

# 仮想空間において接触を伴うロボットに対する 反力を考慮したマスタスレーブ制御

2018SC069 大橋美咲 2018SC072 岡本颯太

指導教員：中島明

## 1 はじめに

近年，マスタスレーブシステムは人間が作業するには危険な場所などで用いられており，精密性や動作性，安全性などを向上させることが課題となっている。

マスタスレーブ制御とはロボットや манипуレータを遠隔操作するための手段である．先行研究 [1] ではマスタ側から取得した関節角をスレーブに目標値として入力し，機構限界を提示するための反力をマスタに発生させた．

本研究ではハプティクスデバイスをマスタ機とし，2次元3関節のロボットアームのシミュレーションをスレーブ機としたマスタスレーブシステムを用いて，マスタから取得した関節角をスレーブに入力し，スレーブに外力が加えられた場合マスタに反力を生成するマスタスレーブ制御を行った．本研究ではシミュレーションベースで行っており，シミュレーションを用いて物理環境を表したり，実機で実験を行う前にシミュレーションを行うことで，課題を取り除くことが目的である．

## 2 システム構成

### 2.1 マスタ機

本研究ではハプティクスデバイスである 3D Systems 製の GeomagicTouch™(以下，Touch とする) をマスタ機として使用している．Touch は図 1 に示すように 6 自由度の機構をしており，この姿勢が Touch の基本姿勢である．また，角関節に絶対値エンコーダ搭載されているため Touch から様々な情報を取得可能となっており，Touch の動作範囲を以下の表 1 に示す．またスレーブの機構は 2次元3自由度なので，Touch の実際に使用する軸は 2軸と 3軸，5軸である．

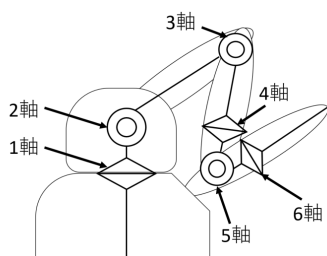


図 1 Touch の基本姿勢

### 2.2 マスタスレーブシステムの構成

図 2 にシステム構成を示す．ハプティクスデバイスから目標値  $q_d$  を入力し，PID 制御をした制御トルク  $\tau$  をロ

表 1 Touch の動作範囲

軸	動作範囲
1 軸	約 $-57 \sim$ 約 $+55$ [deg]
2 軸	約 $-12 \sim$ 約 $+90$ [deg]
3 軸	約 $-67 \sim$ 約 $+48$ [deg]
4 軸	約 $-142 \sim$ 約 $+145$ [deg]
5 軸	約 $-150 \sim$ 約 $-7$ [deg]
6 軸	約 $-149 \sim$ 約 $+149$ [deg]

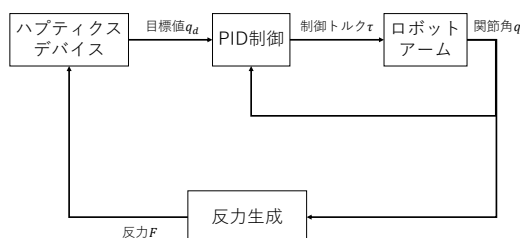


図 2 システム構成

ットアームに入力する．現在角である  $q$  を用い反力生成を行い，反力  $F$  をハプティクスデバイスで発生させる．

## 3 マニピュレータと壁の衝突モデリング

### 3.1 ロボットアームのモデリング [2]

2次元動作をする 3自由度のロボットアームのシミュレータの構造を図 3 に示す．

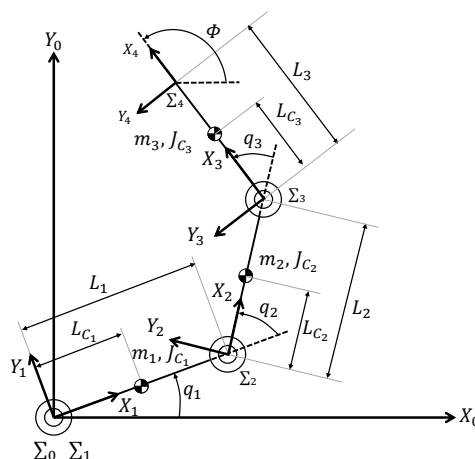


図 3 ロボットアームの構造

2次元動作をする 3自由度のマニピュレータの運動方程

式を式 (1) に示す.

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = \tau + J^T F \quad (1)$$

ここで  $M(q)\ddot{q}$  は慣性力項,  $h(q, \dot{q})$  は遠心力・コリオリ力項,  $g(q)$  は重力項である. また  $\tau$  は関節の制御トルクである.  $J^T F$  は手先外力  $F$  によって発生する関節トルクであり,  $J$  はヤコビ行列である.

### 3.2 壁のモデリング

図 4 に壁からの反力の概念モデルを示す. 図 4 の  $F_y$  は手先速度の  $y$  成分である  $\dot{y}$  が正であるときの向きである. また表 2 にパラメータを示す. また  $F_x$  は壁から受ける力であり,  $F_y$  は壁との摩擦力である.

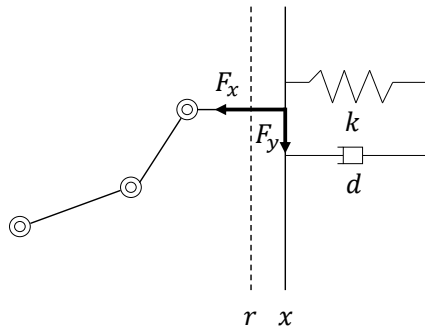


図 4 壁との衝突の概念モデル

表 2 物理パラメータ

記号	名称
$x$	手先位置の $x$ 成分
$r$	壁までの距離
$k$	バネ定数
$d$	ダンパの粘性摩擦
$\mu$	壁の摩擦係数
$\dot{y}$	手先速度の $y$ 成分

マニピュレータは手先位置の  $x$  成分が壁までの距離  $r$  より大きいと力を受ける為, 反力  $F$  は式 (2) で表される.

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(r - x) - d\dot{x} \\ -\mu|F_x|\text{sgn}(\dot{y}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3.3 重力補償つきの関節角 PID 制御

2次元動作をする3自由度のロボットアームのシステム構成を図 5 に示す.

$P$  は関節角を出力するものであり,  $G$  は重力補償を行っている.  $P$  では, 式 (1) を  $\dot{q}$  の式に直して, 積分器に通すことで関節角  $q$  を求めている.  $\tau_{pid}$  は PID 制御の出力で

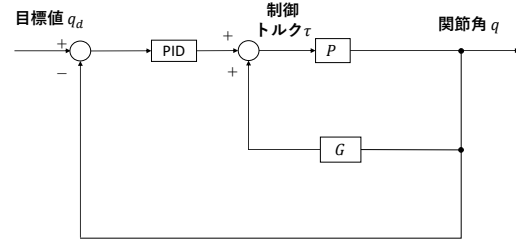


図 5 システム構成

あり, 式 (3) に示す. 制御トルク  $\tau$  の式は式 (4) に示す.  $\tau_g$  は重力補償によって発生するトルクであり, 式 (1) の重力項である. また PID 制御の各ゲインを表 3 に示す.

$$\tau_{pid} = -K_p(q(t) - q_d) - K_i \int_0^t (q(t) - q_d) dt - K_d \dot{q}(t) \quad (3)$$

$$\tau = \tau_{pid} + \tau_g \quad (4)$$

表 3 各ゲイン設定

軸	$K_p$ ゲイン	$K_i$ ゲイン	$K_d$ ゲイン
1 軸	200	1	20
2 軸	200	1	20
3 軸	200	1	20

はじめに, 目標値  $q_d$  を入力する. 図 5 の PID の部分は, 現在の関節角  $q$  と目標値  $q_d$  の偏差に比例ゲイン  $K_p$  を掛け P 制御を行う. また同じ偏差を積分し積分ゲイン  $K_i$  を掛けて I 制御を行う. フィードバックされた現在の関節角  $q$  の微分したものに微分ゲイン  $K_d$  を掛けて D 制御を行う. そこにフィードバックされた現在の関節角  $q$  を  $G$  に入力して重力補償を行い, PID 制御をした制御トルク  $\tau$  に加える.

## 4 関節角目標値を提示するマスタによるスレーブ側の制御

### 4.1 環境

シミュレーション環境を図 6 に示す. Touch は MATLAB/Simulink 上で使用することが出来ないため, Touch の各関節の情報を Visual Studio で取得し, UDP 通信を用いて MATLAB/Simulink に情報を送っている.

### 4.2 マスタとスレーブの初期姿勢

マスタスレーブシステムにおいて, マスタ側とスレーブ側の初期姿勢を合わせることは必須になる. 本研究ではマスタの初期姿勢をスレーブの初期姿勢に合わせる. また表 4 にスレーブの初期姿勢を示す. その時の姿勢を図 7 と図 8 に示す.

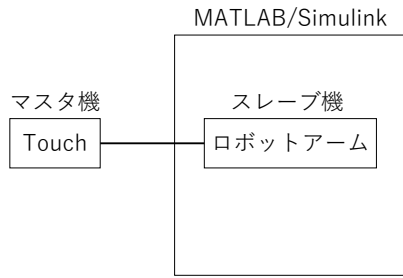


図6 シミュレーション環境

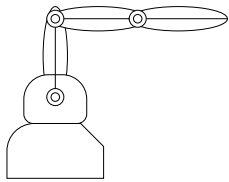


図7 マスタの初期姿勢

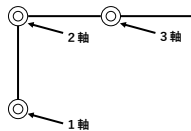


図8 スレーブの初期姿勢

表4 スレーブの初期姿勢

軸	関節角
1 軸	90 [deg]
2 軸	-90 [deg]
3 軸	0 [deg]

### 4.3 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図9~12に示す。図9は上から第1関節, 第2関節, 第3関節の結果を示しており, 青の実線がスレーブの関節角, 赤の破線がマスタの関節角を表している。図10はスレーブの手先位置と姿勢を表しており, 上から手先位置のx成分, 手先位置のy成分, 手先姿勢の結果を示している。また緑の破線は壁の位置を表している。図11はスレーブの反力と摩擦力を表しており, 上から壁から受ける反力, 壁との摩擦力の結果を示している。図12はスレーブの手先速度を表しており, 上から手先速度のx成分, 手先速度のy成分の結果を示している。

図9において, スレーブ機がマスタ機に追従していることがわかる。また図10と図11の3秒から10秒付近に注目すると手先位置のx成分が壁の位置を超えたあたりから反力が発生していることが確認できる。図11と図12の2.5秒から3秒付近に注目すると手先速度のy成分が正方向であるのに対して摩擦力は負方向であることが確認できる。

## 5 マスタ側への反力提示の検証

### 5.1 反力提示

Touchに搭載されているモータは最大で $\pm 3.3\text{N}$ の力までしか出力することが出来ないため, 反力のスケールを合

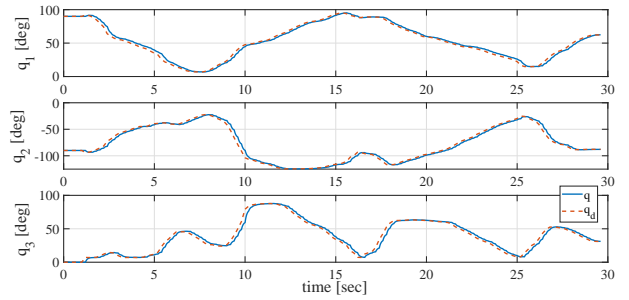


図9 関節角

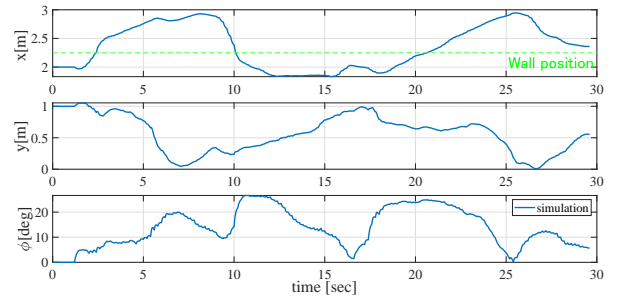


図10 手先位置と姿勢

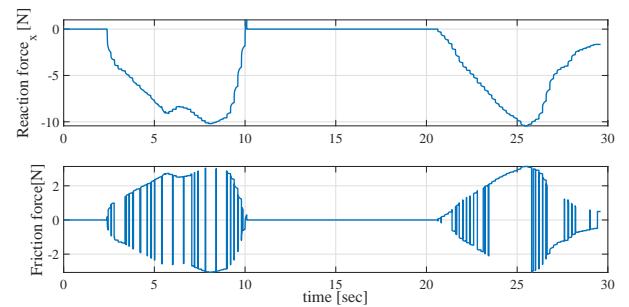


図11 反力と摩擦力

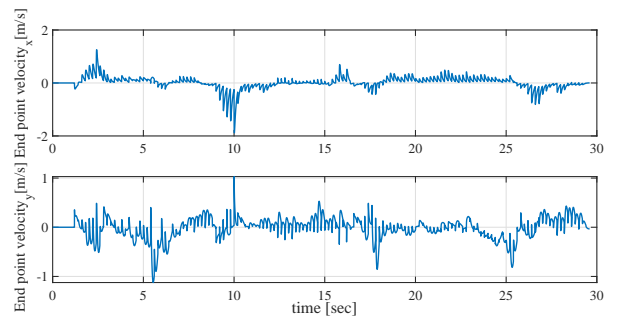


図12 手先速度

わせる必要がある。実際に Touch の方に発生させる反力を  $F_R$  とすると

$$F_R = K_R F$$

となる。ここで  $K_R$  は比例ゲインである。

また, 壁との間に発生する摩擦力  $F_y$  は操作性を考慮し, 一次遅れ系の伝達関数  $G_s(s)$  を掛ける。式(5)に伝達関数

$G_s(s)$  を示す.

$$G_s(s) = \frac{1}{s+1} \quad (5)$$

## 5.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 13~16 に示す. 図 13 は上から第 1 関節, 第 2 関節, 第 3 関節の結果を示しており, 青の実線がスレーブの関節角, 赤の破線がマスタの関節角を表している. 図 14 はスレーブの手先位置と姿勢を表しており, 上から手先位置の x 成分, 手先位置の y 成分, 手先姿勢の結果を示している. また緑の破線は壁の位置を表している. 図 15 は上から壁から受ける反力, 壁との摩擦力の結果を示しており, 青の実線がシミュレーションの値, 赤の破線がマスタに実際に送っている値である. 図 16 はスレーブの手先速度を表しており, 上から手先速度の x 成分, 手先速度の y 成分の結果を示している.

図 13 において, スレーブ機がマスタ機に追従していることがわかる. また図 14 と図 15 の 2.5 秒から 15 秒付近に注目すると手先位置の x 成分が壁の位置を超えたあたりから反力が発生していることが確認できる. 図 15 と図 16 の 4.8 秒から 5.2 秒付近に注目すると手先速度の y 成分が負方向であるのに対して摩擦力は正方向であることが確認できる.

## 5.3 実機への展望

本研究ではシミュレーションベースで進めてきたが, 将来的にスレーブ機を HEBI Robotics 社製の HEBI X-シリーズ スマートアクチュエータ<sup>TM</sup>(以下, スマートアクチュエータとする)に変更する際に, どのような変更点があるのかについて説明する. スマートアクチュエータは MATLAB を用いたプログラミングが可能である. また出力トルクをセンシングすることが可能である. 実機では環境である壁と衝突したかどうかの判定の仕方がシミュレーションと違ってくる. そこで出力トルクをセンシングすることで壁との衝突を判定し, 更に壁から受ける反力を求めることが可能である.

## 6 おわりに

これまでに, MATLAB/Simulink で 2 次元 3 自由度のロボットアームでの関節角制御のシミュレーションを作成した. さらにハプティクスデバイス Touch を導入し, マスタ機から送信した関節角を目標値として入力し, シミュレーション上での 2 次元 3 自由度のロボットアームをマスタスレーブ系として制御することができた. また, マスタ側とスレーブ側で双方向通信を行い, マスタを通してオペレータにスレーブがバネダンパ系の壁と接触したときを提示するための反力を発生させた. 今後の展望として, スレーブ機を実機のロボットアームを用いてマスタスレーブ系の制御を成功させることがあげられる.

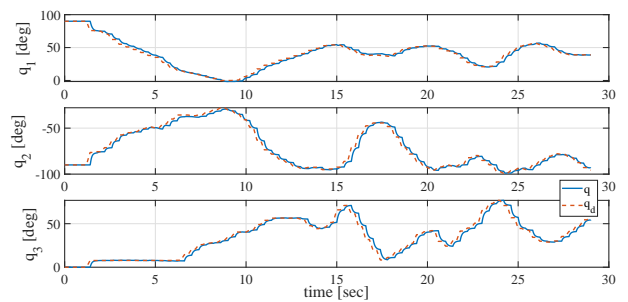


図 13 関節角

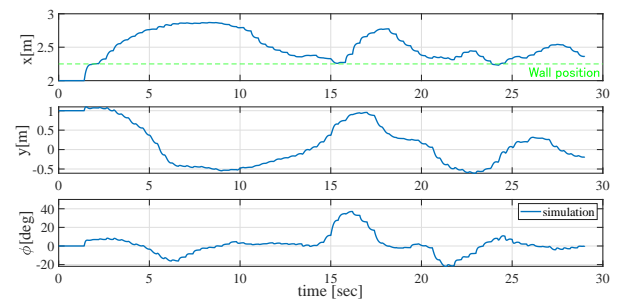


図 14 手先位置と姿勢

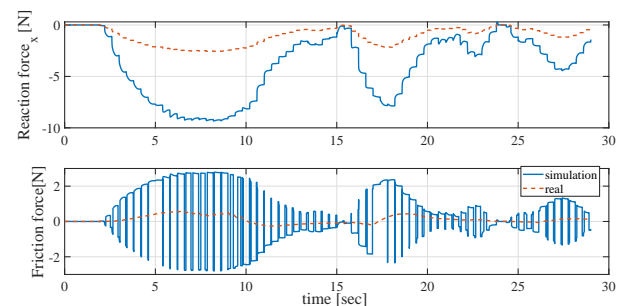


図 15 反力と摩擦力

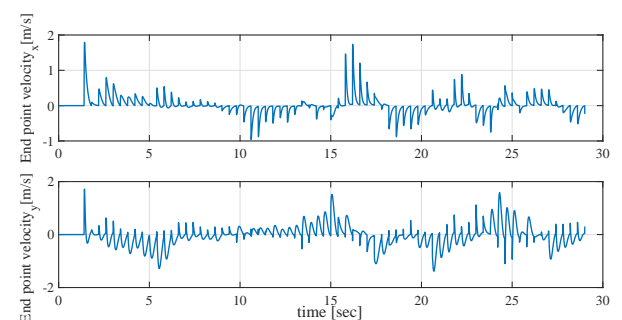


図 16 手先速度

## 参考文献

- [1] 井後圭人・山口正成: ハプティクスデバイスを用いたマスタスレーブ制御. 南山大学, 2019.
- [2] 永井清・土橋宏規: 『ロボティクスシリーズ 8 ロボット機構学』. コロナ社, 東京, 2015.