

視覚情報を用いたマニピュレータによるボール・ビーム系での非拘束な操り制御

M2019SC016 吉田樹

指導教員：中島明

1 はじめに

近年、マニピュレータは、より複雑で多様な作業が可能になってきている。そのため、工場や日常の中で、人に代わって自動で作業を行うマニピュレータが注目されている。しかし、マニピュレータには工場や日常の中で、まだまだ実現出来ていない作業があり、人間のようなさらなる器用な動作が求められている。そのため、完全には把持しないで、物体を搬送する場合に、状況に合わせた操作をすることが重要になってくる。そこで我々は、マニピュレータが出来る作業の中で、完全には把持しない、非拘束な把持に注目した [1]。非拘束な把持は、バランス制御と目標の場所に移動する位置制御であるが、人間はより器用にボールとビームの相対位置を同時に制御している。つまり、物体を移動させながら、持ちやすさも同時に調整している。このように、物体の空間上の位置に加えて、ビームとボールの相対位置も同時に制御することで、より人間の器用さを再現した制御を目指す。そのため、研究として、マニピュレータの手先をビームに見立てて空間内での対象物のバランスを行う。

本研究では、マニピュレータの先端に取り付けたビーム上のボールのバランスを維持するために、6軸垂直多関節ロボットを制御する。対象物の位置をセンシングするために視覚情報を用いる。先行研究 [2] では、力センサーを使いボールの位置を観測していたが、視覚情報を使うことでノイズの影響を減らすことに繋がり、より高度な制御を行うことが可能である。また、人間の五感の中で最も重要な役割を占める視覚情報を用いることで、より人間のような器用さを実現できるため視覚情報を用いる。制御変数は、ディスクとビームの位置、およびビームの姿勢角を用いる。基本の制御の目的は、対象物の位置を推定し、ボールのバランスを維持するための制御系設計とビームを目標の場所に動かすためのマニピュレータの制御に分けられる。そして、ボールのバランスを取りながらマニピュレータの自由度を活かした制御を行って行く。そのために、物体の空間上の位置に加えて、ビームとボールの相対位置も同時に制御する。

2 実験環境

2.1 ロボットアーム

本研究で用いられるロボットアームは、MOTOMAN-HP3Jである。

2.2 リアルタイム画像計測システム

Radish/2D/3DTM は対象を2基のカラーカメラで撮影し、カラー抽出を行うことで、基準座標系での位置と姿勢を取得することが可能である [3]。

3 モデリング

3.1 システム構成

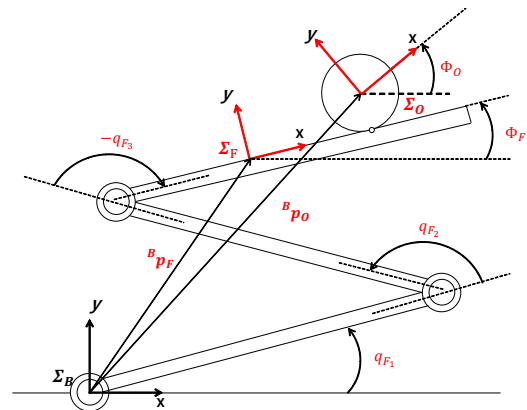


図1 3自由度マニピュレータの対象物バランスシステム

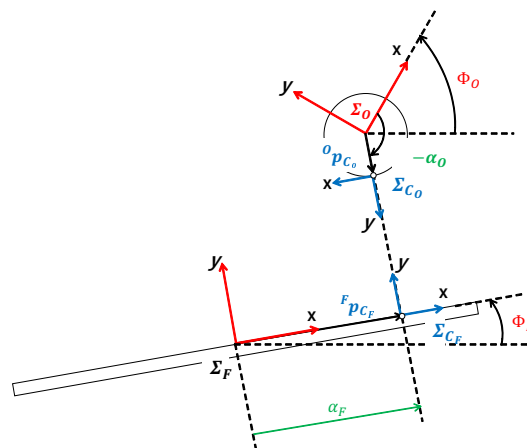


図2 接触座標での構成

この章では、文献 [4][5] を参考に、3自由度マニピュレータによるボール・ビーム系における運動方程式を定式化する。3自由度マニピュレータの対象物バランスシステムの構成を図1に示す。指先であるビームは厚みのない薄い板、ボールは円であり、材質

は均一であるとする。指先であるビームの質量は m_F であり、中心まわりの慣性モーメントは、 J_F である。対象物であるディスクの質量は、 m_O であり、中心まわりの慣性モーメントは J_O である。以降では、ビームを指先、ボールを対象物と呼ぶ。マニピュレータの関節角、ボールの空間上の位置、ボールのビーム上での位置とビームの姿勢角を一般化座標を用いて表す。マニピュレータの関節角は、 $q_F := [q_{F1} \ q_{F2} \ q_{F3}]^T \in \mathbb{R}^3$ で定義される。座標系と変数を次のように定義する。 \sum_B は、基準座標系であり、 y 軸は鉛直上向きであるものとする。 \sum_F は、指先に固定されており、ビームに沿って x 軸を定めるものとする。また、 \sum_O は対象物の中心に固定する。基準座標系 \sum_B から見た指先の位置と姿勢を $({}^B p_F, {}^B R_F) \in \text{SO}(2)$ と表現する。基準座標系 \sum_B からみた指先座標系 \sum_F の位置ベクトルを ${}^B p_F \in \mathbb{R}^2$ 、姿勢を表す回転行列を ${}^B R_F \in \text{SO}(2)$ とする。対象物座標系 \sum_O についても同様に、位置と姿勢を $({}^B p_O, {}^B R_O) \in \text{SO}(2)$ で表す。 ${}^B R_F := R(\phi_F)$, ${}^B R_O := R(\phi_O)$ は、2次元空間内での回転行列であるため、 $\phi_F, \phi_O \in \mathbb{R}^1$ で示される。 $\phi_F \in \mathbb{R}$ と $\phi_O \in \mathbb{R}$ は、基準座標系 \sum_B の x 軸から指先座標系 \sum_F 、対象物座標系 \sum_O の x 軸のなす角である。ただし、 $R(\phi)$ は、以下のように定義される。

$$R(\phi) := \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \phi \in \mathbb{R} \quad (1)$$

マニピュレータの関節角、ボールの空間上の位置、ボールのビーム上での位置とビームの姿勢角を一般化座標で表すと次のように定義される。 $q := [q_F \ q_O]^T \in \mathbb{R}^6$, $q_O := [{}^B p_O \ \phi_O]^T \in \mathbb{R}^3$ ここで、指先と対象物の接触状態での座標を表す座標系を導入する。接触状態での座標系を図2に示す。指先と対象物が交わる点を接触点とする。接触状態での、指先と対象物の接触点が一致する原点を $\sum C_F$, $\sum C_O$ で示す。このとき、 $\sum C_F$, $\sum C_O$ の位置ベクトル、姿勢は、 $({}^B p_{C_F}, {}^F R_{C_F}), ({}^O p_{C_O}, {}^O R_{C_O}) \in \text{SO}(2)$ で表される。

$${}^F p_{C_F} = \begin{bmatrix} \alpha_F \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^F R_{C_F} = I_2 \quad (2)$$

$${}^O p_{C_O} = \begin{bmatrix} r_O \cos \alpha_O \\ r_O \sin \alpha_O \end{bmatrix}, \quad {}^O R_{C_O} = R\left(\alpha_O - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$\alpha_F \in \mathbb{R}$ は、指先座標系 \sum_F から対象物との接触点 $\sum C_F$ までの距離であり、 $\alpha_O \in \mathbb{R}$ は、 $\sum O$ の x 軸から $\sum C_O$ の y 軸までのなす角である。 r_O は、ボールの半径である。これら、 α_F, α_O は接触座標と呼ぶ。

最後に、制御入力に関して定義する。ボール・ビーム系での非拘束な操りを実現するためのマニピュレータへの制御入力は、 $\tau := [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \in \mathbb{R}^3$ で定義する。これは、マニピュレータの関節トルクである。

3.2 拘束

3.2.1 接触拘束

図3のシステム構成から、指先と対象物での接触点は一貫していることから以下のように表される。

$${}^B p_F + {}^B R_F {}^F p_{C_F} = {}^B p_O + {}^B R_O {}^O p_{C_O} \quad (4)$$

$${}^B R_F {}^F R_{C_F} {}^C R_{C_O} = {}^B R_O {}^O R_{C_O} \quad (5)$$

式(4)は、基準座標系から接触点までの位置ベクトルであり、指先と対象物が接触している拘束条件である。式(5)は、基準座標系から接触点の姿勢に関する関係である。

3.2.2 転がり拘束

ディスクがビームの上を転がる際に、指先座標系から見た接触点では、指先と対象物の速度が一致する。速度に関しての拘束は、以下のように定義される。

$${}^B R_F {}^F \dot{p}_{C_F} = {}^B R_O {}^O \dot{p}_{C_O} \quad (6)$$

3.2.3 一般化座標の拘束式

一般化座標で成り立つ転がり接触条件の拘束式は、

$$A_F(q) J_F \dot{q}_F - A_O(q) \dot{q}_O = 0 \quad (7)$$

である。このとき、 $r_F := [{}^B p_F \ \phi_O]^T \in \mathbb{R}^3$

$$A_F := [I_2 \ R(\frac{\pi}{2}) {}^B R_F {}^F p_{C_F}] \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$$

$$A_O := [I_2 \ R(\frac{\pi}{2}) {}^B R_O {}^O p_{C_O}] \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$$

である。

3.3 拘束付き運動方程式

拘束付きの運動方程式を以下に示す。

$$M_F \ddot{q}_F + C_F + N_F = \tau - J_F^T A_F^T f_C \quad (8)$$

$$M_O \ddot{q}_O + N_O = A_O^T f_C \quad (9)$$

式(8)はビームの運動方程式であり、式(9)はボールの運動方程式である。ボールとビームは相互作用を表す接触力を含んだ形式として表現される。このとき、慣性行列 $M_F(q_F)$ は、 $M_F(q_F) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ であり、慣性行列 $M_F(q_F)$ は、すべての q_F に対して正定である。遠心・コリオリ力項 $C_F(q_F, \dot{q}_F)$ は、 $C_F(q_F, \dot{q}_F) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ であり、重力項 $N_F(q_F)$ は、 $N_F(q_F) \in \mathbb{R}^3$ である。 $J_F(q_F) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は、ヤコビ行列で定義される。

$$J_F := \frac{\partial {}^B p_F}{\partial q_F} \quad (10)$$

式(8)の対象物に関する運動方程式の慣性行列は、 $M_O := b.d.(m_O I_2, J_O) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ であり、重力項は、 $N_O := [m_O g e_y \ 0]^T \in \mathbb{R}^3$ である。物理パラメータは、ディスクの質量 m_O 、ディスクの慣性モーメント J_O 、重力 $g = 9.81[\text{m/s}^2]$ である。

接触力 $f_C \in \mathbb{R}^2$ は、式(8)(9)より、式(7)の拘束条件から指先から対象物、対象物から指先への拘束力 $-J_F^T A_F^T f_C$ と $A_O^T f_C$ が相互に作用する。

4 制御系設計

手先の加速度を仮想的な入力として、安定化するために、実験環境に適した手先空間と関節角空間の両方で軌道追従しつつ、ボール&ビーム系で安定化する制御系設計を行う。

4.1 ボール&ビームとマニピュレータの運動方程式

関節角空間でボールとビームを安定化するための軌道を得るために、ボールとビームのみの運動方程式を考える。

$$\begin{cases} M_P \ddot{r}_F + N_P = F_p - A_F^T \lambda \\ M_O \ddot{r}_O + N_O = A_O^T \lambda \end{cases} \quad (11)$$

N_P はプレートの重力項であり、 F_p は、マニピュレータが動いたときにマニピュレータによって加えられる力である。接触点で作用する拘束力を λ とする。このとき、マニピュレータの運動方程式は以下のようなになる。

$$M_F \ddot{q}_F + C_F \dot{q}_F + N_F = \tau - J_F^T F_P \quad (12)$$

4.2 関節角空間と手先空間の両方での PD(PID) 制御

関節角空間と手先空間の両方で PD(PID) 制御を行うことを考える。

$$\begin{cases} \tau = \tau_{PID} + N_F + J_F^T F_{Pd} \\ F_{Pd} = F_{PC} + N_P + A_F^T \lambda_0 \\ F_{PC} = M_P \{ \ddot{r}_F - K_{rP}(r_F - r_{Fd}) \\ \quad - K_{rD}(\dot{r}_F - \dot{r}_{Fd}) \} \\ \lambda_0 = E_2 N_O \quad (E_2 = [I_2 \quad 0_{2 \times 1}]) \end{cases} \quad (13)$$

τ_{PID} は関節角空間での PID 制御であり、 $J_F^T F_{Pd}$ は、接触している力の理想的な目標値である。 F_{PC} はビームの制御であり、 $A_F^T \lambda_0$ は対象物の重力補償である。

4.3 ビームが直接制御できると仮定したボール&ビームの運動方程式

$F_P = F_{Pd}$ であると仮定すると、ビームのみでの制御を考える。ビームとボールの運動方程式は以下のようなになる。

$$\begin{cases} M_P \ddot{r}_F + N_P = F_{Pd} - A_F^T \lambda \\ M_O \ddot{r}_O + N_O = A_O^T \lambda \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) に式 (13) の F_{Pd} , $\Delta \lambda := \lambda - \lambda_0$, $\Delta N_O := (I_3 - A_O^T E_2) N_O$ を代入する。

$$\begin{cases} M_P \ddot{r}_F = F_{PC} - A_F^T \Delta \lambda \\ M_O \ddot{r}_O + \Delta N_O = A_O^T \Delta \lambda \end{cases} \quad (15)$$

4.4 コントローラ設計

新しい入力 \ddot{r}_{Fd} を考えると式 (13)(15) と $\Delta r_F := r_F - r_{Fd}$ から以下のように表せる。

$$\begin{cases} M_P \ddot{r}_F + M_P K_{rD} \ddot{r}_F + M_P K_{rP}(r_F - r_{Fd}) \\ \quad - M_P K_{rD} \dot{r}_F = M_P \ddot{r}_{Fd} - A_F^T \Delta \lambda \\ M_O \ddot{r}_O + \Delta N_O = A_O^T \Delta \lambda \end{cases} \quad (16)$$

式 (16) は、ボール&ビームに手先空間での加速度のフィードフォワード付きの PD 制御を行った後に、加速度を新しい入力とした式が導かれる。式 (16) の対象物とビームの運動方程式をまとめて表現する。

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + N(\Delta r_F) + D(\Delta \dot{r}_F) = B \ddot{r}_{Fd} - A^T \Delta \lambda \quad (17)$$

ただし、

$$M := b.d.(M_P, M_O) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}, C := b.d.(M_P K_{rD}, 0) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}, N := [M_P K_{rP} \Delta r_F \quad \Delta N_O]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}, D := [-M_P K_{rD} \dot{r}_F \quad 0]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}, B := [M_P \quad 0]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 3}, A^T := [A_F^T \quad -A_O^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 2}$$

4.5 運動の自由度と制御変数

3 自由度マニピュレータのディスクバランシングシステムは各関節の 3 自由度とディスク空間上での位置とビーム姿勢の 3 自由度を合わせた 6 自由度である。拘束式の式 (4) が 2 本の方程式であることから、システム全体の式 (8)(9) は、4 自由度である。したがって、ディスクの空間上の位置、ディスクのビーム上の位置とビームの姿勢角から制御変数 x_c は、

$$x_c := [{}^B p_O \quad \alpha_F \quad \phi_F]^T \in \mathbb{R}^4 \quad (18)$$

である。一般化座標の速度 \dot{q} を制御変数の速度 \dot{x}_c を用いて以下のように表現出来る。

$$\dot{q} = S(x_c) \dot{x}_c \quad (19)$$

$$S := \begin{bmatrix} I_2 & -{}^B R_F e_x & -R(\frac{\pi}{2}) {}^B R_F {}^F p_O \\ 0_{1 \times 2} & 0 & 1 \\ I_2 & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & -\frac{1}{r_O} & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 4}$$

$$AS(x_c) = 0, S(x_c) = \begin{bmatrix} S_F \\ S_O \end{bmatrix} \quad (20)$$

である。

4.6 制御変数に関する運動方程式

運動方程式の式 (17) に左から S^T をかけて $\Delta \lambda$ を消去し、制御変数式 (18) に関する運動方程式に変換する。

$$M_c(x_c) \ddot{x}_c + C_c(x_c, \dot{x}_c) \dot{x}_c + N_c(x_c, \Delta r_F, \dot{r}_{Fd}) = B_c(x_c) \ddot{r}_{Fd} \quad (21)$$

ただし、 $M_c(x_c) := S^T M S$,

$$C_c(x_c, \dot{x}_c) := S^T (M \dot{S} + C S), N_c(x_c, \Delta r_F, \dot{r}_{Fd}) := S^T (N + D), B_c(x_c) := S^T B$$

4.7 手先軌道を用いたボールの安定化

状態変数として目標値と手先の偏差 Δr_F と目標値の速度 \dot{r}_{Fd} の入力を新しく定義する.

$$\begin{cases} x := (x_c, \dot{x}_c, \Delta r_F, \dot{r}_{Fd}) \in \mathbb{R}^4 \\ u := \ddot{r}_{Fd} \in \mathbb{R}^3 \end{cases} \quad (22)$$

式 (21) を状態方程式に変換する. 式 (22) の変数を安定させるような手先の加速度入力を求めるための, 非線形状態方程式を得る.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (23)$$

制御系設計のため, 式を状態量の原点 (x^e, u^e) の近傍で線形化する. $(x^e, u^e) = (0, 0)$ である. 平衡点まわりの線形化を行うことで, 以下の線形システムを得る.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (24)$$

LQ 最適制御を用いて, 評価関数を最小にするような制御則を求める.

$$J := \int_0^{\infty} (x_e^T Q x_e + u^T R u) dt \quad (25)$$

求めた u を積分することで目標手先位置 r_{Fd} を求める. ここで, マニピュレータの手先の速度および関節の速度との関係は,

$$\dot{q}_{Fd} = J_F(q_{Fd})\dot{r}_{Fd} \quad (26)$$

である. J_F は, マニピュレータのヤコビ行列である. \dot{q}_F を積分することで各関節の目標角度を得る.

5 シミュレーション

5.1 パラメータの設定

数値シミュレーションにおけるマニピュレータの物理パラメータは次のように設定される. リンクの長さ $L_i = 0.5[\text{m}]$, 質量 $m_F = 0.5[\text{kg}]$, 慣性モーメント $J_{Fi} = \frac{1}{12}m_{Fi}L_i^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ($i = 1, 2, 3$) である. 対象物のパラメータ $r_O = 0.05[\text{m}]$, $m_O = 0.1[\text{kg}]$ に設定され, $J_O = \frac{1}{m_O}r_O^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ である. マニピュレータの初期値は, $q_F(0) = [135, -90, -45]^T[\text{deg}]$, であり, ビームの姿勢角の初期値は, $\phi_F(0) = 0[\text{deg}]$ である. 接触座標の初期値 $\alpha_F = 0.1[\text{m}]$ および $\alpha_O = -90[\text{deg}]$ に設定される.

5.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 3 に示す. シミュレーション時間は, $10[\text{s}]$ とした. 図 3 より, 赤い点線は目標値を示しており, 接触座標 α_F は原点に収束している. また, 関節角についても目標値に追従していることが分かる.

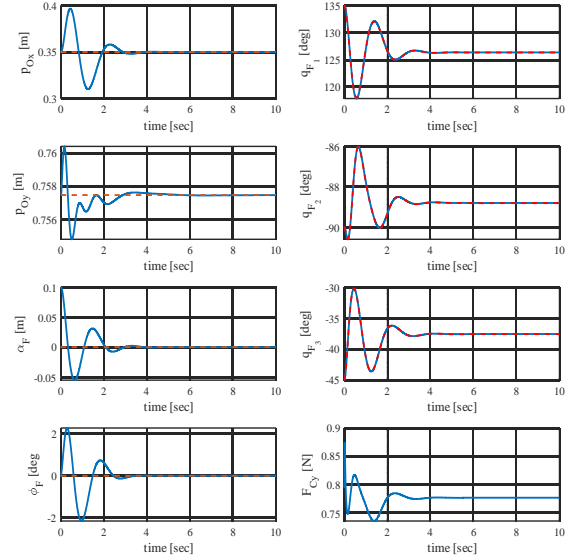


図 3 シミュレーション結果

6 おわりに

本研究では, 完全には把持しない, 非拘束な把持を実現することを目指して, ボール・ビーム系におけるボールのバランスを達成する制御系設計を行った.

今後の課題については, 実験環境で制御することを目指す.

参考文献

- [1] F. Ruggiero, V. Lippiello, and B. Siciliano, “Nonprehensile Dynamic Manipulation: A Survey,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 1711–1718, 2018.
- [2] K. Ryu and Y. Oh, “Balance control of ball-beam system using redundant manipulator,” in *IEEE International Conference on Mechatronics*. IEEE, 2011, pp. 403–408.
- [3] 2次元/3次元リアルタイムトラッカー Radish/2D/3D <https://www.library-inc.co.jp/>
- [4] A. Nakashima, “Control of Nonprehensile Manipulation with Ball-Beam System: Palm Circle of Contact Juggling,” in *Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, sep 2019, pp. 1631–1636.
- [5] A. Nakashima, “A Control Method for Palm Circle Task on Contact Juggling of a Ball by a 3-DOF Manipulator,” in *Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, sep 2020, pp. 1094 - 1099