

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06274

研究課題名(和文)水中ロボットのための低摩擦・流体下における多関節グリップの包み込み把持

研究課題名(英文) Enveloping grasp using underwater gripper with adjustable stiffness joints

研究代表者

坂上 憲光 (Sakagami, Norimitsu)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：20373102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、関節剛性を調整でき、様々な水中物体を包み込み把持できる水中多関節グリップとそのシミュレータを開発し、有効性を検証するために水槽試験を行った。開発したシミュレータでは、グリップや把持対象の物理パラメータを任意に設定でき、実験結果との比較から、ハードウェア設計や解析に役立つことがわかった。開発したグリップ単体の回流水槽試験では、関節剛性を調整することで流速下において物体を安定に把持できることも確認した。本グリップを、海洋調査に利用している水中ロボットに搭載した浮遊状態での物体把持試験も実施し、水中多関節グリップの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中には多種多様な形状・柔らかさ、摩擦係数を持つ物体が多く存在する。これら特徴を持つ物体を流体力も働く環境下において安定に把持するために、関節剛性が制御でき、形状や硬さに合わせて包み込み把持ができる水中多関節グリップを開発した。これによりダイバーに代わって幅広い水中作業の実現が期待できる。また、脆く柔らかい対象を扱うような水中考古学や生物調査等にも役立つことが予想される。広い経済水域や水に関わる多くのインフラを保有している日本にとってロボットによる水中作業の可能性を広げることは意義あることである。

研究成果の概要(英文)：This research reports on numerically and experimentally obtained results for an underwater multi-joint gripper for which joint stiffness can be adjusted using a differential gear mechanism. By adjusting the joint stiffness, the gripper can achieve an enveloping grasp of various objects, such as irregularly shaped objects and those of varied softness. We derived equations of motion for the gripper, including hydrodynamic effects, developed a numerical simulator, and numerically evaluated the gripper performance under steady water flows. We also conducted preliminary experiments to assess the gripper performance in a circulating water tank. From the numerical and experimentally obtained results, we confirmed that the gripper can maintain its posture and hold an object stably, even in water flows. Additionally, we demonstrated that an underwater vehicle with the gripper was able to grasp an object by manual control.

研究分野：水中ロボット工学

キーワード：水中ロボット ROV 多関節グリップ 水中グリップ 包み込み把持 可変剛性機構

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

広大な経済海域を保有する日本にとって海洋資源や海中利用の重要性は増してきている。また、国土交通省は次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重要分野の一つに河川およびダムを設定し、水中ロボットの利用促進を図っている。資源開発、環境調査、生物調査、インフラ検査等を目的に、ダイバーの作業に代わる実用性の高い水中ロボットの開発が求められている。実海域で利用される水中ロボットには、作業を目的に二本指で挟み込むグリッパが広く使われ、油圧駆動やギア比を高めることで把持力を増し、安定した把持を実現している。この従来型のグリッパは簡単な把持作業はできるものの、対象物との接触面積が小さく、流体中での安定した把持や様々な形状や柔らかさ、脆さを持つ対象物を扱えない短所を持つ。自然環境である海中や湖沼では、バイオフィームや水の存在によって極端に摩擦係数が低い対象物や、藻類・生物・泥が付着して様々な形状や硬さ（柔らかさ）、脆さを持つ対象物は非常に多い。こういった状況下でも安定した対象物の把持を目指した水中グリッパも研究開発されている。例えば、柔らかな素材からなるグリッパや、包み込み把持を行う多関節グリッパを研究開発し、対象物の様々な形状に合わせて変形し、把持する方法が検討されている。しかしながら、それらのグリッパでは関節剛性を制御できず、非接触時のグリッパ姿勢の保持も困難であり、様々な対象物に対する把持への適用には課題が残っていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、関節剛性を調整でき、流体外乱中でも様々な対象物を安定して包み込み把持するための水中多関節グリッパの設計条件や把持条件を数値計算と実験を通して明らかにし、グリッパ開発から水中ロボットに搭載した水中把持実験までを行う。また、提案するグリッパ機構の対象になじむ性質を活かし、対象物の接触判定や形状計測への利用にも役立てる。これによって、外乱下での安定把持や生物のような柔らかい対象物の把持にも利用できるようになり、水中ロボットによる作業内容の幅を広げることを目指す。さらに本グリッパは機構上、全てのアクチュエータを根元に配置できるため、グリッパ自身の軽量化、防水機構の簡素化、メンテナンスの容易化を実現するグリッパ設計の一手法の提案ともなる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 物体およびグリッパに働く流体力を考慮した包み込み把持シミュレーションと解析

関節剛性の制御可能な多関節グリッパの開発に向けて、設計条件や把持条件について議論するため、運動シミュレータを開発し、流体外乱下での関節剛性と把持性能について検証する。グリッパ自身の物理パラメータ、流速、グリッパと物体間の摩擦係数、付加慣性力・抗力、把持物体の形状・抗力係数を任意に変更できるシミュレータを開発する。把持過程および把持後も対象物とグリッパには流体力が外乱として作用するため、グリッパ単体での姿勢保持と包み込み把持の安定性について、数値的に明らかにする。この数値結果を実験結果と比較することでシミュレータの有効性を確認する。

#### (2) 包み込み把持を実現する水中グリッパの設計と製作

数値解析の結果も参考にし、水中グリッパを製作するための電子部品・機械部品を選定し、それらの寸法・機構を元にグリッパ設計を行う。グリッパの駆動部分や制御機器の設計を行い、水中ロボットにも搭載した実験が行えるようグリッパとロボット間との通信規格も合わせて設計する。この際、グリッパの駆動に必要なモータを含む電子部品は防水容器に収める形で設計する。

#### (3) 外乱流体下での水中グリッパの単体試験

グリッパの剛性可変機構が外乱に対して有効であるかを確認するため、一様流を生成できる回流水槽を用いて2つの検証試験を行う。一つは、何も把持しない状態において関節剛性を調整し、グリッパが姿勢を保持できるかを確認する。この姿勢保持は、外乱下でグリッパが変形せずに対象物にアプローチ・把持する際に必要となる性能である。もう一つは、物体を把持させた状態で、水流を段階的大きくしていき、物体の安定した把持を維持できるかどうかを検証する。これにより、流速下で物体を把持するための適正な関節剛性値等を含む把持条件を検討できるようになり、水中グリッパの利用に役立つ。

#### (4) 水中ロボットに搭載したグリッパによる水中物体の把持実験

遠隔操縦型水中ロボットに多関節グリッパを搭載し、オペレータが水中ロボットと多関節グリッパを操縦することで水中把持試験を行う。実際の水中探査と同様に、水中ロボットのカメラから陸上のTVモニターに送られる映像のみを頼りに実施する。水槽底に置かれた物体を探し、把持、回収作業を行う。

#### (5) グリッパを利用した接触判定と計測

関節剛性を調整するためにあらかじめ備わったバネの伸び量を計測することで、グリッパの指先にセンサを搭載せずに、間接的に物体との接触を検知することを目指す。グリッパの防水容器内に、バネの伸びを検知するポテンシオメータを取り付ける改良のみで物体との接触判定と

計測を実現する。グリッパによる物体把持の実験を通してこの有効性も検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 物体およびグリッパに働く流体力を考慮した包み込み把持シミュレーションと解析

4自由度の回転関節を持つシリアルリンク機構を1本の指とし、2本でグリッパを構成する。1本の指は、その根元に駆動用モータ、剛性可変用モータとバネを持っており、差動歯車によって駆動用モータからは関節駆動トルクが各関節に送られ、剛性可変用モータは各関節の剛性を調整する。導出された各指の運動方程式には慣性項、粘性項、流体から生じる付加慣性項、抗力項、物体との接触力の項も含まれている。また、剛性可変機構を構成する各要素の各種パラメータも任意に設定できる。シミュレータ内では、把持対象物と各指との距離計算から接触判定を行い、接触力や摩擦力の計算を行える。この運動方程式を組み込み、C言語とOpenGLを用いてグラフィックシミュレータを作成した。数値計算にはRunge-Kutta-Gill法を用いている。このシミュレータを利用して、流速の変化(0.0m/s-0.9m/s)に対して関節剛性の違いによるグリッパ姿勢の保持性能を調べた。この結果、外乱流速0.9m/sにおいても、現実的なグリッパ寸法、モータトルク、バネ定数でグリッパ姿勢を保持できることがわかった。さらに、外乱のある条件下で物体の安定把持について調べた。物体を把持した際には指だけでなく物体に働く流体力もグリッパ関節への負担を増加させるが、この場合でも剛性可変機構が安定した物体把持の実現に貢献することが明らかとなった。

##### (2) 包み込み把持を実現する水中グリッパの設計と製作

設計・開発する多関節グリッパは、関節角度及び関節剛性を制御する差動歯車機構から構成される2入力1出力の動力伝達機構である。駆動用モータは駆動トルクを各関節に伝え、剛性可変用モータはバネの伸び量を調整し、そのバネ張力はワイヤを経由して、各指関節の双方向の回転を拘束する剛性を与える機構となっている。数値解析にも基づき、グリッパの設計と製作を行った。グリッパを制御するための専用コントローラも設計・製作し、陸上の操縦者から与えられるモータへの目標角度をフィードバック制御できるものとした。

水中においては防水設計も重要であり、モータや電子部品用の防水容器も設計した。駆動トルクはマグネットカップリングを通して外部のグリッパ関節に伝えられる。また、指部に過度な負荷が加わる際にはマグネットカップリングがトルクリミッタとして働き、機構の破壊を防止する役割にもなる。関節剛性のためのバネ張力を伝えるワイヤの防水には、直動運動が可能なりニアシャフトを設計した。ワイヤが通る貫通穴にはガスケットとOリングを取り付け、防水性を確保した。製作されたグリッパは水槽実験によって基本動作と防水性が確認された。

##### (3) 外乱流体下での水中グリッパの単体試験

水中グリッパの剛性可変機構が外乱下においても有効に機能するかを実験的に検証した。実験では一様流を生成できる回流水槽中にグリッパを固定し、グリッパの関節剛性を変化させ、次の2種類の実験を行った。なお、関節剛性を調整するバネの伸び量が小さい時はグリッパ関節の剛性が小さく、反対に伸び量が大きい時は剛性が大きくなる。まずは、流速0.5[m/s]が存在する環境で、関節剛性の差によるグリッパの関節角の変化を調べた。グリッパの初期姿勢は同じとし、2パターン(関節剛性(バネの伸び量3.5mmと10.5mm))で関節角への影響の比較を行った。関節剛性が小さい時にはグリッパは流体からの力を受け、指の姿勢を保持できなかったのに対して、関節剛性が大きい時には水流を受けても、指の姿勢を保持できることを確認した。次にグリッパに複数の物体を把持させ、流速を0.0[m/s]から段階的に上げていき、物体把持を持続できるかを調べた。この結果、関節剛性の大きさに比例して物体を把持できる流速も大きくなっていくことがわかった。数値シミュレータの結果と同様に、流速が0.9[m/s]においても把持することができる物体もあった。この結果から、外乱流速下における物体の安定な把持に、開発したグリッパが有効であることを実験からも確認した。

##### (4) 水中ロボットに搭載したグリッパによる水中物体の把持実験

水中ロボットに本グリッパを搭載し、水中物体の把持試験を大型水槽にて実施した。水中ロボットとグリッパの操縦は、ロボット本体を動かすオペレータとグリッパを操作するオペレータに分かれ、ロボットに搭載された水中カメラから陸上にある操縦用コンピュータに送られる映像のみを頼りに対象物を探した。今回は対象物として水槽の底にガラス瓶を設置した。カメラ情報を元に対象物が置かれた場所を探し、水中ロボットによるアプローチ、グリッパによる把持、移動までを行った。水中ロボットに搭載した状態でも水中での包み込み把持が可能であったこと、ロボットの移動中も瓶はグリッパから落ちることなく安定に把持し、運搬できたことも確認した。

##### (5) グリッパを利用した接触判定と計測

剛性を調整できる各関節は、外力を受けた場合のみその力の大きさに比例して回転する。このとき関節につながれた剛性可変用のバネは伸び、それに繋がったワイヤは直動方向に移動する。

この直動の移動量を計測することでグリッパの指先に外界センサを取り付けることなく、間接的に物体との接触を検知することが可能となる。この変化量をリニアポテンシオメータによって計測し、物体を把持した際の接触判定の実験を行った。この結果、包み込み把持によってグリッパが物体に接触していく過程を理解でき、包み込み把持した際に接触した複数の点を判別できることを確認した。また、ワイヤの変位量と引張バネのバネ定数から接触力を推測することも可能であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 坂上憲光
2. 発表標題 Numerical and Experimental Testing of Underwater Gripper with Adjustable Stiffness Joints
3. 学会等名 The 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小金澤鋼一
2. 発表標題 Multi Joint Gripper for Underwater ROV-Experimental Verification-
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS '19 Marseille Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小金澤鋼一
2. 発表標題 水中探査ROVへの搭載を目的とした多関節グリッパ
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 坂上憲光
2. 発表標題 剛性可変関節をもつ水中多関節グリッパの開発と実験
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Takeuchi, Soichiro Nomura, Takumi Tamamoto, Norimitsu Sakagami, Koichi Koganezawa
2. 発表標題 Development of Multi-Joint Gripper for Underwater Operations
3. 学会等名 OCEANS MTS/IEEE 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内 啓太, 坂上憲光, 玉本拓巳, 小金澤綱
2. 発表標題 水中探査ROVに搭載する多関節ロボットハンドの開発
3. 学会等名 第19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 2018年

1. 発表者名 坂上憲光, 野村壮一郎, 竹内啓太, 小金澤綱一
2. 発表標題 包み込み把持を実現する水中多関節グリッパのモデリング
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Koganezawa, Keita Takeuchi, Norimitsu Sakagami
2. 発表標題 Multi Joint Gripper for Underwater ROV-Experimental Verification
3. 学会等名 OCEANS 2019 Marseille (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内啓太, 野村壮一郎, 坂上憲光, 小金澤鋼一
2. 発表標題 水中で駆動可能な多関節グリッパの開発
3. 学会等名 第18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 2017年

1. 発表者名 坂上憲光, 野村壮一郎, 竹内啓太, 小金澤鋼一
2. 発表標題 包み込み把持を実現する水中多関節グリッパのモデリング
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keita Takeuchi, Soichiro Nomura, Takumi Tamamoto, Norimitsu Sakagami, Koichi Koganezawa
2. 発表標題 Development of Multi-Joint Gripper for Underwater Operations
3. 学会等名 OCEANS'18 MTS/IEEE Kobe / Techno-Ocean 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	小金澤 鋼一  (Koganezawa Koichi)  (10178246)	東海大学・工学部・教授    (32644)	