

# haptic device を用いた遠隔組立作業のシミュレーション

中央大学 ○柳下正博, ◎平岡弘之

## 要旨

遠隔組立作業を行う際に必要な力覚提示に, haptic device を適用する研究を行っている. 本研究では, 遠隔組立作業に用いる少自由度 haptic device とマニピュレータの設計・開発を支援するために, シミュレーションシステムの開発を行った. 本報告では, シミュレーション内でレバー型 1 自由度 haptic device を用いてマニピュレータを遠隔操作し, 壁に衝突させて反力提示を行った結果を報告する.

## 1. 序論

原子力プラントや宇宙空間など, 人の立ち入りにくい環境下での作業はロボットの遠隔操作が必要となる. この際, 遠隔地の情報を視覚から得るだけでなく, ロボットが受ける力の感覚をユーザへフィードバックする, すなわち, 触覚や力覚をユーザに感知させることで操作性が向上する. このような, 触覚や力覚をユーザへフィードバックする装置を“haptic device”という. 我々は, 部品の組立作業を遠隔操作で行う際に必要な力覚情報のフィードバックに, haptic device を適用する研究を進めている<sup>[1][2]</sup>.

haptic device を適用したシステムの構築にあたり, 初めから実機を用いると予想外の事態が発生し, 部品や本体が破損する可能性がある. そこで本研究では, 遠隔組立作業に用いる少自由度 haptic device とマニピュレータの設計・開発を支援するための, シミュレーションシステムの開発を目的とする.

## 2. レバー型 1 自由度 haptic device

本シミュレーションシステムで対象として使用するレバー型 1 自由度 haptic device<sup>[3]</sup>を Fig. 1 に示す. 移動方向を指示する pointing device と組み合わせて使用し, レバーを倒すことでマニピュレータの操作を行うことができる. レバーの回転角度を計測するためのインクリメンタル式のロータリーエンコーダ, ユーザに反力を提示するための DC モータ, デバイスにかかるトルクを計測するためのトルクセンサが取り付けられている.

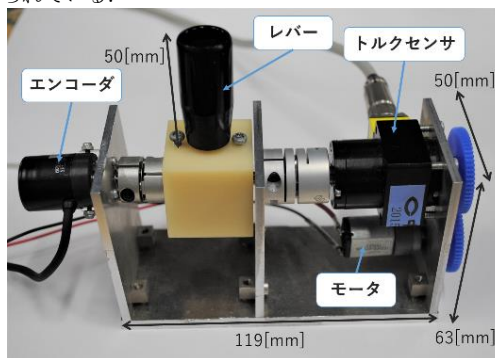


Fig. 1 レバー型 1 自由度 haptic device<sup>[3]</sup>

## 3. 遠隔組立作業シミュレーションシステム概要

開発したシミュレーションシステムの構成図を Fig. 2 に示す. pointing device にはマウスを用いる. haptic device の角度とトルクの情報が入力された IO ボードへ入力され, A/D 変換された値がシミュレータに送られる. IO ボードからモータドライバに指令電圧を送ることで haptic device のモータの制御を行う. 本システムではシミュレータの拡張性を高くするために, 制御・機構・形状・描画の 4 要素に分けた. 以下で各要素の説明をする.

### 3.1. 制御部

制御部では, IO ボードによるアナログ入出力の制御や, マウス入力の制御を行う. エンコーダのパルスからレバーの角度を算出し, その角度をマニピュレータの手先の速度とする. 速度から毎ループ移動後の座標を計算し, 座標を機構部に渡す. レバーには, 把持した時にマニピュレータが過敏に反応することを避けるために  $10^\circ$  の遊びを設けた. 反力提示時には提示するトルクの大きさからモータへの指令電圧を計算し出力することでレバーを回転させる. また, トルクセンサの値からレバーにかかるトルクを算出する.

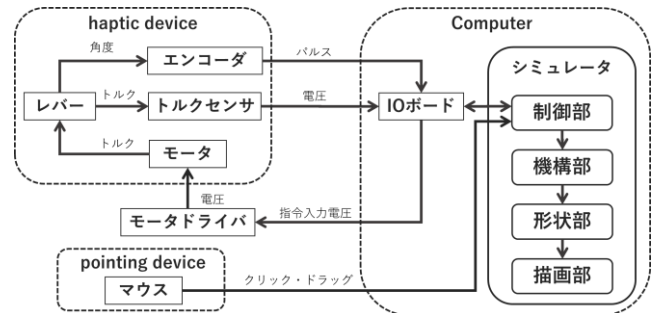


Fig. 2 シミュレーションシステムの概略図

マニピュレータの操作には, 並進と回転の 2 種類の操作モードを設定し, マウスのホイールボタンで操作モードの変更ができるようにした. 右クリック時のドラッグ操作によりマニピュレータの手先の移動方向や回転方向を指示することが可能で, レバーを押し倒すことによって, 移動方向に手先を移動または回転させることができる.

### 3.2. 機構部

機構部では, 座標変換と運動学計算によりマニピュレータの機構を再現する. リンク, 関節, 関節軸を定義し, リンクと関節に位置と姿勢を表す座標変換行列を持たせ, マニピュレータの原点から手先へ繰り返し座標変換を行うことで, それぞれの関節, リンクの位置と姿勢を得る. シミュレーションで用いるマニピュレータの簡易モデルを Fig. 3 のような 3 自由度マニピュレータとし, 手先の位置と姿勢から逆運動学計算により各関節の角度を求め, 順運動学計算により各リンク・関節の座標変換行列を求める.

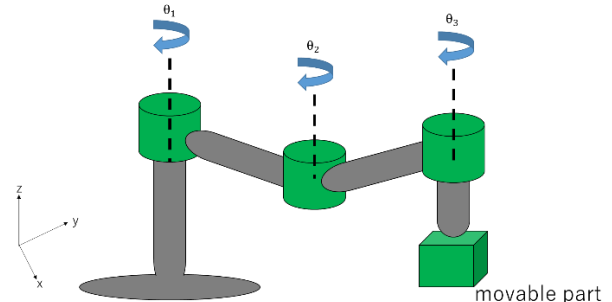


Fig. 3 マニピュレータの簡易モデル

### 3.3. 形状部

形状部では, 立体形状の設定と衝突判定などの干渉計算を行う. 立体は複数の面から構成されており, 面は複数の稜線から, 稜線は 2 つの頂点からそれぞれ構成されている. よって, 座標を入力し頂点を設定し, 次に頂点から始点と終点を選び稜線を設定する. さらに, 稜線をもとに面を設定し, それらの面をつなげることで立体を設定する. 立体には機構部で計算された位置を表す座標変換行列を持たせることで, マニピュレータの形状を設定する.

衝突判定の手法としては, 4 点を与えることで平面を生成し外積計算を行うことで平面の法線ベクトルを取得する. 例えば, 時計回りに  $v_1, v_2, v_3, v_4$  を指定して壁を作り,  $v_2v_1$  と  $v_2v_3$  の外積を計算することで平面の法線ベクトル  $\vec{n}$  が取得できる (Fig. 4). その後, 平面上の任意の点  $P$  と移動部品の頂点  $V$  を結ぶベクトル  $\vec{PV}$  と, 平面の法線ベクトル  $\vec{n}$  との内積の符号により判定を行う.

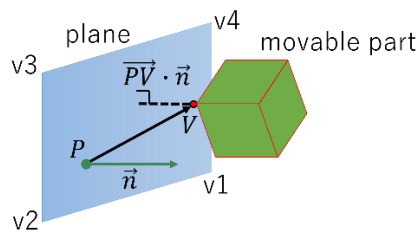


Fig. 4 衝突判定の手法

衝突後、移動部品が平面を通過しないために排斥処理を行う。通過した頂点と平面の距離を計算し、距離の分だけ平面の法線ベクトル方向に手先の位置を修正する。

マニピュレータの手先に生じる反力の計算方法を Fig. 5 に示す。衝突後に壁を通過する仮想的な移動部品を設定する。この時、壁と仮想的な移動部品の間にはばねがあると想定し、通過した移動部品の頂点と壁との距離に比例するばねの復元力を求め、これを反力とする。壁を通過した頂点が複数ある場合、その中で最も壁と離れている頂点を選び、その距離の値を採用する。

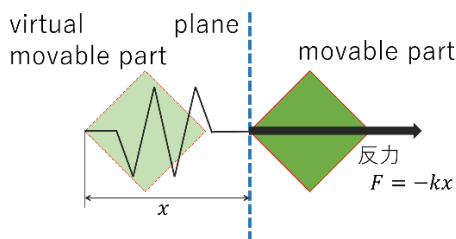


Fig. 5 反力計算方法

### 3.4. 描画部

描画部では、形状部から受け取った座標データをもとに図形の描画を行う。描画する要素は点、線、面とし、立体は複数の面を組み合わせることで表現する。描画には OpenGL を使用する。

機構部、形状部、描画部を連動させ、マニピュレータと壁を設定し描画した結果を Fig. 6 に示す。

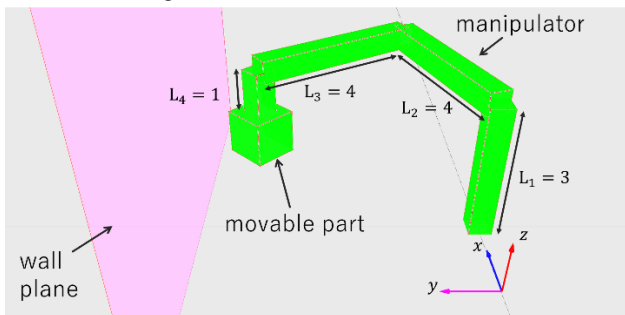


Fig. 6 機構部、形状部、描画部の実行結果

## 4. 衝突判定・デバイス制御実験

開発したシミュレーションシステムの動作を確認するための実験を行った。レバー型 1 自由度 haptic device を用いて、シミュレーション内でマニピュレータを遠隔操作して移動部品を動かし、壁との衝突判定を行った後、反力提示を行い、レバーの角度が戻るかを確認する。

実験条件を Fig. 7 に示す。壁として平面  $y = 6$ 、移動部品のサイズは 1 辺の長さが 1 の立方体、マニピュレータの手先の初期位置と姿勢  $(x, y, \theta)$  を  $(0.0, 2.0, 45^\circ)$ 、 $y$  軸上を正方向に移動させる。

実験の手順としては、初期状態からレバーを  $30^\circ$  押し込んで、手先を移動させ、移動部品を壁に衝突させる。衝突後、レバーを押し込んだ状態のまま約 5 秒間維持し反力提示を行い、レバーから手を離しレバーの動きを確認する。

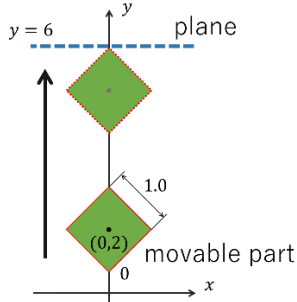


Fig. 7 実験条件

実験結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 8 より、実験開始から約 2.5 秒後に手先の  $y$  座標が変化し、マニピュレータが操作されていること

がわかる。約 5 秒後からは衝突状態になり、壁を通過する仮想的な移動部品が設定され、壁を通り抜けない実体の移動部品と位置が異なっている。また、仮想的な移動部品と実体の移動部品の距離が増えるにつれて、デバイスへの指令電圧も上昇していることが読み取れる。約 10 秒後には、手を離れたため衝突状態ではなくなり、仮想的な移動部品の  $y$  座標が実体の  $y$  座標に戻っている。同様に、指令電圧も低下している。Fig. 9 より、実験開始から約 2 秒でレバーが操作され、角度が上昇し、負荷トルクが変化している。約 5.5 秒後には反力提示により、レバーを傾けていた方向と逆方向のトルクが瞬間的に発生している。その次の瞬間には、レバーを押し込んだ状態に維持するため、提示される反力の大きさのトルクがトルクセンサから読み取ることが出来る。この時、負荷トルクの大きさは約  $0.06[\text{Nm}]$  で一定となっているが、これはレバー型 1 自由度 haptic device に取り付けられているトルクセンサの測定レンジの値であり、負荷トルクは正しく測定できていない。約 10 秒後にはレバーから手を離れたため、反力によってレバーの角度が  $10^\circ$  未満に戻っている。

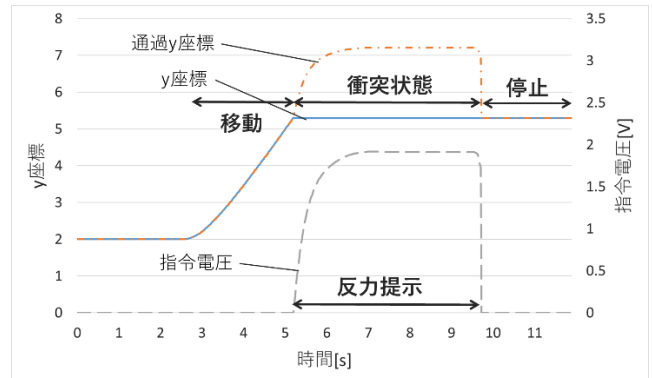
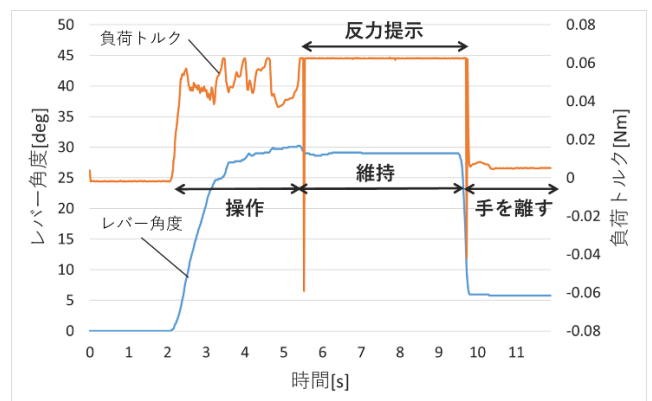
Fig. 8 手先の  $y$  座標と指令電圧の時間変化

Fig. 9 レバー角度と負荷トルクの時間変化

## 5. 結論

少自由度 haptic device とマニピュレータの設計・開発を支援するためのシミュレーションシステムの開発を行い、シミュレーション内で衝突判定を行い、正しく反力提示を行えているか確認した。実験結果から、haptic device によるマニピュレータの遠隔操作はシミュレーション可能だと思われる。また、衝突判定が正しく行えて、反力を提示することはできる。しかし、今回使用した haptic device のトルクセンサではレバーにかかるトルクを正しく測定できないことから、トルクのフィードバックが行えないなど、多くの課題が残されている。今後の展望としては、モータへの指令電圧のフィードバック制御を行う、他の haptic device の仕様に対応可能にするなどが挙げられる。

## 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] 天内勇樹, 大井賢治, 平岡弘之, 舟橋幸祐, 2 自由度 haptic device による組立操作法—組立品モデルによる組立操作シミュレーション—, 精密工学会秋季大会講演論文集, (2009), pp.473-474.
- [3] 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, 精密工学会春季大会講演論文集, (2018), pp.473-474.