

カセンサを用いた3本指での把持・操りの制御

2017SC014 伊藤孝浩 2018SC017 本田大洲 2018SC050 松尾友佳

指導教員：中島明

1 背景と目的

多指ハンドロボットとは複数の指を持ち、人間と同じ自由度を持つ効果器のことである。ロボットは日常生活だけでなく、災害現場や工場など危険な現場を含め様々な場面で活躍している。人間に代わって作業ができるロボットは、少子高齢化が進行している日本の産業においては将来的に必要な存在になると予測される。さらに新型コロナウイルスの影響で働き方が変化し、労働人口が減少している中で人間の代替作業が可能ロボットの存在は大きな役割をはたすだろう。

しかし、多指ハンドロボットは構造が複雑であり制御が困難であるため、未だ研究段階で汎用性の期待できる設計のなされたものは実用化がされていない。

本研究では、3本指の制御による物体の把持・操りの制御を行う。最適な力で把持ができるよう、カセンサを加えた把持制御を行う。

2 実験機器の説明

2.1 多指ハンドロボット

多指ハンドロボットは自由度3で、1本の指は3つのモータで構成されている。各モータには相対値エンコーダが内蔵され、パルスカウントを読み取ることによって現在角度を取得する。3本の指で1つのハンドとなっている。

2.2 カセンサ

カセンサは力によって生じる測定物の変形を利用し、 x, y, z 方向の力とモーメントをそれぞれ検出している。力やトルクの大きさをリアルタイムに測定できる。測定物に力が加わった際、その物体の電気抵抗値が一定の値で変化する原理を用いて力の大きさを検出している。

2.3 制御装置

制御機器とソフトウェアは LabVIEW を用いている。

2.4 各機器の制御の流れ

使用機器の制御の流れを図1に示す。制御機器で入力関節の目標角のPID制御を行う。またトルクを計算し多指ハンドロボットに送信している。カセンサでひずみゲージ・データを読み取ることができ、制御機器で作動信号を処理することで x, y, z 方向の力と各軸周りのモーメントを計算している。



図1 システムの構成

3 指の運動のモデリング

3.1 関節構造と座標系の設定

多指ハンドの構造は、台座の原点座標を Σ_H とし、指の根元座標を Σ_B とする。指 i の指先座標を Σ_{F_i} とする。

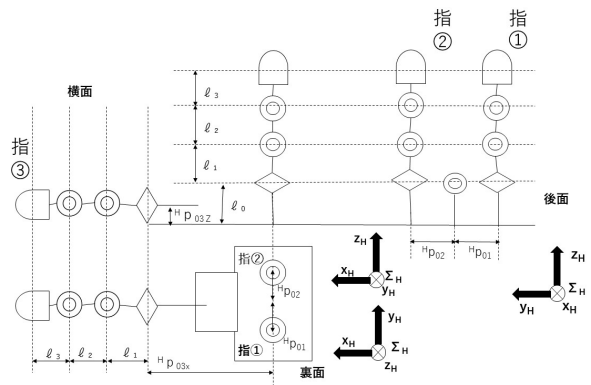


図2 多指ハンドの指の配置と基準座標

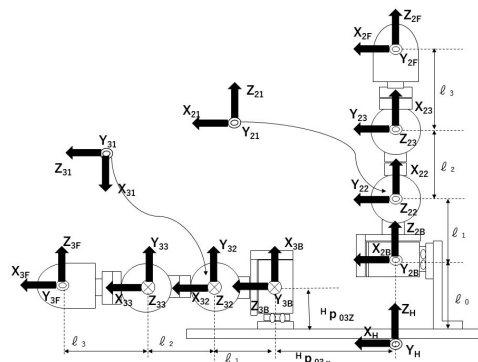


図3 指ロボットの関節構造と座標系の設定

表1 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
${}^H p_{02}$	40.0
${}^H p_{03x}$	25.0
${}^H p_{03z}$	20.0

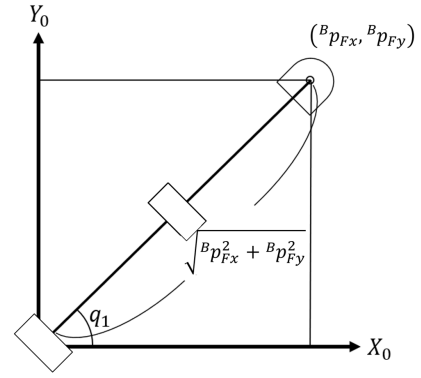


図4 x, y 平面でのハンドロボット配置

3.2 順運動学

図3の座標系においてハンドの手先位置 ${}^H p_{iF}$ を求める。

各座標系間の同時変換行列を求めたのち、順運動学を利用して解くという手順を取る。

ここで各座標系間の距離は図2, 3の通り、 $l_0, l_1, l_2, l_3, {}^H p_{01}, {}^H p_{02}, {}^H p_{03x}, {}^H p_{03z}$ とおく。また、ハンドロボットの第 i 軸の関節角を q_i として $C_i = \cos(q_i), S_i = \sin(q_i)$ と表す、 $\Sigma_H \sim \Sigma_F$ 間におけるそれぞれの同時変換行列を以下に示す。

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

${}^H R_F$ は姿勢変換行列、 ${}^H p_F$ は手先位置である。

台座原点座標から手先座標の同時変換行列 ${}^H T_F$ は ${}^H T_F = {}^H T_B {}^B T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_F$ で計算される。各リンクの同時変換行列を以下に示す。

$${}^H T_B = \begin{bmatrix} {}^H R_B & {}^H p_B \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

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

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

3.3 逆運動学

台座の原点座標からの指先の位置 ${}^H p_F$ が与えられときに、逆運動学を解くことで各関節の角度の導出を行う。

Σ_B を基準として考えるために Σ_H の原点から指の根本までの位置 ${}^H p_B$ を指先位置 ${}^H p_F$ からひくことによって、 Σ_B を基準とした指先位置 ${}^B p_F$ を得る。

$${}^B p_F = {}^H p_F - {}^H p_B$$

このときの x, y, z の各成分を ${}^B p_{Fx}, {}^B p_{Fy}, {}^B p_{Fz}$ とする。まず第1軸の角度 q_1 を求める、 Σ_B の x, y 平面を考える、その時のハンドロボットの配置は図4に示すようになる。

図4にあるようにハンドロボットの x, y 平面への投影を考える。

atan2 は1番目の引数を Y 座標、2番目の引数を X 座標とすることで q_1 を正しい象限で求めることができる関数である。

これを用いて q_1 は式(1)と求められる。

$$q_1 = \text{atan2}({}^B p_{Fy}, {}^B p_{Fx}) \quad (1)$$

次に第2軸、第3軸の角度 q_2, q_3 を求める。

Σ_B の z 軸を鉛直上向きにとり、ハンドロボットを真横から見た時の配置を図5に示す。

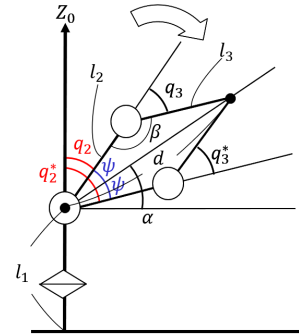


図5 真横から見たハンドロボット配置

第2軸、第3軸の角度は図5に示したように q_2, q_3 と q_2^*, q_3^* の2通りの解が存在することに気を付ける。

第2軸について考える。

図5より、

$$q_2 = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \psi) \quad (2)$$

$$q_2^* = \frac{\pi}{2} - (\alpha - \psi) \quad (3)$$

であることがわかる。

ここで α は、式(4)である。

$$\alpha = \text{atan2}({}^B p_{Fz} - l_1, \sqrt{{}^B p_{Fx}^2 + {}^B p_{Fy}^2}) \quad (4)$$

また ψ は、余弦定理を考慮することで、式 (6) であることがわかる。

$$\cos \psi = \frac{l_2^2 + d^2 - l_3^2}{2l_2d} \quad (5)$$

$$\psi = \arccos \frac{l_2^2 + d^2 - l_3^2}{2l_2d} \quad (6)$$

d は第 2 関節付け根から指先位置までの距離であり、以下の式 (7) である。

$$d = \sqrt{{}^B p_{F_x}^2 + {}^B p_{F_y}^2 + ({}^B p_{F_z} - l_1)^2} \quad (7)$$

最後に第 3 軸について考える。

図 5 より、

$$q_3 = \pi - \beta \quad (8)$$

$$q_3^* = -q_3 \quad (9)$$

であることがわかる。

ここで β は、余弦定理を考慮することで、式 (11) であることがわかる。

$$\cos \beta = \frac{l_2^2 + l_3^2 - d^2}{2l_2l_3} \quad (10)$$

$$\beta = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - d^2}{2l_2l_3} \quad (11)$$

4 関節角の PID 制御

入力为目标角度，出力を制御トルクとしてフィードバック制御をしている。ブロック線図を図に示す。目標角度への軌道を滑らかにするために 1 次遅れ系の伝達関数の二乗 $G(s)$ を通して目標軌道を生成している。

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

目標角度 θ_d と現在角度 θ の偏差に比例ゲイン K_p ，積分ゲイン K_i を掛け、ノイズ対策用に微分機にローパスフィルターを掛けたものを疑似微分器 $H(s)$ としてゲイン K_d を掛け PID 制御を行っている。疑似微分器のカットオフ周波数は $\omega = 30[\text{rad/s}]$ に設定している。

$$H(s) = s \times \left(\frac{\omega}{s + \omega} \right)$$

5 把持と操りの制御則

5.1 座標系と変数の設定

指 1 のモータを根本から $q_{F11}, q_{F12}, q_{F13}$ とする。指 2 のモータを根本から $q_{F21}, q_{F22}, q_{F23}$ とする。指 3 のモータを根本から $q_{F31}, q_{F32}, q_{F33}$ とする。各指ごとにまとめるとそれぞれ

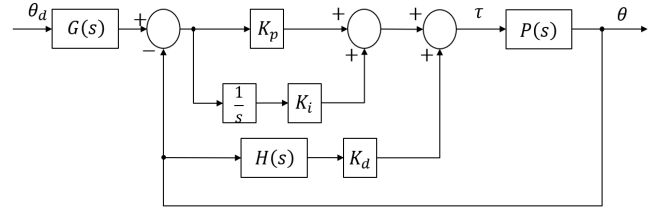


図 6 PID 制御ブロック線図

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

となる。指 3 本分を 1 つにまとめたものを \mathbf{q}_F とする。

物体座標系を Σ_o ，対象物の接触点を co_i ($i = 1, 2, 3$)，指側の接点を cf_i ($i = 1, 2, 3$) とする。

物体座標系と物体の位置・姿勢は各指の指先位置から推定している。まず物体中心は各指先により作られる三角形の重心とし、その点から三角形に対する法線ベクトルを z 軸とし、指 3 の指先方向を x 軸と定める。 x 軸と z 軸より外積を用いて y 軸を決定している。

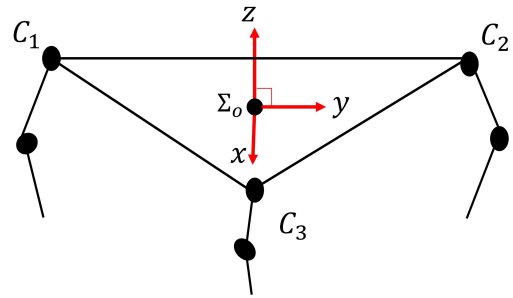


図 7 物体座標系の設定

対象物を把持したときの座標系と接触点の位置関係を図 8 に示す。

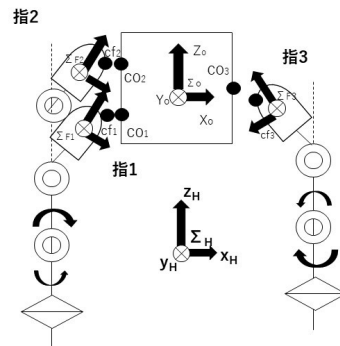


図 8 対象物を把持した時の座標系

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

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

とする.

5.2 指と対象物の拘束条件

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.

$${}^H\mathbf{p}_{Fi} + {}^H\mathbf{R}_{Fi} {}^{Fi}\mathbf{p}_{cFi} = {}^H\mathbf{p}_o + {}^H\mathbf{R}_o {}^o\mathbf{p}_{cOi}$$

この式を微分すると

$${}^H\dot{\mathbf{p}}_{Fi} + {}^H\boldsymbol{\omega}_{Fi} \times ({}^H\mathbf{R}_{Fi} {}^{Fi}\mathbf{p}_{cFi}) = {}^H\dot{\mathbf{p}}_o + {}^H\boldsymbol{\omega}_o \times ({}^H\mathbf{R}_o {}^o\mathbf{p}_{cOi})$$

$${}^H\dot{\mathbf{p}}_{Fi} - ({}^H\mathbf{R}_{Fi} {}^{Fi}\mathbf{p}_{cFi})^\wedge {}^H\boldsymbol{\omega}_{Fi} = {}^H\dot{\mathbf{p}}_o - ({}^H\mathbf{R}_o {}^o\mathbf{p}_{cOi})^\wedge {}^H\boldsymbol{\omega}_o \quad (12)$$

となる. (12) 式を

$$\mathbf{D}_{Fi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -({}^H\mathbf{R}_{Fi} {}^{Fi}\mathbf{p}_{cFi})^\wedge \\ \mathbf{0} & {}^H\mathbf{V}_{Fi} \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{Fi} = \begin{bmatrix} {}^H\dot{\mathbf{p}}_{Fi} \\ {}^H\boldsymbol{\omega}_{Fi} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{oi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -({}^H\mathbf{R}_o {}^o\mathbf{p}_{cOi})^\wedge \\ \mathbf{0} & {}^H\mathbf{V}_o \end{bmatrix}, \mathbf{V}_o = \begin{bmatrix} {}^H\dot{\mathbf{p}}_o \\ {}^H\boldsymbol{\omega}_o \end{bmatrix}$$

とおくと,

$$\mathbf{D}_{Fi} \mathbf{V}_{Fi} = \mathbf{D}_{oi} \mathbf{V}_o \quad (13)$$

となる.

指 i のヤコビアン

$$\mathbf{J}_{Fi} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{vFi} \\ \mathbf{J}_{\omega Fi} \end{bmatrix}$$

と姿勢角

$$\mathbf{T}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_r \end{bmatrix}, \mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \\ 0 & -\cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ 1 & 0 & -\sin \beta \end{bmatrix}$$

を (13) 式に代入すると,

$$\mathbf{D}_{Fi} \mathbf{J}_{Fi} \dot{\mathbf{q}}_{Fi} = \mathbf{D}_{oi} \mathbf{T}_o \dot{\mathbf{q}}_o \quad (14)$$

と表される. (14) 式を指三本分まとめると

$$\mathbf{D}_F \mathbf{J}_F \dot{\mathbf{q}}_F = \mathbf{D}_o \mathbf{T}_o \dot{\mathbf{q}}_o \quad (15)$$

と速度の関係式で表すことができる. また, 力関係式として,

$$\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{D}_F \mathbf{J}_F)^T \mathbf{f}_c \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_o = (\mathbf{D}_o \mathbf{T}_o)^T \mathbf{f}_c \quad (17)$$

と表せる.

5.3 指先力

(17) 式を $(\mathbf{D}_o \mathbf{T}_o)^T$ の疑似逆行列を用いて \mathbf{f}_c について解くことで指先力を求められるが, 解に冗長性があるため, 内力 $\tilde{\mathbf{f}}_n$ を加えることで解を一意に決定する. その関係式を (18) 式に示す.

$$\mathbf{F}_c = ((\mathbf{D}_o \mathbf{T}_o)^T)^\dagger \mathbf{F}_o + \mathbf{E} \tilde{\mathbf{f}}_n \quad (18)$$

ここで, (18) 式の \mathbf{E} は接触点 C_i から C_j へ方向ベクトル \mathbf{e}_{ij} をまとめたものであり,

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

と表すことができる. このときの幾何学的関係図を図 9 に示す.

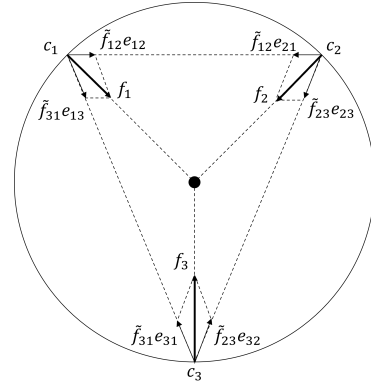


図 9 内力の幾何学的関係図

今回扱う把持物体に対する指 1・指 2 の接触点は同一の平面であり, さらに指 3 の接触面と平行であるため, 指 1・指 2 の間の内力は指を滑らせる原因となり得る. そのため \mathbf{E} を指 i における方向ベクトル \mathbf{e}_i をまとめた

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}$$

とし内力を接触面に対し垂直にすることで, 1 自由度に限定する. 1 自由度にした場合の幾何学的関係図を図 10 に示す.

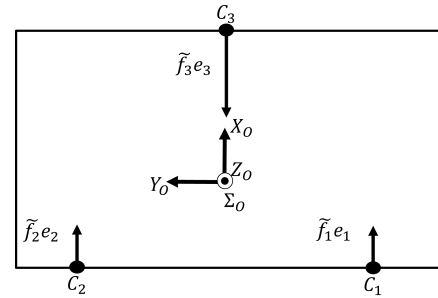


図 10 1 自由度での内力の幾何学的関係図

5.4 物体の位置のPID制御

物体を把持した状態で、物体の位置制御を行うために物体にはたらく力の項に物体の位置のPI制御を組み込み、安定性を高めるために、関節角の微分制御を組み込む。物体の目標位置を q_{od} 、現在位置を q_o とすると制御則は (19) 式、(20) 式になる。 K_p, K_i, K_d は各ゲインである。

$${}^H F_c^{fb} = [((D_o T_o)^T)^{\dagger} \quad E] \begin{bmatrix} F_o - K_p(q_o - q_{od}) - K_i \int (q_o - q_{od}) dt \\ \dot{f}_{nd} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\tau = (D_F J_F)^T {}^H F_c^{fb} - K_d \dot{q}_F \quad (20)$$

5.5 関節角度制御

物体の位置制御を各関節の角度制御に変換し、関節角のPID制御を行う。接触点の速度の関係式は対象物の位置及び姿勢の変数と指の関節角を用いて

$$D_F J_F \dot{q}_F = D_o T_o \dot{q}_o \quad (21)$$

これを \dot{q}_F について解くと

$$\dot{q}_F = (D_F J_F)^{-1} D_o \dot{q}_o \quad (22)$$

となる。

(22) 式を微小変位としてとらえ、

$$\Delta q_F = (D_F J_F)^{-1} D_o \Delta q_o \quad (23)$$

とする。

物体の変化量の目標値を Δq_{od} とすると、 $\Delta q_{od}(t)$ は、離散値で考えるので $\Delta q_{od}[k]$ となる。このとき k はサンプリングごとの値である。これより、

$$\Delta q_{od}[k] = q_{od}[k] - q_{od}[k-1] \quad (24)$$

が求められる。(24) 式を (23) 式に代入し、ステップごとの関節角の変化量 q_{Fd} が

$$\Delta q_{Fd}[k] = q_{Fd}[k-1] + \Delta q_{Fd}[k] \quad (25)$$

と得られる。そして (25) 式より、

$$q_{Fd}[k] = q_{Fd}[k-1] + \Delta q_{Fd}[k]$$

となる。ただし、 $q_{Fd}[0]$ は初期把持姿勢の関節角度である。

6 物体の把持

6.1 指先力指定の把持

ハンドロボットの初期姿勢は特異点をずらす目的と、安全性の観点から2軸、5軸、8軸を19[deg]、3軸と6軸を39[deg]、9軸を49[deg]とする。また、台座そのものを45[deg]に固定している。把持対象物は質量23[g]、縦

9.8[cm] 横20.8[cm] 厚さ6.0[cm]の発泡スチロール製の直方体を把持対象物に用いた。そのとき、物体に対し F_1 と F_2 には物体座標からみて x 軸方向にそれぞれ $+2[N]$ 、 F_3 には物体座標からみて x 軸方向に $-4[N]$ の力を加えるように指先力を指定した。

力センサで読み取った指1の指先力のグラフを図11に示す。指2・3は指1と類似していたので省略する。

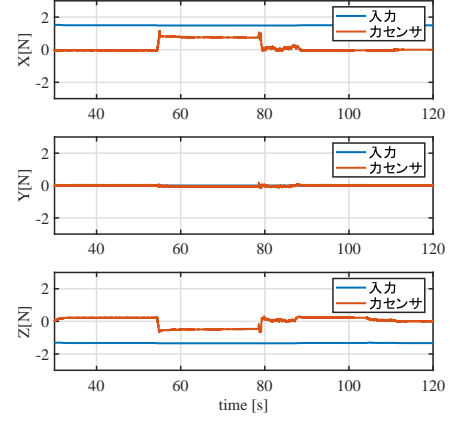


図11 ハンド座標からみた指1の指先力

図11において指先力の入力値と力センサで読み取った数値はハンド座標からみて

$${}^H F_{c1} = \begin{bmatrix} 1.48 \\ 0 \\ -1.34 \end{bmatrix}, {}^H F_{c1}^s = \begin{bmatrix} 0.75 \\ -0.06 \\ -0.47 \end{bmatrix}$$

となっている。安定した把持を継続して行うことには成功した。指定した値と比較すると偏差はあるがフィードフォワード制御であるので十分な把持制御実験の結果であると考えられる。目標値との偏差の発生要因としてまず、各関節モーターの摩擦力が挙げられる。この実験では指定した指先力から計算される関節トルクを一定に出力しているため、摩擦などによる減衰の補正がなされていない。また、力センサの値はプログラム実行初期の状態を0とした相対値であるため力センサ自体にかかっている重力が考慮されていないことや指の質量によるものなどがあげられる。これらの要因により実際に把持した際の指先力が小さくなっていると考えられる。

6.2 力センサを用いた把持

指先力指定の把持制御の後、物体を把持した状態で、物体の上に重りを50[g]、100[g]、200[g]、300[g]と順に追加する。物体の質量の変化を力センサで読み取り、指先力を変化させ物体を静止させ続ける制御を行う。把持対象物は質量23[g]、縦9.8[cm] 横20.8[cm] 厚さ6.0[cm]の発泡スチロール製の直方体を用いた。実験の結果を図12・図13に示す。指2・3は指1と類似していたので省略する。

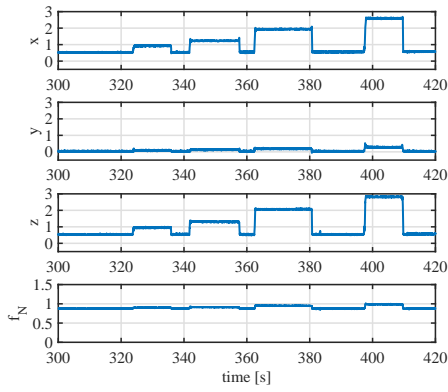


図 12 物体に働く力と内力

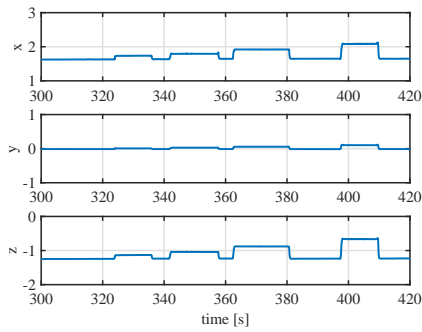


図 13 ハンド座標からみた指 1 の指先力

図 12 から物体に対し追加した重りによる重量の変化は読み取れていることが確認できた。また、図 13 から物体重量の変化に対し指先力を変化させ対応していることが確認できる。以上より力センサにより計測される力を使い物体を静止した状態で把持させることが出来た。

7 位置制御実験

指先力指定の把持制御の後、物体を把持した状態で、台座座標系の y 軸周りに $+0.1[\text{rad}]$ 回転させ、 $-0.1[\text{rad}]$ 回転させる。続けて $-0.1[\text{rad}]$ 回転させ、 $+0.1[\text{rad}]$ 回転させる。その後 x 軸方向に $+1[\text{cm}]$ 操作し $-1[\text{cm}]$ 操作するといった一連の操り制御実験を行う。把持対象物は質量 $23[\text{g}]$ 、縦 $9.8[\text{cm}]$ 横 $20.8[\text{cm}]$ 厚さ $6.0[\text{cm}]$ の発泡スチロール製の直方体を用いた。実験の結果を図 14・15 に示す。

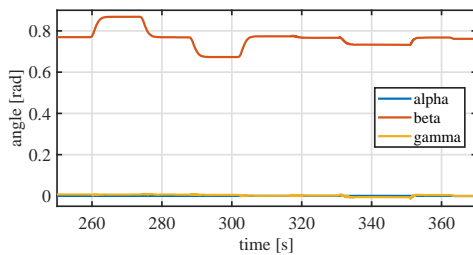


図 14 実験結果 物体の姿勢

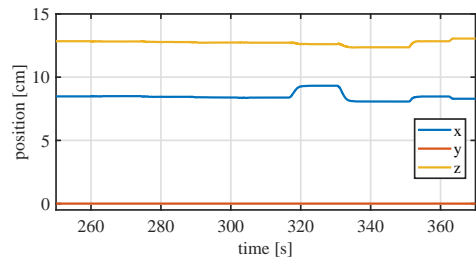


図 15 実験結果 物体の位置

図 14 から物体の姿勢は $0.769[\text{rad}]$ から $0.868[\text{rad}]$ へ、 $0.769[\text{rad}]$ へ戻り $0.673[\text{rad}]$ へと目標値通りに変化していることが確認できた。図 15 から物体の位置は $+1[\text{cm}]$ 操作するのに対して、 $8.4[\text{cm}]$ から $9.3[\text{cm}]$ へと $0.9[\text{cm}]$ 上がっており、目標値との偏差が $0.1[\text{cm}]$ 残った。 $-1[\text{cm}]$ 操作する際には $9.3[\text{cm}]$ から $8.1[\text{cm}]$ へと $1.2[\text{cm}]$ 下がっており、目標値との偏差が $0.2[\text{cm}]$ 残って静止している。また、操作を行っていない z 軸の負方向にも位置の変化が $0.5[\text{cm}]$ ほど見られるが、操り実験結果としては十分な結果が得られたと考える。この実験で偏差が発生する要因としては、指の質量によるものが挙げられる。この実験では物体の重力補償はなされているが指に対する重力補償はされていない。そのため x 軸・ z 軸の負方向に対し偏差が発生していると考えられる。

8 おわりに

本研究では 3 本指の多指ハンドロボットにて、内力表現を 1 自由度に限定し物体の把持・操りの制御を行った。今後の課題としては、操り制御の精度を上げることや、内力表現を 3 自由度に拡張し、より汎用性の高い物体の把持・操りの制御を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] 大寫 柁貴：『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』。南山大学，修士論文，2021。
- [2] 三浦 泰仁・大寫 柁貴・榊原 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。
- [3] 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。
- [4] 永井清・土橋宏規：『ロボット機構学』。コロナ社，東京，2015。
- [5] 吉川 恒夫：『ロボット制御基礎論』。コロナ社，東京，1988
- [6] 中島 明『メカトロニクス研究ノート』。南山大学，2017