

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04503

研究課題名（和文）異種類複数台の自律型海洋ロボットを用いた自動点検システムの協調制御法の開発

研究課題名（英文）Development of a Coordinate Control Scheme for an Automatic Inspection System with Different Types of Autonomous Marine Robots

研究代表者

平 雄一郎 (Yuichiro, Taira)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：20399645

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、船舶・海洋構造物の自動点検を実現するため、海中ロボットと海面ロボットをケーブルで結合した海洋ロボットシステムに注目する。このシステムの自律化のためには、ロボットの動作制御法が必要である。しかし、コントローラ設計に用いられるケーブルの数学モデルの構造は非常に複雑である。そこで、点検用カメラを先端に取り付けたロボットアームを有する海中・海面ロボットから構成される自律型システムを考案した。そして、ロボットに結合されたケーブルの影響により、本体の制御性能が著しく劣化する場合であっても、アーム先端のみは良好に位置決めされる制御法を、それぞれの自律型ロボットに対して開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題において開発した制御法は、海中・海面ロボット・ケーブルから構成される点検ロボットシステムに実装するためのものであり、その自動化・自律化に貢献するものである。また、それぞれのロボットにおいて、本体の制御性能がケーブルの影響のために劣化する場合であっても、アーム先端の点検用カメラの位置が良好に制御されることを示した。さらにこの制御法は、マニピュレータ（腕・手）を有する従来型の海中・海面ロボットにも応用可能であり、その汎用性は高いといえる。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on an ocean robotic system that consists of two different types of autonomous robots (i.e., an autonomous underwater robot and an autonomous surface robot), connected to each other through a cable. This system is utilized for ocean operations such as an automatic inspection for a vessel or a marine structure. Its mathematical model is required for developing its control scheme. However, the structure of the model is complicated. In view of this situation, we considered a robotic system that consists of two different types of autonomous robots, each of which is equipped with a robotic arm with a camera for inspection. In this study, we have developed control schemes for the autonomous robotic system.

研究分野：海洋工学、ロボット工学、制御工学

キーワード：海洋ロボット 自律ロボット 水中ロボット 水上ロボット 自動点検システム ロボット制御

### 1. 研究開始当初の背景

(1) これまで多種多様な海洋開発において、作業者を支援するため、ロボット技術が導入されてきた。最近では、人工知能・情報通信技術の急速な発展に伴い、作業の効率化・高性能化・低コスト化のため、作業者が直接操縦しない自律型海洋ロボットが盛んに研究開発されている。さらに我が国では、海洋工学分野における若年労働者の不足および労働者の高齢化の解決策として、自律型ロボットの導入が大いに期待されている。自律型ロボットには、作業の種類や作業環境の差異により、種々の構成のものが開発されている。

(2) 近年、上記 1.(1)で述べた自律型ロボットのの一つとして、船舶・海洋構造物を自動点検する自律型海洋ロボットシステムが注目されている。この点検作業においては、海中・海面・海上という異なる作業環境が存在する。そして従来の研究開発では、いずれか 1 種類のロボットの自律化が注目されてきた。これに対して本研究では、海中・海面・海上における 3 種類の異なる自律型ロボットが同時に協調しつつ作業を遂行するロボットシステムを提案する。本研究課題では、図 1 に示すロボットシステム開発の初段階として、まずは海中・海面に注目し、2 種類の自律型ロボットから構成される自動点検システムの開発を目指す。

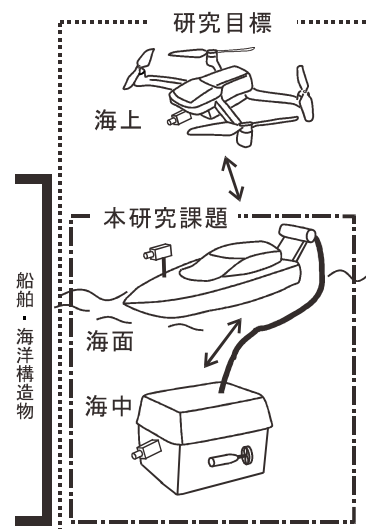


図 1: 海洋ロボットシステム

### 2. 研究の目的

本研究では、海中・海面・海上における 3 種類の自律型ロボットが同時に協調しつつ点検作業を遂行する海洋ロボットシステムの開発を目指す。本研究課題では、研究の初段階として、海中・海面における 2 種類の自律型ロボットから構成されるシステムに対し、ロボットの自律化に必要不可欠である協調動作制御法を開発する。まず、ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムのモデル導出と協調制御法の設計に取り組む。つぎに、ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムのシミュレーション解析を実施する。さらに、ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムの実験解析により、提案制御法の有用性・実用性を確認する。

### 3. 研究の方法

(1) 海中・海面ロボットから構成される船舶・海洋構造物の自動点検システムの実現に必要不可欠である海中・海面ロボットの協調動作コントローラを設計するためには、まずは制御対象の入力と出力の関係を記述する数学モデルを導出する必要がある。そこで、ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムに対する数学モデルを導出する。

(2) 上記 3.(1)で述べた数学モデルをもとに、海中ロボット・海面ロボット・ケーブルから構成される海洋ロボットシステムに対する協調動作制御法を開発する。

(3) 上記 3.(2)で設計した協調制御法に対する計算機シミュレーションシステムを構築し、そのシミュレーション解析により、提案制御法の性能を検証・評価する。このシミュレーション解析において、所期の制御性能が得られなければ、それが満足されるまで、提案制御法の再設計を繰り返す。

(4) ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムの実験システムを構築し、そのコントローラに提案制御法を実装する。この実験解析において、所期の制御性能が得られなければ、それが満足されるまで、提案制御法の再設計を繰り返す。

### 4. 研究成果

(1) 海中ロボット・海面ロボット・ケーブルから構成される海洋ロボットシステムの協調動作コントローラを設計する際には、まずは制御対象の入力と出力の関係を記述する数学モデルを導出する必要がある。しかしこの制御対象の動特性には、1) 流体抗力・浮力・付加質量による慣性力などの流体力が作用すること、2) 互いにケーブルで結合されていることから、相互に運動が拘束されること、3) ケーブルが浮力・水流により弛張することから、ケーブルにも運動特性があること、4) 海中・海面ロボットにはそれぞれ水流・波浪が外乱として加わること、という特徴がある。そこで、これらの特徴を踏まえ、ケーブル結合された海中・海面ロボットシステムに対する数学モデルを導出した。この数学モデルの主な特徴は、ケーブルの運動特性を、非駆動関節で結合された剛体リンクシステムとして表現することである。なお厳密には、ケーブルは柔

軟物体と同様な運動特性を有する。しかしこの場合には、制御対象の数学モデルが非常に複雑になり、コントローラ実装に適していないと考えられる。また、この数学モデルの導出方法・結果に関する成果の一部を国際会議論文 に公表した。

つぎにこの数学モデルに対して、より詳細な数値計算・解析を実施したところ、良好な近似性能を得るためにケーブルのサブシステムを高自由度(多リンク・多関節)に拡張した場合には、その数学モデルは格段に複雑な構造を有するものになり、それをういた協調動作コントローラのリアルタイム実装は困難であることが予想された。すなわち、上記3.(2)の方法と異なる協調動作制御法の開発が必要になった。そこで、点検用カメラを先端に搭載したロボットアーム(マニピュレータ)を有する海中・海面ロボットから構成される自動点検システムを考案した。そして、ケーブルの影響により、いずれのロボットにおいても、本体の制御性能が著しく劣化することが想定されるが、そのような場合であっても、点検用カメラを取り付けたアーム先端のみは良好に位置決めされる制御法を、それぞれのロボットに対して開発することにした。これが達成されれば、点検用カメラは基準座標系において静止していることから、正確な自動点検作業が実現されることが考えられる。

(2) 上記4.(1)の研究成果を踏まえ、点検用カメラを先端に取り付けたロボットアームを有する海中ロボットに注目した。さらに、点検用ロボットアームの他にも、船舶・海洋構造物の保守などの作業に拡張することを考慮すれば、作業用マニピュレータを海中ロボットに搭載させることが望ましい。そして、この作業用マニピュレータの先端の動作と接触力の両方を同時に制御できれば、種々の作業に適用可能になる。そこで拡張性を考慮し、より一般的なマニピュレータを有する海中ロボットに対する動作・力制御に関する研究に取り組んだ。また、マニピュレータの動作・力制御は、先端の動作および接触力を理想軌道に追従させることを目的としたパラレル制御法・ハイブリッド位置力制御法と、先端の動作および接触力に関する機械インピーダンスを理想のものに一致させるインピーダンス制御法に大別される。これらの制御法には、それぞれに利点と欠点があることから、両方の動作・力コントローラ的设计に取り組んだ。

まず、マニピュレータを有する海中ロボットに対し、パラレル制御に分類される動作・力制御法を開発した。その主な特徴としては、1) 海面ロボットと結合されたケーブルの影響のためにロボット本体の動作制御性能が芳しくないという条件のもとで、マニピュレータ先端の位置および接触力を理想軌道に良好に追従させること、2) 構造が複雑な非線形力誤差フィルタの代わりに線形力誤差フィルタを用いていること、3) ロボット本体のアクチュエータである水中スラスタの非線形動特性を考慮していること、4) ロボット本体のみならずマニピュレータにも流体力や、水流などの外乱が加わるという条件のもとで、コントローラを設計していること、5) 動作・力制御系の安定性を理論的に保証していることが挙げられる。さらに数値シミュレーション解析により、提案法の有用性を確認した。そのシミュレーション結果の一例を図2に示す。なお図2(a)と(b)は、それぞれ海中ロボットの制御動作結果と、各種変数と理想軌道との誤差である。また、その成果の一部が国際学術誌 に掲載された。

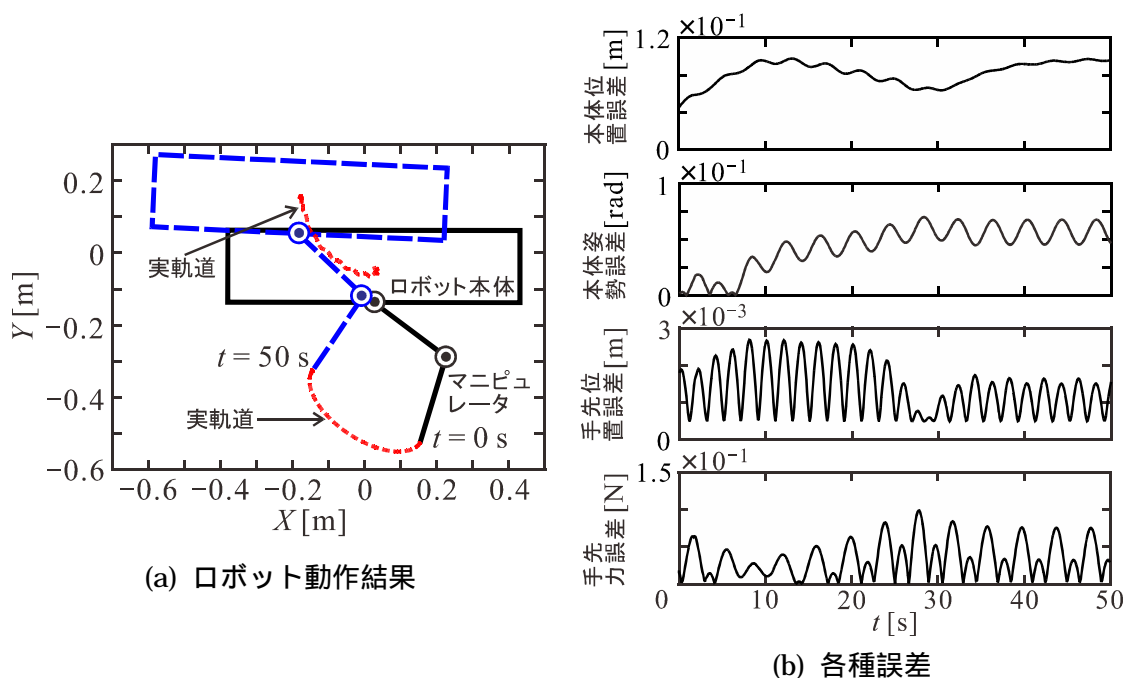


図2：海中ロボットシミュレーション結果例(パラレル制御)

つぎに、マニピュレータを有する海中ロボットに対し、インピーダンス制御に分類される動作・力制御法を開発した。その主な特徴としては、1) 海面ロボットと結合されたケーブルの影響の

ためにロボット本体の動作制御性能が芳しくないという条件のもとで、マニピュレータの機械インピーダンスを理想のものに近似させること、2)インピーダンスパラメータと独立な設計パラメータにより、インピーダンス誤差を低減可能であること、3) ロボット本体のアクチュエータである水中スラストの非線形動特性を考慮していること、4) ロボット本体のみならずマニピュレータにも流体力や、水流などの外乱が加わるという条件のもとで、コントローラを設計していること、5) 動作・力制御系の安定性を理論的に保証していることが挙げられる。さらに数値シミュレーション解析により、提案法の有用性を確認した。そのシミュレーション結果の一例を図3に示す。なお、この図は各種変数と理想軌道との誤差ならびに制御入力である。また、その成果の一部を国際会議論文 に公表した。さらに、それを拡張したものが国際学術誌 に掲載された。

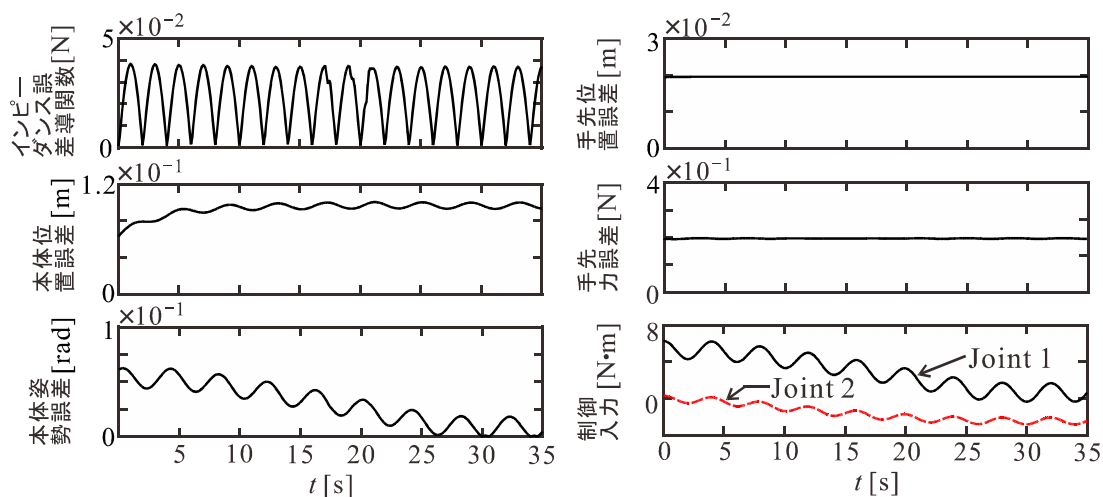


図3：海中ロボットシミュレーション結果例（インピーダンス制御）

(3) 上記4.(1)の研究成果を踏まえ、点検用カメラを先端に取り付けたロボットアームを有する海面ロボットに注目した。また海中ロボットと同様に、点検用ロボットアームの他にも、作業用マニピュレータを海面ロボットに搭載することが望ましい。そこで、一般的なマニピュレータを有する海面ロボットに対する動作・力制御に関する研究に取り組んだ。

まず、マニピュレータを有する海面ロボットに対し、インピーダンス制御に分類される動作・力制御法を開発した。その主な特徴としては、1) 海中ロボットと結合されたケーブルの影響のためにロボット本体の動作制御性能が芳しくないという条件のもとで、マニピュレータの機械インピーダンスを理想のものに近似させること、2) ロボット本体のアクチュエータである水中スラストの非線形動特性を考慮していること、3) モデルに基づくインピーダンス制御方策を採用していることが挙げられる。なお、その成果の一部を国際会議論文 に公表した。

また、パラレル制御に基づく動作・力制御法の開発に関しては、本研究課題期間中に完成しておらず、期間後に取り組む予定である。

(4) 海中・海面ロボット実機を用いた実験解析に関しては、遠隔操縦方式の機体をそれぞれ購入し、それらを改良して自律動作方式の海洋ロボットシステムを製作する予定であった。そこで、遠隔操縦用ロボットや、ロボットに搭載する自律動作用コンピュータなどの必要な部品を購入し、ロボットシステムの構築に取り組んだ。しかし構築中に、上記4.(1)で述べた通り、当初のシステムと比較し、点検用カメラを先端に取り付けたロボットアームを有する海中・海面ロボットから構成される海洋ロボットシステムの方が自律動作方式に適していると判断した。この新たに考案したロボットシステムでは、点検用カメラを先端に搭載したロボットアームが必要である。そこで、その搭載のための改良に取り組んでいる。今後、このロボットシステムの構築を完了し、実験解析を実施し、提案法の制御性能を実験的に検証する予定である。

#### <引用文献>

Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Masahiro Oya, Modeling and control of an underwater robotic system composed of two different types of autonomous vehicles, Proceedings of the 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.1460-1465, 2022

Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Masahiro Oya, Motion and force control with a linear force error filter for the manipulator of an underwater vehicle-manipulator system, Artificial Life and Robotics, Vol.27, No.1, pp.90-106, 2022

Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Masahiro Oya, Design of a motion and force



controller with impedance error for an underwater vehicle-manipulator system with a differently-controlled vehicle, Proceedings of the 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.1117-1122, 2023

Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Masahiro Oya, Impedance control based on error feedback for the manipulator of an underwater vehicle-manipulator system, Artificial Life and Robotics, Vol.28, No.4, pp.830-849, 2023

Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Masahiro Oya, Design of a model-based impedance controller for the manipulator mounted on an autonomous surface vehicle, Proceedings of the 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.1268-1273, 2024

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Taira Yuichiro, Sagara Shinichi, Oya Masahiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Impedance control based on error feedback for the manipulator of an underwater vehicle-manipulator system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 830 ~ 849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-023-00896-6	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 -

1. 著者名 Taira Yuichiro, Sagara Shinichi, Oya Masahiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Motion and force control with a linear force error filter for the manipulator of an underwater vehicle-manipulator system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 90-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-021-00708-9	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Taira Yuichiro, Sagara Shinichi, Oya Masahiro
2. 発表標題 Design of a model-based impedance controller for the manipulator mounted on an autonomous surface vehicle
3. 学会等名 The 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2024 (AROB 29th 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Taira Yuichiro, Sagara Shinichi, Oya Masahiro
2. 発表標題 Design of a motion and force controller with impedance error for an underwater vehicle-manipulator system with a differently-controlled vehicle
3. 学会等名 The 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2023 (AROB 28th 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taira Yuichiro, Sagara Shinichi, Oya Masahiro
2. 発表標題 Modeling and control of an underwater robotic system composed of two different types of autonomous vehicles
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2022 (AROB 27th 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------