

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14222

研究課題名（和文）身体化インターフェイスを介したスマートロボットの遠隔操作に関する研究

研究課題名（英文）Embodied Interface for Enhanced Teleoperation of Intelligent Robots

研究代表者

朱 曜南（Zhu, Yaonan）

名古屋大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：80924068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、直感的な遠隔操作を実現するための身体性を考慮した操作インターフェイスを開発し、操作者の負担を軽減し、作業効率を向上させるための協調制御手法を提案した。初年度では視覚ベースの触覚センサを利用して把持力を推定した。さらに、商用の触覚デバイスとの連携により遠隔操作系を構築し、力フィードバックを行った。最終年度では、RGBDカメラから取得した点群データから把持位置を検出し、ロボットアームの可操作性を考慮して最適な把持姿勢を選定することで、把持操作の支援を実現した。この協調制御手法は、遠隔操作時の操作性の向上と作業時間の短縮に寄与した。成果は国際ジャーナル及び学会で発表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は直感的な遠隔操作を可能にする身体性を伴う操作インターフェイスと協調制御手法を開発した。これにより遠隔操作の操作性向上及び操作者の負担軽減を実現した。本研究の成果は家庭、医療、農業など多岐にわたる分野での応用が期待できる。また、AIによる協調制御の実現は遠隔操作の知識が限られたユーザーでも直感的な操作を可能にし、遠隔操作システムの一般化と普及に寄与する。身体性を考慮したインターフェイスとAIの統合により直感的な操作方法を確立することで、遠隔操作の課題解決、人・AIロボット協働の発展に貢献した点で学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, an interface that considers human embodiment was developed to enable intuitive teleoperation, and a shared control method was proposed to reduce operator workload and enhance operation efficiency. In the first year, a vision-based tactile sensor was attached to a parallel gripper to estimate the grasping force, and by integrating it with a commercial tactile device, a teleoperation system capable of providing force feedback was developed. In the final year, grasping poses were detected from point cloud data obtained using an RGBD camera, and the feasible grasping pose was selected considering the manipulability of the robot arm to assist grasping operations. This shared control method contributed to improved operability during teleoperation and reduced task completion time. The research outcomes were published at international journals and conferences.

研究分野：ロボット工学

キーワード：遠隔操作 インターフェイス 協調制御 知能ロボティクス

### 1. 研究開始当初の背景

リーダーとフォロワーによって構成される遠隔操作ロボットに関する研究は、ロボット工学の基礎的な研究課題の一つであり、盛んに研究が行われている。物理的な距離が原因で発生するデータ通信の遅延、感覚フィードバックの欠如、さらには身体構造の差異等といった課題から、ロボットの遠隔操作には高度な技術が必要とされる。その結果、遠隔操作は熟練者によるものが主流となり、特定の整備された環境下で応用されることが一般的である。このような背景から、遠隔操作技術のさらなる発展と普及を促進するためには、操作者の身体性を考慮した直感的かつ効果的な操作インターフェースの開発が不可欠である。また、AI 技術を用いて遠隔ロボットに一定の自律性を持たせ、操作を支援することにより、遠隔操作の操作性を改善し、初心者でも熟練者と同様の操作が可能になることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、遠隔操作者の身体性を考慮した直感的操作インターフェースの開発に取り組み、スマートロボットを用いた協調制御手法（半自動制御）を構築し活用することで操作性を向上させることを目的とする。この協調制御手法では、操作意図に応じて遠隔ロボットの動作補完や修正を行い、熟練度が低い初心者を含む誰もが直感的に違和感なくロボットを遠隔操作できることを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、人の身体性を考慮した直感的遠隔操作インターフェースを構築した上で、AI 技術を活用し遠隔ロボットに一定の自律性を持たせた協調制御システムを形成するための研究を行う。そのため、具体的には以下の課題に取り組む。

(1) 人の身体動作(主に上半身)を追従可能な遠隔操作システムの構築。遠隔ロボットは 7 自由度を有するロボットアーム 2 つ、ステレオカメラ、2 つの平行グripper で構成される双腕ロボットを利用する。市販の VR デバイスによって操作者の頭部動作、手先動作を取得する。逆運動学に基づいた制御アルゴリズムを実装することにより、人の頭部、手先の位置をリアルタイムで追従し、操作者の身体動作を遠隔ロボットに反映する。この際に、遠隔操作の操作性(タスクの遂行時間、労力等)を評価する。

(2) 物体の in-hand 操作時に必要とされる触覚情報を操作者に伝送する手法の構築。本研究では、視覚ベースの触覚センシング技術と触覚フィードバック技術を連携することにより、遠隔操作時にロボットの手先で生じる触覚情報を操作者に伝送する。これにより、操作性を改善し、器用な手先遠隔操作を実現する。

(3) AI を活用した遠隔操作者の意図に応じて動作計画・補完を行う協調制御手法を構築する。協調制御を実現するため、双腕ロボットの頭部に装着された RGBD カメラを用いて環境の点群を取得し、操作者が意図した対象物の把持姿勢を検出する。更に、ロボットアームの拘束条件を考慮することで把持に最適な位置・姿勢を選出する。そして、目標位置・姿勢へ到達可能な軌道を計算し、人の操作軌道と融合することで操作支援を行う。この際に、協調制御を用いる場合と用いない場合で比較し、操作性を評価する。

### 4. 研究成果

#### 4.1 直感的インターフェースおよび協調制御による遠隔操作の操作性向上

直感的な遠隔操作を可能にするインターフェースの開発、及び操作支援を行う協調制御システムの研究開発を進めてきており、図 1 に示す協調制御システムを構築した。

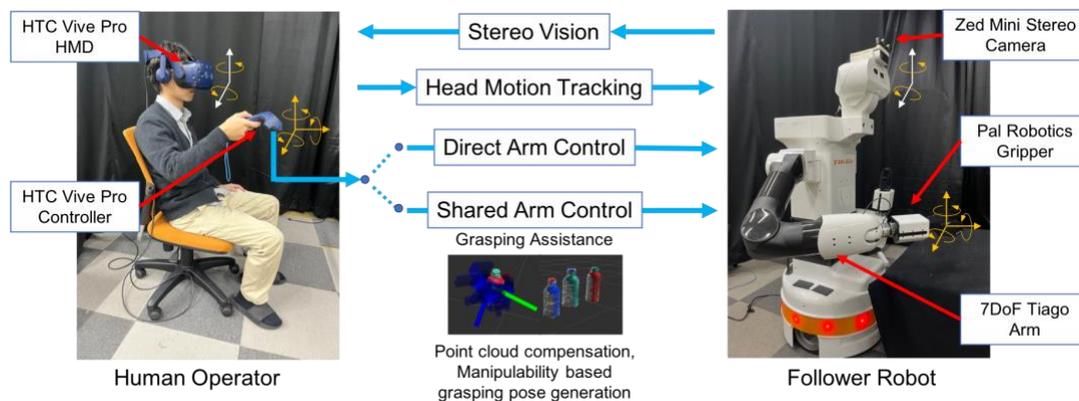


図 1 直感的な遠隔操作を可能にする協調制御システム

構築した遠隔システムは、直接制御モードと協調制御モードを有している。直接制御モードでは操作者の上半身動作を遠隔ロボットで追従する。具体的には、操作者の頭部動作とロボットの頭部動作が同期され、遠隔ロボットの頭部に装着されたステレオカメラによって視点変更を伴う視覚フィードバックが可能である。また、操作者の手先とロボット手先の動作は逆運動学の計算によって同期される。

協調制御では、遠隔での把持動作を支援する。ロボットの頭部に取り付けられた RGBD カメラから取得した点群データをテンプレートマッチングで補完することにより、各方向から対象物の把持位置を検出した。その結果、多方向の把持候補をロボットアームの可操作性によって評価することが可能となり、その中から可操作性の一番高い姿勢を選出し操作の支援に用いた。これにより、ロボットアームが到達可能な目標の位置・姿勢をあらかじめ選出し、操作支援の実現可能性を保証する。提案した協調制御手法は、操作者の意図を反映し、同時にロボットアームの動作拘束条件を考慮しているため、スムーズな遠隔操作支援を行うことが可能である（図2参照）。検証実験の結果、遠隔操作時の操作性の改善により、作業者の負担が軽減され、作業時間が短縮された（図3参照）。

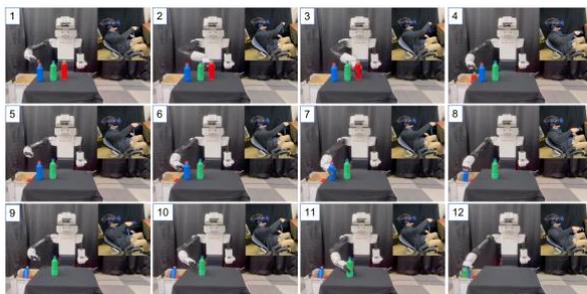


図2 協調制御による遠隔把持の支援

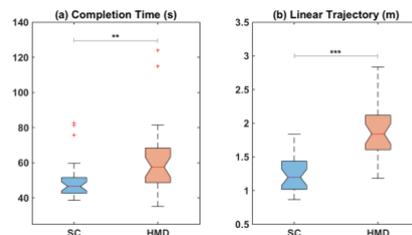


図3 操作性評価の結果

(a) タスク遂行時間, (b) 操作者の手先移動距

#### 4.2 触覚情報を遠隔操作者にフィードバックする手法の構築

本研究ではビジョンベースの触覚センサを用いて把持力の推定を行った。推定された把持力を力逆送型バイラテラル制御器と連携することにより、遠隔操作者にグリップ先端の力情報を提示することに成功した（図4参照）。

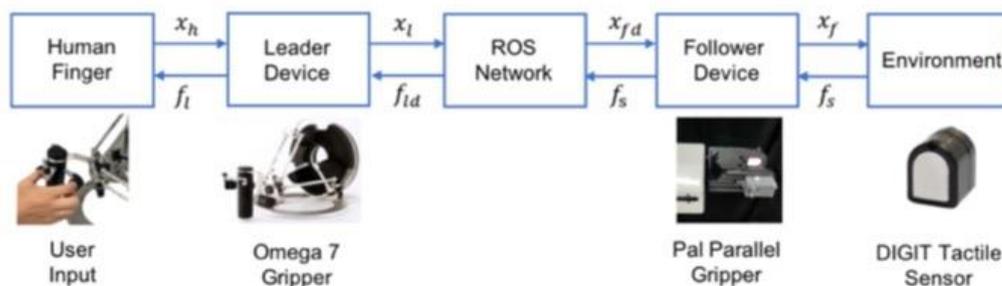


図4 ビジョンベース触覚センサとバイラテラル制御の連携

把持力の推定は、ビジョンベース触覚センサの表面にあるゲルの変形量に基づいて行われるため、この表面変形量の推定のために深度マップを作成した。深度マップはセンサから取得された RGB 画像を Multi-Layer Perceptron を用いることによって作成された（図5参照）。推定された表面変形量(深度)と力の真値データを取得し、回帰アルゴリズムによって深度と力の関係を解析することで、把持力をリアルタイムで推定できるようになった。更に、バイラテラル制御と連携することで力覚フィードバックを行った結果、器用な in-hand 遠隔操作が可能となった（図6参照）。

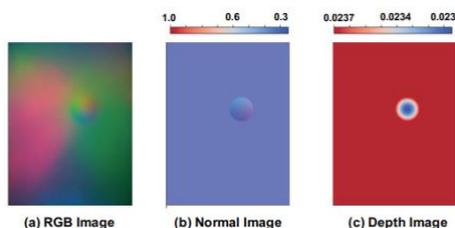


図5 RGB 画像から作成された深度マップ



図6 遠隔操作による in-hand pivoting

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 Zhu Yaonan, Jiang Bingheng, Chen Qibin, Aoyama Tadayoshi, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 11
2. 論文標題 A Shared Control Framework for Enhanced Grasping Performance in Teleoperation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 69204 ~ 69215
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3292410	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 Zhu Yaonan, Fusano Keisuke, Aoyama Tadayoshi, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 10
2. 論文標題 Intention-reflected predictive display for operability improvement of time-delayed teleoperation system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	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） 10.1186/s40648-023-00258-8	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Qibin Chen, Yaonan Zhu, Kay Hansel, Tadayoshi Aoyama, Yasuhisa Hasegawa
2. 発表標題 Human Preferences and Robot Constraints Aware Shared Control for Smooth Follower Motion Execution
3. 学会等名 34th 2023 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haokun Liu, Yaonan Zhu, Kenji Kato, Izumi Kondo, Tadayoshi Aoyama, Yasuhisa Hasegawa
2. 発表標題 LLM-Based Human-Robot Collaboration Framework for Manipulation Tasks
3. 学会等名 34th 2023 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yaonan Zhu, Shukrullo Nazirjonov, Bingheng Jiang, Jacinto Colan, Tadayoshi Aoyama, Yasuhisa Hasegawa, Boris Belousov, Kay Hansel, Jan Peters
2. 発表標題 Visual Tactile Sensor Based Force Estimation for Position-Force Teleoperation
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS) (国際学会)
4. 発表年 2023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		
ドイツ	ダルムシュタット工科大学		