

ハプティクスデバイスを用いたマスタスレーブ制御

2016SC021 井後圭人 2016SC097 山口正成

指導教員：中島明

1 はじめに

マスタスレーブとはロボットを遠隔操作するための方法であり、一般的には2本のマニピュレータを用い、一方をオペレータが操るマスタ機とし、もう一方をマスタ機と同様の動きをするスレーブ機として運用する。またハプティクスデバイス (Haptics Device) とは、力の感覚をフィードバックさせることが可能な装置のことであり医療用シミュレーションなどで用いられている。

本研究ではハプティクスデバイスをマスタ機とし、ロボットアームをスレーブ機とした異構造マスタスレーブシステムの構築を行い、マスタから取得した関節角をスレーブの目標値として入力するマスタスレーブ制御を行った。さらに異構造マスタスレーブシステムにおいてオペレータがスレーブ機の機構限界などを意識することは困難であるため、オペレータにスレーブ側の機構限界を提示するための反力をマスタ機であるハプティクスデバイスに発生させた。

2 実験機の仕様

2.1 ロボットアーム

本研究では6軸垂直多関節マニピュレータであるMOTOMAN-HP3Jをスレーブ機として使用している。各関節に絶対値エンコーダを搭載しており、ロボットアームのフレーム配置 $\Sigma_0 \sim \Sigma_7$ を図1のように定義する。

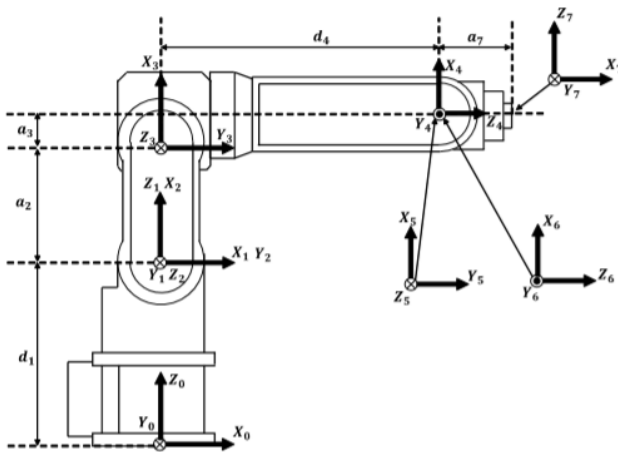


図1 ロボットアームのフレーム配置

また図1において各座標系間の距離を d_1, a_2, a_3, d_4, a_7 と置き、具体的な値を表1に示す。

表1 ロボットアームの各パラメータ

パラメータ	座標間距離 [m]
d_1	0.2900
d_4	0.2700
a_2	0.2600
a_3	0.0300
a_7	0.1315

2.2 ハプティクスデバイス

本研究でマスタ機として用いるハプティクスデバイスの TouchTM (以下, Touch と呼ぶ。) は6自由度の機構をしており、各関節に絶対値エンコーダが搭載されているため Touch の関節角などが取得可能である。Touch のフレーム配置 $\Sigma_{t0} \sim \Sigma_{t7}$ を図2のように定義する。

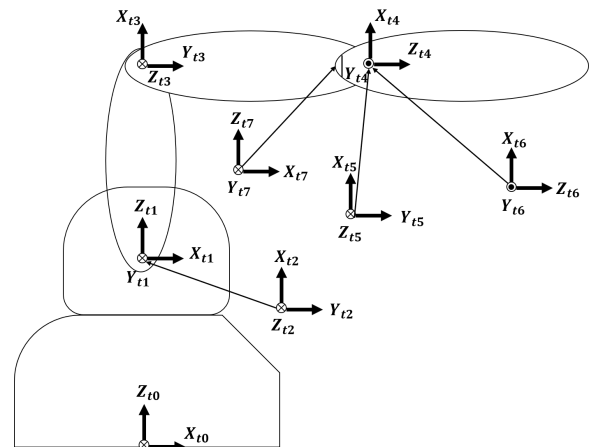


図2 Touch のフレーム配置

3 マスタスレーブシステムの構築

3.1 実験環境の構築

実験環境は図3に示されるようにハプティクスデバイス, Host PC, Real Time PC, ロボットアームの4つの機器が連なって構成されている。Host PC ではハプティクスデバイスの制御用プログラムを実行しており、ハプティクスデバイス及び Host PC を合わせてマスタ側としている。同様に Real Time PC ではロボットアームの制御用プログラムを実行しており、ロボットアーム及び Real Time PC を合わせてスレーブ側としている。

本研究ではマスタ機であるハプティクスデバイスの関節角をマスタ側で取得し、その関節角をもとにスレーブ機で

あるロボットアームの制御を行った。そのためマスタ側からスレーブ側へ関節角などのデータを受け渡す必要があり、マスタ側とスレーブ側は UDP 通信という通信方法でデータの送受信を行っている。UDP 通信とはポート番号と IP アドレスを指定してデータの通信をする通信方法の 1 つであり、非常に速いデータの送受信が可能な通信方法である。ただし複数の値を同時に送受信するため、送信側では送信したい値をまとめて一つの文字列へ変換した後送信を行い、受信側では受信した文字列を分解して値を取り出すという事を行った。

本来マスタスレーブ制御を行うにはマスタ側からスレーブ側への一方向通信を行うだけで十分だが、本研究ではスレーブ機の状態をもとにマスタ機から反力を発生させるという事を行っているためマスタ側とスレーブ側は双方向通信を行っている。

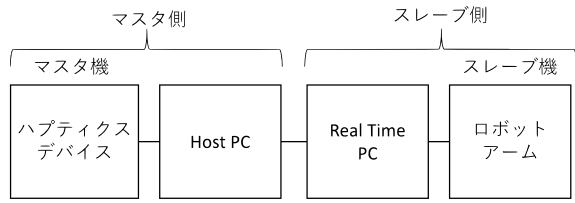


図3 実験環境の構成

3.2 マスタスレーブシステムの構成

本研究におけるマスタスレーブシステム全体のブロック線図を図4に示す。

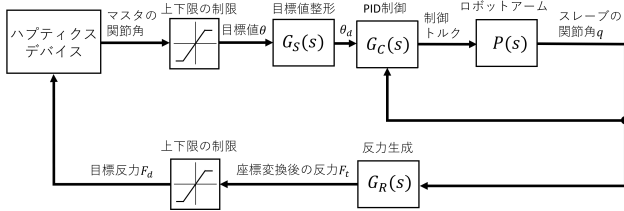


図4 マスタスレーブシステムのブロック線図

図4において $G_S(s)$ は目標値整形のための伝達関数であり、 $G_C(s)$ でロボットアームを制御するためのPID制御を行い、 $G_R(s)$ でスレーブ側の機構限界をオペレータへ提示するための反力生成を行っている。

このシステムにおける処理の流れを以下に示す。マスタ機であるハプティクスデバイスからマスタ機の関節角をスレーブ側へ送信する。スレーブ側で受信処理を行った後、マスタ機とスレーブ機で動作範囲の上下限の違う軸があるため、送られてきた関節角に対して上下限の制限を行うことでスレーブの目標値 θ とする。目標値軌道を滑らかにするため、目標値整形を行う伝達関数 $G_S(s)$ を目標値 θ に掛けて θ_d とする。整形後の目標値 θ_d をもとにPID制御を用いて制御対象であるロボットアーム $P(s)$ をフィードバック制御する。ロボットアームの関節角 q をもとにスレーブ

側の機構限界をオペレータに提示するための反力 F を生成する。生成した反力 F をマスタの座標系へ座標変換を行い F_t としてマスタ側へ送信する。ハプティクスデバイスには出力できる最大値が決まっているためスレーブ側から送られてきた反力 F_t に上下限の制限を行い目標反力 F_d とし、ハプティクスデバイスはその目標反力 F_d を出力する。以上の処理により、反力の出力が可能なマスタスレーブ制御が可能となる。

4 ロボットアームのモデリング

4.1 ロボットアームの順運動学

ロボットアームの順運動学について考える。順運動学とは関節角空間から手先空間への変換を行う事である。ロボットアームのフレーム配置 $\Sigma_0 \sim \Sigma_7$ の同次変換行列を (1) 式に示す。

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} {}^0R_7 & {}^0p_7 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

このとき、ロボットアームの手先位置は 0p_7 と表される。また、 0T_7 は以下の (2) 式で求まる。

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (2)$$

各同次変換行列は (3) 式のように示される。

$${}^iT_{i+1} = \begin{bmatrix} {}^iR_{i+1} & {}^ip_{i+1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (3)$$

隣り合う座標系ごとの位置と姿勢の関係を以下に示す。ただし、ロボットアームの第 i 軸の関節角を q_i として、 $S_i := \sin(q_i)$ 、 $C_i := \cos(q_i)$ と表記する。

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ C_2 & -S_2 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^1p_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2R_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2p_3 = \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^3R_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -S_4 & -C_4 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^3p_4 = \begin{bmatrix} a_3 \\ d_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^4R_5 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ S_5 & C_5 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^4p_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^5R_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -S_6 & -C_6 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^5p_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^6R_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^6p_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

5 マスタとスレーブの動作範囲

マスタとスレーブの各軸の動作可能範囲には違いがある。以下の表 2 に示される 2 軸と 5 軸について、マスタの可動範囲がスレーブの可動範囲を超える領域が存在する。

表 2 マスタとスレーブの動作範囲

軸	マスタ	スレーブ
2 軸	約 - 12 ~ 約 + 90[deg]	約 - 80 ~ 約 + 85[deg]
5 軸	約 - 150 ~ 約 - 7[deg]	約 - 100 ~ 約 + 90[deg]

よって、2 軸及び 5 軸では Touch から取得した関節角をそのまま目標値にするのではなく、目標値に対し上下限を設定し、スレーブの 2 軸に入力される目標値の上限を +80[deg]、5 軸に入力される目標値の下限を -95[deg] とした。

6 スレーブの制御則

6.1 PID 制御

スレーブの各関節の制御には PID 制御を用いている。目標値 θ に目標値整形のための伝達関数 $G_S(s)$ を掛けた値を目標値 θ_d として入力する。入力された目標値 θ_d とスレーブの現在角 q との偏差に比例ゲイン K_p を掛けて P 制御を行い、同じ偏差を積分したものに積分ゲイン K_i を掛けて I 制御を行う。また、現在角 q に疑似微分フィルター $H(s)$ を通して疑似微分し、微分ゲイン K_d を掛けて D 制御を行う。

PID のブロック線図を以下の図 5 に示す。ここで、 $P(s)$ は制御対象であるロボットアームを表す。

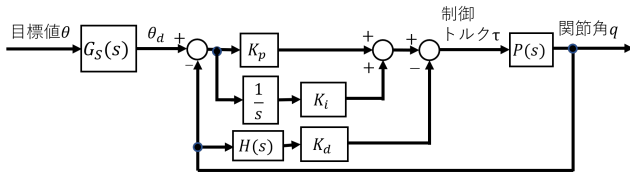


図 5 PID 制御のブロック線図

$$G_S(s) = \left(\frac{1}{Ts + 1} \right)^2, \quad H(s) = \frac{6}{s + 6}s \quad (11)$$

7 反力生成

7.1 スレーブの 2 軸の機構限界を提示する反力の生成

前述の 5 章において、マスタ機の 2 軸と 5 軸の動作範囲がスレーブ機の 2 軸と 5 軸の動作範囲を超えて動くことを示した。そこで、マスタであるハプティクスデバイスの力感覚をフィードバックできるという特徴を利用し、スレーブの 2 軸の機構限界である $q_2 = 85[\text{deg}]$ に近づくほど主に図 2 の Σ_0 座標系の z 軸方向に強い反力を出力させることにより、オペレータにスレーブの 2 軸の機構限界を把握させることを試みた。

具体的には、スレーブの手先に発生させたい反力を基にマスタに発生させる反力を決定する。ここで、スレーブの反力生成を考えるにあたり、以下の F_q 及び F_p で表される 2 種類の目的に応じた反力を生成するのが望ましい。

$$\begin{cases} F_q: \text{関節角空間での制限をするための反力} \\ F_p: \text{手先空間での制限をするための反力} \end{cases} \quad (12)$$

スレーブに発生させる反力を F とし、

$$F = F_q + F_p \quad (13)$$

と定める。ただし、本研究において反力 F_p は生成しないため、 $F = F_q$ となる。

F_q の生成について考える。(12) 式で表される反力 F_q は J をスレーブ機のヤコビ行列、 τ_d を反力生成に用いるためのスレーブの 1 軸、2 軸、3 軸のトルクとして以下の (14) 式に示される

$$F_q = (J^T)^{-1} \tau_d \quad (14)$$

スレーブの 1 軸、2 軸、3 軸に発生させる関節トルクをそれぞれ τ_{d1} 、 τ_{d2} 、 τ_{d3} と置き τ_d を、

$$\tau_d = \begin{bmatrix} \tau_{d1} \\ \tau_{d2} \\ \tau_{d3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ -k_{q2}/|q_2 - 85| \\ -k_{q3}/|q_3 - 65| \end{bmatrix} \quad (16)$$

と定める。ただし、 k_{q2} 、 k_{q3} は任意の定数である。

ヤコビ行列 J とは順運動学の一般式 $p = f(q)$ の両辺を時間微分することにより求まる $\dot{p} = J\dot{q}$ の関係式で表される J のことである。ヤコビ行列 J を導出する過程を以下に示す。

ロボットアームの手先位置 0p_7 の x, y, z 成分をそれぞれ p_x, p_y, p_z とすると、手先位置は以下のように表される。

$${}^0p_7 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

よって、(17) 式を用いてヤコビ行列 J は以下のように表される。

$$J = \begin{bmatrix} \partial p_x / \partial q_1 & \partial p_x / \partial q_2 & \partial p_x / \partial q_3 \\ \partial p_y / \partial q_1 & \partial p_y / \partial q_2 & \partial p_y / \partial q_3 \\ \partial p_z / \partial q_1 & \partial p_z / \partial q_2 & \partial p_z / \partial q_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

さらに、手先空間に関する反力 F_p は 0 であるため、最終的に生成される反力は $F = F_q$ となる。そして、生成された F をマスタの座標系へ座標変換し、 $F_t = [F_{tx}, F_{ty}, F_{tz}]$ として各 x, y, z 成分をマスタ側へ送信する。

7.2 反力の上下制限

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できないので, Touch に与える目標反力 F_d を $F_d = [F_{dx}, F_{dy}, F_{dz}]$ とすると F_{dx}, F_{dy}, F_{dz} はそれぞれ $|F_{dx}| \leq 3.3, |F_{dy}| \leq 3.3, |F_{dz}| \leq 3.3$ となるよう制限を加えた.

また出力される力が急激に変化することを防ぐため, 1ms あたりの力の変化量は $0.002[\text{N/ms}]$ 以下になるよう制限を加えた.

8 実験結果

8.1 マスタスレーブ制御と反力提示

6 章に基づきスレーブの 1 軸から 6 軸までの全ての軸を同時にマスタスレーブシステムとして制御した. 得られた実験結果のを図 6 に示す.

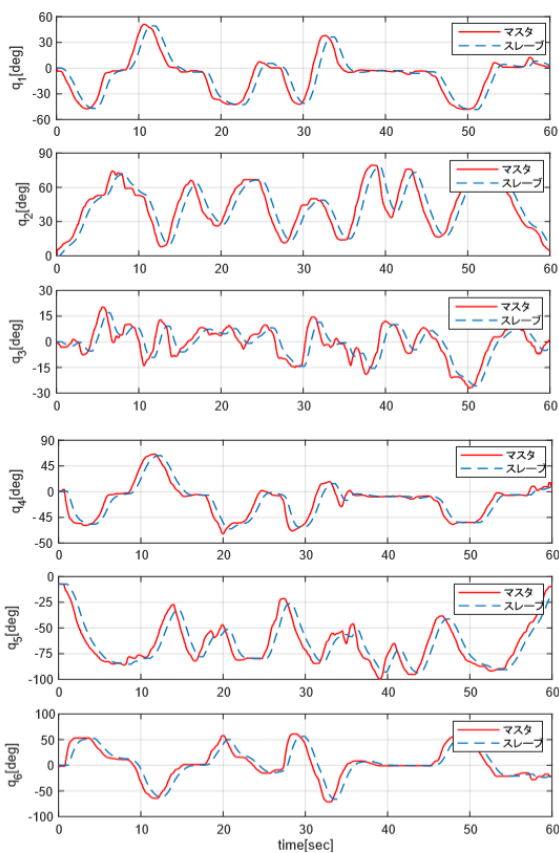


図 6 1 軸から 6 軸までの全ての軸が目標値に追従する様子

図 6 において, 上から順番に 1 軸, 2 軸, 3 軸, 4 軸, 5 軸, 6 軸の各関節角の実験結果を示している. なお, 各グラフ内の実線がマスタ (Touch) の関節角を表し, 破線がスレーブ (ロボットアーム) の関節角を表している.

6.1 節より, 目標値整形のために伝達関数 $G_S(s)$ を掛けたゆえにスレーブがマスタより約 2 秒遅れて動作するが, スレーブが目標値に追従している様子がわかる.

次に, 7 章に基づき, $k_{q2} = 14.5, k_{q3} = 8.0$ と定め, マスタを通してオペレータにスレーブの 2 軸の機構限界を提示

するための反力の発生を行った. 得られた実験結果を図 7 に示す.

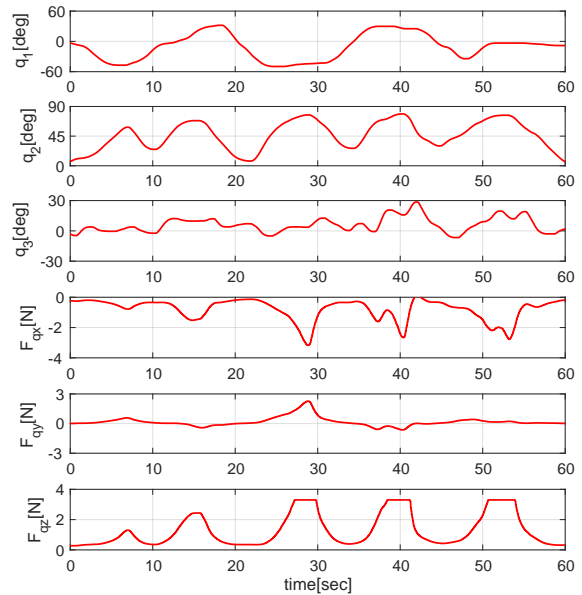


図 7 スレーブの現在角に応じて反力を出す様子

図 7 において, 上から順番にスレーブの 1 軸, 2 軸, 3 軸の各関節角, 図 2 における Σ_{t_0} 座標系におけるマスタの x, y, z 軸に発生した反力を示している. スレーブの現在角が機構限界である $q_2 = 85[\text{deg}]$ に近づくほどマスタで z 軸方向に反力を提示した. しかし, 1 軸や 2 軸の姿勢に依存して y 軸方向に反力が発生したことや x 軸方向に発生する反力を十分に抑えきれなかったことから, オペレータがスレーブの 2 軸の機構限界を把握することは困難であった.

9 おわりに

これまでに, ハプティクスデバイス Touch の導入とマスタから送信した関節角を目標値として入力し, 1 軸から 6 軸までの全軸を同時にマスタスレーブ系として制御をすることができた. また, マスタとスレーブ間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の 2 軸の機構限界を提示するための反力の発生を行ったが, オペレータがスレーブの 2 軸の機構限界を把握することは困難であった. 今後の展望として, 反力生成におけるスレーブのトルクの与え方について再考をすることや手先空間での制限を反力として提示させることが挙げられる.

参考文献

- [1] 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.
- [2] John J.Craig:「ロボティクス-機構・力学・制御」. 共立出版社, 東京, 2016.
- [3] 3D Systems 社: <https://ja.3dsystems.com/>