

視覚情報を用いたマニピュレータによる Ball-on-Plate システムの制御

M2019SC002 石黒 太雅

指導教員：中島 明

1 はじめに

日常や工場内においてロボットによるマニピュレーションでは対象物を完全に拘束する把持によって操ることが多い。これは人間の行う多様なマニピュレーションを考えた場合でも把持による操りが基本であるからである。そのため、多指ハンドロボットを対象とした把持の研究が精力的に行われてきた。しかし、ロボットに人間のような器用さを与えるためには、把持による操りに加え、対象物を完全に拘束しない把持のような不安定さを許容したマニピュレーションが必要不可欠であると言える。これらの対象物を完全に拘束しない把持によって操るマニピュレーションは“Nonprehensile manipulation”と呼ばれ、研究が盛んに行われている。その例は転がし操作 (Rolling)、バッティング (Batting) およびキャッチ (catching)、押し操作 (Pushing) など人間の日常の行動の中に多く存在する [1]。その中でも転がし操作に着目し、トレーの上に物を載せて運ぶようなバランスと移動をマニピュレータで行うことを考える。このタスクを抽象化し、マニピュレータに取り付けたプレートを通りボールを移動させる Ball-on-Plate の研究に取り組む。このような非把持操作を実現できれば、ロボットの適用可能な分野が広がることが見込める。

本研究で使用するロボットは6軸垂直多関節ロボットであり、そのロボットの手先にプレートを取り付けて Ball-on-Plate の制御を行う。過去研究 [2] ではシステムの自由度が4であるが、それは垂直方向の運動を考えると、水平方向やプレートの傾きによるバランス運動と慣性力が干渉するため、より制御が難しくなるためである。しかし、マニピュレーションの本来の目的は3次元の任意の位置に対象物を移動させることであるから、垂直方向の運動も考えることは、Nonprehensile なマニピュレーションとして必要不可欠なことである。そこで、本研究では垂直方向の自由度も増やし、「3次元空間上での位置」の制御を目指した。

2 モデリング

2.1 システム構成

マニピュレータを含めた Ball-on-Plate システムの全体像を図1に示す。また、図2にシステムの座標系および変数を示す。ボールは半径 r_O 、質量は m_O である。システムを構成するプレートを指先 (Finger)、ボールを対象物 (Object) と呼ぶ。基準座標系 Σ_B が3次元空間内に固定されており、 z 軸が鉛直上向きであるとする。プレートに指先座標系 Σ_F を固定し、 x 軸は長手方向に沿うように定める。対象物座標系 Σ_O は、対象物の中心に固定する。変数として、基準座標系から見た指先座標系の位置と

姿勢を $({}^B p_F, {}^B R_F)$ で表すものとする。ここで、 ${}^B p_F$ は Σ_B の原点から Σ_F の原点までの位置ベクトル、 ${}^B R_F$ は Σ_B から見た Σ_F の姿勢を表す回転行列である。また、対象物座標系においても同様に位置と姿勢を $({}^B p_O, {}^B R_O)$ で表現する。

さらに、指先と対象物の接触状態を表す座標を導入する。指先、対象物の共通法線とそれぞれの表面が交わる点を接触点として定義する。このそれぞれの接触点に、接触座標系 Σ_{CF} 、 Σ_{CO} の原点を設置する。これら Σ_{CF} 、 Σ_{CO} の位置・姿勢は、それぞれ指先座標系および対象物座標系 Σ_{CF} 、 Σ_{CO} を基準として $({}^F p_{CF}, {}^F R_{CF})$ 、 $({}^O p_{CO}, {}^O R_{CO})$ で表される。指先座標系 Σ_F から見た接触座標系 Σ_{CF} の位置ベクトル ${}^F p_{CF}$ は、 ${}^F p_{CF} = [\alpha_F \ 0]^T \in \mathbb{R}^3$ と表す。また、指先と対象物の姿勢角 ${}^B \phi_F \in \mathbb{R}^3$ 、 ${}^B \phi_O \in \mathbb{R}^3$ を ZYX オイラー角とする。対象物の回転速度 ${}^B \omega_O$ と対象物の姿勢角の時間微分 ${}^B \dot{\phi}_O$ は ${}^B \omega_O = T_r({}^B \phi_O) {}^B \dot{\phi}_O$ を満たす。従って一般化座標 q は対象物の位置姿勢を表現する $q_O := [{}^B p_O^T \ {}^B \phi_O^T]^T \in \mathbb{R}^6$ とマニピュレータの関節角 $q_F \in \mathbb{R}^6$ となる。

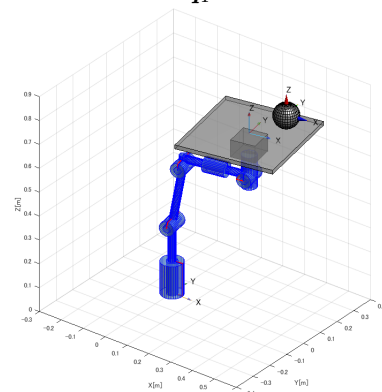


図1 Ball-on-Plate システムの全体像

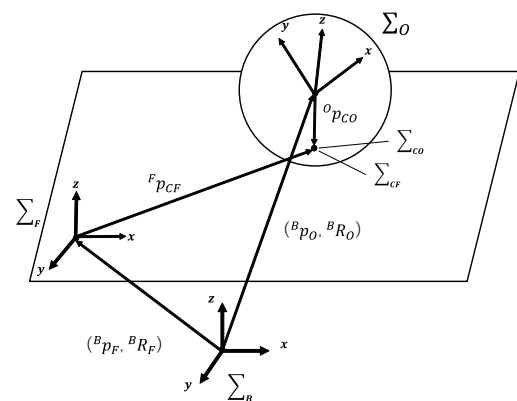


図2 システムの座標系及び変数

2.2 拘束条件

2.2.1 接触条件

指先側と対象物側の接触点は空間内において一致しており、以下のように定式化される。

$${}^B \mathbf{p}_F + {}^B \mathbf{R}_F {}^F \mathbf{p}_{CF} = {}^B \mathbf{p}_O + {}^B \mathbf{R}_O {}^O \mathbf{p}_{CO} \quad (1)$$

2.2.2 転がり接触条件

対象物が指先の上を滑らない条件は、指先接触点と対象物接触点の接触点速度が等しいことであり、次のように定式化される [3]。

$${}^B \mathbf{R}_F {}^F \dot{\mathbf{p}}_{CF} = {}^B \mathbf{R}_O {}^O \dot{\mathbf{p}}_{CO} \quad (2)$$

次に、対象物と指先の相対姿勢に関する拘束条件は、回転摩擦力を拘束力として導入することで実現される。対象物から見た指先の接触点での相対回転速度を基準座標系から見て ${}^B \boldsymbol{\omega}_{COCF}$ とする。指先から見た指先に垂直な向きのベクトル成分は、すえ切りがないため 0 になる。対象物と指先が接触している点での法線ベクトル周りの成分表示を、基準座標系から見た指先に垂直な向きの回転速度が無いものに変換すると以下の式で表される。

$$\mathbf{e}_z^T {}^B \mathbf{R}_F^T {}^B \boldsymbol{\omega}_{COCF} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{e}_z = [001]^T$ である。この条件により、対象物と指先の間ですえ切りが発生することを防ぐ。式 (1) を微分し、式 (2) と連立させることで一般化座標において以下の式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_F \mathbf{J} & -\mathbf{A}_O \mathbf{T}_O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_F \\ \dot{\mathbf{q}}_O \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4)$$

ただし、 \mathbf{J} は指先の並進速度と回転速度と関節角速度の関係を表す基礎ヤコビ行列、 $\mathbf{T}_O = \text{b.d.}(\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{T}_r) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ である。

$$\mathbf{A}_F := \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -({}^B \mathbf{R}_F {}^F \mathbf{p}_{CF})^\wedge \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{e}_z^T {}^B \mathbf{R}_F^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$$

$$\mathbf{A}_O := \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -({}^B \mathbf{R}_O {}^O \mathbf{p}_{CO})^\wedge \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{e}_z^T {}^B \mathbf{R}_F^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$$

ここで、 $\mathbf{a}^\wedge \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はベクトルによる外積演算に等価な線形変換を表す歪対称行列である [4]。

2.3 運動方程式

2.3.1 対象物と指先の運動方程式

対象物の運動方程式は以下の式 (5) で表される。

$$\mathbf{M}'_O \ddot{\mathbf{q}}_O + \mathbf{C}'_O \dot{\mathbf{q}}_O + \mathbf{N}'_O = \mathbf{T}_O^T \mathbf{A}_O^T \mathbf{f}_c \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{M}'_O \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は慣性行列、 $\mathbf{C}'_O \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は遠心コリオリ力項、 $\mathbf{N}'_O \in \mathbb{R}^6$ は重力項、 \mathbf{f}_c はラグランジュの未定乗数であり、拘束を成立させるために必要な拘束力である。また、拘束条件 (4) を考慮したマニピュレータの運動方程式は以下の式 (6) で表される。

$$\mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{C}_F \dot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{N}_F = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T \mathbf{A}_F^T \mathbf{f}_c \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{M}_F \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 、 $\mathbf{C}_F \in \mathbb{R}^6$ 、 $\mathbf{N}_F \in \mathbb{R}^6$ はマニピュレータの慣性行列、遠心コリオリ力項、重力項である。

2.3.2 未定乗数の導出

システム全体の運動方程式は以下ようになる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} + \mathbf{N} = \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T \mathbf{f}_c \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{M} := \text{b.d.}(\mathbf{M}_F, \mathbf{M}'_O) \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ 、 $\mathbf{C} := \text{b.d.}(\mathbf{C}_F, \mathbf{C}'_O \dot{\mathbf{q}}_O) \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ 、 $\mathbf{N} := [\mathbf{N}_F^T \quad \mathbf{N}'_O^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$ 、 $\mathbf{B} := [\mathbf{I}_{6 \times 6} \quad \mathbf{0}_{6 \times 6}]^T \in \mathbb{R}^{12 \times 6}$ 、 $\mathbf{A} := [\mathbf{J}^T \mathbf{A}_F^T \quad -\mathbf{T}_O^T \mathbf{A}_O^T]^T \in \mathbb{R}^{4 \times 12}$ である。系全体は拘束条件付きのシステム全体の運動方程式 (7) と拘束条件 (4) の両式の連立により記述される。

3 制御系設計

3.1 運動方程式

手先空間のみの制御は実験機では摩擦の影響もあり、マニピュレータの姿勢によっては実現されない。そこで、手先空間と関節空間の両方の軌道を制御し、手先空間で生じた加速度を仮想的な入力として指先と対象物を安定化するような制御系設計を行う。制御系設計のためにモデルの低次元化を行い拘束力を消去する。しかし、一般化座標を制御変数 \mathbf{x}_c で表現する必要があるが、平面を転がる球の運動は非ホロノミックであるため、対象物の姿勢角を制御変数で表すことが不可能である。そこで、運動方程式を指先と対象物の並進速度と回転速度を表す $\mathbf{V}_F, \mathbf{V}_O$ について記述する。

$$\begin{cases} \mathbf{M}_p \dot{\mathbf{V}}_F + \mathbf{C}_p \mathbf{V}_F + \mathbf{N}_p = \mathbf{F}_p - \mathbf{A}_F^T \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{M}_O \dot{\mathbf{V}}_O + \mathbf{C}_O \mathbf{V}_O + \mathbf{N}_O = \mathbf{A}_O^T \boldsymbol{\lambda} \end{cases}$$

ただし、 $\mathbf{M}_p \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 、 $\mathbf{C}_p \in \mathbb{R}^6$ 、 $\mathbf{N}_p \in \mathbb{R}^6$ はプレートの慣性行列、遠心コリオリ力項、重力項である。 \mathbf{F}_p は、マニピュレータによってプレート中心に作用する力とする。一方でマニピュレータの運動方程式は以下の式で表される。

$$\mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{C}_F \dot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{N}_F = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_p$$

マニピュレータへの入力は、関節空間のPID制御入力と重力項と指先への理想的な力 \mathbf{F}_{pd} を実現するトルクである。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{PID} + \mathbf{N}_F + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{pd} \quad (8)$$

この重力補償付き関節角のPID制御によって、関節角が目標軌道に乗っていると仮定したならば、マニピュレータからプレートへ理想的な力 \mathbf{F}_{pd} が入力 ($\mathbf{F}_p = \mathbf{F}_{pd}$) されていることになる。理想的な力 \mathbf{F}_{pd} は、プレートの制御の項 \mathbf{F}_{Pc} とプレートの重力補償 \mathbf{N}_P と対象物の重力補償であり、以下の式で定義される。

$$\mathbf{F}_{pd} = \mathbf{F}_{Pc} + \mathbf{N}_P + \mathbf{A}_F^T \boldsymbol{\lambda}_0$$

ここで $\boldsymbol{\lambda}_0 := \mathbf{E} \mathbf{N}_O$ は対象物の姿勢に関する重力の影響項以外を取り出したものである。手先空間でのPD制御 \mathbf{F}_{Pc} は以下のようになる。

$$\mathbf{F}_{Pc} = \mathbf{M}_p \{ \dot{\mathbf{V}}_{Fd} - \mathbf{K}_{rp}(\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_{Fd}) - \mathbf{K}_{rd}(\mathbf{V}_F - \mathbf{V}_{Fd}) \} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{r}_{Fd} は手先空間での目標軌道であり、目標加速度 $\dot{\mathbf{V}}_{Fd}$ をフィードフォワードとして入れている。指先の

運動方程式に理想的な力 F_{Pd} を代入し、 $\Delta\lambda := \lambda - \lambda_0$ とおくことで対象物と指先に対して手先空間での加速度フィードフォワード付きの PD 制御を行った後に、 \dot{V}_{Fd} を新しい入力 u とした式が得られる。

$$M\dot{V} + CV + N + D = Bu - \tilde{A}^T \Delta\lambda \quad (10)$$

ただし、 $\tilde{A} := [A_F^T \ -A_O^T]^T \in \mathbb{R}^{4 \times 12}$ 、 $V := [V_F^T \ V_O^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$ とする。

3.2 制御変数

制御変数 x_c として以下の変数を取る。

$$x_c := \begin{bmatrix} B p_O^T & \alpha_F^T & B \phi_F^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^8$$

指先と対象物の速度 V と制御変数の速度 \dot{x}_c の関係を S 行列を用いて表現する。

$$V = S\dot{x}_c \quad (11)$$

係数行列 S の列ベクトルは $\tilde{A}V = 0$ の係数行列 \tilde{A} の零化空間を張っており、以下の式 (12) を満たす。

$$\tilde{A}S = 0 \quad (12)$$

従って、制御変数 x_c は拘束を常に満たすように運動する。

3.3 制御変数の運動方程式

式 (11) とその微分を運動方程式 (10) に代入し、左から S^T をかけると、制御変数 x_c に関する運動方程式 (13) が得られる。

$$M_v \ddot{x}_c + C_v \dot{x}_c + N_v = B_v u \quad (13)$$

ただし、手先空間での位置の目標値との偏差 Δr_{Fd} と指先の姿勢角 ${}^B \phi_F$ をまとめて $\Delta \tilde{r}_{Fd} = [\Delta r_{Fd} \ {}^B \phi_F]^T$ とする。状態変数を以下のように定義する。

$$x := \begin{bmatrix} x_c^T & \dot{x}_c^T & \Delta \tilde{r}_{Fd}^T & \dot{\tilde{r}}_{Fd}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{28}$$

よって、次の非線形状態方程式を得る。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

以上より、目標軌道の位置の偏差と速度も状態として繰りこんだ状態 x 全てを安定化させるような手先の加速度入力を求める問題になる。平衡点周りで線形化した状態方程式の係数行列を A_l, B とする。

$$A_l := \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^e}, \quad B := g(x^e)$$

よって、次の線形状態方程式を得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = A_l x + B u \\ y = C_l x \end{cases}$$

ここで、実験環境として視覚センサで取得可能であるのは対象物の 3 次元位置であるため、出力方程式の観測行列を $C_l := [I_3 \ 0_{3 \times 25}]$ である。

3.4 重力補償付き LQ サーボ

次に、対象物の位置を定値の目標値に追従制御をするため、重力補償付きの LQ サーボの導出を行う。対象物の定値の目標値を $r \in \mathbb{R}^3$ とする。 $e(t) := r(t) - y(t)$ とし、その偏差を時刻 0 から t まで積分したものを z とする。

$$z = \int_0^t e(t) dt$$

拡大系は以下の式 (14) で表される。

$$\begin{cases} \dot{x}_e = A_e x_e + B_e u \\ y = C_e x_e \end{cases} \quad (14)$$

ただし、 $x_e := [x \ z]^T$

$$A_e := \begin{bmatrix} A_l & 0 \\ -C_l & 0 \end{bmatrix}, B_e := \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_e := \begin{bmatrix} C_l & 0 \end{bmatrix}$$

拡大系における評価関数を

$$J = \int_0^\infty (x_e^T Q x_e + u^T R u) dt$$

とし、LQ サーボによる最適入力 u は以下の式で与えられる。

$$u = -[K_F \ K_i] x_e \quad (15)$$

以上の LQ サーボシステムのブロック線図を図 3 に示す。

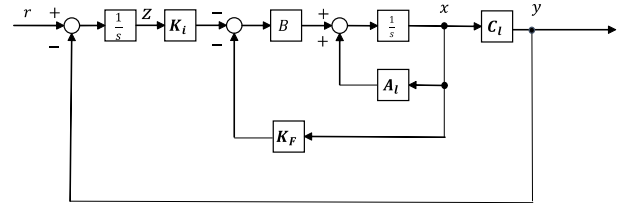


図 3 拡大システムに基づく LQ コントローラ

次に、得られた入力である式 (15) をヤコビ行列を用いることで目標関節角 q_{Fd} に変換し、関節角のフィードバック制御を行う。マニピュレータへの入力であるトルク τ は以下のように与えられる。

$$\tau = K_p(q_{Fd} - q_F) + K_i \int (q_{Fd} - q_F) dt - K_D \dot{q}_F + N_F \quad (16)$$

この制御則のブロック線図を図 4 に示す。

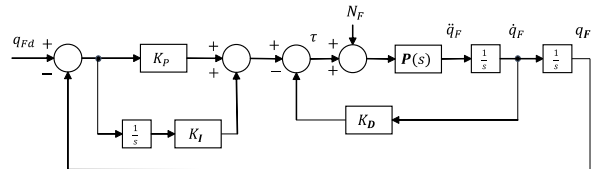


図 4 関節角の PID 制御

ここで、 $P(s)$ は制御対象、 N_F はマニピュレータの重力項であり、入力に加えることで重力補償を行う。

4 数値シミュレーション

4.1 シミュレーションの設定

図 1 のように、マニピュレータの初期姿勢を $\mathbf{q}_F = [10, 10, -10, 0, -90, 0]^T$ [deg] とする. 対象物の初期位置 $[0.3915, 0.1706, 0.8031]^T$ [m], 初期姿勢を $[0.1745, 0, 0]^T$ [rad] とする. フィードバックゲインを $\mathbf{K}_P = \text{diag}(2290, 5300, 4500, 1050, 1805, 1650)$, $\mathbf{K}_I = 400\mathbf{I}_4$, $\mathbf{K}_D = \text{diag}(100, 170, 180, 100, 170, 160)$ としている. 出力の目標値を $\tilde{\mathbf{r}} = [0.27 \ 0 \ 0.807 \ \mathbf{0}_{1 \times 2} \ \mathbf{0}_{1 \times 3}]^T$ とし, LQ サーボ制御則については重み行列を次のように設定した. $\mathbf{Q} = \text{b.d.}(\mathbf{Q}_{xc}, \mathbf{Q}_{\dot{x}c}, \mathbf{Q}_{drf}, \mathbf{Q}_{drf\dot{d}ot}, \mathbf{Q}_z)$, $\mathbf{Q}_{xc} = \text{b.d.}(300\mathbf{I}_5, \mathbf{I}_3)$, $\mathbf{Q}_{\dot{x}c} = 10\mathbf{I}_6$, $\mathbf{Q}_{drf} = 0.3\mathbf{I}_6$, $\mathbf{Q}_{drf\dot{d}ot} = \mathbf{I}_6$, $\mathbf{Q}_z = 100\mathbf{I}_3$, $\mathbf{R} = 100\mathbf{I}_6$

シミュレーション結果を図 5 - 8 に示す. シミュレーション時間は 15[s] とした. 図 5, 6 より指先及び対象物の全てが安定であることが分かる. 8[s] 程度で対象物が 3 次元空間上の目標位置に制御されており, 図 7 から指先上の対象物の位置 α_F が目標値である指先上の原点にレギュレーションされていることが分かる.

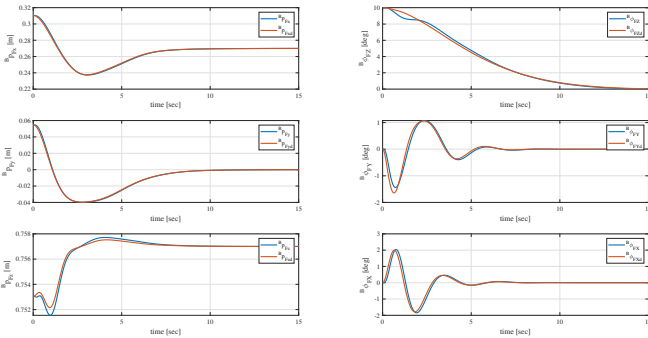


図 5 指先の位置・姿勢角

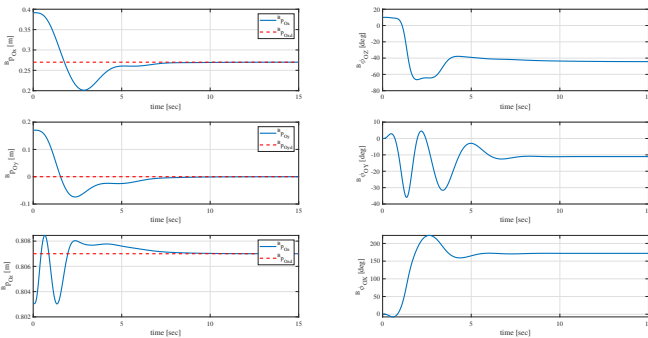


図 6 対象物の位置・姿勢角

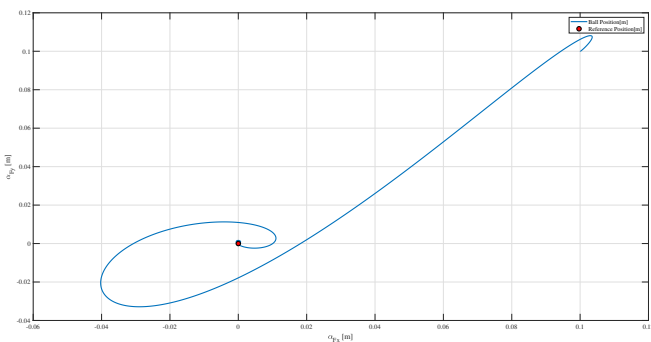


図 7 接触座標

指先と対象物の接触点に生じる接触力 $\mathbf{f}_c \in \mathbb{R}^4$ は, XYZ 方向の並進力 3 成分と摩擦力である. \mathbf{f}_c を指先の接触座標系で表現する式は以下の式で与えられる.

$${}^C F \mathbf{f}_c = {}^F \mathbf{R}_{CF}^T {}^B \mathbf{R}_F^T \mathbf{f}_c$$

図 8 は接触力 \mathbf{f}_c のうち, 垂直抗力である z 成分をプロットしたグラフである. 値が常に正であることから, 指先と対象物は常に接触状態であり物理的に矛盾しない制御が行われていることが分かる.

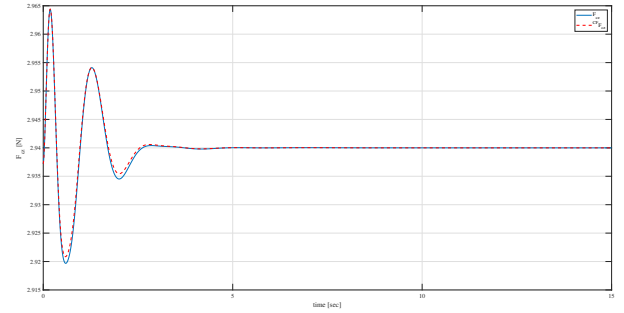


図 8 接触力

また, 今回設計した制御則を指先の姿勢角のみを入力とした制御と比較した場合, 指先の位置・姿勢を状態に繰りこんだことで自由度が増え, マニピュレータの各軸への入力分散されるといった結果も見られた.

5 おわりに

本研究では, 対象物を完全には拘束しない把持のような不安定さを許容したマニピュレーションの例である Ball-on-Plate の実現を目指して, 制御系設計を行った. まず, システム全体を拘束条件付きの運動方程式としてモデリングを行った. 制御系設計においては, 拘束力を消去した制御変数に関する非線形状態方程式を導出し, 平衡点近傍で線形化を行い, 重力補償付き LQ サーボ制御器を設計した. 最後に, 設計した制御則の有効性を数値シミュレーションにより検証した. 今後の課題としては, 実機での検証が挙げられる.

参考文献

- [1] F. Ruggiero, V. Lippiello, and B. Siciliano, “Non-prehensile Dynamic Manipulation: A Survey,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1711–1718, 2018.
- [2] K.-K. Lee, G. B. Atz, and D. Wollherr, “Basketball robot: Ball on plate with pure haptic information,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008, pp. 2410–2415.
- [3] Akira Nakashima: “Control of Nonprehensile Manipulation with Ball-Beam System: Palm Circle of Contact Juggling”. 2019, pp. 2–3.
- [4] 中島明: 『メカトロニクス研究 講義ノート』. 南山大学, 2017, pp. 25