

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：14501  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K12010  
研究課題名（和文）オペレータの主視点選択に基づく遠隔操縦システムの操作性向上に関する基盤的研究  
  
研究課題名（英文）Study on improvement of operability of remote control systems based on the operator's selection of primary viewpoint  
  
研究代表者  
横小路 泰義（Yokokohji, Yasuyoshi）  
  
神戸大学・工学研究科・教授  
  
研究者番号：30202394  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数画面を有する遠隔操縦システムにおいて、オペレータが主画面を明示的に切り替える行為に着目し、この切り替えに応じて操縦デバイスの参照座標系を切り替えるとともに、適切な操縦モード（位置モードまたは速度モード）に切り替え、さらに選択した主画面内での作業アームの手先に合致するように、操縦デバイスの手先姿勢を力覚フィードバック用のアクチュエータを有効利用して能動的に変化させて、手先姿勢および参照座標系に関する整合性を確保し、オペレータの心的負荷を軽減する方法を提案した。また、パラレル機構とジンバル機構を組み合わせ、提案する手法に適したコンパクトな操縦デバイスを設計開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
複数画面を有する遠隔操縦システムにおける操縦モードの切り替えや、手元の操縦側と画面を通しての作業環境側との整合性を確保するための一般的な手法を提案した。  
想定するカメラは、作業環境に固定されたカメラや作業アーム手先のカメラだけでなく、自由視点カメラも含まれており、一般性の高い問題設定であるため、ここでの成果は様々な遠隔操縦システムを開発する上で重要な設計指針となるものである。また、提案手法に適したデバイスとして開発された操縦デバイスと組み合わせた全体システムは極めて操作性が高く、多くの場面で有効となる普遍的なシステムとなることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a basic design framework for remote control systems with multiple screens by focusing on the operator's act of explicitly switching the primary view. The reference coordinate system of the control device will be changed according to this switching, and an appropriate control mode (position mode or velocity mode) is also selected. We also proposed a method to reduce the operator's mental load by actively changing the hand posture of the control device using the actuators for force feedback so that it matches the hand posture of the working arm, thereby ensuring consistency in the hand posture and the reference coordinate system. We also designed and developed a compact control device that combines a parallel mechanism and a gimbal mechanism, which is suitable for the proposed method.

研究分野：ロボット工学

キーワード：遠隔操縦システム リモートペア型アーム 参照座標 主画面選択 操縦デバイス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

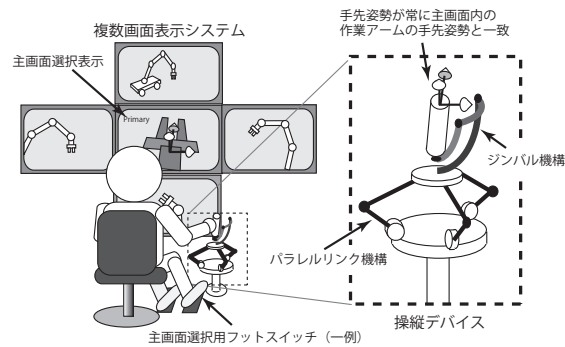


図 1: 提案する遠隔操縦ステーションの概念図

### 1 研究開始当初の背景

遠隔操縦に関する研究の歴史は長く、その起源は 1940 年代にまで遡ることができるが、ロボティクスの進展と共に遠隔操縦の研究も益々盛んになり、災害対応や手術ロボットに加え、自律機能との分担／融合や自律動作するロボット（自動運転車を含む）のバックアップとしての遠隔操縦技術にも注目が集まっている。しかしながら、遠隔操縦システムに関する普遍的な設計論はいまだに確立されていないのが現状であり、具体的には【問い 1】遠隔操縦における動作の精密性と効率性のトレードオフをどう解決するのか？【問い 2】遠隔操縦における視覚系と操作系の参照座標の不一致に伴うメンタルローテーション負荷の問題をどう解決するのか？【問い 3】遠隔操縦システムにおける操縦デバイスは、どうあるべきか？という 3 つの問いが本質的な問題として未解決のままである。

### 2 研究の目的

本研究は、遠隔操縦システムの普遍的な設計論の確立を目指し、遠隔操縦システムの設計論の核心をなす上記の学術的問いに答えることで、遠隔操縦システムの操作性向上に関する基盤的研究を行うことを目的とする。具体的には、上記問い 1 と問い 2 に対しては、オペレータの主視点選択行為に着目することで問題の解決を図る。また問い 3 に対しては、提案手法の特徴を活かして、並進動作指令にはパラレル機構、手先姿勢指令にはジンバル機構を採用した新たな機構を提案する（図 1 参照）。

### 3 研究の方法

本研究では、図 1 に示したような遠隔操縦ステーションを開発してその有効性を検証するが、具体的には以下の点を明らかにする。

1. オペレータの主視点選択に基づく参照座標系と操縦モードの切り替え手法の確立
2. 参照座標系切り替え時とインデキシング操作時の操縦デバイスの姿勢制御
3. 並進パラレル機構と回転ジンバル機構を組み合わせたコンパクトな操縦デバイスの設計開発
4. システムの構築と評価

### 4 研究成果

#### 4.1 オペレータの主視点選択に基づく参照座標系と操縦モードの切り替え手法の確立

##### 4.1.1 遠隔操縦において確保すべき二つの整合性

本研究では、まず遠隔操縦において確保すべき整合性を図 2 に示す二つの整合性で整理し、これらの整合性を確保することが重要であることを明確にした。まず参照座標の整合性とは、操縦デバイスによる動作指令の方向と、その指令を受けて画面内の作業アームが動作する方向とが整合することである。また手先姿勢の整合性とは、操縦者の手の姿勢に基づいた動作指令が、作業アームの手先姿勢に整合した動作として実現できていることである。

異構造型のリモートペア型アームにおいて行われるインデキシング操作中は操縦デバイスはフリーとなるので、作業アームとの再接続時に両者の姿勢間に誤差が生じうる。さらにインデキシングを繰り返すことでこの誤差が累

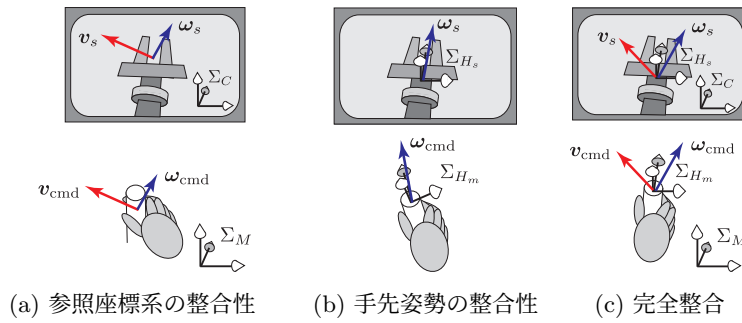


図 2: 遠隔操縦において確保すべき二つの整合性

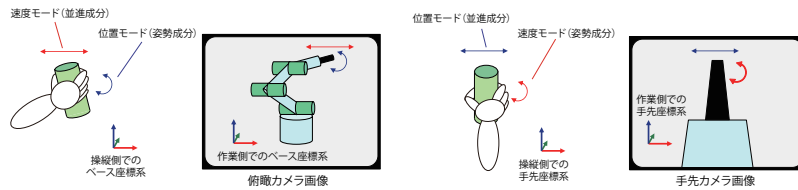


図 3: 主画面として選択したカメラに応じた制御モードの設定

積し、手先姿勢の整合性が崩れてしまう。また複数画面を有する遠隔操縦システムでは、オペレータが注視する画面を変更した時点で参照座標の整合性が崩れてしまう。

#### 4.1.2 選択した主画面に応じた操縦モードの割り当て

遠隔操縦における適切な参照座標系と制御モードの選択の問題を解決するために、オペレータが選択した主視点と整合する遠隔操縦法を提案した。複数画面を有する遠隔操縦システムにおける「主視点」の概念は、マルチウィンドウを有するヒューマンインタフェースにおける“primary window”の考えかたを拡張して、オペレータが作業中に最も注目する画面とみなすことができる。よって以降は「主視点」ではなく「主画面」(primary view)とする。この主画面は、作業中に何度も変更されることを想定している。

主画面は、注目する画面をヘッドトラッカーで検知させた後にフットスイッチを用いてオペレータが明示的に選択できるようにすると良い<sup>1</sup>。選択された主画面のカメラ座標系を操縦デバイスの参照座標とすることで、主画面において参照座標の整合性を確保する。

適切な制御モードの選択の問題に対しては、選択した主画面に応じてあらかじめ設定しておいた制御モードにすることで解決する。各画面が主画面として選択されるとき作業状況はある程度想定できるため、画面毎にあらかじめ制御モードを設定しておくことは可能である。例えば図 3(a) に示したように、作業アーム全体や対象タスクを含む作業環境全体を捉える俯瞰カメラの映像を主画面とした場合、オペレータは作業アームの手先を大きく動かすような作業を行おうとしていると想定されるので、並進成分は速度モードとする<sup>2</sup>。ただし、回転成分は姿勢整合性を保つため位置モードとすべきである。一方で図 3(b) に示したように、作業アームの手先とアプローチする対象物体を大きく映すような手先カメラ視点からの映像を主画面とした場合、オペレータは対象物体への接触を伴うような繊細な作業などを行うことが想定されるので、並進成分は位置モードとする。ただし、手先カメラ画像内では、作業アームの手先の姿勢は変わらないため、姿勢の整合性を保つために回転成分は速度モードとすべきである。

#### 4.1.3 自由視点カメラ映像を主画面とした場合への拡張

作業環境に配置されたカメラは、通常は手先カメラ以外は環境に固定されているが、作業場所や作業の種類によって適切なカメラアングルは異なるため、たとえ複数の視点が確保されていたとしても固定カメラでは不十分となる

<sup>1</sup> この手法は提示する画面の配置や数に依存しないので、一般性の高いものである。

<sup>2</sup> この時、本来位置モードによるリモートペア型遠隔操縦のための 6 自由度の操縦デバイスを用いて速度モードを実現するには、操縦デバイスのある基準位置あるいは基準姿勢を目標とした弱いゲインでの位置制御をすることで、操縦デバイスをジョイスティックのように振舞わせればよい。

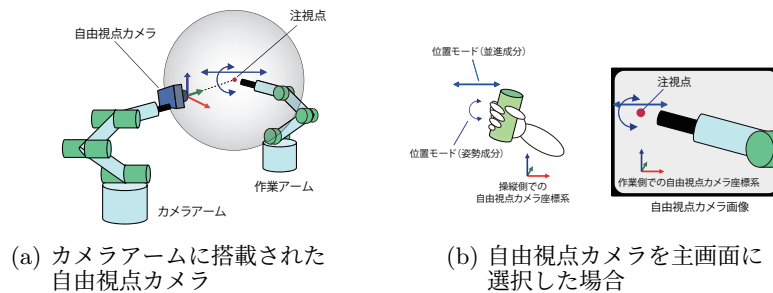


図 4: 自由視点カメラ

場合がある。この問題を解決するために、図 4(a) に示すように、カメラアームの先端に取り付けた「自由視点カメラ」の導入が考えられる。このような自由視点カメラの映像を主画面とした場合は、図 4(b) に示すように並進成分、回転成分共に位置モードとするのが適当である。

なお以上 4.1.2 節、4.1.3 節で述べたモードの振り分けはあくまで一例であり、選択した主画面に応じて並進成分と回転成分それぞれ独立に適切な制御モードを振り分けることが重要となる。

## 4.2 参照座標系切り替え時とインデキシング操作時の操縦デバイスの姿勢制御

### 4.2.1 手先拘束による整合性の確保

オペレータが主画面を切り替えた際は、新たに選択された画面のカメラ座標系を参照座標系とすることで、座標系の整合性が確保される。その上で、新たに選択された主画面のカメラ座標系から見た作業アームの手先姿勢に操縦デバイスの手先姿勢を拘束させることで、姿勢の整合性を確保する<sup>3</sup>。また、インデキシング操作中も、操縦デバイスの手先姿勢を現在の主画面のカメラ座標系から見た作業アームの手先姿勢に拘束させる。操縦デバイスの手先姿勢拘束には、操縦デバイスが備える力覚フィードバック用のアクチュエータを有効利用する。

選択した主画面に応じて操縦デバイスの姿勢が変化することで、オペレータにとっては主画面が正しく変更されたことの合図 (cue) になり、また新たに選択した主画面内での作業アームの姿勢を画面からだけでなく自身の手の向きからも把握できるようになる。

### 4.2.2 自由視点カメラの視点変更法

自由視点カメラの視点変更も、姿勢拘束の考え方を拡張することで直感的な操作が可能となる。図 4(a) に示したように、自由視点はある点 (注視点) を常に注視しながら変更できることが望ましい。これは、カメラは常に注視点を向かせつつ、注視点を中心とする球殻に沿わせてカメラを移動させる事に相当する。このようなカメラの視線変更を操縦デバイスを使って直感的に行うために、これまでの「作業アーム操縦モード」に加え、新たに「カメラ視点変更モード」を導入する。このモードに遷移すると操縦デバイスはカメラアームと接続され、操縦デバイスの手先は、現在の注視点回りの回転運動のみが可能のように拘束される。その拘束下で操縦デバイスの姿勢を変更すると、画面内の作業アームの姿勢がそれと整合するように、カメラアームが図 4(a) の球殻上を移動もしくは注視点を向く軸回りに回転する。この結果、自由視点カメラの視線変更を行ったとしても、主画面内での姿勢整合性は常に確保されるので、再び「作業アーム操縦モード」に遷移しても、そのままスムーズに操縦が可能となる。

また、注視点の位置そのものを変更したい場合は、「カメラ視点変更モード」での操縦デバイスの並進方向の指令で可能となる。通常このモードでは、注視点が動かないように操縦デバイスの手先は拘束されているが、スイッチを押すなどしてオペレータが注視点位置変更の意志を示せば、操縦デバイスの並進を許すようにすれば良い。

## 4.3 並進平行機構と回転ジンバル機構を組み合わせたコンパクトな操縦デバイスの設計開発

### 4.3.1 4 自由度冗長ジンバル機構

本研究で提案した手法では、姿勢の整合性を確保するために、操縦デバイスの手先姿勢は選択された主画面内の作業アームの手先姿勢と同じになるように拘束される。カメラの視線によって画面内での作業アームの手先は様々

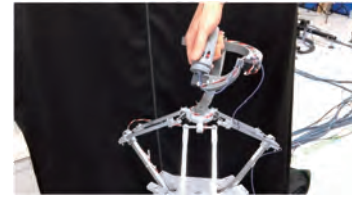
<sup>3</sup>手先姿勢の整合性は本来オペレータの手先姿勢に関するものであるから、操縦デバイスの手先の拘束で手先姿勢の整合性を確保するには、操縦デバイスのグリッパの形状を工夫し、常にオペレータが決まった手先姿勢でグリッパを把持するようしておく必要がある。



(a) 4自由度ジンバル機構



(b) ある手先姿勢でのジンバルの最適姿勢

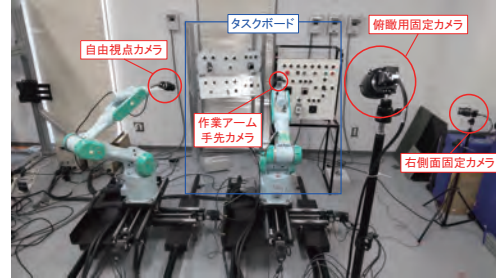


(c) 別の手先姿勢でのジンバルの最適姿勢

図 5: 試作デバイス



(a) 操縦コックピット



(b) 作業環境全景

図 6: 実験システム

な姿勢となり得るので、操縦デバイスの手先姿勢は広い動作範囲を持つ必要がある<sup>4</sup>。通常の3軸ジンバル機構では、各関節の動作範囲をどれだけ広げても特異点によるジンバルロックの問題は回避できないため、内視鏡手術用ロボットのダビンチでも採用されている4自由度冗長ジンバル機構とする。

一方並進部については、操縦デバイスの作業範囲が狭いと頻繁なインデキシング操作を要求されて作業能率が落ちるが、本研究で提案した手法では作業アームの大きな移動が想定される俯瞰カメラを主画面として選択したときは、並進成分は速度モードとなるため、インデキシングの必要がない。また主画面が手先カメラ映像となったときは、並進成分は位置モードとなるが、手先カメラ映像下での並進操作の範囲は限定的である。したがって、姿勢成分と違って並進成分はそれほど広い可動範囲は必要なく、見かけの慣性を押さえて高剛性でコンパクトな設計が可能となるパラレル機構を採用する。

#### 4.3.2 操縦デバイスの試作

図5に、上記コンセプトに基づいて実際に試作した操縦デバイスを示す。図5(a)は、4自由度ジンバル機構の近影であり、図5(b), (c)に示したように、与えられた手先姿勢に対して冗長自由度のセルフモーションにより最も可操作度の大きな姿勢（すなわちジンバルロックから最も遠い姿勢）にすることができる。

#### 4.4 システムの構築と評価

以上の提案手法の有効性を検証するため、図6に示したような実験システムを構築し、検証実験を行った。ただし、図6(a)に示すように、操縦デバイスとしては市販の6自由度ハプティックデバイスを用いており、4.3節で示した本研究で開発したデバイスは、現状単体での評価に留まっている。また、任意視点カメラを導入する前の、複数画面としては最低の2画面構成での評価の詳細は参考文献を参照されたい。図6に示した任意視点カメラを導入後の4画面構成のシステムでの評価の詳細な結果については、今後公表される成果発表を参照されたい。

<sup>4</sup>操縦デバイスの手先姿勢が広い動作範囲を取れたとしても、その姿勢がオペレータにとって無理のある姿勢であれば、そのまま操縦を続けることは困難であろう。この場合は、オペレータが明示的に姿勢拘束を解いて、自身にとって快適な手先姿勢に変更する「姿勢のインデキシング」を導入すると良い。これは作業アームの手先を自身にとって快適な姿勢で仮想的に「持ち替える」ことに相当する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 横小路 泰義	4. 巻 39
2. 論文標題 極限作業ロボットのための遠隔操縦技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 510-516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.39.510	査読の有無 無
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4件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 辻廣樹, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 マスタ・スレーブ型遠隔操縦における複数の参照座標系に応じた直感的指令法の提案
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2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Tsuji, Raita Katayama, Hikaru Nagano, Yuichi Tazaki, Yasuyoshi Yokokohji
2. 発表標題 Primary-view-consistent Operation Method of Master Controller in Multiple Screen Teleoperation System
3. 学会等名 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横小路 泰義
2. 発表標題 過去の教訓に基づいて福島原発内部調査用ロボットを振り返る
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuyoshi Yokokohji
2. 発表標題 Keynote Talk: Teleoperation Technology That Expands Possibilities of Robot Applications
3. 学会等名 International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research 2022 (FDR 2022) (招待講演) (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