

# 二次元空間内における把持操りの制御

2014SC092 山本雅和

指導教員：中島明

## 1 はじめに

現在、様々な工場において、必要な人員の削減や人では危険を伴う作業を行うために、産業用のマニピュレータが用いられている。しかし、使用されているハンドはグリッパなどの用途が特定されているものが主流であり、人の手の形をした汎用型のハンドは研究段階である。

本研究では、物体の把持・操りを行う2自由度の指について、2次元空間内におけるシミュレーションを作成した。このシミュレーションの作成において、指の制御については文献 [1] を、物体の把持操りについては文献 [2] を参考にした。

## 2 モデリング

### 2.1 座標系と変数

図1に、物体の把持操りを行う2自由度の指の概略図を示す。図1中の大きい四角が物体を、円が指の駆動する関節を表している。

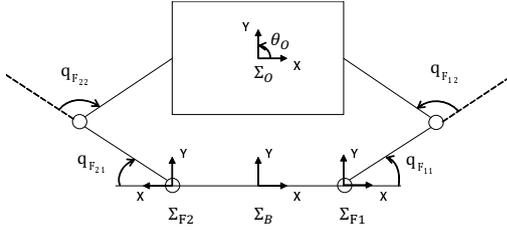


図1 モデリングにおけるフィンガーの概略図

XY平面上の原点に基準座標系  $\Sigma_B$  を設定し、対象物の重心に座標系  $\Sigma_O$ 、指  $F_i$  の根元の第1関節に座標系  $\Sigma_{F_i}$  を設定する。各関節の角度を表す関節変数を  $\mathbf{q}_F$ 、対象物の位置および姿勢の変数を  $\mathbf{q}_O$  とする。ただし、 ${}^B\mathbf{p}_O$  は対象物の位置を表すベクトルである。

$$\mathbf{q}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{F_1} \\ \mathbf{q}_{F_2} \end{bmatrix}, \mathbf{q}_{F_i} = \begin{bmatrix} q_{F_{i1}} \\ q_{F_{i2}} \end{bmatrix}, \mathbf{q}_O = \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{p}_O \\ \theta_O \end{bmatrix}$$

### 2.2 拘束条件

接触点を指からは  $CF_i$ 、対象物からは  $CO_i$  とすると、対象物と指  $F_i$  の指先がある一点で点接触するための拘束条件が以下の式 (1) である。さらに式 (1) を微分することで、式 (2) から (5) が得られる。ただし、運動学方程式より  ${}^B\dot{\mathbf{p}}_{F_i}$  を  $\mathbf{J}_{F_i}\dot{\mathbf{q}}_{F_i}$  に変換しており、 $\mathbf{J}_{F_i}$  は指先の位置を

関節角で微分することで得られるヤコビ行列である。

$${}^B\mathbf{p}_{F_i} + {}^B\mathbf{R}_{F_i}{}^{F_i}\mathbf{p}_{CF_i} = {}^B\mathbf{p}_O + {}^B\mathbf{R}_O{}^O\mathbf{p}_{CO_i} \quad (1)$$

$$\mathbf{D}_{F_i}\mathbf{J}_{F_i}\dot{\mathbf{q}}_{F_i} = \mathbf{D}_{O_i}\dot{\mathbf{q}}_O \quad (2)$$

$$\mathbf{D}_{F_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_{O_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & {}^B\mathbf{R}_O(\theta_O + \frac{\pi}{2})^O\mathbf{p}_{CO_i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{CF} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{F_1}\mathbf{J}_{F_1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{F_2}\mathbf{J}_{F_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 指先力と関節トルク・対象物合力との静力学的関係

接触点において、指  $F_i$  の指先から対象物に加える指先力を  $\mathbf{f}_{C_i}$  とする。 $\mathbf{F}_O$  を対象物に接触している指や環境から加えられる外力とすると、指先力と外力の静力学的関係式は式 (6) となる。

$$\mathbf{F}_O = \mathbf{D}_O^T \mathbf{f}_C, \left( \mathbf{f}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{C_1} \\ \mathbf{f}_{C_2} \end{bmatrix}, \mathbf{D}_O = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{O_1} \\ \mathbf{D}_{O_2} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

また、各関節に与える駆動入力を  $\boldsymbol{\tau}$  とすると、静力学において  $\boldsymbol{\tau}$  は次の式 (7) から得られる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{CF}^T \mathbf{f}_C \quad (7)$$

### 2.4 運動方程式

式 (8) は、指と対象物についての運動方程式をまとめた式である。ただし、 $M_{F_i}$  は指  $F_i$  の一般化慣性テンソル、 $M_O$  は対象物の一般化慣性テンソル、 $\mathbf{h}_{F_i}$  は指  $F_i$  に関する遠心力・コリオリ力・重力項、 $\mathbf{h}_O$  は対象物に関する遠心力・コリオリ力・重力項を表す。

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T \mathbf{f}_C \quad (8)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_F & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_O \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_F \\ \mathbf{q}_O \end{bmatrix}, \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_F \\ \mathbf{h}_O \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_4 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{CF} & -\mathbf{D}_O \end{bmatrix}$$

## 3 制御則

### 3.1 指先力の導出

対象物に与える指先力は、式 (6) を  $\mathbf{f}_C$  について解いた式 (9) で求められる。 $(\mathbf{D}_O^T)^+$  は  $\mathbf{D}_O^T$  の疑似逆行列を表す。この式 (9) を式 (7) に代入することで、制御入力  $\boldsymbol{\tau}$  が得られる。ただし、 $\mathbf{e}_{ij}$  は接触点  $i$  から他方の接触点  $j$  へ向かう単位ベクトル、 $f_N$  は  $\mathbf{e}_{12}, \mathbf{e}_{21}$  に沿った指先力の大きさであり、 $\mathbf{K}_{D_0^T} f_N$  は内力のみに影響する項である。また、 $\mathbf{F}_O$  の値を変更することで、対象物を把持することや任意の操りを行うことが可能となる。

$$\mathbf{f}_C = (\mathbf{D}_O^T)^+ \mathbf{F}_O + \mathbf{K}_{D_0^T} f_N, \left( \mathbf{K}_{D_0^T} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{12} \\ \mathbf{e}_{21} \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

### 3.2 操りのための制御

物体に加える合力項  $\mathbf{h}_O$  と、物体の目標位置  $\mathbf{q}_{O_d}$  と現在位置  $\mathbf{q}_O$  とのずれを補正する項を合わせた式 (10) を、合力  $\mathbf{F}_O$  とした。

$$\mathbf{F}_O = \mathbf{h}_O + K_p(\mathbf{q}_{O_d} - \mathbf{q}_O) \quad (10)$$

関節駆動力  $\boldsymbol{\tau}$  を求める式 (7) に、関節角に関する減衰を付加するための項  $-K_d\dot{\mathbf{q}}_F$  を加えた。  $\mathbf{g}_F$  は指に加わる重力の補償項である。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{CF}^T \mathbf{f}_C + \mathbf{g}_F - K_d\dot{\mathbf{q}}_F \quad (11)$$

握力  $f_N$  を、握力の目標値  $f_{N_d}$  を用いた  $f_{N_d} + K_I \int (f_{N_d} - f_N) dt$  に変更した。対象物を移動させる際に握力が一時的に上下するため P 制御だと不安定になってしまう。そのため I 制御を用いている。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_C &= (\mathbf{D}_O^T)^+ \mathbf{F}_O \\ &+ \mathbf{K}_{D_O^T} (f_{N_d} + K_I \int (f_{N_d} - f_N) dt) \end{aligned} \quad (12)$$

## 4 シミュレーション

### 4.1 シミュレーション用の立式

式 (2) を式 (13) に変形し、微分すると式 (14) が得られる。

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (14)$$

最終的に、式 (8) と式 (14) を一つの式にまとめ、積分誤差の補正項  $\gamma$  を加えると、以下の式 (15) が得られる。対象物の把持のシミュレーションは、この式 (15) を用いて行う。

$$\begin{bmatrix} M & \mathbf{A}^T \\ \mathbf{A} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{f}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{h} + \boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T \mathbf{f}_C \\ -\dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{q}} + \gamma \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\gamma = -2\alpha\mathbf{A}\dot{\mathbf{q}} - \beta^2\mathbf{C} \quad (16)$$

### 4.2 シミュレーション結果

シミュレーションにおける、フィンガーの概略図を図 2 に示す。図 3, 図 4 は対象物の操りのシミュレーション結果である。目標値は物体の X 座標を 3[cm], Y 座標を 8[cm], 姿勢を 0[rad]。握力を 5[N] とした。制御ゲインの値を表 1 に示す。指先力  $\mathbf{f}_C$  は常に握力が座標系  $\Sigma_O$  の原点に向かうようにプロットされている。

対象物の位置及び姿勢について、オーバーシュートさせずに目標値に追従させることができている。さらにその上で、対象物に加える握力  $f_{C1_x}$  及び  $f_{C2_x}$  について、対象物の操りが終了した直後に、握力を目標値に追従させることができている。

表 1 制御ゲイン

詳細	制御 2
位置制御の P ゲイン $K_p$	[14.5, 23.0, 100.0](対角行列)
速度制御の D ゲイン $K_d$	79.0
握力制御の I ゲイン $K_I$	0.4

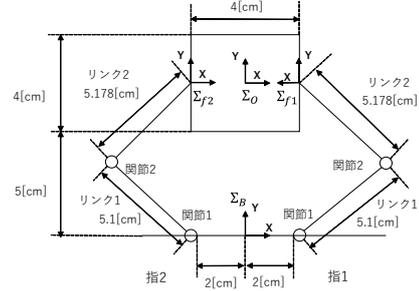


図 2 シミュレーションにおけるフィンガーの概略図

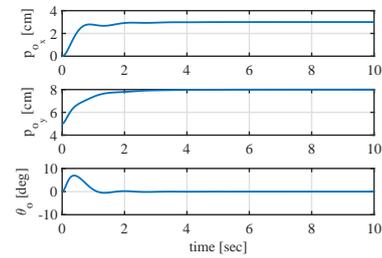


図 3 対象物位置

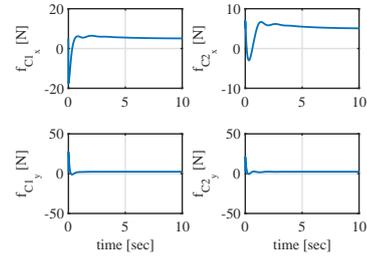


図 4 指先力

## 5 おわりに

本研究では、2次元空間内のシミュレーションにおいて、力センサーを搭載した多指ハンドロボットを想定し、2本の指による把持・操りを行ったうえで、任意の握力を保ち続けることに成功した。今後の課題は、実験機のシステム同定を行ってシミュレーションの精度を上げること。空間を3次元に拡張することなどが挙げられる。

### 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] 吉川 恒夫:「把持と操りの基礎理論 3. 制御」. 日本ロボット学会誌, Vol.14(1996), No.4, pp. 505-511.