

# 人×機械の遠隔融合システムの開発 -操作負荷軽減を目指した運動拘束システムの基礎検討-

○延命朋希 畑 浩一 春名正樹（三菱電機株式会社）

## 1. 研究背景

COVID-19 の世界的大流行を受け、人間同士の対面を必要としない遠隔操作技術やロボットの自律化技術への注目が高まっている。従来から進展してきたこれら技術は COVID-19 の流行をきっかけに次々と実地投入されており、昨今急速な発達を見せている。

本研究グループでは触覚-視覚といった五感同士の相互作用に着目した遠隔操作技術の開発を進めており、文献 [1] では視覚を通じて疑似的に触覚情報を伝達する「視覚的力触覚」に基づく作業効率の改善について論じた。

本稿ではこれに続き、遠隔操作時の操作性向上を目的とした運動拘束技術や、その視覚化に関する提案・実証を行った。通信遅延や遠近感の欠如、不慣れなインターフェースの使用といった状況下での自由度の高いデバイスの操作は高難度である。例えば文献 [1] にて遠隔操作を行った際、スレーブの操作自由度が高すぎて却って適切な操作ができなくなる現象が報告されている。そこで本稿では、遠隔操作時のスレーブデバイスの運動自由度をあえて拘束することで操作性を改善する手法を提案した。本研究ではスレーブデバイスとして建設機械を想定した運動拘束手法を提案し、シミュレータや簡易な実験機を用いてその実現性を確認した。特に今回は建設機械の簡易モデルとして、同様の構造を有する車輪付きロボットアームを用いて実証実験を行った。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章でシステム構成や実験機およびそのモデリングについて説明し、続く 3 章で運動拘束手法のアルゴリズムを述べる。第 4 章では運動拘束手法の実現性を確認し、最後に 5 章で結論を述べる。

## 2. 問題設定

### 2.1 システム構成

本稿で用いる遠隔操作システムの構成を図 1 に示す。操作インターフェースを通じて手指の情報を取得し、対応する角度指令値をロボットアームの実機に反映すると同時に、拘束空間を Unity シミュレータ上にリアルタイム表示する構成となっている。各デバイス間は UDP 通信を用いて送受信を行っており、関節角度指令値の情報やモード切り替え情報等をやり取りしている。

操作インターフェースにはロボットハンド遠隔操作のマスタデバイスとしても実用例がある Leap Motion を用いた [2]。Leap Motion は赤外線 LED と赤外線カメラを用いて手の動作を測定するデバイスであり、手首の座標位置や指の骨の向き、特定のジェスチャ等を非接触で取得可能である。

また、ロボットアームには Dynamixel 社の Open Manipulator-X を用いており、移動を考慮する際にはこの下に Nexus Robot 社製の 3 輪オムニホイール台車を接続した。

### 2.2 実験機とそのモデリング

本稿では建設機械への応用を前提に、ショベルカーと同様の構造を持つロボットアームを用いて運動拘束を実現する。

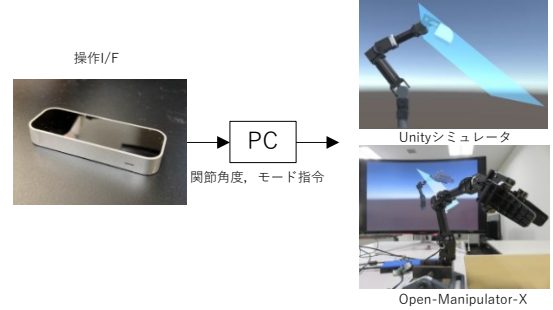


図 1 システム構成のブロック図

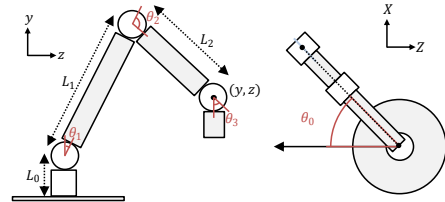


図 2 リンクアームと座標系 ( $\{X, Y, Z\} \in \mathbb{R}^3$ ,  $\{y, z\} \in \mathbb{R}^2$ ,  $\{r, \theta_0\} \in \mathbb{R}^2$ )

ショベルカーのアームはリンクマニピュレータと同様の力学的モデルを有する [3]。図 2 にその物理モデルを示す。

リスト位置 (図中  $(y, z)$ ) について、 $\theta_0$  と同期した回転座標系における順運動学は式 (1) で表される。

$$y = L_0 + L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1a)$$

$$z = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1b)$$

また、この時の逆運動学は式 (2) で表される。

$$\theta_1 = -\arccos\left(\frac{y^2 + z^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2}}\right) + \arctan\left(\frac{z}{y}\right) \quad (2a)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{z - L_1 \sin \theta_1}{y - L_1 \cos \theta_1} - \theta_1\right) \quad (2b)$$

なお、 $\theta_3$  は手先が常に下方向を向くよう設定している。

### 2.3 建設機械の特性

ショベルカーの運動モデル自体はリンクアームと合致するが、その特性においては異なる点がある。これらを踏まえた上でアルゴリズムを構築する必要がある。

ショベルカーは「バケットシリンダーとバケットアームの角度が 90 度」かつ「アームシリンダーとアームの角度が 90 度」の時に最大掘削力を発揮する。この時の関節角の値を  $\theta_{1,\text{max}}, \theta_{2,\text{max}}$  とすると、最大掘削力を発揮する点までの水平距離  $L_{f,\text{max}}$  は式 (3) となる。

$$L_{f,\text{max}} = L_1 \sin(\theta_{1,\text{max}} + \theta_{2,\text{max}}) + L_2 \sin(\theta_{1,\text{max}}) \quad (3)$$

表1 簡易アームのパラメータ		
Symbols	Value	Unit
$L_0, L_1, L_2, L_3$	7.7, 13, 12.4, 12.6	cm
$\theta_{1,\max}, \theta_{2,\max}$	20, 80	deg
$V_{\max}$	10	deg/s

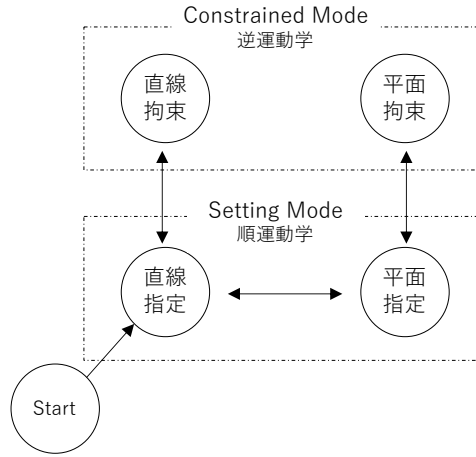


図3 操作モードの状態遷移図

また、通常ショベルの操作はアームの角度が前方45度～手前30度の範囲で作業することから、本稿でもこれをロボットアームの可動範囲として用いる。

### 3. リンクアームの運動拘束

#### 3.1 操作モードとその切り替え

##### 3.1.1 操作モード

本研究では拘束モードとして、直線状の空間への拘束と平面状の空間への拘束を取り扱う。これらはそれぞれ、通常の掘削作業や均し動作への活用を想定している。

拘束空間の形状1つに対し、拘束する空間を指定するモードと実際に運動を拘束するモードが存在する。ここでは直線状の拘束空間と平面状の拘束空間を取り扱うので、「拘束直線の指定」「拘束平面の指定」「直線拘束」「平面拘束」の計4つのモードを遷移することになる。操作モードの状態遷移図を図3に示す。

今回用いるロボットアームを筆頭に、スレーブデバイスは通常有限な可動範囲を持つ。適切な範囲が選定されていない場合、実際には到達できない領域を操作範囲として表示したり、逆に実際には到達できる範囲を見落としたりといった事態に繋がる。そのため、拘束空間のサイズや形状アプリケーションのほか、こういったデバイスの可動域やアクチュエータの飽和を加味して指定する必要がある。拘束空間の具体的なサイズや形状については3.2.1節および3.2.2節にて取り扱う。

##### 3.1.2 拘束空間の指定

本節では「拘束直線の指定モード」および「拘束平面の指定モード」について述べる。どちらのモードにおいても、下記のルールに基づいて手の動きとリスト位置の座標を対応付けている。

- 手首の前後・上下運動とリスト位置の前後・上下運動を対応付ける
- 手首位置の左右移動量とベース角  $\theta_0$  を対応付ける
- 手首のあおり角とリスト角を対応付ける

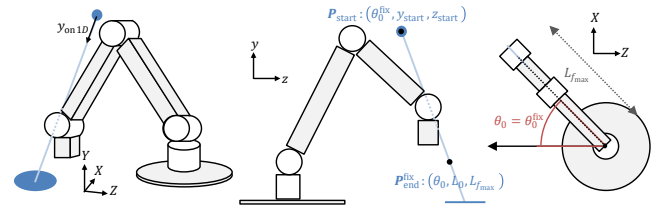


図4 直線拘束時の座標系 ( $y_{on1D} \in \mathbb{R}$ )

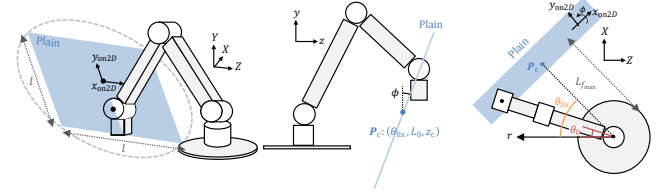


図5 平面拘束時の座標系 ( $\{x_{on2D}, y_{on2D}\} \in \mathbb{R}^2$ )

拘束直線の指定において、図4に示した  $P_{end}$  はショベルカ特性によって決まっており、 $P_{start}$  はリスト部を追尾する様に動く。また、それぞれの点の位置が分かりやすい様に  $P_{end}$  にはスポットライト状のマーカーを、 $P_{start}$  には球状のマーカーを設置し、両者を結ぶ半透明の直線によって拘束空間を明示している。

また拘束平面の指定において、平面上部をリスト部に追従させ、リスト位置に応じて平面の傾きを決定している。この仕様は後述のジャンプ問題の改善にも役立つ。拘束平面を明示するために、正方形のマーカーを設置している。

#### 3.1.3 ジャンプ問題とその対策

本システムは4つのモードを有するが、各々の状態において直線上の座標系  $\mathbb{R} : (y_{on1D})$ 、平面上の座標系  $\mathbb{R}^2 : (x_{on2D}, y_{on2D})$ 、慣性系  $\mathbb{R}^3 : (x, y, z)$ 、という異なる座標系を持つ。このため、状態遷移に伴って座標系が変動し、モードの切り替え時に指令値が大幅に変動する「ジャンプ」を引き起こす場合がある。このジャンプは意図しない動作を引き起こし、機器の破損や安全上の問題に繋がる場合がある。

この問題の対策として「ジャンプが小さくなるような位置にリスト位置を移動させてからモードを切り替える」「切り替え時にジャンプが小さくなる様な拘束面内の座標に移動させる」「座標の切り替えが起らないような拘束空間を選定する」「進入禁止領域を設けるなど、そもそもモード自体の切り替えを行わない」といった解決策が考えられる。

本稿では実装の簡便さから、リスト位置を拘束空間に追従させることで、「ジャンプが小さくなるような位置に移動させてからモードを切り替える」手法を採用した。

### 3.2 運動の拘束

#### 3.2.1 直線拘束

リスト位置の運動を直線状の空間に拘束することを考える。前述の通りショベルカにおいて、最大掘削力を発揮する地点までの距離は各関節の角度によって決まる。そこでここでは拘束直線指定モードで指定したリスト位置を始点、掘削力最大となる地点を終点とした拘束直線を考える。直線拘束の様子とその時の座標系を図4に示す。

ここで  $0 \leq y_{on1D} \leq 1$  なる変数を導入する。これは拘束直線上の座標系に対応しており、 $y_{on1D} = 1$  の時  $y_{ref} = y_{end}$  となり、 $y_{on1D} = 0$  の時  $y_{ref} = y_{end}$  となる。ここでは各指の関節角の平均に比例した手のひらき具合に関する操作量を正規化して  $y_{on1D}$  に対応付けた。

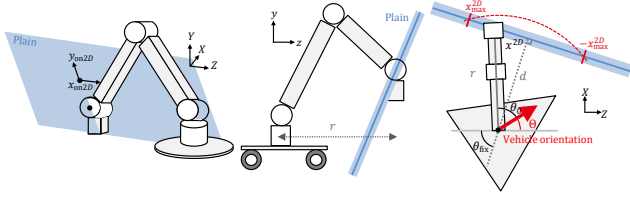


図6 移動を考慮した平面拘束時

拘束直線は  $\theta_0$  の値を固定したときのロボットアームの可動範囲内にあるので、 $\theta_0 = \theta_{\text{fix}}$  とした時の  $y-z$  平面の部分空間である。直線空間上で  $y_{\text{on1D}}$  と表された座標は  $y-z$  平面上では式 (4a) で表される。この時、式 (2) を用いて求めた逆運動学の解は式 (4b) となる。

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ y_{\text{ref}} \\ z_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{\text{fix}} \\ y_{\text{start}} + (y_{\text{end}} - y_{\text{start}})y_{\text{on1D}} \\ z_{\text{start}} + (z_{\text{end}} - z_{\text{start}})y_{\text{on1D}} \end{bmatrix}, \quad (4a)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arccos\left(\frac{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2}}\right) + \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}}}{y_{\text{ref}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}} - L_1 \sin \theta_1}{y_{\text{ref}} - L_1 \cos \theta_1} - \theta_1\right) \end{bmatrix} \quad (4b)$$

ここで、添え字の start, end, ref はそれぞれ、指令値、直線の始点、直線の終点、を表す。このように、直線上への運動拘束の実現には下記の3ステップを経由している。

1. 直線の始点と終点を指定
2. 直線上の座標系  $y_{\text{on1D}}$  を  $y-z$  平面上に射影
3.  $y-z$  平面上で逆運動学を解く

### 3.2.2 平面拘束

リスト位置の軌道を平面状の空間に拘束することを考える。この様子を図5に示す。ここでは最大掘削力を発揮する地点  $P_c$  を中心とし、2リンクアームの円形の可動範囲に内接する正方形を拘束平面として選んだ。なお、「円形の可動範囲」は  $P_c$  を通り  $xz$  平面に平行な平面とリンクアームの可動範囲の共通部分を指しており、この大きさは平面の傾きに対して可変である。ここでは、可動範囲が  $\phi$  について最大となった時の範囲を拘束平面として表示しており、この時の一片の長さを  $l$  とする。

ここで、 $-1 \leq y_{\text{on2D}} \leq 1$ ,  $-1 \leq x_{\text{on2D}} \leq 1$  なる変数を導入する。これらは拘束平面上の座標系に対応しており、 $y_{\text{on2D}} = 1$  の時  $y_{\text{ref}} = l$  となり、 $y_{\text{on2D}} = -1$  の時  $y_{\text{ref}} = -l$  となる。なお、 $l$  は拘束平面の一辺の長さである。 $x_{\text{on2D}}$  についても同様である。ここでは、手のひらき具合に関する操作量を正規化して  $y_{\text{on2D}}$  に対応付け、手首の回転角を  $x_{\text{on2D}}$  に対応付けた。

以上の前提のもと、式 (5a) で  $r-\theta_0$  座標系へのマッピングと逆運動学の求解、 $y-z$  平面へのマッピングを行い、式 (5b) にて  $y-z$  平面上での逆運動学の求解を行っている。

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ y_{\text{ref}} \\ z_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{\text{fix}} + \arccos\left(\frac{x_{\text{on2D}}}{L_{\text{fmax}} + l y_{\text{on2D}} \sin \phi}\right) \\ y_{\text{on2D}} l \cos \phi \\ \sqrt{l^2 x_{\text{on2D}}^2 + (L_{\text{fmax}} + l y_{\text{on2D}} \sin \phi)^2} \end{bmatrix}, \quad (5a)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arccos\left(\frac{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2}}\right) + \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}}}{y_{\text{ref}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}} - L_1 \sin \theta_1}{y_{\text{ref}} - L_1 \cos \theta_1} - \theta_1\right) \end{bmatrix} \quad (5b)$$

ここで、添え字の fix は平面拘束時のラッチ角を表す。平面拘束においては、マッピングと逆運動学の求解を (1)  $\theta_0$  を中



図7 台車付きロボットアームのモデルと実機

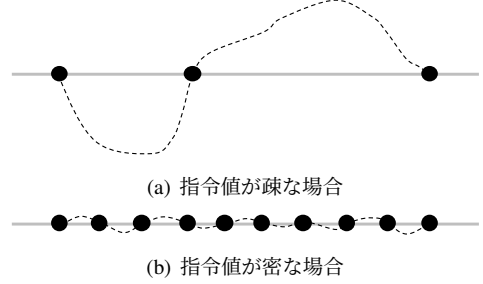


図8 指令値の間隔と運動拘束

心とした回転座標系と (2)  $y-z$  平面上の2段階に分割しており、平面上での運動拘束の実現では下記の5ステップを経由している。

1. 拘束平面を指定
2. 平面上の座標系  $x_{\text{on2D}}, y_{\text{on2D}}$  を  $r-\theta_0$  平面上に射影
3.  $r-\theta_0$  平面上で逆運動学を解く
4. 平面上の座標系  $x_{\text{on2D}}, y_{\text{on2D}}$  を  $y-z$  平面上に射影
5.  $y-z$  平面上で逆運動学を解く

上記ステップにおいて  $\theta_0$  を固定すると直線拘束と同値なアルゴリズムが導かれる。

### 3.2.3 移動を考慮した平面拘束

図7に示すように、ショベルカーのようなアームが台車の上に搭載されているケースでは、両者を協調制御することで可動範囲を大幅に伸展できる。この様子を図6に示す。

ここでは、車体中心からの距離が  $d$  となり、水平方向の広さが無限の平面を拘束平面として指定した。前節と同様に、 $-1 \leq y_{\text{on2D}} \leq 1$ ,  $-1 \leq x_{\text{on2D}} \leq 1$  なる変数を導入する。ただし  $x_{\text{on2D}}$  は  $l$  ではなく車体を固定した時の水平方向の可動範囲に対応づけられている。

以上の前提のもと、式 (6a) で  $r-\theta_0$  座標系へのマッピングと逆運動学の求解、 $y-z$  平面へのマッピングを行い、式 (6b) にて  $y-z$  平面上での逆運動学の求解を行っている。

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ y_{\text{ref}} \\ z_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{\text{fix}} - \Theta + \arccos\left(\frac{x_{\text{on2D}}}{r + l y_{\text{on2D}} \sin \phi}\right) \\ y_{\text{on2D}} l \cos \phi \\ \sqrt{l^2 x_{\text{on2D}}^2 + (r + l y_{\text{on2D}} \sin \phi)^2} \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arccos\left(\frac{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{y_{\text{ref}}^2 + z_{\text{ref}}^2}}\right) + \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}}}{y_{\text{ref}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{z_{\text{ref}} - L_1 \sin \theta_1}{y_{\text{ref}} - L_1 \cos \theta_1} - \theta_1\right) \end{bmatrix} \quad (6b)$$

ここで、 $r = \sqrt{x_{\text{on2D}}^2 + d^2}$  である。運動拘束の実現自体に必要なステップは前節と同様であるが、適宜台車の移動に関する操作が挿入される。





図9 1次元拘束の実験

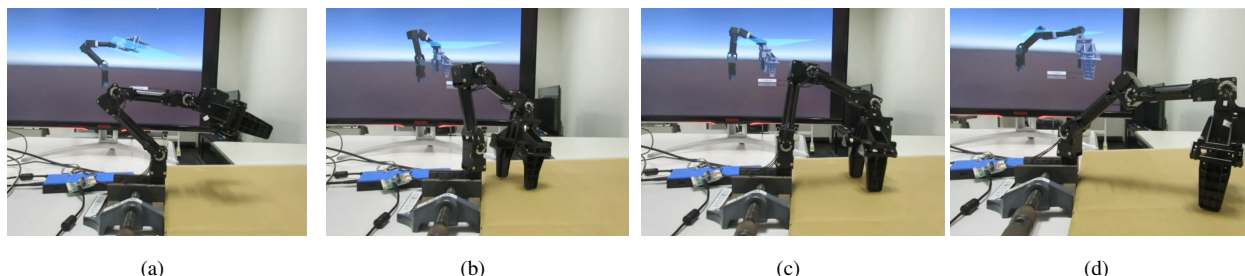


図10 水平面への拘束の実験

### 3.2.4 サンプル間隔の問題とその対策

ソフトウェア的に運動拘束を行う場合、アクチュエータの動作方向と拘束空間の形状の違いに起因して、動作が拘束面から外れてしまう問題がある。ロボットが並進駆動機構によって駆動され、拘束空間もそれらアクチュエータと平行に定義される場合、線型な逆運動学計算によってアクチュエータへの指令値を決定でき、サンプル点間においても運動拘束が達成される。一方、リンクロボットアームは回転モータによって駆動されるが、このリスト位置を線分や平面といった平らな空間で拘束する場合、指令値の決定には非線形な逆運動学計算が必要である。このような場合、指令値のサンプル点間での運動拘束は保証されない。言い換えれば、回転モータにとって最も「自然な」軌道は円軌道であるが、拘束空間の軌道は直線的であり、この齟齬に起因して上述の問題が生じる。P2P方式のロボットアームの軌道追従において同様の問題が知られている [4]。

この問題に対しては、「サンプリング周波数を改善する」、「1サンプルあたりの移動量の制限  $V_{max}$  を設ける」といった形で離散指令値間の距離をできるだけ短くするか、「アクチュエータに対して自然な拘束空間を選定する」等の解決策が挙げられる。本稿では1サンプルあたりの移動量を制限する手法を採用した。

## 4. 検証

図1に示したシステム構成に基づき、実機検証を行った。

図9, 10に示す3つのシチュエーション下で実験を行った。図9は掘削を意図した直線拘束を行っており、背面のモニターで提示した直線に沿うようにロボットが動作する様子が確認できる。図10は建設機械の均し作業を想定し、地面に平行な平面上にリスト位置を拘束している。段ボールで模した地面をリスト部がなぞるように動作する様子が確認できる。

以上より、運動拘束アルゴリズムが正常に動作することが確認できた。特に指定した平面をなぞるタスクに関しては操作難易度の改善が顕著であった。運動拘束アルゴリズムを使わずに地面や壁をなぞる様な動作を行った場合、何度も地面や壁に衝突してしまったが、運動拘束アルゴリズ

ムを用いて地面や壁をなぞる様な動作を行うと、スムーズにこれらタスクを実現できた。

## 5. 結論

本稿では運動拘束による遠隔操作時の操作負荷軽減について、実機とUnity上の表示を用いて基礎的な検討を行った。特に建設機械への応用を念頭に、リンク式のロボットアームの直線/平面拘束をソフトウェア的に行い、その実現性を示した。また、実装にあたって従来検討されていなかった「ジャンプ」や「指令値間隔」に関する問題を発見し、これを解決した。

現時点での成果は以上の定性的な評価と実証性の確認にとどまっており、操作負荷の軽減について定量的な評価を達成していない。今後は[1]で述べられた脳内情報流のような評価指標を用いて、操作負荷の比較を定量的に行う必要がある。また、AR/VR重畳を用いた没入感の向上等も今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Masaki Haruna, Kawaguchi Noboru, Masaki Ogino, and Toshiaki Koike-Akino. Comparison of Three Feedback Modalities for Haptics Sensation in Remote Machine Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 5040–5047, 2021.
- [2] Umberto Scarcia, Roberto Meattini, and Claudio Melchiorri. Mapping human hand fingertips motion to an anthropomorphic robotic hand. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017*, Vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018.
- [3] 森田孝司, 坂和愛幸. パワーショベルのモデリングと制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 1, 1986, pp. 69–75, 1986.
- [4] 日高良和. ロボットの直線移動のための軌道生成に関する基礎研究. Technical report, 1992.