

カセンサを用いた把持と操りの制御

2015SC060 三浦泰仁 2015SC077 大寫柁貴 2015SC078 榎原健祐

指導教員：中島明

1 はじめに

多指ハンドロボットとは多数の指を持ち人間の指を模した効果器のことである。

現在、ロボットは工場など人間が作業するには危険な現場などで人間の代替機能として活躍している。しかし、工業用として実用化されているロボットハンドはある特化したタスクに対して設計されており汎用性が少ない。一方で多指ハンドロボットは人間の手のように設計されており、その広い汎用性が期待されている。人間の手のように汎用性を持ち把持や操りの制御を行うことでロボットは工場ではマルチタスクで活躍できる他、日常生活においても活躍することが期待されている。しかし現状では、構造の複雑さから制御が困難であり、未だ汎用型のハンドは研究段階である。

本研究ではまず、2本指の制御による把持の制御を行う。また、最適な力で把持ができるようにカセンサを加えた把持制御を行っていく。

2 実験機器説明

今回の実験機器は主に3つに分けることができる。1つ目の機器は多指ハンドロボットで、1本の指は3つのモータで構成されており、自由度3の機構である。各モータには相対値エンコーダが内蔵されており、パルスカウントを読み取ることで現在角度を取得することができる。そして、指3本で1つのハンドを構成している。2つ目はカセンサである。各指の先端に付けることにより、指にかかっている力とモーメントを読み取ることができる。3つ目は制御部分である。今回制御機器とソフトウェアはLabVIEWを用いている。今回の使用機器の制御の流れを図1に示す。また、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} とし、 Σ_H からみた指 i の根元位置座標 Σ_B を ${}^H p_{B_i}$ とする。2本指の制御による把持の制御を行う為、今回は指2本のみに着目する。



図1 システムの構成

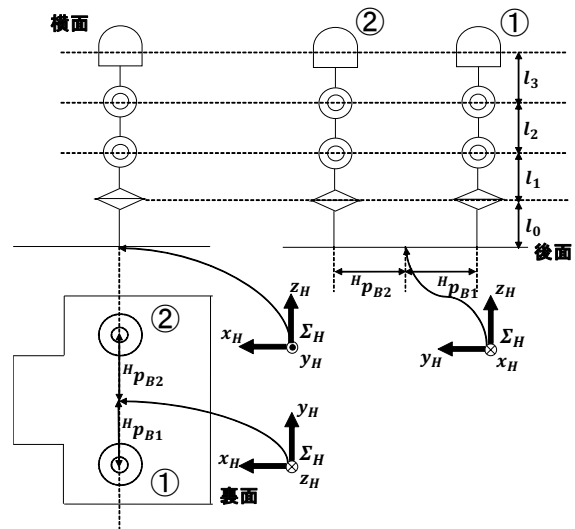


図2 多指ハンドの指の配置と基準座標

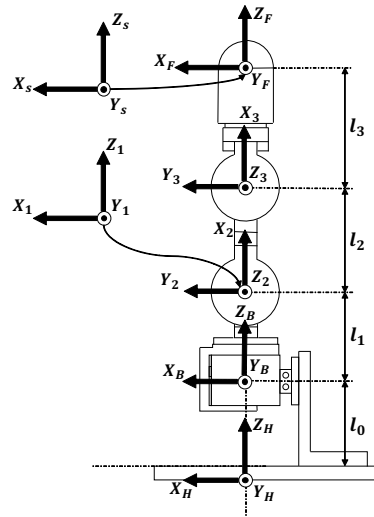


図3 指ロボットの関節構造と座標系の設定

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
${}^H p_{B1}$	40.0
${}^H p_{B2}$	40.0

3 カセンサを用いた把持と操りの制御則

3.1 座標系と変数 [1][3]

図4に、物体の把持と操りを行う2自由度の指の概略図を示す。図4中の白円は、指の駆動する関節を表している。以降は Σ_H の (y, z) 平面上での把持と操りについての制御則と実験を示す。

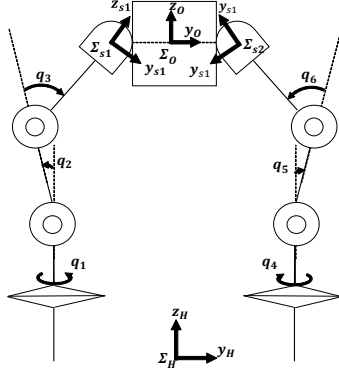


図4 モデリングのフィンガー概略図

(y, z) 平面上の原点に台座の原点座標 Σ_H を設定し、対象物の重心に座標系 Σ_O 、指 F_i の根元の第1関節に座標系 Σ_{B_i} を設定する。各関節の角度を表す関節変数を式(1)、対象物の位置および姿勢の変数を式(4)とする。ここで、 ${}^H p_O$ は対象物の位置を表すベクトルである。

$$q_F = \begin{bmatrix} q_{F1} \\ q_{F2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$q_{F1} = \begin{bmatrix} q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$q_{F2} = \begin{bmatrix} q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$q_O = \begin{bmatrix} {}^B p_O \\ \theta_O \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 指先力と物体に作用する力 [1][2][3]

図5に指先と対象物の概略図を示す。

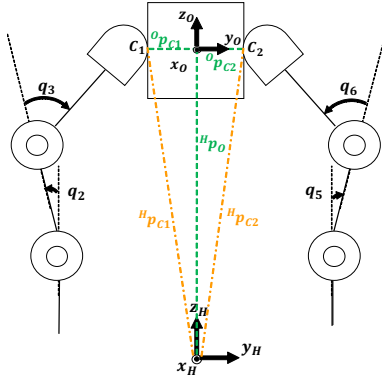


図5 指先位置と対象物の概略図

物体を把持するための条件は指先位置と把持対象物が点 $C_i (i = 1, 2)$ で接触することである。よって条件式は式(5)になる。左辺は、 Σ_O からみた接触点、右辺は、台座から物体、物体から接触点を表している。ここで2次元平面上なので回転行列 ${}^H R_O$ は式(6)となる。また、指先力と物体に作用する力の関係は、指先の速度、物体の速度と双対関係になるので式(5)を微分することにより速度の関係式(7)を得ることができる。ここで、 J_o は物体のヤコビ行列である。式(7)に仮想仕事の原理を用いることによって、指先力 $({}^H F_c)$ と物体に作用する力 $({}^H F_o)$ の関係は物体のヤコビ行列 J_o^T を用いた式(8)になる。

$${}^H P_{C_i} = {}^H P_o + {}^H R_o \circ P_{C_i} \quad (5)$$

$${}^H R_O(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^H \dot{P}_c = J_o \dot{q}_o \quad (7)$$

$${}^H F_o = J_o^T {}^H F_c \quad (8)$$

式(8)を変形して ${}^H F_c$ を求める。この時 ${}^H F_o$ は物体に対して (y, z) 方向に動く並進力とモーメントの3変数であり、指先力 ${}^H F_c$ は指1, 2それぞれの (y, z) 方向の力で表されるので4変数である。したがって、 ${}^H F_c$ は疑似逆行列を用いて求められ式(9)で表される。この時、決まりきらなかった冗長性は物体を把持する内力 f_N として出てくる。この式(9)は物体に (y, z) 方向に作用する力 ${}^H F_o$ と物体を把持するための内力 f_N から指先力 ${}^H F_c$ への変換を表している。また $K_{J_o^T}$ は図3.2に示すように接触点 C_i から C_j への方向ベクトルである。

$${}^H F_c = (J_o^T)^\dagger {}^H F_o + K_{J_o^T} f_N \quad (9)$$

$$K_{J_o^T} = \begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{21} \end{bmatrix} \quad (10)$$

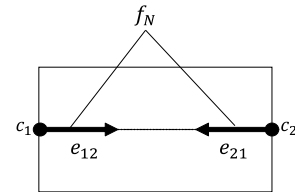


図6 物体にかかる内力

3.3 指先力と関節トルクの関係

指先力 ${}^H F_c$ と各関節トルクの関係は指のヤコビ行列 J_F を用いて式(11)で表される。指のヤコビ行列 J_F は指先の位置を関節角で微分することで得られる。

$$\tau = J_F^T {}^H F_c \quad (11)$$

3.4 カセンサを用いた物体の把持

今後、変数の右肩添え字に s がつく場合は力センサから読み取った値を用いており、右肩の添え字 fb は力センサで読みとった値を使った指先力の目標値である。

物体の質量が不明な物体を把持するためには、指先に掛かっている力 ${}^H F_c^s$ を力センサで読みとり物体の質量を検出し指先力を調整する必要がある。

式 (12) より力センサで読み取った指先力 ${}^H F_c^s$ から物体に対し作用している (y, z) 方向の力とモーメント ${}^H F_o^s$ 、内力である f_N を測定することができる。物体が静止している場合、 ${}^H F_o^s$ の z 成分が物体の質量に対応する。このとき測定した物体の質量を把持出来るように物体に作用する力と内力を調整する必要がある。

以上より物体の質量を指先のセンサで読み取り推定した値を用いて、制御入力として目標の指先力を式 (14) で示す。また、 f_{Nd} は物体の把持をするための内力の目標値である。

$${}^H F_c^s = (J_o^T)^\dagger {}^H F_o^s + K_{J_o^T} f_N^s \quad (12)$$

$$f_{Nd} = \frac{{}^H F_{cz}^s}{\mu} + f_{Noffset} \quad (13)$$

$${}^H F_c^{fb} = [(J_o^T)^\dagger \quad K_{J_o^T}] \begin{bmatrix} {}^H F_o^s \\ f_{Nd} \end{bmatrix} \quad (14)$$

また、内力の目標値 f_{Nd} は式 (15) のように設定し、指先力の z 方向の力によって変化するように設計した。

$$f_{Nd} = \frac{{}^H F_{cz}}{\mu} + f_{Noffset} \quad (15)$$

ここで、摩擦と内力の概念図を図 7 に示し、物体を把持したときに発生する摩擦の関係式を式 (16) に示す。

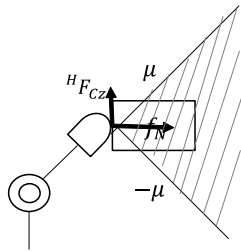


図 7 物体にかかる摩擦と内力の関係

$${}^H F_{cz} = \mu f_N \quad (16)$$

式 (16) より、摩擦は内力 f_N に比例し、摩擦係数は傾き μ の直線となる。物体を把持したときに物体が滑らないための条件は物体に加える合力が傾き μ と $-\mu$ に囲まれた上図斜線部分の領域の中に入っていないなければならない。よって、内力の目標値は式 (16) を式 (15) に変形し、オフセット値を加えたものである。

3.5 物体の位置制御 [1]

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 D 制御を組み込む。物体の目標位置を q_{od} 、現在位置を q_o とすると制御則は式 (17)、式 (18) になる。 K_o 、 K_i 、 K_d は各ゲインである。

$${}^H F_c^{fb} = [(J_o^T)^\dagger \quad K_{J_o^T}] \begin{bmatrix} {}^H F_o^s - K_o(q_o - q_{od}) - K_i \int (q_o - q_{od}) dt \\ f_{Nd} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\tau = J_F^T {}^H F_c^{fb} - K_d \dot{q}_F \quad (18)$$

3.6 位置の関節制御

前の章で行った位置の PID 制御において、ゲインの選択が困難であり指の安定化をしつつ位置制御を行うことが困難だったため、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以下の式 (19) で表される。

$$\begin{cases} \dot{P}_c = J_o \dot{q}_o \\ \dot{P}_c = J_F \dot{q}_F \end{cases} \quad (19)$$

式 (19) から

$$\dot{q}_F = J_F^{-1} J_o \dot{q}_o \quad (20)$$

が求められる。

式 (20) を微小変化として考えると、

$$\Delta q_F = J_F^{-1} J_o \Delta q_o \quad (21)$$

となり、 J_o は定数である。

ここで、物体の変化量の目標値を q_{od} とすると、 $q_{od}(t)$ は、離散値で考えるので $q_{od}[k]$ 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、

$$\Delta q_{od}[k] = q_{od}[k] - q_{od}[k-1] \quad (22)$$

が求められ、式 (22) を式 (21) に代入して毎ステップごとの q_{Fd} の変化量

$$\Delta q_{Fd}[k] = q_{Fd}[k-1] + \Delta q_{Fd}[k] \quad (23)$$

が得られる。

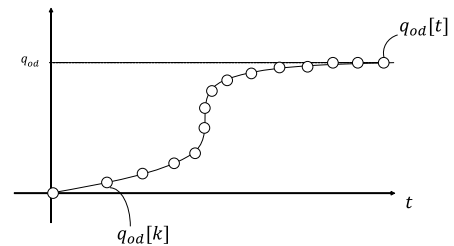


図 8

そして、最後に式 (23) を用いて

$$q_{Fd}[k] = q_{Fd}[k-1] + \dot{q}_{Fd}[k] \quad (24)$$

を求める。ただし、 $q_{Fd}[0]$ には初期姿勢時の関節角度が入る。

4 実験結果

4.1 指先力を指定しての物体把持

図 9 のように指 1, 2 を向かい合わせるために、1 軸と 4 軸をそれぞれ $+90[\text{deg}]$, $-90[\text{deg}]$ 回転させる。特異点をずらすために 2 軸と 5 軸をそれぞれ $-15[\text{deg}]$, 3 軸と 6 軸をそれぞれ $+30[\text{deg}]$ 倒した姿勢を初期姿勢とする。また、把持対象物は質量 $40[\text{g}]$ 、一辺の長さが $0.043[\text{m}]$ の木製の立方体を把持対象物に用いた。そのとき、図 9 の赤矢印のように物体に対し基準座標からみて F_1 と F_2 の y 軸方向にそれぞれ $+3[\text{N}]$, $-3[\text{N}]$ の力を加えるように指先力を指定した。

$${}^H F_{c1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^H F_{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

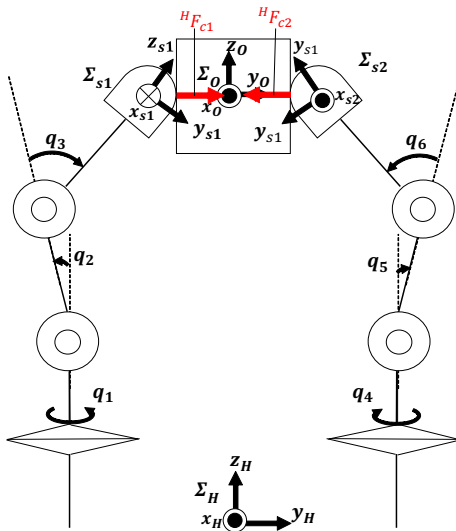


図 9 指先位置と対象物の概略図

力センサで読み取った指先力のグラフを図 10 に示す。また、図 11 は物体に働く並進力とモーメント、内力を表したグラフである。

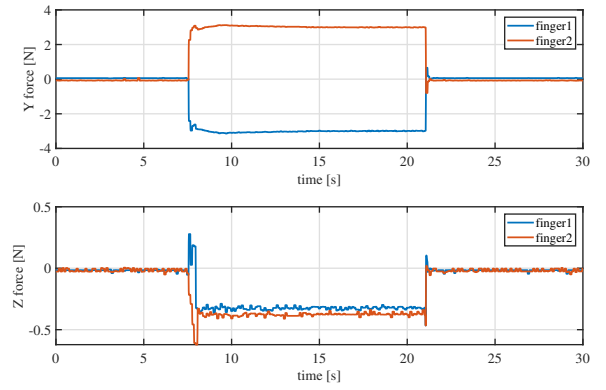


図 10 基準座標から見た指先力

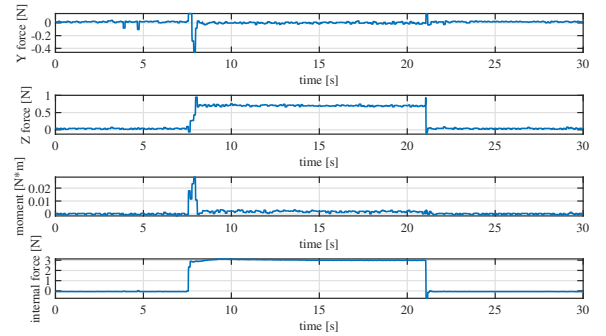


図 11 物体に作用する力

図 10 の上図において y 軸方向の力に関しては指令通り F_1 には $+3[\text{N}]$, F_2 には $-3[\text{N}]$ の力が出ていることを確認できる。また、 z 方向の力については、物体の質量よりも少し大きい値がでていますが、これは物体の質量と指の質量がかかっているためだと考えられる。図 11 の物体に働く力では指からの y 方向の力は互いに打ち消しあい静止している。また、 z 方向の力は物体に対し上向きに重力分の力が指から加えられていることが分かる。内力は物体に対し y 軸方向の指先力と同じ力つまり $3[\text{N}]$ が出ていると確認できる。以上より指先力を指定して、物体に指令値通りの力が加わったことを確認できる。

4.2 物体にはたらく力と内力を指定

次に物体に加える力と内力を指定し、物体を把持する実験を行った。把持する制御則は式 (26)、式 (27) に示す。

姿勢は 4.1 節と同じ初期姿勢とし、把持対象物も 4.1 節と同じものを用いた。 ${}^H F_o$ と f_N を式 (28) として、式 (26) に加えた。

$${}^H F_c = (J_o^T)^\dagger {}^H F_o + K_{J_o, \tau} f_N \quad (26)$$

$$\tau = J_F^T {}^H F_c \quad (27)$$

$${}^H F_O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 0 \end{bmatrix}, f_N = 3 \quad (28)$$

力センサで読み取った指先力のグラフを図 12 に示す。また、図 13 は指先力から推定した物体に働く並進力とモーメント、内力を表したグラフである。

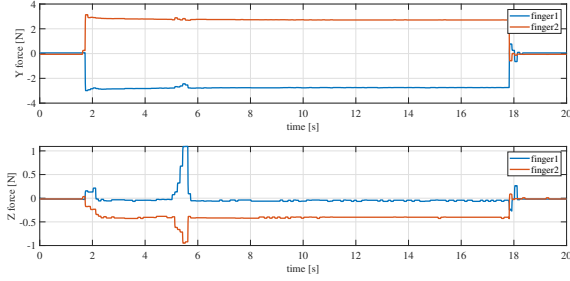


図 12 指先力

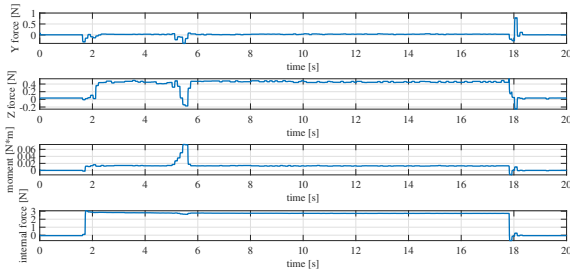


図 13 物体に作用する力と内力

図 12 の指先力は、物体把持の姿勢が左右非対称であったため、指 1 と指 2 の力センサで読み取った値がずれている。力センサから推定した物体に加わる力は図 13 において物体の z 方向に 0.44[N] と目標と近い値が出ており、内力に関しても目標値は 3[N] であるのに対し、力センサから読み取った指先力から推定した内力は 2.7[N] であり、目標値に近い値が出ている。以上より、物体に加わる力と内力から指先力を計算し、目標値通りに把持をすることができると考えることができる。

4.3 力センサを用いた物体の把持

物体を把持したままその場で静止を維持させる制御をする。

姿勢は 4.1 節と同じとし、式 (29) において把持対象物の摩擦係数 $\mu = 0.1$ 、オフセットを $f_{N_{offset}} = 1$ で設定した。以上より力センサの値を使ってフィードバックする指先力は式 (31) で計算できる。

$$f_{Nd} = \frac{{}^H F_{cz}^s}{\mu} + f_{N_{offset}} \quad (29)$$

$${}^H F_o^s = J_o^T {}^H F_c^s \quad (30)$$

$${}^H F_c^{fb} = [(J_o^T)^\dagger \quad K_{J_o^T}] \begin{bmatrix} {}^H F_o^s \\ f_{Nd} \end{bmatrix} \quad (31)$$

図 14 は物体に作用する力とモーメント、内力のグラフで、図 15 は指先力のグラフである。

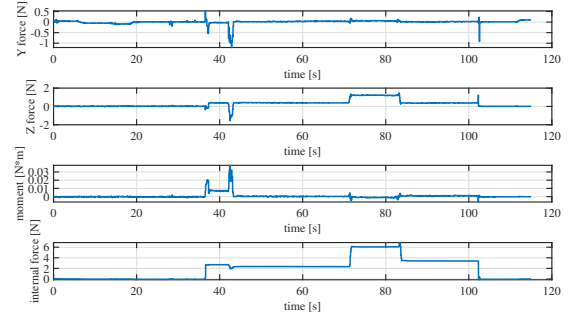


図 14 物体に作用する力

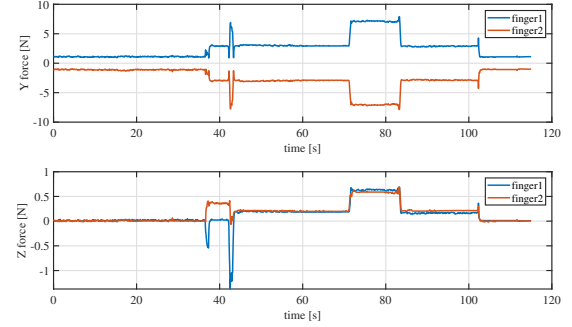


図 15 台座から見た指先力

図 14 の最初は物体の把持位置を調整するために値がぶれているが、約 50[s] より把持の位置が安定している。約 50[s] 後の把持対象物は 40[g] であり、力センサで推定した値は図 14 の z 方向に 0.38[N] の力で現れている。そして物体をその場で把持するためには質量と同じだけの力が物体の z 座標の正方向に加わっているため、計測が正確だと考えられる。また、 y 方向の力は 0[N] で、またモーメントも 0[N·m] であり、実際の状況は物体は静止しており、状況と一致していた。内力は式 (29) で設定した値より計算されており、計算した力で内力を出している。約 70[s] において重りを 100[g] 追加したときは、物体を静止させるために z 方向の力が質量分だけ増え、把持するために内力も 6[N] まで増えている。図 15 の上図は台座から見た y 方向の指先力の変化で、下図は同様の条件の z 方向の変化である。質量 100[g] の重りを追加したときに z 方向に物体を押し上げる力が増え、把持するために y 軸方向も物体に加える力が増えている。以上より力センサに加わる力を使い物体を静止、把持させることが出来た。

4.4 位置制御を加えた把持と操りの実験結果

物体を把持した状態で、台座座標系の z 軸方向に 0.02[m] 下げる制御をする。

姿勢は図 9 のように指 1, 2 を向かい合わせるために、1 軸と 4 軸をそれぞれ 90[deg], -90[deg] 回転させ、2 軸と 5 軸をそれぞれ -25[deg], 3 軸と 6 軸をそれぞれ 35[deg] 倒した姿勢を初期姿勢とした。また、把持対象物には質量 45[g], 一辺の長さが 0.065[m] の木製の立方体に質量 200[g] の重りを追加し合計 245[g] の立方体を用いた。今回内力 f_{Nd} は力センサで読み取った値は使わず、3[N] を直接指定した。

$${}^H F_C^{fb} = \begin{bmatrix} (J_o^T)^\dagger & K_{J_o^T} \\ & f_{Nd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_o - K_o(q_o - q_{od}) - K_i \int (q_o - q_{od}) dt \\ f_{Nd} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\tau = J_F^T {}^H F_C^{fb} - K_d \dot{q}_F \quad (33)$$

実験では PI 制御を行った。この時用いたゲインを表 2 に示す。

表 2 実験 位置制御ゲイン

	y	z	θ_o
K_p	2000	2000	300
K_i	120	120	2
K_d	0	0	0

実験の PI 制御の結果を図 16 に示す。

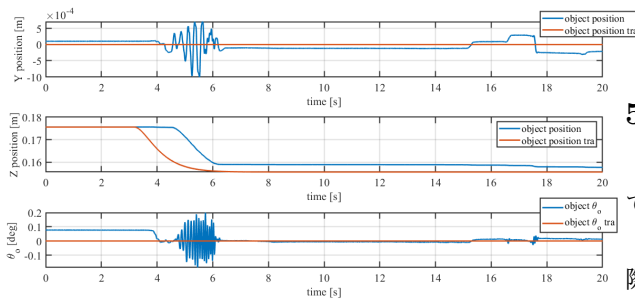


図 16 実験 位置制御実験結果

実験するにあたり静止摩擦の影響が大きいため 静止摩擦に打ち勝つように K_p ゲインを大きくしている。実験では I 制御を加え位置の PI 制御を行っている。 z の目標位置を 0.02[m] 下げるのに対して、0.0177[m] 下がったため偏差が 0.0023[m] 残って静止している。I 制御を組み込んでいるため、時間経過とともに偏差が少なくなっていることがわかる。また、物体に回転が生じているため、 θ_o のゲインを調整することで回転方向にも静止するようにしている。

4.5 位置の関節制御実験

物体を把持した状態で、台座座標系の z 軸方向に 0.02[m] 下げる制御をする。

姿勢は図 9 のように指 1, 2 を向かい合わせるために、1 軸と 4 軸をそれぞれ 90[deg], -90[deg] 回転させ、2 軸と 5 軸をそれぞれ -25[deg], 3 軸と 6 軸をそれぞれ 35[deg] 倒した姿勢を初期姿勢とした。また、把持対象物には質量 45[g], 一辺の長さが 0.065[m] の木製の立方体に質量 200[g] の重りを追加し合計 245[g] の立方体を用いた。そのときの実験結果を図 17 に示す。

Z 軸方向には目標 0.02[m] 下に下げるのに対し目標位置を通り越して 0.025[m] 下がっており、偏差が -0.005[m] となっている。これは式 (21) のように微小変化を用いた関節角の制御であるために生じた誤差であると考えられる。また、各関節ごとに PID のゲインチューニングを行ってあるので、実験を行う際に新たに物体の位置の PID ゲインチューニングを行う必要がない。4.4 節では、関節の摩擦について考慮していなかったが関節角制御においては摩擦を含めたゲインチューニングを行っているため指は安定している。

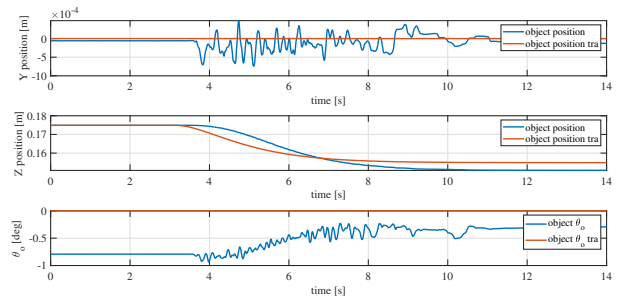


図 17 関節角制御による位置制御実験結果

5 終わりに

本研究において力センサを用いて物体を把持することができ、位置制御を組み込むことで操りを行うことができた。今後は位置の関節角制御において、物体の目標軌道と実際の軌道に偏差が残ってしまった為、実験機を動かす際に偏差を考慮することで、目標軌道との誤差を減らしたい。

参考文献

- [1] 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。
- [2] 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 Vol.14, No.1, pp48-54, 1996。
- [3] 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 Vol.14, No.4, pp505-511, 1996。