

カセンサを用いたマスタースレーブ制御

2014SC099 神村海 2015SC074 大石真由

指導教員：中島明

1 はじめに

マスタースレーブシステムとは、人間が入り込めない環境において作業を行うための遠隔操作のシステムの一つである。一般的に、マスタースレーブシステムは манипуレータに実装される [1]。マスタースレーブマニピュレータは 2 本のアームから構成され、操作者によって操られるマスター側の動きが作業対象のスレーブ側に伝えられて作業が行われる。

近年、マスタースレーブシステムは、産業用ロボットや医療用ロボットなどに用いられており、厳しい環境下での安全性と複雑な作業に対する操作性の向上が課題となっている。

本研究ではその第一段階としてフィンガーロボットとアームロボットを用いたマスタースレーブ制御を行う。また操作性の向上についてはフィンガーロボットに対してパワーアシストを行うことや、ディザ信号を入れることによる摩擦の軽減などを行った。

2 実験機の仕様

2.1 カセンサ

本研究で用いるカセンサは図 1 に示すように、6 成分の力とモーメント ($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$) を検出し、6 組の歪ゲージ・データをアナログ信号で出力するセンサである。



図 1 カセンサ

2.2 フィンガーロボット

フィンガーロボットは 3 つのモータより構成されており、それぞれがのモータが関節となっている、自由度 3 の機構である。各モータに、相対値エンコーダが内蔵されているので、現在角度を読み取ることが可能である。図 2 は

フィンガーロボットの概略図である。

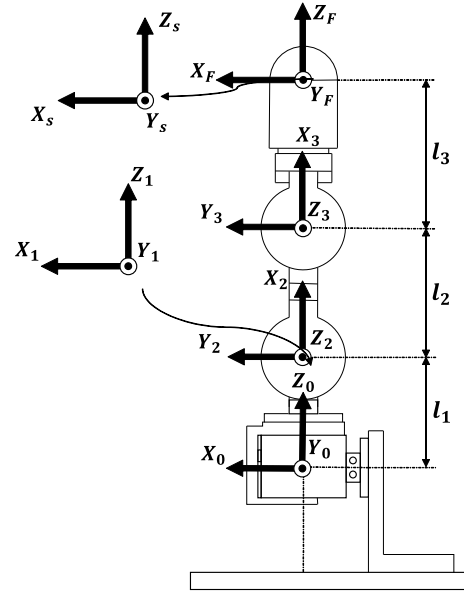


図 2 フィンガーロボット

2.3 アームロボット

アームロボットは各関節に絶対値エンコーダを搭載しており、図 3 に示すような姿勢の時に初期姿勢である。本来、6 自由度のアームロボットであるが、マスターであるフィンガーロボットが 3 自由度であるため、アームロボットの 1 軸, 2 軸, 3 軸のみを用いて、3 自由度のスレーブとして使用する。

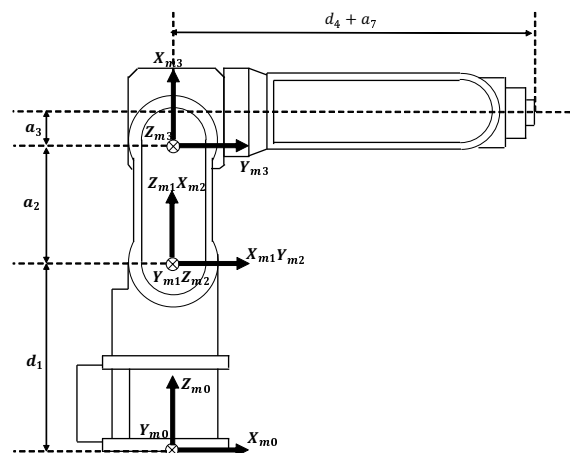


図 3 アームロボット

3 モデリング

3.1 座標系と変数

本研究で使用するフィンガーロボットの概略図を図4に示す。

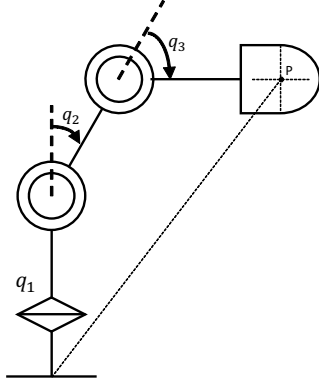


図4 マスターの概略図

各変数と座標系を以下の表1に示す。

表1 物理パラメータ

名称	記号
1軸の姿勢角	q_1 [rad]
2軸の姿勢角	q_2 [rad]
3軸の姿勢角	q_3 [rad]
基準座標系から見た指先位置	p

図2のように各座標間の距離を l_0, l_1, l_2, l_3 とおく。具体的な値は表2に示す。

表2 各座標パラメータ

文字	座標間距離 [mm]
台座の高さ	6.0
l_0	37.5
l_1	39.0
l_2	46.0
l_3	51.78
${}^H p_{01}$	40.0

3.2 順運動学

この節ではヤコビ行列の導出のための順運動学について説明する。順運動学とは関節角から手先位置を求めることを言う。そのために2.2節の図2の各座標系間の同次変換行列を求め、順運動学を解くことでハンドの指先位置 ${}^0 p_F$ を求める。ただしハンドの第 i 軸の関節角を q_i とし、 $C_i :=$

$\cos(q_i)$, $S_i := \sin(q_i)$ と表記する。また、指の根元座標を Σ_0 とする。

ハンドのフレーム配置 $\Sigma_0 \sim \Sigma_F$ の同次変換行列を以下に示す。

$${}^0 T_F = \begin{bmatrix} {}^0 R_F & {}^0 p_F \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

このとき、指先位置は ${}^0 p_F$ である。

${}^0 T_F$ は、 ${}^0 T_F = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_F$ で計算でき、各同次変換行列は以下のように示される。

$${}^i T_{i+1} = \begin{bmatrix} {}^i R_{i+1} & {}^i p_{i+1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (i = 0, 1, 2)$$

$${}^3 T_F = \begin{bmatrix} {}^3 R_F & {}^3 p_F \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

隣り合う座標系ごとの位置と姿勢の関係 (${}^1 R_2, {}^1 p_2, {}^2 R_3, {}^2 p_3, {}^3 R_F, {}^3 p_F$ の値) は以下のように示される。

$${}^0 R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0 p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}$$

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

$${}^2 R_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2 p_3 = \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^3 R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^3 p_F = \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.3 力とトルクの関係式

力センサから読み取った力 F を関節トルク τ として、モータに出力させるための変換式を説明する。3.2節で説明したように式(3)に順運動学の一般式を以下に示す[2]。

$$p = f(q) \quad (3)$$

式(3)の $f(q)$ を q について偏微分することによってヤコビ行列 $J(q)$ が求まる。

$$J = \begin{bmatrix} -S_1(l_3 S_{2,3} + l_2 S_2) & C_1(l_3 C_{2,3} + l_2 C_2) & l_3 C_{2,3} C_1 \\ C_1(l_3 S_{2,3} + l_2 S_2) & S_1(l_3 C_{2,3} + l_2 C_2) & l_3 C_{2,3} S_1 \\ 0 & -l_3 S_{2,3} - l_2 S_2 & -l_3 S_{2,3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

一方で、力センサで読み取った力 F と関節トルク τ の関係式は基準座標から見た指先座標系 ${}^B F_c$ を用いて以下のよう示される。

$$\tau = J^T(q) {}^B F_c \quad (5)$$

しかし力センサから得られるセンサ座標系 ${}^S F_c$ を指先座標系に変換する必要があるため、回転行列 R を用いて以下の式で表される。

$${}^B F_c = {}^B R_{F_1} {}^{F_1} R_S {}^S F_c \quad (6)$$

4 制御則

この章ではスレーブであるアームロボットの制御則とマスターであるフィンガーロボットのパワーアシストについて説明する。

4.1 マスターの制御則

マスターには、パワーアシスト、ディザ信号の2つの制御を行っている。パワーアシストとは、3.3節で述べた力と関節トルクの変換式を用いて、力センサで読み取った指先にかかった力の値を関節トルクに変換し、各関節に出力させることである。模式図を図5に示す。その際、式(7)のように倍率 k を掛けることにより、マスターをより滑らかに動かすことが可能になる。

$$\tau = k J^T(q) F \quad (7)$$

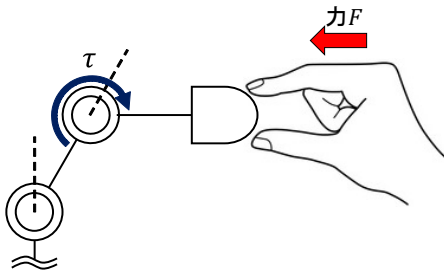


図5 パワーアシスト

しかし、パワーアシストのために倍率 k を上げるとノイズにも倍率がかかり増幅し小刻みに震えるような動きをするため、ノイズ対策として式(8)のようなローパスフィルタ $F(s)$ を用いてノイズを軽減させている。今回用いたローパスフィルタのカットオフ周波数は $\omega = 10[\text{rad/sec}]$

としている。

$$F(s) = \frac{\omega}{s + \omega} \quad (8)$$

また、フィンガーロボットにおいて、各関節に用いられているモータの静止摩擦が強いため、ディザ信号を用いることで摩擦の軽減を図っている。ディザ信号とは、高速な周期で信号を送り続けるもので、本研究では各関節の静止摩擦を推定し、その静止摩擦と同程度の大きさの力をおよそ $10[\text{ms}]$ の周期で送っている。

4.2 スレーブの制御則

フィンガーロボットは手で操作するのに対し、アームロボットでは各関節角をフィードバックし、各関節のPID制御を行っており、そのブロック線図を図6に示す。

各関節の入力は目標角 θ のステップ入力と与えられ、目標値を滑らかにする伝達関数 $G(s)$ を通すことで目標軌道を緩やかにしている。その $G(s)$ は一次遅れ系の二乗であり式(9)のように定義している。

$$G(s) = \left(\frac{1}{Ts + 1} \right)^2 \quad (9)$$

目標角と現在角の差に比例ゲインである K_p ゲインを掛けP制御を行い、偏差の積分に K_i ゲインを掛けI制御を行っている。また、D制御では現在角を疑似微分して、 K_d ゲインを掛けている。ここで、実際の制御においては現在角の微分は不可能であるため、疑似微分フィルタ $H(s)$ を現在角に通すことで微分を行っている。ここで $H(s)$ は式(10)に示すように微分器 s にカットオフ周波数 $6[\text{rad/sec}]$ のローパスフィルタを掛け合わせたものを用いている。

$$H(s) = \frac{6s}{s + 6} \quad (10)$$

なお、ブロック線図における $P(s)$ は制御対象である。

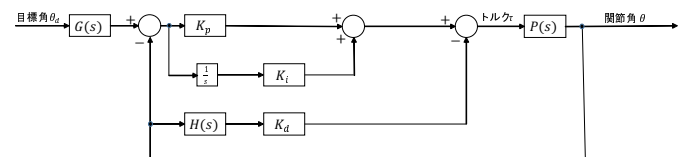


図6 PID制御ブロック線図

5 マスタースレーブ制御

この章では、マスターであるフィンガーロボットとスレーブであるアームロボットとの連携について説明する。

5.1 マスタースレーブ系の制御則

4.1 節で説明したパワーアシストにより動いたフィンガーロボットの各関節角の値をエンコーダで読み取り、スレーブであるアームロボットに目標値として送ることによって、マスターの動きをスレーブに伝えることが可能になる。

図 7 はマスタースレーブ制御のブロック線図である。ここでの $C(s)$ は式 (7) を示している。

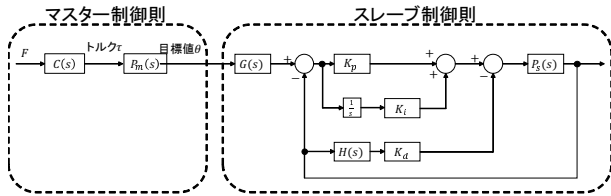


図 7 マスタースレーブ制御ブロック線図

5.2 マスターとスレーブとの初期姿勢合わせ

マスタースレーブは 2 つの機器に同じ動作をさせるため、初期姿勢を合わせる必要がある。本実験ではスレーブに与える目標値を手入力とマスタースレーブ制御のどちらでも与えられるように切り替えが可能となっている。2 つの機器の初期姿勢を図 8 のように 3 軸を 90[deg] 曲げて、アームロボットに合わせるようにした。また、マスタースレーブ制御に切り替えた際に、フィンガーロボットとアームロボットの角度の補正をするため、アームロボットに与える目標値を 3 軸のみ -90[deg] ずらしている。

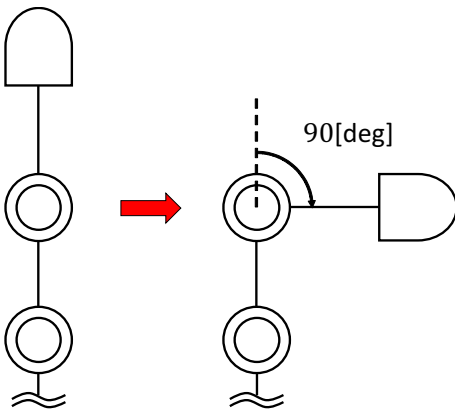


図 8 初期姿勢

5.3 実験結果

5.1 節, 5.2 節より得られたマスタースレーブ制御の実験結果を図 9 に示す。

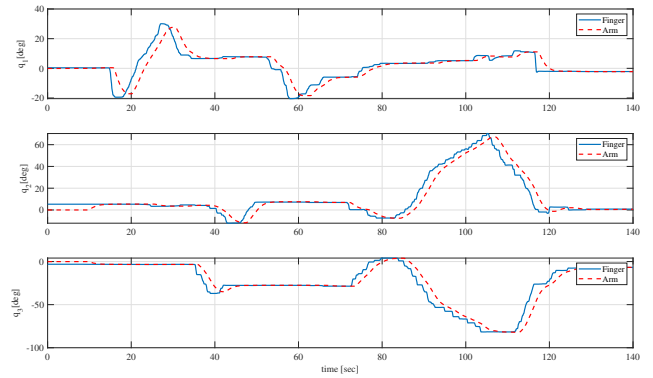


図 9 追従

図 9 において上から順に 1, 2, 3 軸の各関節角であり、実線がフィンガーロボットの関節角、破線がアームロボットの関節角を表している。今回、4.2 節の式 (9) における時定数 $T = 1$ としているためフィンガーロボットの角度に対してアームロボットの角度に約 6[s] の遅れはあるが追従していることが分かる。

6 おわりに

本研究では、力センサを用いることでフィンガーロボットを滑らかに動かし、ロボットアームにフィンガーロボットの現在角を目標値として与え、またそれに伴ってフィンガーロボットの各関節の摩擦の軽減を図る目的でディザ信号を用いることで、全体としてマスタースレーブ制御の実現をすることができた。

しかし現段階では研究目的である複雑な作業ではなくスレーブにする作業として単純なものしかできていないので再考の余地がある。

参考文献

- [1] 横小路泰義：『マスタ・スレーブ制御の理論』．日本ロボット学会誌 Vol.11 No.6, pp.794 pp.802, 1993.
- [2] J.J.Craig (三浦宏文・下山勲 訳)：『ロボティクス-機構・力学・制御』．共立出版、東京、1991.