

遠隔組立作業に用いる 1 自由度 haptic device の操作性比較

Comparison of operability of 1 degree-of-freedom haptic device used for remote-controlled assembly

精密工学専攻 22 号 齋藤健大
Kenta Saito

1. 緒言

近年、宇宙空間や原子力発電所など、人間が立ち入りにくい環境下における組立作業の重要性が高まっている。そのような環境下ではロボットの遠隔操作によって作業を行うと安全である。その際、ロボットが受ける力を作業者にフィードバックするために、haptic device を用いる研究を行っている⁽¹⁾。haptic device とは、操作者が仮想物体に触れたときの触覚や力覚を提示する装置である。多くの haptic device は、ユーザに高現実感を与えるため多自由度をもつことが一般的である。自由度が高い haptic device は微小な動きも忠実に再現するので、精密な作業に向いている。しかし組立作業など、必ずしも同時多自由度の運動と力覚が必要ではない作業がある。少自由度の運動と力覚で操作が行えるのであれば、操作者の負担を軽減することができる。そのため、我々は、1 自由度のみの力覚提示を行える haptic device を作成し、遠隔組立手法とシステムの構築を行ってきた⁽²⁾。

これまでに 2 種類の 1 自由度の力覚提示機構を備えた haptic device を開発してきた。しかしそれぞれのデバイスの優位性などについては調べていなかった。そこで本論文では 2 種類のデバイスで組立実験を行い、操作性比較を行ったので報告する。

2. 仮想座標系に基づく遠隔組立作業

2.1 haptic device を用いた遠隔組立作業

本研究では、自動化が困難な生産現場における組立作業に焦点をあて、組立対象物の詳細な形状情報なしに、ユーザが作業現場をカメラで見ながらロボットを遠隔操作して行う組立を想定する。Fig. 1 に、本研究で対象としている遠隔組立システムの概要図を示す。ユーザは、力覚提示をする haptic device と移動方向を指示する pointing device をコンピュータ 1 に接続し、ネットワークでつながり、マニピュレータ側のカメラから映し出された映像を見ながら作業を行う。マニピュレータ側はマニピュレータとカメラ、コンピュータ 2 から構成されている。

組み付ける側の部品を移動部品、組み付けられる側の部品を環境部品と呼ぶとすると、組立作業では移動部品が環境部品との接触を順次増やしていくことで組立を完了する特徴がある⁽³⁾。それゆえ、移動部品を操作する際には、すでに実現した接触状態を維持するために、移動部品を環境部品に押し付けながら操作する。このとき、押し付け方向と移動方向は直交する。接触箇所が増えるたびに移動部品の自由度が拘束され、すべての自由度が拘束されたとき組立は完了する。

このように、組立作業の分野では一度の操作に必要な自由度は 1~2 自由度で十分である。より操作を単純化させるため、本研究では 1 自由度の haptic device を用いる。

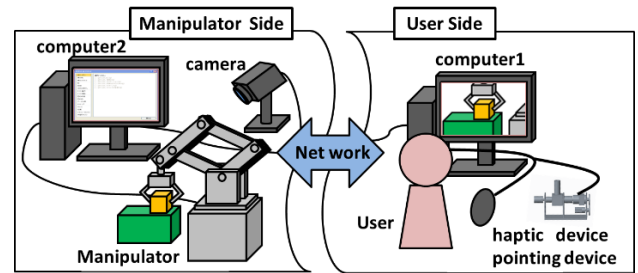


Fig. 1 System overview

2.2 仮想座標系に基づく組立操作

移動部品に加える力とトルクの大きさと方向の制御に用いる座標系を仮想座標系⁽⁴⁾と呼ぶ。その 1 軸を仮想軸と呼ぶ。仮想座標系の概要を Fig. 2 に示す。a) に移動部品の並進移動を行う場合、b) に回転移動を行う場合を示す。

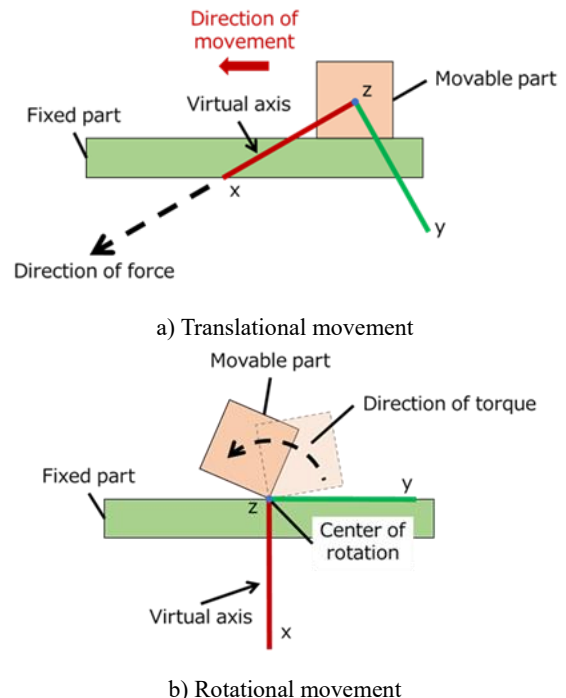


Fig.2 Conceptual scheme of the virtual coordinate system⁽⁵⁾

並進移動の場合、ユーザは pointing device の操作により仮想座標系を、原点を中心として回転させて、力を出す方向である仮想 Z 軸方向を任意の方向に変更する。haptic device を

動かすことによって マニピュレータを操作し設定した方向に移動部品に力を加える。ユーザがマニピュレータを通じて移動部品に加える 1 自由度の力は、移動部品に対して、押しつけ方向の力と移動方向の力に分解される。ユーザは、pointing device 操作により、力を出す向きを変更し、haptic device の操作で力の向きに移動部品を移動させる。仮想座標系を用いることにより、ユーザは作業中に押しつけ方向の力の大きさを自由に変更できる。回転移動の場合には、同様に移動部品にトルクを与えて回転させる。

3. デバイス評価のための組立システム

3.1 組立システムの概要

本研究では遠隔組立作業のための haptic device を評価するために Fig. 3, Fig. 4 に示す組立システムを用いた。本システムの情報の流れを Fig. 3 に示す。本システムは、平面 3 自由度マニピュレータ、操作デバイス、ウェブカメラの三つから構成され、2 次元環境における基本的な組立作業を行える。ユーザは、ウェブカメラによって撮影された映像を見ながら、仮想座標系を操作することでマニピュレータを制御し、組立作業を行う。

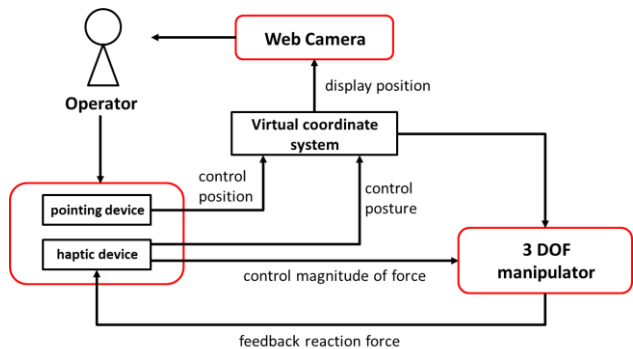


Fig. 3 System overview

操作デバイスには、pointing device と少自由度 haptic device からなる。マニピュレータが出す力・トルクの大きさと仮想座標系の姿勢の操作が必要である。haptic device により力・トルクを操作し、pointing device を操作することで仮想座標系を z 軸周りに回転させられる。

カメラ映像には、仮想座標系を重ねて表示する。ユーザは、カメラ映像上でドラッグ操作を行うことで仮想座標系の位置を移動できる。また、マニピュレータが出している力・トルクをわかりやすくするために、仮想座標系原点から延びる線や原点周りの円としてこれらを表示する。

組立作業中には、映像のみでは把握しづらい力覚情報を haptic device を用いて提示する。仮想座標系を用いた場合、マニピュレータが出す力の反力を力覚情報として出力する。そのために、本デバイスでは、レバーの回転軸に接続したモータによって、ユーザがレバーを倒す方向と反対向きのトルクを出力することで、1 自由度の力覚提示を行う。

3.2 3 自由度マニピュレータ

本システムで用いるマニピュレータを Fig. 4 に示す。2 次元平面環境における作業に対応するために、マニピュレータ

は、手先の位置 2 自由度(x, y)と姿勢 1 自由度(θ)の、併せて 3 自由度を持つものとした。

手先の 6 軸力覚センサは、マニピュレータの手先に加わる外力を測定するために用いるが、マニピュレータ自体は 3 自由度であるため、力覚センサの情報も x, y 軸方向の反力と z 軸周りの反トルクのみを利用する。

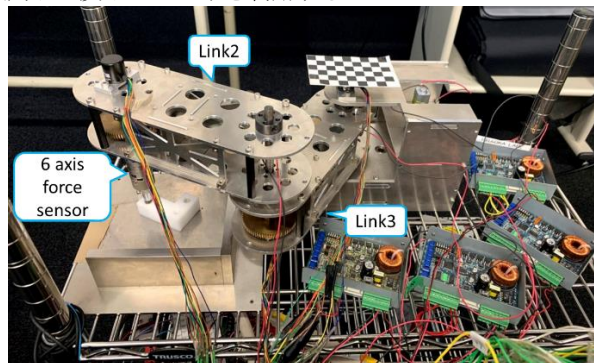


Fig. 4 Manipulator

4. haptic device

本研究で比較対象とした haptic device を Fig. 5 と Fig. 6、デバイス名や方向、移動量指示について Table 1 に示す。

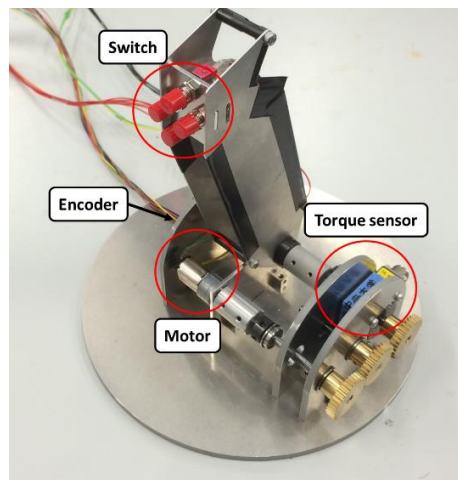


Fig. 5 Integrated lever type haptic device⁽⁵⁾

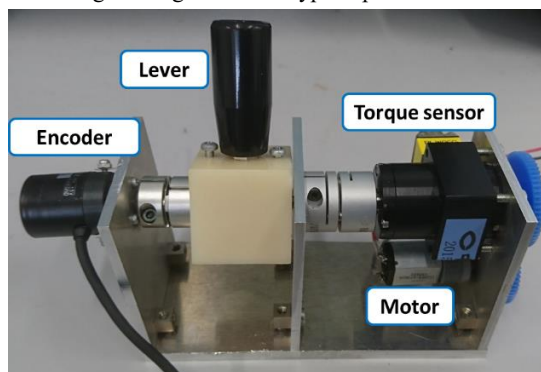


Fig. 6 Separated lever type haptic device⁽⁶⁾

Table 1 Instruction method

device name	Direction	Movement
Integrated lever	Switch	Lever
Separated lever	Mouse	Lever

一体型レバー式(Fig. 5)はレバーについているスイッチで移動方向を指示し、レバーを傾けることで移動量を指示する。一体型レバー式は pointing device と haptic device を一つのデバイスに組み込んであるため片手で操作するが、分離型レバー式(Fig. 6)は右手で pointing device のマウスを操作し移動方向を指示、左手で haptic device のレバーを傾げることで移動量を指示する。

それぞれのデバイスはモータ、エンコーダ、トルクセンサで構成されている。モータで反力を提示し、エンコーダで角度を計測、トルクセンサでデバイスにかかるトルクを計測する。

5. 組立実験

5.1 実験方法

操作時にユーザが見る操作画面を Fig. 8 に示す。この操作画面上には仮想座標系とグローバル座標系を表示する。pointing device を用いて仮想座標系を操作する。

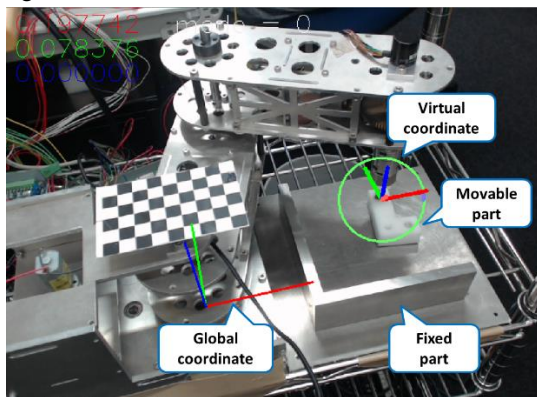


Fig. 8 Operation screen

移動部品にプラスチックの立方体、環境部品にはステンレスを採用し、Fig. 9 のように①接触なし、②並進運動をして1点接触、③回転移動をして一面接触、④並進運動をして2面接触という順番で自由度を拘束させながら遠隔組立実験を行う。それぞれ6人に5回ずつ行う。

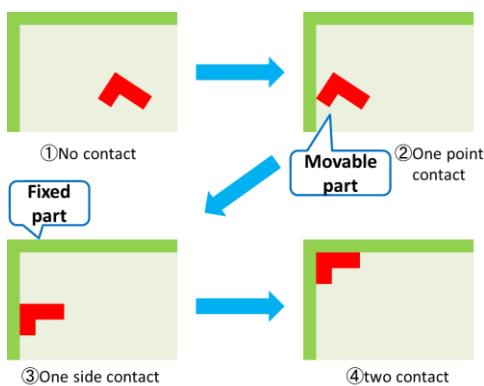


Fig. 9 Experimental procedure

作業時間と以下に示す操作感についてアンケートをとり比較を行う。

- ・移動方向の指示のしやすいのはどちらか
- ・移動量指示のしやすいのはどちらか
- ・移動方向の指示と同時に行うのはどちらか

・総合的な優位性について

5.2 実験結果

一体型レバー式 haptic device と分離型レバー式 haptic device での比較を行った。

一体型レバー式 haptic device での実験結果は Fig. 10, 11, 分離型レバー式 haptic device での実験結果は Fig. 12, 13 に示すこれらはマニピュレータの手先位置の座標とユーザに提示する反力と反トルクの情報を示す。Fig. 10, 12 は熟練者が行った結果であり、Fig. 11, 13 は初心者が行った結果である。

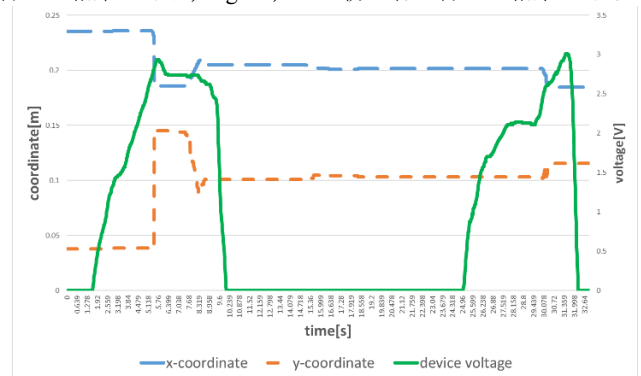


Fig. 10 Integrated device(expert)

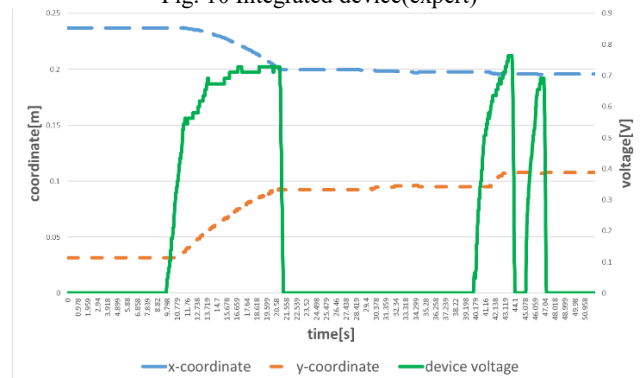


Fig. 11 Integrated device(beginner)

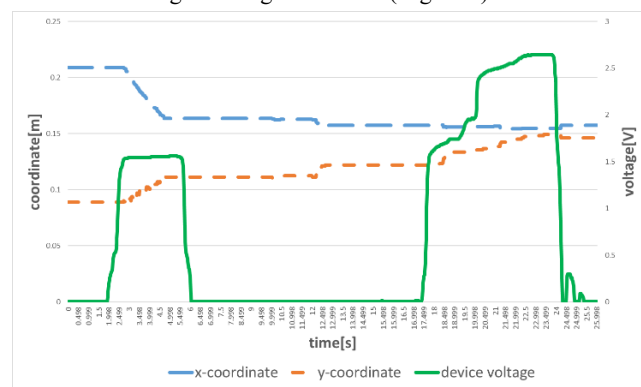


Fig. 12 Separated device(expert)

Table 2 Questionnaire results

	Direction	Movement	Comprehensive
Integrated	3	1	2
Separated	3	4	4
Neither	0	1	0

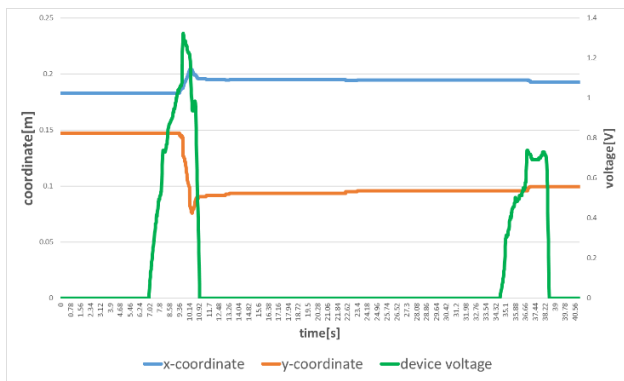


Fig. 13 Separated device(beginner)

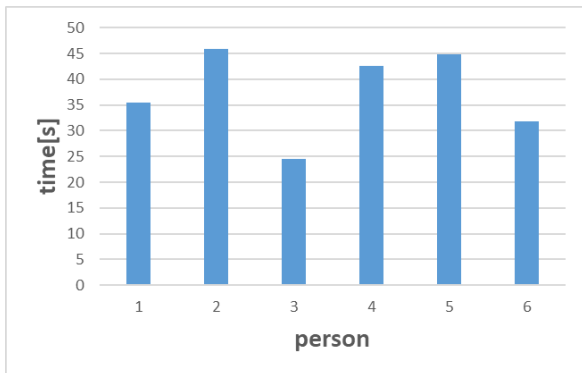


Fig. 14 Integrated average working time

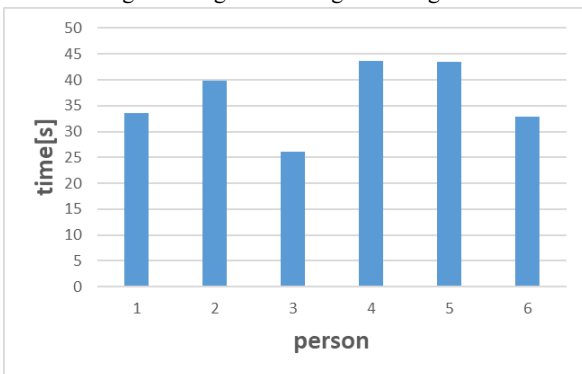


Fig. 15 Separated average working time

Fig. 10, 11 は一体型デバイスで行った実験でのデバイスの提示反力についてを示す。Fig. 12, 13 は分離型デバイスでの実験結果を示す。それぞれ移動部品と環境部品が衝突した場所で、ユーザに反力が提示されたことがわかった。慣れていている人の方が一体型と分離型の両方ともに反力提示の大きさが大きかった。作業時間が短いこともあり移動量の指示量が大きいため、移動部品と環境部品が衝突した際の力が大きいので提示される反力が大きくなったと考えられる。

Fig. 14 が一体型デバイスでの 5 回の平均作業時間、Fig. 15 は分離型デバイスでの平均作業時間を示す。6 人の平均作業時間は一体型デバイスは 37.5[s]、分離型デバイスは 36.6[s] と差はあまりなかった。

「一体型デバイス、分離型デバイス、どちらでもない」の 3 択を、移動方向、移動量の指示のしやすさと総合的な優位性について答えてもらったアンケート結果を Table 2 に示す。

アンケートの数字は答えた人数を示す。移動方向の指示はどちらも大差なかったが、熟練者はマウスを使った分離型デバイスの方が使いやすいと感じ、初心者スイッチを使った一体型デバイスの方が使いやすいと感じた。移動量の指示は分離型デバイスの方が使いやすいと感じる人の方が多かった。デバイスが小さいことが良かったと考えられる。方向と量の指示を同時に行うことについては全員が同時に行うのは難しいと答えた。haptic device と pointing device が一体か分離かでの違いはなかった。総合的には分離型デバイスの方が優れていると感じた人の方が多かった。結果として移動方向の指示にはマウスを用いて、移動量の指示には小さめのデバイスを用い、haptic device と pointing device を分離型にする方が良いとわかった。しかし、実際に人間が組立作業を行うときは移動方向と移動量は同時に行うので、それらを同時に行うことに適したデバイスを検討する必要がある。

6. 結言

本研究では、1 自由度 haptic device を用いて遠隔組立作業を行うために、仮想座標系という概念を提案し、組立システムを構築した。一体型デバイスと分離型デバイスを用いて実験を行い、比較を行った。

今後の展望として、今回わかったことを踏まえた新たな haptic device を作製し、それについて検討する。実際に人間がどのような力を出しながら作業を行うのかを調べたい。今現在、遠隔操作を行っていないので、遠隔組立システムの構築を行っていききたい。

参考文献

- (1) 大井賢治, haptic device を用いた 1 自由度の操作による 3 自由度遠隔組立作業, 精密工学会春季大会講演論文集, (2010), pp.953-954.
- (2) 新津哲, 田村亮佑, 平岡弘之, 6 自由度遠隔操作組立業に用いるマウス型 1 自由度 haptic device の開発, 生産システム部門研究発表講演会 2013 講演論文集(2013), pp47-48.
- (3) 加藤頭剛, 自動組立技術がわかる本, 工業調査会, (1995).
- (4) 田村亮佑, 新津哲, 平岡弘之, 仮想座標系を用いた 1 自由度ハプティックデバイスによる 6 自由度遠隔組立システムの構築, 第 57 回自動制御連合講演会講演論文集, (2014), pp.1983-1986.
- (5) 安藤弘晃, 平岡弘之, 曲面形状部品を含む遠隔組立作業のための仮想座標系システム, 第 18 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. 1B5-03, pp.452-455.
- (6) 齋藤健大, 安藤弘晃, 平岡弘之, 1 自由度のレバー型 haptic device を用いた遠隔組立作業, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 P08, pp.841-842.