

3次元空間における3関節の多指ハンドロボットによる物体の把持と操りの制御

M2019SC009 大鷲 柁貴

指導教員：中島明

1 はじめに

ハンドロボットは人の手を模した手先効果器である。人間の手のように物を掴んで移動させる動きをロボットで実現できれば日常生活、工場や災害現場のような危険な場所で人間の作業を代替できるなど高い汎用性が期待されている。現在のコロナウィルスの影響で働き方が大きく見直される状況や少子高齢化が進み、労働人口が減少している日本においてハンドロボットのような人間の作業を代替するロボットは将来的に大きな役割を果たす必要不可欠な存在になると考えられる。しかし、構造が複雑で制御が困難な為、ハンドロボットの研究は未だ研究段階で実用化されていない。本研究では各指先に力センサを搭載した3本指のハンドロボットによる対象物の把持と操りを立体的に実現することを目的にその前段階としてシミュレーション上での研究を行う。中間発表までに指1本のシミュレータの構築と2次元平面上における把持と操りのシミュレータで使う物理パラメータを実験機のものを利用してシミュレーションを行った。そして本報告では中間発表で報告した内容から拡張を行い、3関節3本指のハンドロボットによる三次元上空間における把持と操りのシミュレーションの作成を行った。

2 モデリング

モデリングを以下に示す。台座座標系を Σ_H 、指 i の指先座標系を Σ_{Fi} ($i = 1, 2, 3$)、対象物の中心に物体座標系 Σ_o を設定する。また、本研究では基準となる座標系を台座座標系とする。

2.1 座標系の設定 [1][2]

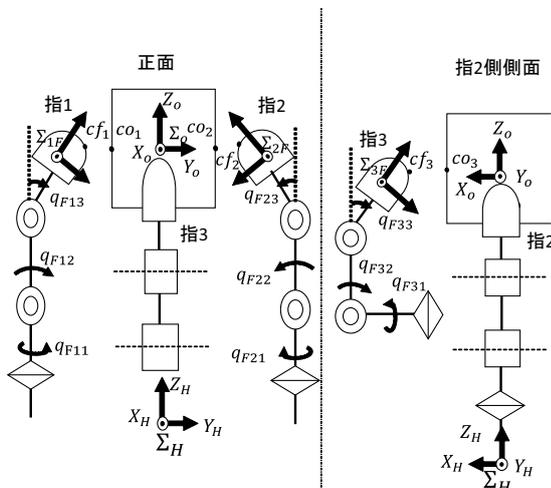


図1 座標系の設定

対象物側接触点を co_i 、指側接触点を cf_i ($i = 1, 2, 3$) とする。

指1のモータを根元から q_{F11} , q_{F12} , q_{F13} 、指2を q_{F21} , q_{F22} , q_{F23} 、指3を q_{F31} , q_{F32} , q_{F33} とするとそれぞれ

$$\mathbf{q}_{F1} = \begin{bmatrix} q_{F11} \\ q_{F12} \\ q_{F13} \end{bmatrix}, \mathbf{q}_{F2} = \begin{bmatrix} q_{F21} \\ q_{F22} \\ q_{F23} \end{bmatrix}, \mathbf{q}_{F3} = \begin{bmatrix} q_{F31} \\ q_{F32} \\ q_{F33} \end{bmatrix}$$

とする。そして、指3本を一つにまとめたものを

$$\mathbf{q}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{F1} \\ \mathbf{q}_{F2} \\ \mathbf{q}_{F3} \end{bmatrix}$$

とする。

また、基準座標系から見た対象物の座標系の位置を ${}^H\mathbf{p}_o$ 、対象物の姿勢を ${}^H\phi_o$ とし、まとめて

$$\mathbf{q}_o = \begin{bmatrix} {}^H\mathbf{p}_o \\ {}^H\phi_o \end{bmatrix}$$

と表す。

2.2 拘束条件 [2][5][7]

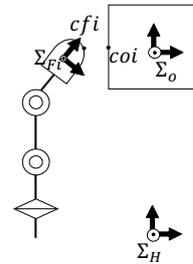


図2 指と対象物の関係

図2のように指 i について考える。指先側接触点と対象物側の接触点は一致しているため以下の式が成り立つ。

$${}^H\mathbf{p}_{Fi} + {}^H\mathbf{R}_{Fi}{}^{Fi}\mathbf{p}_{cfi} = {}^H\mathbf{p}_o + {}^H\mathbf{R}_o{}^o\mathbf{p}_{coi}$$

この式を微分して整理すると

$${}^H\dot{\mathbf{p}}_{Fi} - ({}^H\mathbf{R}_{Fi}{}^{Fi}\mathbf{p}_{cfi})^\wedge {}^H\boldsymbol{\omega}_{Fi} = {}^H\dot{\mathbf{p}}_o - ({}^H\mathbf{R}_o{}^o\mathbf{p}_{coi})^\wedge {}^H\boldsymbol{\omega}_o \quad (1)$$

となる。ここで \wedge は外積演算に相当する歪対称行列を表している。(1)式を左辺と右辺それぞれ行列化して整理し、

$$\mathbf{D}_{Fi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -({}^H\mathbf{R}_{Fi}{}^{Fi}\mathbf{p}_{cfi})^\wedge \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{Fi} = \begin{bmatrix} {}^H\dot{\mathbf{p}}_{Fi} \\ {}^H\boldsymbol{\omega}_{Fi} \end{bmatrix}$$

$$D_{oi} = \left[I_3 \quad -({}^H R_{o^o} p_{coi})^\wedge \right], V_o = \begin{bmatrix} {}^H \dot{p}_o \\ {}^H \omega_o \end{bmatrix}$$

とおくと,

$$D_{Fi} V_{Fi} = D_{oi} V_o \quad (2)$$

となる. これに指 i の並進ヤコビアン J_{vfi} と回転ヤコビアン $J_{\omega fi}$ を一つにまとめた指 i のヤコビアン

$$J_{fi} = \begin{bmatrix} J_{vfi} \\ J_{\omega fi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

と姿勢角

$$T_o = \begin{bmatrix} I_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & T_r \end{bmatrix} \left(T_r = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \\ 0 & -\cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta \\ 1 & 0 & -\sin\beta \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

を (2) 式に代入すると

$$D_{Fi} J_{fi} \dot{q}_{Fi} = D_{oi} T_o \dot{q}_o \quad (5)$$

と表される.

(5) 式は指 1 本分であるため指 3 本文をまとめた式を

$$D_F J_f = \begin{bmatrix} D_{F1} J_{f1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D_{F2} J_{f2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & D_{F3} J_{f3} \end{bmatrix}$$

$$D_o T_o = \begin{bmatrix} D_{o1} T_o \\ D_{o2} T_o \\ D_{o3} T_o \end{bmatrix}$$

とおくと指と対象物の拘束の式は

$$D_F J_f \dot{q}_F = D_o T_o \dot{q}_o \quad (6)$$

と表される.

そして,

$$D_F J_f = J_{CF}$$

$$D_o T_o = G^T$$

とおくと, (6) 式は

$$J_{CF} \dot{q}_F = G^T \dot{q}_o \quad (7)$$

と表すことができる.

2.3 運動方程式の導出 [5][6]

ラグランジュ法によりハンドロボットの運動方程式を導出すると

$$M_F \dot{q}_F + h_F + g_F = \tau - J_{CF}^T f_c \quad (8)$$

となる.

M_F は指の慣性行列, h_F は指の遠心力・コリオリ力項,

g_F は指の重力項で, 指 i の慣性行列を M_{Fi} , 遠心力・コリオリ力項を h_{Fi} 重力項を g_{Fi} ($i = 1, 2, 3$) とすると

$$M_F = \begin{bmatrix} M_{F1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_{F2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & M_{F3} \end{bmatrix}, h_F = \begin{bmatrix} h_{F1} + D_{F1} \\ h_{F2} + D_{F2} \\ h_{F3} + D_{F3} \end{bmatrix}$$

$$, g_F = \begin{bmatrix} g_{F1} \\ g_{F2} \\ g_{F3} \end{bmatrix}$$

と表される.

ここで, 遠心力・コリオリ力項 h_F は関節の粘性摩擦を考慮しており各指の関節の粘性摩擦を D_{F1i} , D_{2i} , D_{F3i} ($i = 1, 2, 3$) とすると

$$D_{F1} = \begin{bmatrix} D_1 \dot{q}_1 \\ D_2 \dot{q}_2 \\ D_3 \dot{q}_3 \end{bmatrix}, D_{F2} = \begin{bmatrix} D_4 \dot{q}_4 \\ D_5 \dot{q}_5 \\ D_6 \dot{q}_6 \end{bmatrix}, D_{F3} = \begin{bmatrix} D_7 \dot{q}_7 \\ D_8 \dot{q}_8 \\ D_9 \dot{q}_9 \end{bmatrix}$$

と表される.

対象物の運動方程式は

$$M_o \dot{V}_o + C_o V_o + N_o = D_o^T f_c \quad (9)$$

となる.

(10) 式に, (4) 式を導入して

$$M_o' = T_o^T M_o T_o$$

$$C_o' = T_o^T (M_o \dot{T}_o + C_o T_o)$$

$$N_o' = T_o^T N_o$$

と変換すると対象物の運動方程式は

$$M_o' \ddot{q}_o + C_o' \dot{q}_o + N_o' = G f_c \quad (10)$$

と表される.

2.4 指先力の導出 [3]

対象物に作用する力を F_o とおくと, 指先力との関係は

$$F_o = G f_c \quad (11)$$

となる. これを f_c について解くと

$$f_c = G^\dagger F_o + E \tilde{f}_n \quad (12)$$

と表される.

(12) 式の右辺第一項は操り力, 第二項は把持力にのみ影響を及ぼす.

右辺第一項の F_o は対象物に作用する力を表している.

また, G は基準座標から接触点 co_i への位置ベクトル ${}^H p_{coi}$ の歪対称行列 ${}^H p_{coi}^\wedge$ ($i = 1, 2, 3$) を用いて

$$G = \begin{bmatrix} I_3 & I_3 & I_3 \\ {}^H p_{co1}^\wedge & {}^H p_{co2}^\wedge & {}^{H0} p_{co3}^\wedge \end{bmatrix}$$

と表され、 \mathbf{G}^\dagger は疑似逆行列を表す。
 右辺第二項の $\tilde{\mathbf{f}}_n$ は内力を表しており、 \mathbf{E} と $\tilde{\mathbf{f}}_n$ は

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{e}_{13} & \mathbf{e}_{12} \\ \mathbf{e}_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{e}_{21} \\ \mathbf{e}_{32} & \mathbf{e}_{31} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_n = \begin{bmatrix} \tilde{f}_{23} \\ \tilde{f}_{31} \\ \tilde{f}_{12} \end{bmatrix}$$

で表され、 \mathbf{E} の式中の \mathbf{e}_{ij} は接触点 coi から coj へ向かう単位ベクトルを表す。

$\tilde{\mathbf{f}}_n$ の値を指定することで把持力が決定する。図3は3本指ハンドの内力を表した図である。

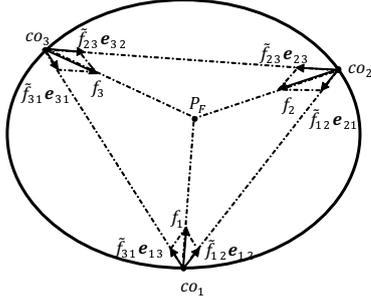


図3 内力の幾何学的関係

3 制御則 [4]

入力トルクの式は

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{CF}^T \mathbf{f}_c \quad (13)$$

と表される。

(12) 式を (13) 式に代入した式を行列化すると

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{CF}^T \begin{bmatrix} \mathbf{G}^\dagger & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_o \\ \tilde{\mathbf{f}}_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

と表される。

対象物に作用する力 \mathbf{F}_o に対象物の位置の P 制御を追加して

対象物の位置の現在値を \mathbf{q}_o 、目標値を \mathbf{q}_{od} とおくと

$$\mathbf{F}_o - \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_o - \mathbf{q}_{od})$$

と変更する。

内力 $\tilde{\mathbf{f}}_n$ に内力の I 制御を追加し、

内力の現在値を $\tilde{\mathbf{f}}_n$ 、内力の目標値を $\tilde{\mathbf{f}}_{nd}$ とおくと

$$\tilde{\mathbf{f}}_n - \mathbf{K}_I \int (\tilde{\mathbf{f}}_n - \tilde{\mathbf{f}}_{nd}) dt$$

と表される。

また、関節角に関する減衰を付加するために D 制御 $\mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}}_F$ を追加した。

これらの式を (15) 式に加えると

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{CF}^T \begin{bmatrix} \mathbf{G}^\dagger & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_o' - \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_o - \mathbf{q}_{od}) \\ \tilde{\mathbf{f}}_n - \mathbf{K}_I \int (\tilde{\mathbf{f}}_n - \tilde{\mathbf{f}}_{nd}) dt \end{bmatrix} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}}_F \quad (15)$$

となり、本研究ではこの式を用いる。

4 シミュレーション

以下の拘束条件付きのシミュレーションを解く。

$$\begin{cases} \mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{h}_F + \mathbf{g}_F = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}_{CF}^T \mathbf{f}_c \\ \mathbf{M}_o' \ddot{\mathbf{q}}_o + \mathbf{C}_o' \dot{\mathbf{q}}_o + \mathbf{N}_o' = \mathbf{G} \mathbf{f}_c \\ \mathbf{J}_{CF} \dot{\mathbf{q}}_F = \mathbf{G}^T \dot{\mathbf{q}}_o \end{cases} \quad (16)$$

まず、(7) 式を行列化して

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{CF} & -\mathbf{G}^T \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_F \\ \dot{\mathbf{q}}_o \end{bmatrix}$$

とおくと (7) 式は

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (17)$$

と書き表すことができる。そして、シミュレーションを解くために (17) 式をさらに微分した

$$\dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (18)$$

を用いる。

また、(16) 式の指と対象物の運動方程式をまとめて

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_F & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_o' \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_9 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_F + \mathbf{g}_F \\ \mathbf{C}_o' \dot{\mathbf{q}}_o + \mathbf{N}_o' \end{bmatrix}$$

とおくと (16) 式は

$$\begin{cases} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T \mathbf{f}_c \\ \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (19)$$

と表される。そして、これらをまとめて

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{A}^T \\ \mathbf{A} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\mathbf{h} + \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} \\ -\dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$$

とおくと (19) 式は

$$\mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{S} \quad (20)$$

と表され (20) 式を \mathbf{x} について解いて $\ddot{\mathbf{q}}_F$ と $\ddot{\mathbf{q}}_o$ を一つにまとめた $\ddot{\mathbf{q}}$ と指先力 \mathbf{f}_c を導出する。

4.1 補正項の追加 [2]

積分誤差の補正項の追加を行う。基準座標から指先へのベクトル ${}^H \mathbf{p}_{Fi}$ と基準座標から対象物側接触点へのベクトル ${}^H \mathbf{p}_{coi}$ の差を \mathbf{C} とおくと

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} {}^H \mathbf{p}_{F1} - {}^H \mathbf{p}_{co1} \\ {}^H \mathbf{p}_{F2} - {}^H \mathbf{p}_{co2} \\ {}^H \mathbf{p}_{F3} - {}^H \mathbf{p}_{co3} \end{bmatrix}$$

と表され、拘束条件式より

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{C}} &= \mathbf{A} \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{C}} &= \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} \end{aligned}$$

である。

時間経過によって 0 に収束するように微分方程式

$$\ddot{\mathbf{C}} + 2\alpha \dot{\mathbf{C}} + \beta^2 \mathbf{C} = \mathbf{0}$$

が臨界減衰収束する $\alpha = \beta$ を選び、 $\gamma = 2\alpha \dot{\mathbf{C}} + \beta^2 \mathbf{C}$ として (18) 式に γ を追加した

$$\dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} + \gamma = \mathbf{0} \quad (21)$$

を用いる。

4.2 シミュレーションの初期条件

把持対象物は一片の長さが0.045[m]の質量0.2[kg]の立方体とし、把持対象物を基準座標系 x 方向5[cm] z 方向に11[cm]の位置を初期位置と設定し、初期姿勢として y 軸回りに $\frac{\pi}{4}$ 回転した姿勢を初期姿勢とした。また、対象物の奥行き、幅、高さをそれぞれ L_{ox} [m], L_{oy} [m], L_{oz} [m] 物体座標系から見た対象物の接触点とすると $L_{ox} = L_{oy} = L_{oz} = 0.045$ となり、物体座標系からみた対象物側の各接触点は

$${}^o\mathbf{p}_{co1} = \begin{bmatrix} -\frac{L_{ox}}{2} + 0.01 \\ -\frac{L_{oy}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}, {}^o\mathbf{p}_{co2} = \begin{bmatrix} -\frac{L_{ox}}{2} + 0.01 \\ \frac{L_{oy}}{2} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$${}^o\mathbf{p}_{co3} = \begin{bmatrix} \frac{L_{ox}}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

と設定した。また、指の初期姿勢は指の接触点から逆運動学を使って各関節角度の導出を行い、その値を初期姿勢とした。

4.3 シミュレーション結果

把持の操りとして対象物の初期位置から基準座標系からみて x, z 方向にそれぞれ1[cm]移動させること、また姿勢についても x, y, z 軸それぞれを初期姿勢から正方向へ10[deg]回転させることを目標として制御を行った。また、対象物に加える把持力の目標値はそれぞれ5[N]と設定した。ゲインは $\mathbf{K}_P = ([3000, 3000, 3000, 5, 5, 5])$, $\mathbf{K}_I = ([10, 10, 10])$, $K_D = 1$ とした。

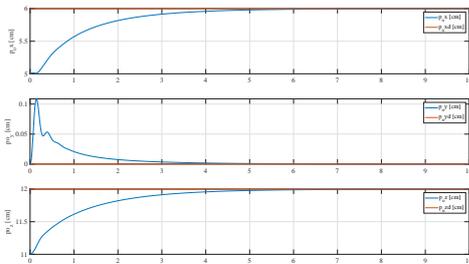


図4 対象物の位置

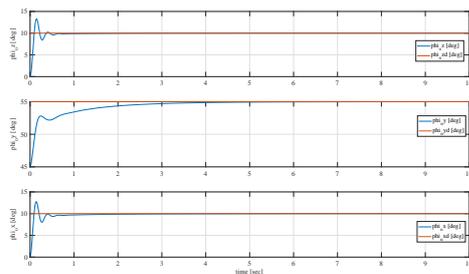


図5 対象物の姿勢

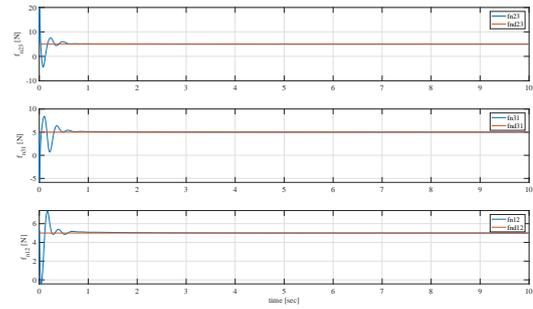


図6 把持力

図4は基準座標系から見た対象物の中心の x, y, z 方向の位置、図5は基準座標系から見た対象物の z, y, x 回りの姿勢のグラフである。また、図6は対象物を把持した時の各指の把持力を表す。図4より対象物の位置は目標値に6秒で追従している。姿勢についても初期姿勢から z, y, x 軸方向にそれぞれ10[deg]回転していることが図5から分かる。また6から各指の把持力5[N]で対象物を把持していることが分かる。

5 おわりに

本研究では3次元空間上における3関節3本指ロボットによる対象物の把持と操りのシミュレータを作成した。今後の展望としては本研究はシミュレーションのみで実験機を用いた研究を行っていないため実機を用いた把持と操りを行い、シミュレーションとの比較検証を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] 三浦 泰仁・大畠 柁貴・榎原 健祐:『力センサを用いた把持と操りの制御』. 南山大学, 卒業論文, 2019.
- [2] 山本 雅和:『二次元空間内における把持操りの制御』. 南山大学, 卒業論文, 2018.
- [3] 吉川 恒夫:『把持操りの基礎理論 2. 指先力』. 日本ロボット学会誌 Vol14, No.1, pp48-54, 1996.
- [4] 吉川 恒夫:『把持操りの基礎理論 3. 制御』. 日本ロボット学会誌 Vol14, No.4, pp505-511, 1996.
- [5] John 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.
- [6] 永井清・土橋宏規:『ロボット機構学』. コロナ社, 東京, 2015.
- [7] 中島 明:『メカトロニクス研究ノート』. 南山大学, 2017, pp. 25.