

少自由度 haptic device を用いた組立作業のための仮想座標系

Virtual coordinate system for assembly task using a haptic device with a few DOFs

精密工学専攻 7 号 安藤弘晃
Hiroaki Ando

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。そのような組立作業では、ロボットの遠隔操作による作業が有効である。また、ロボットが受ける反力情報を haptic device を用いて作業者にフィードバックすることで、作業環境や対象物に応じた作業が容易になる。

マニピュレータの遠隔操作には、ユーザへの高い現実感の提示を目的として、多自由度の haptic device を利用することが多い。しかし、組立作業の特徴に基づく、力覚フィードバックの自由度が少ない、少自由度 haptic device を適用することが可能である^[1]。

田村ら^[2]は、周辺環境や作業の対象物の情報が得られない場合の組立作業を対象に、少自由度 haptic device を用いて遠隔組立作業を行うために、仮想座標系と呼ぶ手法を提案した。多面体部品を対象とした組立作業では実際に問題なく組立作業が行えることを確認したが、曲面形状部品を含む組立作業では接触関係を維持したまま組立作業を進行できないという課題が残っていた。

そこで本論文では、曲面形状を含む部品の組立作業に仮想座標系を対応させるべく、手法とシステムの改良を行った。組立動作実験を行い、提案手法の有効性を検証したので報告する。

2. 少自由度 haptic device を用いた組立作業

2.1 組立作業の特徴

本研究では、一対一の部品間での組立作業を想定し、マニピュレータが把持して操作を加える部品を移動部品、既に組み付けられている部品を環境部品と呼ぶ。

Fig. 1 に概要図を示す。組立作業は、移動部品と環境部品の接触を順次増やしていくことで進行するという特徴がある。既に実現した接触状態を維持しつつ、新たに接触が増える方向へ動かすことで、移動部品の拘束を増やしていき、すべての自由度が拘束された段階で組立完了とする。一連の作業を移動部品の一方向への並進移動や、接触点まわりの回転移動などの単純な動作を組み合わせることで行う^[3]。

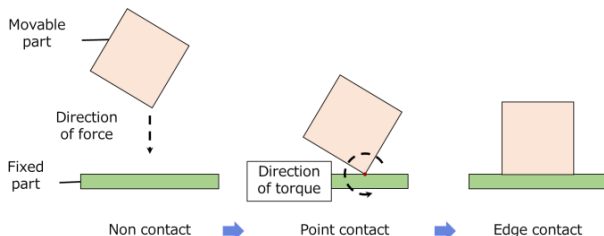


Fig. 1 Feature of assembly task

組立作業では、対象とする部品に意図しない力が加わるのを防ぐために、マニピュレータを力制御する必要がある。前述の移動部品の運動は単純なものであるため、マニピュレー

タが部品に一度に加える力は 1~2 自由度あればよい。

2.2 必要な力覚情報

組立作業において重要となる力覚情報は、部品同士の衝突と接触状態の提示である。Fig. 2 に反力情報の概要図を示す。

マニピュレータが移動部品に力を加えることで、移動部品と環境部品が接触する場合を考える。移動部品に加わる力のうち、環境部品との接触によって拘束されている方向の力は、移動部品を押し付ける力として働き、接触状態では押し付け反力が発生する。拘束されていない自由度では、移動部品をその方向へ動かすための力として働き、新たに環境部品との接触が増えた場合には、衝撃力が発生する。

上記二つの力覚情報は、移動部品に加える力に対する反力として表すことが可能である。2.1 節でも述べた通り、組立作業では、一度に移動部品に加える力は 1~2 自由度であることから、力覚提示の自由度が少ない、少自由度 haptic device の適用が可能である。

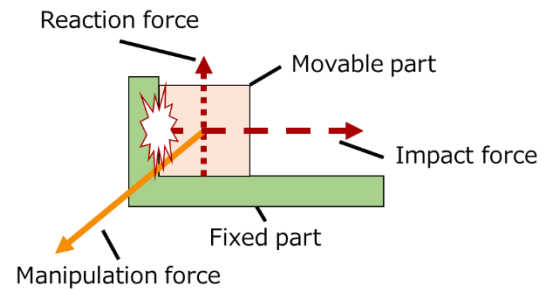


Fig. 2 Haptic information

2.3 曲面への倣い作業

2.1 節のように、多面体形状部品を想定した場合は、移動部品の並進移動と回転移動を切り分けて考えることができる。しかしながら、曲面などの形状に沿って、接触関係を維持したまま移動部品を移動させるには、並進移動に応じて接触面に倣うように姿勢を変化させる必要がある。

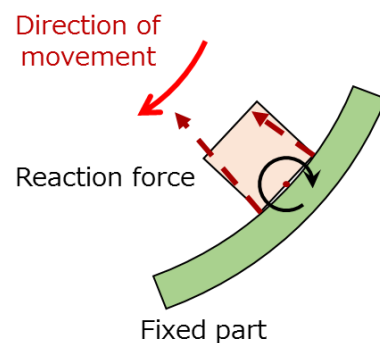


Fig. 3 Reaction force on the curved surface

一般に、環境に倣うように手先を移動させる場合、環境から受ける外力を打ち消すようにマニピュレータを制御する。Fig. 3のように、曲面形状の環境部品に沿って立方体形状の移動部品の並進移動を行うと、各接触点における反力の差によって移動部品の接触面の中心にトルクが発生する。このトルクを打ち消すようにマニピュレータを制御することで、曲面に倣うように移動部品を動かすことが可能である。

3. 仮想座標系を用いた組立作業

3.1 仮想座標系による組立動作

2.1 節で述べた通り、組立作業中は、マニピュレータが移動部品に加える力は、1~2 自由度であればよい。本研究では、仮想座標系と呼ぶ手法を用いて、移動部品に加える力を制御する。Fig. 4 に概要図を示す。

仮想座標系の x 軸方向を、マニピュレータが移動部品に加える力の方向とする。ユーザは、仮想座標系の向きを変えることで、力の向きを任意の方向に変更でき、移動部品を並進移動させることが可能である。

仮想座標系 z 軸を、マニピュレータが移動部品に加えるトルクの中心軸とする。回転移動時は、仮想座標系 z 軸が移動部品の回転中心になるように、仮想座標系を移動させることで、任意の点を中心にして回転移動を行える。

多面体形状の部品の組立作業の場合、移動部品の並進移動と回転移動を同時に行う必要がないため、これらを切り分けて考えることができる。

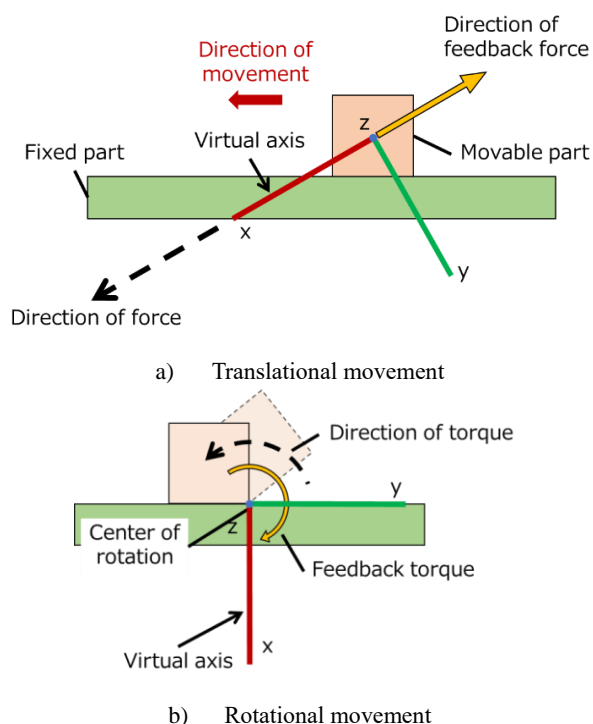


Fig. 4 Conceptual scheme of the virtual coordinate system

曲面など複雑な形状に沿って接触関係を維持したまま移動部品を移動させる際には、2.3 節で述べたように、環境部品に倣うように移動部品を動かす。環境部品と接している移動部品の面の中心に、仮想座標系を移動させ、仮想座標系 z 軸周りの反トルクを求めることで、2.3 節で述べたような制御を行うことができる。

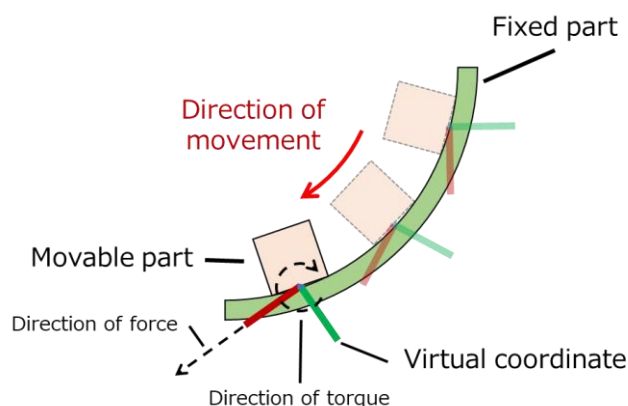


Fig. 5 Relationship between virtual coordinate system and part on the curved surface

3.2 仮想座標系による力覚提示

2.2 節で述べた通り、組立作業中に必要な力覚情報は、マニピュレータが移動部品に加える力に対する反力として表せる。本研究では、マニピュレータの力覚センサの値を、座標変換によって仮想座標系周りの反力として表す。Fig. 4 のとおり、並進移動時には仮想座標系 x 軸方向の反力を、回転移動時は z 軸周りの反トルクを、一自由度の力覚情報としてユーザに提示する。

4. 構築した組立システム

提案した手法によって組立作業が行えることを確認するために、組立システムを構築した。Fig. 6 に組立システムの概要図、Fig. 7 にシステムの動作画面、Fig. 8 にレバー型少自由度 haptic device^[4]を示す。

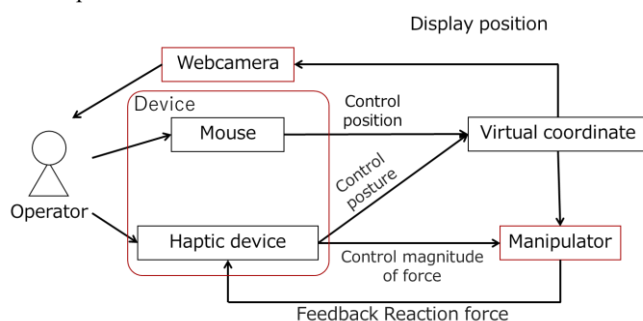


Fig. 6 Overview of assembly system

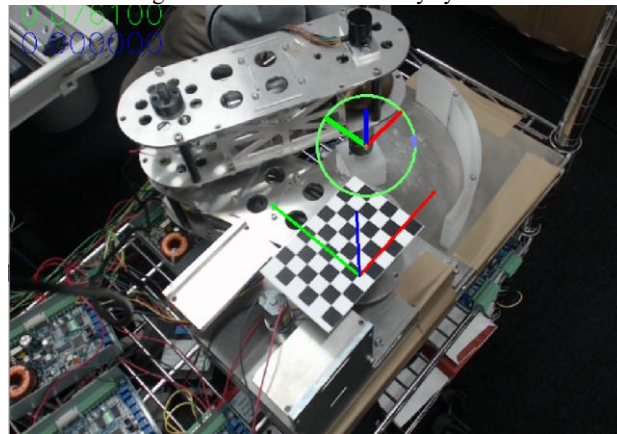


Fig. 7 Screen image of virtual coordinate system

本システムは、平面3自由度マニピュレータ、操作用デバイス、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。

操作用デバイスは、マウスと少自由度 haptic device からなる。haptic device では、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できる。haptic device のレバーを傾けることで力・トルクの操作ができ、先端に設けたスイッチを押す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。3.2 節で述べた通り、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、レバーの回転軸につながったモータによって、ユーザがレバーを倒す方向の反対向きのトルクを出力することで、一自由度の力覚提示を行う。

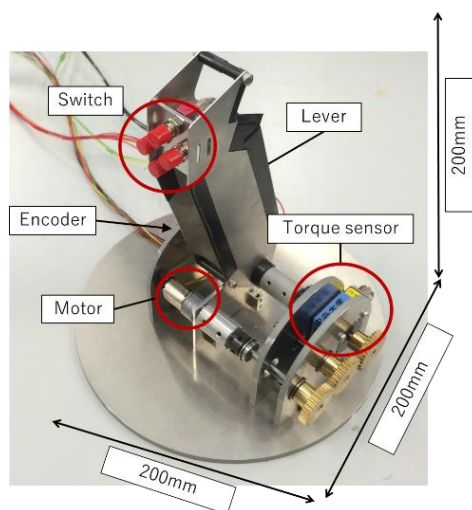


Fig. 8 Lever-type haptic device

組立システムでは、移動部品の運動の制御を行うために、3つの動作モードを用意した。3.1 節で述べた通り、多面体形状の部品の組み立ての場合は、姿勢を維持しつつ行う並進移動と、中心位置を維持しつつ行う回転移動が必要となる。それぞれ以下の動作モードを用意することでそれぞれの動作が行えるようにした。

- ① 並進移動モード: 移動部品の姿勢を維持しつつ仮想座標系 x 軸方向に並進移動を行う
- ② 回転移動モード: 仮想座標系の原点を中心として、移動部品の回転移動を行う

加えて、3.1 節で述べたような曲面形状部品を含む作業を行うために以下の動作モードを用意した。

- ③ 倣い動作モード: 仮想座標系 z 軸周りのトルクを打ち消すように回転移動を行いつつ、仮想座標系 x 軸方向に並進移動を行う

5. 動作実験

5.1 実験内容

曲面形状を持った環境部品に対して、移動部品を組み付けの際の仮想座標系システムの有効性を確認するために、動作実験を行った。

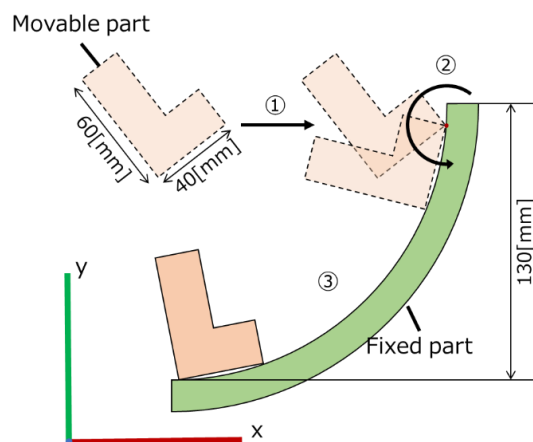


Fig. 9 Operation in the experiment

Fig. 9 に本実験での移動部品の動作内容を示す。本実験は、以下の部品を対象とし、平面3自由度マニピュレータを用いて2次元環境下で組立作業の基本的な動作が行えることを確認する。

- ・ 一辺が 40[mm]の立方体形状の移動部品
- ・ 半径 130[mm]の 1/4 円弧形状を持つ環境部品

動作の内容は以下のとおりである。

- ① 並進移動モードで、移動部品の姿勢を維持しつつ x 軸正方向に並進移動
- ② 回転移動モードで、環境部品との接触点まわりに反時計回りに回転移動させて移動部品と環境部品を面接触状態にする
- ③ 倣い動作モードで、環境部品の曲面に倣うように姿勢を変化させつつ並進移動

マニピュレータの手先に移動部品を固定し、手先姿勢と移動部品の姿勢は一致するものとする。動作中のマニピュレータの手先位置・姿勢、手先における反力情報を 20[ms]ごとに記録する。

5.2 実験結果

Fig. 10 にマニピュレータの手先位置のプロット図、Fig. 11 に手先姿勢の時間変化のグラフを示す。また、Fig. 12 は手先における反力情報、Fig. 13 にユーザへ提示する仮想座標系周りの反力情報を示す。Fx, Fy はそれぞれ手先における x 軸方向、y 軸方向の反力、Tz は z 軸まわりのトルク、FxVC は仮想座標系 x 軸方向の反力、TzVC は仮想座標系 z 軸周りの反トルクである。これらのグラフから、以下を確認した。

並進移動モードでは手先の軌道にブレがあるが、概ね手先姿勢を維持したまま並進移動が行えていることが確認できる。Fig. 12 の Fx が大きく変化している部分が、力覚センサによって部品同士の接触の検知を示している。Fig. 13 の FxVC にも同じ特徴が表れていることから、仮想座標系 x 軸方向の反力によって、部品同士の衝突をユーザに提示できる。

Fig. 12 より、回転移動モードでは、移動部品の姿勢を滑らかに変化させられていることがわかる。Fig. 12 の Tz が、23.0

[s] 付近で大きく変化していることから、回転移動によって稜線接触から面接触に変化したことがわかる。Fig. 13 の TzVC にも同様の特徴があることから、仮想座標系によって、回転移動時の衝突の提示も行えているとわかる。

Fig. 12 より、扱い動作モードでも、移動部品の姿勢を滑らかに変化させられていることがわかる。Fig. 13 の TzVC の値が $0.00 \text{ [N} \cdot \text{m]}$ 付近で上下していることから、仮想座標系 z 軸周りのトルクを打ち消すように制御できていることが分かる。習い動作中の反力は、動作開始時には x 軸方向の反力が支配的になり、後半は y 軸方向の反力が支配的になるが、Fig. 13 の FxVC の値より、仮想座標系 x 軸方向の反力で表せることが確認できる。

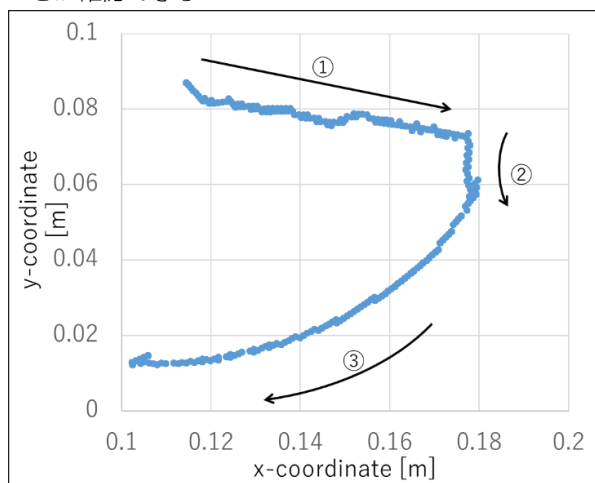


Fig. 10 Plot of Position

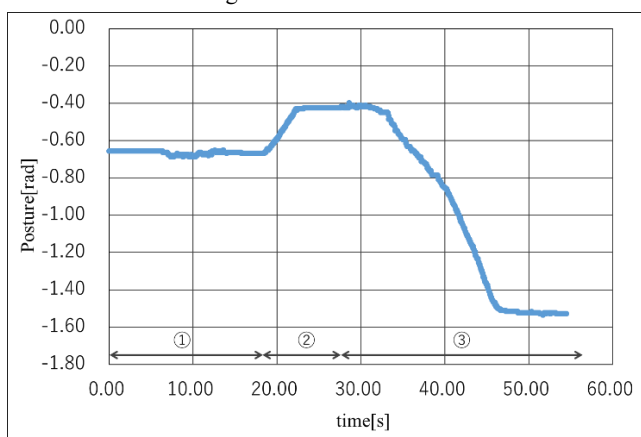


Fig. 11 Change in posture

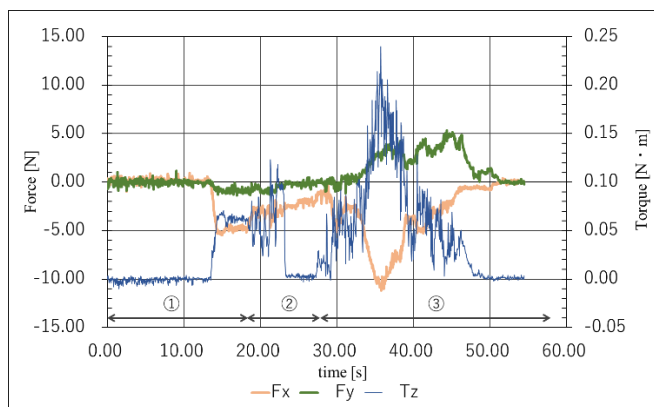


Fig. 12 Value of force sensor

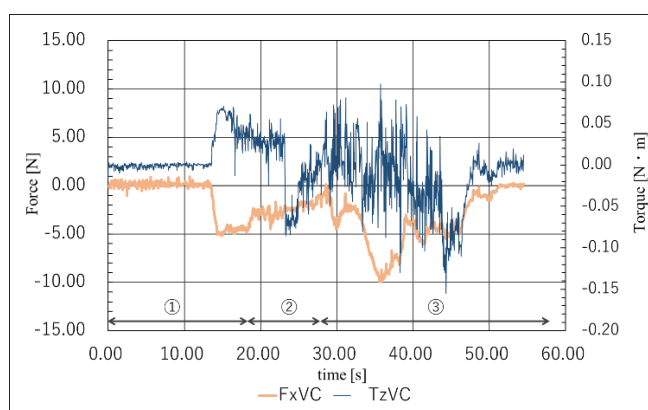


Fig. 13 Reaction force in virtual coordinate system

本実験では、提案した手法を用いることで曲面形状の環境部品を含む組立作業でも、接触関係を崩すことなく作業が行えることが確認できた。しかしながら、仮想座標系周りの反トルクを計算によって求めているため、手先と仮想座標系の位置が離れるほど、力覚センサのノイズの影響が大きくなり、マニピュレータの動作が不安定になりやすい。そのため、力覚センサのノイズの影響を抑える手法の検討が必要である。

6. 結言

少自由度 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。曲面形状の部品の組立作業におけるシステムの有効性を確認するために、曲面形状部品を含む組立動作実験を行い、接触関係を維持したまま組立作業が行えることを確認した。

本研究では、曲面の内側に対して移動部品を接触させるという作業を行った。しかしながら、曲面の外側に対して移動部品を接触させる場合のような、部品同士が点(あるいは稜線)接触する場合については検討不足であり、今後行う必要がある。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 高松淳, 小川原光一, 木村浩, 池内克史, ロボットによる実行を目的とした人の組立作業の理解接触状態遷移からの最適軌道の生成, 日本ロボット学会誌, Vol22, No.6 (2004), pp. 752-763.
- [4] 安藤弘晃, 平岡弘之, 遠隔組立作業のための少自由度 Haptic device の開発, 精密工学会春季大会講演論文集, (2016).