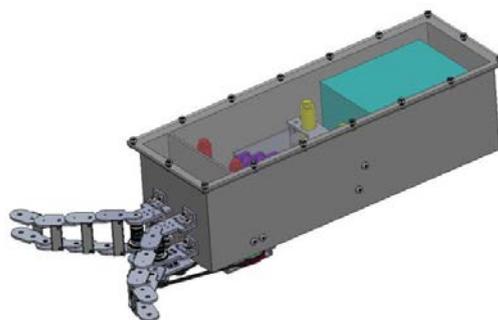


Fig.12 Watertight type MJG

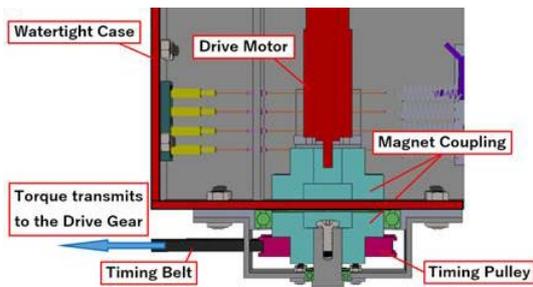


Fig.13 Torque transmission using magnet coupling

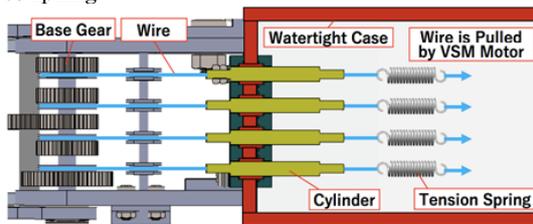


Fig.14 Watertight type VSM

#### 4.5 結言と今後の展望

本稿では開発した MJG を用いていくつかの実験を行いその把持性能について検証を行った。一連の実験により、MJG の機能について有効性を示し、そのことから実験環境を水中に移してもその性能を発揮することができると考えられ、水中仕様の MJG を開発している。今後は、簡単な水槽実験によって防水性の確認と動作実験を行う。実験後は海洋学部にて更に実験を行いさらなる検証を行う。最終的には、実際に ROV に搭載するモデルを開発し、フィールド実験を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 広瀬茂男: “生物機械工学やわらかいロボットの基本原理と応用”, 工業調査会, pp.193-199, 1978
- 2) S. Hirose, “Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator)”, Oxford University Press (1993).
- 3) 吉田和哉: “水中作業ロボット用多関節グリップの開発”, 日本機械学会論文集 (C編), 68巻675号 (2002).
- 4) Daniel Aukes, Barrett Heyneman, Vincent Duchaine and Mark R. Cutkosky, “Varying spring preload to select grasp strategies in an adaptive hand”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1373-1379 (2011).
- 5) Yasuyuki Hirano, Kensaku Akiyama, Ryuta Ozawa, “Design of Low-Cost and Easy-Assemblable Robotic Hands with Stiff and Elastic Gear Trains”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.864-870, 2016.
- 6) 野村壮一郎, 玉本拓巳, 小金澤鋼一: “多指多関節グリップの開発とその把持についての検証”, 第34回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 3A2-07 (2016).
- 7) S. Nomura, T. Tamamoto, K. Takeuchi and K. Koganezawa, Development of Multi Joint Gripper and

- Its Dexterous Grasping, 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), pp.1412-1417 (2017).
- 8) 竹内啓太, 野村壮一郎, 坂上憲光, 小金澤鋼一: “水中で駆動可能な多関節グリップの開発”, 第18回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), pp.1435-1440 (2017).
  - 9) Norimitsu Sakagami, Kouhei Ishimaru, Sadao Kawamura, Mizuho Shibata, Hiroyuki Onishi, Shigeo Murakami, Development of an Underwater Robotic Inspection System using Mechanical Contact, Journal of Field Robotics, Vol.30, Issue 4, pp.624-640 (2013).
  - 10) G. Endo, H. Yamada, S. Hirose, “Development of a Light Duty Arm with an Active-Fingertip Gripper for Handling Discoid Objects”, In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2600-2605 (2010).
  - 11) K. Tadakuma, R. Tadakuma, M. Higashimori, M. Kameko, “Robotic Finger Mechanism Equipped Omnidirectional Driving Roller with Two Active Rotational Axes”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] S. Nomura, T. Tamamoto, K. Takeuchi and K. Koganezawa, Development of Multi Joint Gripper and its Dexterous Grasping, 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), pp.1412-1417 (2017).

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 竹内啓太, 野村壮一郎, 坂上憲光, 小金澤鋼一: “水中で駆動可能な多関節グリップの開発”, 第18回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), pp.1435-1440, (2017).
- [2] 野村壮一郎, 玉本拓巳, 小金澤鋼一: “多指多関節グリップの開発とその把持についての検証”, 第34回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 3A2-07, (2016).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者 小金澤鋼一  
(Koganezawa Koichi)  
東海大学・工学部・教授  
研究者番号 10178246