

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01294

研究課題名（和文）ハプティックシェアードコントロールを用いた水中ロボット作業の効率化と実証展開

研究課題名（英文）Efficiency and Practical Application of Underwater Robot Operation Using Shared Haptic Control

研究代表者

坂上 憲光（Sakagami, Norimitsu）

龍谷大学・先端理工学部・教授

研究者番号：20373102

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,720,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間（操縦者）と自動化システムが協調して制御対象を操作するHaptic Shared Control（HSC）と、剛性可変機能をもつ多関節グリッパを水中ロボットに適用し、水中の近接・接触作業時の操縦者の負担軽減、作業の効率化や自動化を目指した。まず、水中ロボットの操縦と操縦者への力覚提示を実現する操縦デバイスの開発を行った。また、水中ロボットにHSCを適用し、その有効性を検証した。さらに、水中物体へのアプローチおよび物体把持を支援する、多関節グリッパ機構の開発も行った。この他、水中ロボット運用時に役立つケーブルの絡まりを防止する手法や、操縦酔い防止に関する基礎データも得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境に接近・接触する水中作業の多くは、現在でもダイバーや熟練者が操縦する水中ロボットに大きく依存している。本研究の成果として、人間による介入が必要な水中作業にHSCを適用することで、操縦者の負担を軽減できることが確認された。この成果は、港湾管理や老朽化が進むインフラ点検など、水中ロボットの利用が増えている中で、社会的に役立つ可能性がある。また、水中ロボットの作業においては三次元運動制御や流体外乱補償等の困難が伴うが、今回開発した技術は水中ロボットの自動化による作業の可能性を広げることに貢献するという点で学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we applied Haptic Shared Control (HSC), where a human operator and an automated system collaboratively control a machine and robot, and a multi-joint gripper with variable stiffness functionality to an underwater robot. Our goal was to reduce the operator's burden, improve the efficiency, and enhance the automation of close-range and contact tasks underwater. Firstly, we developed a control device that realizes the control of the underwater robot and provides haptic feedback to the operator, validating the effectiveness of HSC. Additionally, we developed a highly usable gripper mechanism with variable stiffness functionality to assist in approaching and grasping underwater objects. Furthermore, we obtained fundamental data on methods to prevent cable entanglement, which is useful during underwater robot operations, and on operator motion sickness.

研究分野：水中ロボット工学

キーワード：Underwater Robot Haptic Shared Control ROV 水中作業 多関節グリッパ 物体把持

1. 研究開始当初の背景

港湾管理やインフラ施設の保守点検等における水中ロボットによる効率化や自動化は不可欠である。この背景から、水中ロボットに関する研究が注目を集めている。しかしながら、環境に近接・接触する目視検査やサンプル回収作業の自動化は十分に達成されておらず、現在でもダイバーや熟練者が操縦する水中ロボットに大きく依存している。これら作業の自動化は世界的にも挑戦的な研究課題となっている。本研究では、接近・接触作業に対して Haptic Shared Control (HSC) を用い、人間と自動化システムが協力しながら一つの操縦デバイスを通して水中ロボットを操作し、検査や回収作業を効率的に達成することを目指す。HSC は水中ロボットの計測情報や画像情報を基に、操縦デバイスからの力覚情報によって操縦者を誘導し、ロボット操縦者の負担軽減を図る。これまでの HSC を水中ロボットに適用した予備実験と、多点接触により力分散しながら対象物を安定把持する水中多関節グリッパの研究成果を基礎として、水中ロボットによる近接・接触作業の効率化や自動化に貢献できるかを明らかにする。計測や被験者実験による主観・客観評価から、本手法の有効性を実証することを最終目標とする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人間（操縦者）と自動化システムが協調して制御対象を操作する HSC と、剛性可変機能をもつ多関節グリッパを水中ロボットに適用し、水中で行われる近接・接触作業の操縦者負担の軽減、効率化や自動化を実現することである。水中ロボットと本研究で開発する操縦デバイスを用いた被験者実験を通して、操縦者の負担軽減や効率化に関する主観・客観評価を行い、提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、水中ロボットによる接近・接触作業に対して HSC を用いることで、人間と自動化システムが協力しながら効率的に検査や回収作業を達成することを目的にした。この目的を達成するために、以下の方法を採用した。

3.1 操縦者の負担軽減を目指す力覚提示可能な操縦デバイスの開発

操縦者の負担を軽減し、三次元運動する水中ロボットの操作精度を向上させるために、力覚提示が可能な操縦デバイスを開発した。このデバイスの設計および実装において、操縦者に対するリアルタイムフィードバック機能を組み込み、ロボット操作を支援することを目指した。

3.2 水中ロボットへの Haptic Shared Control の適用

HSC を水中ロボットに適用するための手法を開発した。具体的には、流速下や物体把持を行う水中ロボットに対する HSC の導入、安定化協調制御則の設計とそれによる操縦者の作業負荷低減・操縦精度向上、センサ情報の信頼度に応じて操縦端末の硬さを変更することによる適切な触覚誘導の実現を図った。

3.3 水中多関節グリッパの機能拡張

把持対象とグリッパとの距離を調整可能な機構を設計することで、水中物体へのアプローチおよび物体把持を支援する柔軟性の高い剛性可変機能をもつグリッパ機構を開発する。

3.4 水中ロボット作業の効率化のためのケーブル絡まり防止および操縦酔い防止手法

水中ロボットの作業効率を向上させるため、ロボットケーブルの環境との絡まり防止策および人間の操縦酔いを防止する手法について検討した。

4. 研究成果

4.1 操縦者の負担軽減を目指す力覚提示可能な操縦デバイスの開発

4.1.1 水中ロボットの三次元運動のための小型軽量デバイスの開発

実海域利用を想定し、船舶での運用が容易なゲームパッド型の操縦・力覚提示デバイスを開発した。図1に開発したデバイスを示す。図2は開発したデバイスのジョイスティック操作と水中ロボット運動との対応関係を示す。各ジョイスティックの根元2軸にはアクチュエータと光学式エンコーダが付いており、スティックの角度を制御することで水中ロボットの自動制御や操縦者への力提示による HSC が可能となった。

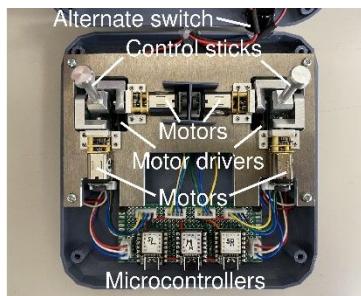


図1. デバイス内部構造

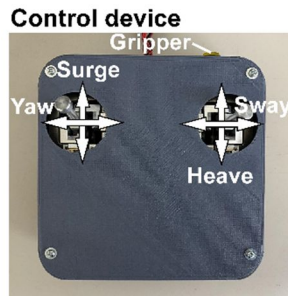
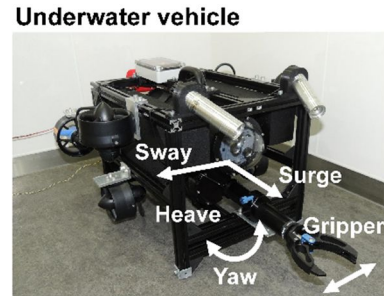


図2. スティック操作とロボット運動との対応関係



4.1.2 機械の信頼度提示による HSC 強度決定支援と水中ロボットへの応用

経路追従中の物体発見タスクを対象とし、現在と将来の経路情報取得率を機械信頼度とした。機械信頼度に応じて操縦端末に取り付けた HSC 強度調節機構のフィードバックゲインを変更し、機械から人間に対し強度の提案を行った。また、人間が機構を握り込むことで HSC 強度を低下させるアルゴリズムとした(図3)。シミュレーション空間での水中ロボットの操縦による経路追従中の物体発見タスクにおいて、16名の参加者による従来の一定強度 HSC と比較した結果、人間は機械の信頼度変化を有意に感じ取ることが可能だった。また、精神的な要求を有意に低減させ、認知負荷を減少させることが示された。

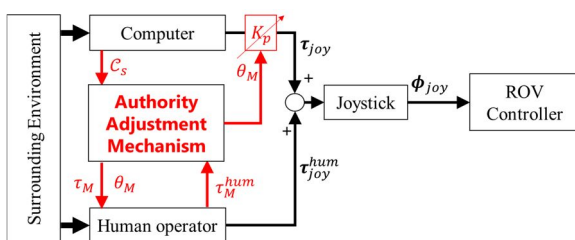


図3. HSC 強度調節機構の提案

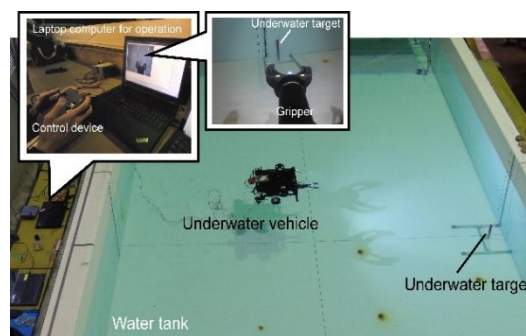


図4. 水中物体把持への HSC の適用

4.2 水中ロボットへの Haptic Shared Control の適用

4.2.1 流速下および物体把持への HSC の適用

流速中にある水中ロボットの操縦者に対して HSC を適用し、操縦時の精神的負荷が軽減できることを明らかにした。また、水中ロボットの位置決め精度の向上にも効果が得られた。図4のように、水中ロボットの三次元的な操作を必要とする物体把持においても開発した操縦デバイスを用いて HSC を行った。この実験結果から、HSC による制御性能を向上させる制御手法開発のための新たな知見も得られた。

4.2.2 目視検査タスクのための水中ロボットの協調経路追従制御

経路との横方向誤差と操縦者の入力速度から水中ロボットの横方向速度を生成する並進速度変換と HSC による旋回方向のハプティックガイダンスによって操縦者の経路追従補助を行った (図 5)。また、逆最適制御を用いた非ホロノミック経路追従制御を 3 自由度ホロノミックへと拡張し、制御安定性と操縦者による操作入力との関係を明らかにした。

16 名の実験参加者による一部欠損のある経路追従中の物体検知タスクにおいて、完全手動操縦と比較して、経路追従中の横方向誤差・角度誤差を有意に減少させることを確認した。また、操縦者の作業負荷も有意に低減させることが示された。

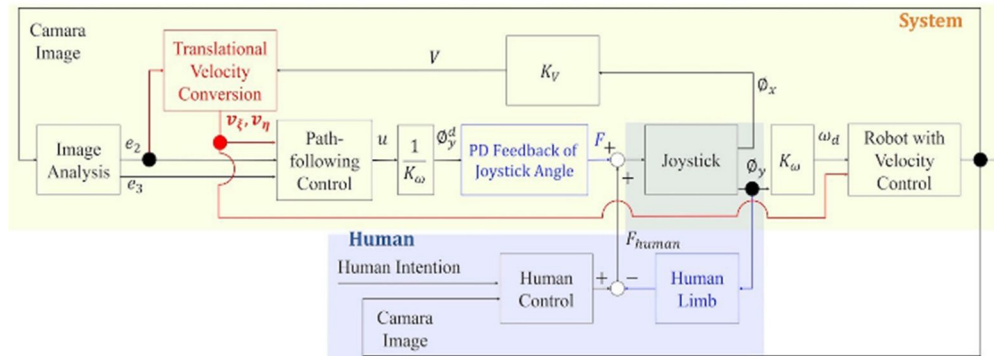


図 5 . 協調経路追従制御

4.2.3 センサシステムの信頼度に応じて操縦桿の硬さを変更する HSC

センサの認識信頼度に応じて、操縦端末であるジョイスティックの PD フィードバックゲインを変化させることで、ハプティックデバイスの硬さを変化させた (図 6)。この変化によって、操縦の主導権がどちらにあるかを操縦者に知覚させることが可能となり、操縦 (介入) のしやすさを向上させた。この結果、水中ロボットが対象物に近づいた際に左右旋回の姿勢誤差が有意に改善されることを確認した。この成果は、水中での HSC を用いた物体把持など、精度が要求されるタスクの実現に貢献することが期待できる。

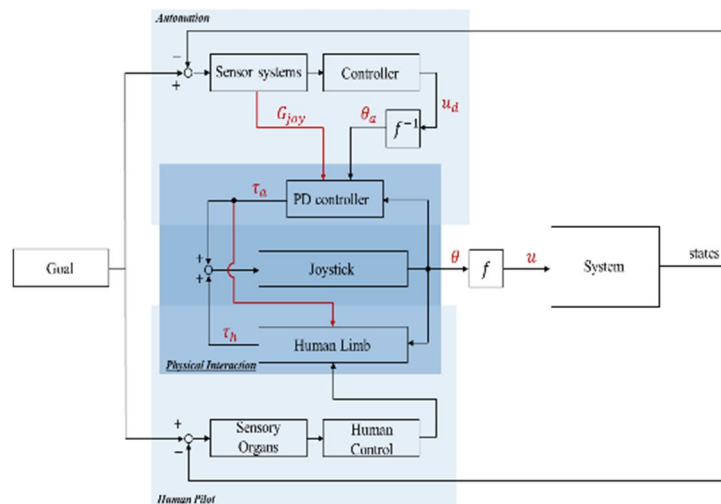


図 6 . センサ信頼度によるデバイス硬さの調整

4.3 水中多関節グリッパの機能拡張

HSC による作業性の向上だけでなく、多関節グリッパ単体での性能向上も図り、水中作業の効率化と自動化の向上を目指した。剛性可変関節を持つグリッパによる包み込み把

持の柔軟性に加え、グリップ部分が前後方向にスライドする機構を提案し、水中ロボットの操作熟練度や位置制御に依存せずに把持対象へのアプローチ、把持を支援するユーザビリティの高いグリップ機構を開発した。

4.4 水中ロボット作業の効率化のためのケーブル絡まり防止および操縦酔い防止手法

水中ロボットに装着されるテザーケーブルは、環境との絡まりを発生させる危険性がある。このため、ケーブルの絡まりを考慮したロボット経路の選択が必要となる。そこで、紐の形状を表現するホモトピー拡張ヒューリスティックを経路探索へ応用したホモトピーベースド経路探索手法を提案した。本手法により、比較手法では絡まりが発生する、または絡まりを発生させない経路を発見できないような複雑な環境でも、現実的な計算時間で経路を探索することが可能になった。

この他、視覚的要因による水中ロボットオペレータの動揺病症状に注目し、オペレータが水中ロボットを操縦しながら探索タスクを行う際、視線が固定しにくいことによって動揺病が発症しやすくなるとの仮説を立てた。この問題を解決するため、水中ロボットの操作中にディスプレイ中央に固視点を導入することで、動揺病症状を軽減する方法を提案した。20名の実験参加者が水中ロボットを操作し、固視点の有無を被験者内に比較した。その結果、固視点を設けた条件では、設けない条件と比較して、実験参加者の動揺病症状が有意的に軽減し、視線行動の分散が低減することを確認した。また、動揺病症状と視線行動の分散に相関があることも確認した。

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 2件）

1. 著者名 Norimitsu Sakagami, Mizuki Suka, Yu Kimura, Eito Sato, Takahiro Wada	4. 巻 27
2. 論文標題 Haptic shared control applied for ROV operation support in flowing water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 867,875
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-022-00788-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Eito Sato, Hailong Liu, Yasuaki Orita, Norimitsu Sakagami, Takahiro Wada	4. 巻 3
2. 論文標題 Cooperative path-following control of a remotely operated underwater vehicle for human visual inspection task	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Control Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fcteg.2022.1056937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 木村友, 谷出敦哉, 和田隆広, 坂上憲光
2. 発表標題 水中ロボットによる物体把持のための操縦支援装置の試作
3. 学会等名 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤瑛人, 織田泰彰, 坂上憲光, 和田隆広
2. 発表標題 ROV操縦のためのシステムによるセンサ認識信頼度呈示を介したHSC強度調整インタフェース
3. 学会等名 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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 乙部達生, 劉海龍, 坂上憲光, 和田隆広
2. 発表標題 固視点追加による水中ロボット操縦者の動揺病低減
3. 学会等名 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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤江謙伸, 織田泰彰, 坂上憲光, 和田隆広
2. 発表標題 センサ信頼度に応じて操作端のインピーダンスを調整するROVの触力覚共有制御
3. 学会等名 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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuki Otobe, Hailong Liu, Norimitsu Sakagami, Takahiro Wada
2. 発表標題 Motion Sickness Symptoms in Underwater Robot Operator in Low Visibility Environment
3. 学会等名 International Comfort Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 薫, 坂上憲光, 和田隆広, 小金澤鋼一, 甲斐義弘
2. 発表標題 水中探査 ROVに搭載するスライド可能な多関節ロボットハンドの開発
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村友、須賀瑞樹、坂上憲光、佐藤瑛人、織田泰彰、和田隆広、小金澤鋼一
2. 発表標題 水中ロボットによる物体把持のための操縦支援装置の提案
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤瑛人、劉海龍、織田泰彰、坂上憲光、和田隆広
2. 発表標題 視覚検査タスクのための水中ロボットの操縦支援制御
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 乙部達生、劉海龍、坂上憲光、和田隆広
2. 発表標題 船上におけるROV操縦が動揺病に及ぼす影響
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村友、須賀瑞樹、坂上憲光、佐藤瑛人、和田隆広
2. 発表標題 水流下にあるROVのHaptic Shared Controlを用いた操縦支援
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村友、伊藤史苑、榛村友希、田村海斗、和田隆広、坂上憲光
2. 発表標題 水中ロボット操縦支援のための力覚提示可能な小型操縦装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須賀瑞樹、坂上憲光、和田隆広、川村貞夫
2. 発表標題 水中ロボットによる表土除去作業のためのスラスト配置決定と操縦支援
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Kimura, Norimitsu Sakagami, Takahiro Wada, Koichi Koganezawa
2. 発表標題 Development of An Operation Support Device for Portable Underwater Vehicles
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Optimal guidance and control for autonomous systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 須賀瑞樹、小西宏和、坂上憲光、和田隆広
2. 発表標題 Haptic Shared Control を用いた流速中における水中ロボットの操縦支援
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須賀瑞樹, 木村友, 小西宏和, 坂上憲光, 和田隆広, 小金澤鋼一
2. 発表標題 Haptic Shared Control を用いた操縦支援時の流速中における水中ロボットの位置誤差評価
3. 学会等名 第22回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤瑛人, 坂上憲光, 小金澤鋼一, 和田隆広
2. 発表標題 水中ロボットの経路追従タスクのための触力覚誘導制御
3. 学会等名 第22回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤薫, 坂上憲光, 小金澤鋼一
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22回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuki Suka, Yu Kimura, Hirokazu Konishi, Norimitsu Sakagami, Takahiro Wada, Koichi Koganezawa
2. 発表標題 Use of haptic shared control to support the operation of an ROV in water flow
3. 学会等名 International Symposium on Artificial Life and Robotics 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
研究 分担者	小金澤 鋼一 (Koganezawa Koichi) (10178246)	東海大学・スポーツ医科学研究所・研究員 (32644)	
研究 分担者	和田 隆広 (Wada Takahiro) (30322564)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授 (14603)	

	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 協力者	木村 淳 (Kimura Jun)		

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
---------	---------