# 視覚情報を用いたマニピュレータによるボールの打ち上げ

2015SC028 石黒太雅 2015SC055 松永純弥 2015SC110 吉田樹

指導教員：中島明

## 1　はじめに

近年, 工場内において同一で単純な作業を繰り返すだけであったマニピュレータは視覚情報を取得することで複雑な作業を行うことが可能となった.

本研究では，マニピュレータを利用して行うことが出来る多様なタスクの中から卓球に関するタスクを取り上げる．マニピュレータに取り付けたラケットを使ってボールの打ち上げを実現するために, モーションキャプチャを用いて計測して得られるボールの位置を基に，マニピュレータの制御を行う.

また, 6 自由度のマニピュレータについて，3 次元空間内におけるシミュレーションを作成した．その後, 実験機で重力補償を行い, より精度の高い制御を行うためにパラメータ同定を行った.

## 2　実験環境

### 2.1　ロボットアームと座標系の設定

本研究で用いられるロボットアームである MOTOMAN-HP3J の座標系を図 1 の $\Sigma_0$〜$\Sigma_7$ のように定義する.

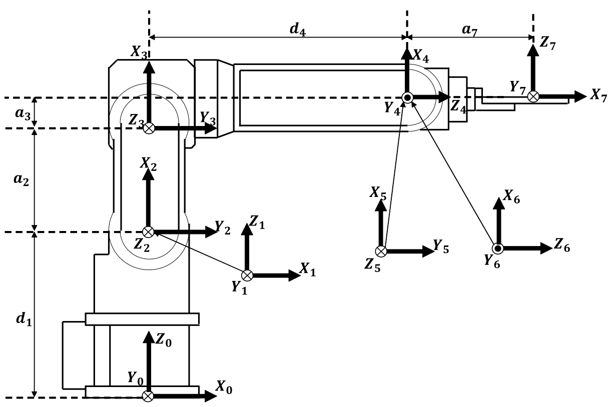


図 1　アームのフレーム配置

### 2.2　モーションキャプチャー

OptiTrack は赤外線 LED を搭載したカメラと 3 次元トラッキングソフトウェアからなる光学式のモーションキャプチャシステムであり, 対象を 3 基の赤外線カメラで撮影し, 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．カメラのフレームレートは最大 240 fps であり, 計測範囲は水平方向 82 度, 垂直方向 70 度の空間である [9].

## 3　モデリング

### 3.1　順運動学

図 1 の各座標系間の同次変換行列を求め，順運動学を解くことでアームの手先位置 $p$ を求める．ただしアームの第 $i$ 軸の関節角を $q_i$ とし，$C_i := \cos(q_i)$，$S_i := \sin(q_i)$ と表記する．さらに図 1 のように各座標系間の距離を $d_1$，$d_4$，$a_2$，$a_3$，$a_7$ とおく．具体的な値は表 1 に示す.

表 1　各座標パラメータ

| 文字 | 座標間距離 [m] |
|---|---|
| $d_1$ | 0.2900 |
| $d_4$ | 0.2700 |
| $a_2$ | 0.2600 |
| $a_3$ | 0.0300 |
| $a_7$ | 0.1315 |

アームのフレーム配置 $\Sigma_0$〜$\Sigma_7$ の同次変換行列を以下に示す.

$$ {}^0T_7 = \begin{bmatrix} {}^0R_7 & {}^0p_7 \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

このとき, 手先位置は ${}^0p_7$ である.

${}^0T_7$ は, ${}^0T_7 = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3{}^3T_4{}^4T_5{}^5T_6{}^6T_7$ で計算でき, 各同次変換行列を以下のように示される.

$$ {}^iT_{i+1} = \begin{bmatrix} {}^iR_{i+1} & {}^ip_{i+1} \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(i=0,1,2,3,4,5,6)}$$

隣り合う座標系ごとの位置と姿勢の関係は以下のように示される.

$$ {}^0R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^0p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$ {}^1R_2 = \begin{bmatrix} S_2 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ C_2 & -S_2 & 0 \end{bmatrix} {}^1p_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$ {}^2R_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^2p_3 = \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$ {}^3R_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -S_4 & -C_4 & 0 \end{bmatrix} {}^3p_4 = \begin{bmatrix} a_3 \\ d_4 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$ {}^4R_5 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ S_5 & C_5 & 0 \end{bmatrix} {}^4p_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$
{}^5R_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -S_6 & -C_6 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^5p_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}
$$

$$
{}^6R_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^6p_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_7 \end{bmatrix} \tag{8}
$$

### 3.2　逆運動学

手先の位置 ${}^0p_7$ と手先の姿勢を回転行列 ${}^0R_7$ で与え，逆運動学を解くことで各関節角を求める．
本研究では，手先の姿勢を表すのに，Z-Y-X オイラー角を用いる．よって，アームの 0 座標系から 7 座標系への回転行列 ${}^0R_7$ は

$$
{}^0R_7 = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \tag{9}
$$

となる．
まず，$q_1$ について考える．
手先位置 ${}^0p_7$ と回転行列 ${}^0R_7$ は以下の関係が成り立つ．

$$
\begin{bmatrix} {}^0p_7 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0p_6 \\ 0_{1\times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^6p_7 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{10}
$$

$$
{}^0R_7 = {}^0R_6\,{}^6R_7 \tag{11}
$$

ここで，${}^0p_6$，${}^0R_6$ は式 (10)，式 (11) より，

$$
{}^0p_6 = {}^0p_7 - {}^0R_6\,{}^6p_7 \tag{12}
$$

$$
{}^0R_6 = {}^0R_7\,{}^6R_7^{-1} \tag{13}
$$

と与えられる．
よって，$\Sigma_0$ を基準として考え，$\Sigma_0$ から見た第 2 軸原点から第 6 軸原点までの位置ベクトル ${}^0p_{26}$ は

$$
{}^0p_{26} = {}^0p_6 - {}^0p_1 \tag{14}
$$

となる．以降は式 (14) の $(x, y, z)$ 成分をそれぞれ $p_x$，$p_y$，$p_z$ と表記する．$\Sigma_0$ の Z 座標系からアームのフレーム配置を考慮すると，図 2 のようになる．

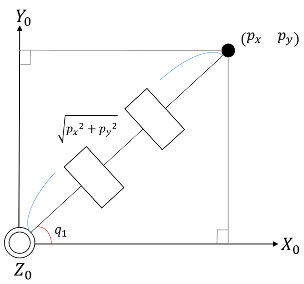


図 2　第一関節の逆運動学

図 2 より，$(x, y)$ 平面への投影を考えると，4 象限逆正接関数 atan2 を用いて $q_1$ は

$$
q_1 = \mathrm{atan2}(p_y, p_x) \tag{15}
$$

で与えられる．

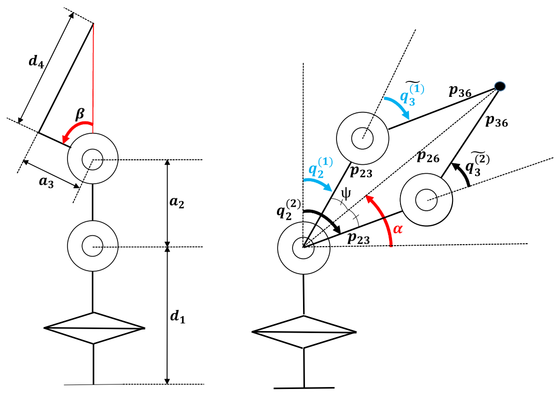


図 3　左:第三関節の初期姿勢 右:逆運動の概略図

逆運動学において，アームの姿勢は図 3 のように 2 通り考えられる．図 3 の ${}^0p_{23}$,${}^0p_{26}$,${}^0p_{36}$ の三角形を利用して，$q_2$,$q_3$ を求める.2 つの姿勢のうち，$q_2^{(1)}$ について考える．
$||{}^0p_{23}||, ||{}^0p_{26}||, ||{}^0p_{36}||$ は図 1，図 3 より，

$$
||{}^0p_{23}|| = a_2 \tag{16}
$$

$$
||{}^0p_{26}|| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}, \tag{17}
$$

$$
||{}^0p_{36}|| = \sqrt{a_3^2 + d_4^2}, \tag{18}
$$

で与えられる．
図 3 の $\psi$ について，${}^0p_{23}$,${}^0p_{26}$ のなす角を $\psi$ とおき，$\psi$ についての余弦定理を考えると

$$
\cos(\psi) = \frac{||{}^0p_{23}||^2 + ||{}^0p_{26}||^2 - ||{}^0p_{36}||^2}{2||{}^0p_{23}||||{}^0p_{26}||} \tag{19}
$$

となるから，$\psi$ は

$$
\psi = \arcsin\frac{||{}^0p_{23}||^2 + ||{}^0p_{26}||^2 - ||{}^0p_{36}||^2}{2||{}^0p_{23}||||{}^0p_{26}||} \tag{20}
$$

となる．よって，図 3 から $q_2$ は

$$
q_2 = \frac{\pi}{2} - (\alpha \pm \psi) \tag{21}
$$

で与えられる．ここで $\alpha$ は

$$
\alpha = \mathrm{atan2}(p_z, \sqrt{p_x^2 + p_y^2}) \tag{22}
$$

を満たす角度である．
次に，$q_3$ を導出する．
図 3 のように第二関節の鉛直上に先端がくるような姿勢を初期姿勢とすると $q_3$ は

$$
q_3 = -\beta \tag{23}
$$

となる．

ここで, 初期姿勢が 0[deg] であるように座標変換した値を $\tilde{q}_3$ とすると, $\tilde{q}_3$ は,

$$\tilde{q}_3 = q_3 + \beta \tag{24}$$

となる.
同様に図 3 の第 3 関節が関わる角度について余弦定理を考えると, 以下のようになる.

$$\cos(\pi - \tilde{q}_3^{(1)}) = \frac{||{}^0p_{23}||^2 + ||{}^0p_{36}||^2 - ||{}^0p_{26}||^2}{2||{}^0p_{23}||\,||{}^0p_{36}||} \tag{25}$$

$$\tilde{q}_3^{(1)} = \arccos\frac{||{}^0p_{23}||^2 + ||{}^0p_{36}||^2 - ||{}^0p_{26}||^2}{2||{}^0p_{23}||\,||{}^0p_{36}||} \tag{26}$$

$$\tilde{q}_3^{(2)} = -\tilde{q}_3^{(1)} \tag{27}$$

ここで式 (26) の右辺を $q_3^*$ とおくと, $q_3$ は

$$q_3 = \pm q_3^* - \beta \tag{28}$$

をなり, $\beta$ は

$$\beta = \mathrm{atan2}(d_4, a_3) \tag{29}$$

と表される.
以上で求めた角度 $q_1, q_2, q_3$ をそれぞれ $q_1^*$,$q_2^*$,$q_3^*$ とし, それを用いて第 4 関節以降の角度を計算する.
回転行列 ${}^0R_7$ は以下の関係が成り立つ.

$${}^0R_7 = {}^0R_3\,{}^3R_6 \tag{30}$$

${}^3R_6$ について解くと,

$${}^3R_6(q_4, q_5, q_6) = {}^0R_3^{-1}(q_1^*, q_2^*, q_3^*)\,{}^0R_6 \tag{31}$$

であり, 式 (31) の左辺は回転行列の積により

$${}^3R_6 = \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & -C_4S_5 \\ S_5C_6 & -S_5S_6 & C_5 \\ -S_4C_5C_6 - C_4S_6 & S_4C_5S_6 - C_4C_6 & S_4S_5 \end{bmatrix} \tag{32}$$

で与えられる. 式 (31) の右辺を以下のように置く.

$${}^0R_3^{-1}(q_1^*, q_2^*, q_3^*)\,{}^0R_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{33}$$

$q_5$ を考える. 式 (32), 式 (33) の (2,1),(2,2) 成分の 2 乗を計算し, (2,3) 成分を見比べると

$$\begin{cases} S_5 = \pm\sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2} \\ C_5 = r_{23} \end{cases} \tag{34}$$

を満たす. 従って $q_5$ は

$$q_5 = \mathrm{atan2}\,(S_5, C_5) \qquad (\text{ただし}, q_5 \neq 0)$$

で与えられる.

$q_4$ を考える. 式 (32), 式 (33) の (1,3),(3,3) 成分を計算すると, $q_4$ は

$$\begin{cases} -C_4S_5 = r_{13} \\ S_4S_5 = r_{31} \end{cases} \tag{35}$$

を満たす. 従って $q_4$ は,

$$q_4 = \mathrm{atan2}\left(\frac{r_{31}}{S_5}, -\frac{r_{13}}{S_5}\right) \qquad (\text{ただし}, q_5 \neq 0)$$

で与えられる.
$q_6$ を考える. 式 (32), 式 (33) の (2,1),(2,2) 成分を計算すると, $q_6$ は

$$\begin{cases} S_5C_6 = r_{21} \\ -S_5C_6 = r_{22} \end{cases} \tag{36}$$

を満たす. 従って $q_6$ は,

$$q_6 = \mathrm{atan2}\left(-\frac{r_{22}}{S_5}, \frac{r_{21}}{S_5}\right) \qquad (\text{ただし}, q_5 \neq 0)$$

で与えられる.
$q_5 = 0$ になる場合を考えると,

$$\begin{cases} S_4C_6 + C_4S_6 = -r_{12} = -r_{31} \\ C_4C_6 - S_4S_6 = r_{11} = -r_{32} \end{cases} \tag{37}$$

が成り立つ. ここで三角関数の和の公式より,

$$\begin{cases} \sin(q_4 + q_6) = -r_{12} = -r_{31} \\ \cos(q_4 + q_6) = r_{11} = -r_{32} \end{cases} \tag{38}$$

を満たす. 式 (38) 式の上の式を $a$, 下の式を $b$ とおくと,

$$q_4 + q_6 = \mathrm{atan2}\,(a, b) \tag{39}$$

となることから, $q_4$, $q_6$ は和の形でしか求まらず $q_4$, $q_6$ の値は定まらない. つまりマニピュレータの特異点となる. そのため, 実際にマニピュレータを制御する際は $q_5 = 0$ となった場合に $q_4 = q_6 = 0$ とした.

## 4 運動方程式の導出

参考文献 [1][2][3][4][5] を参考に 6 自由度のロボットアームの運動方程式の導出を行う.
慣性テンソル $I_c$ の各成分は, 以下のように示される.

$$I_c = \begin{bmatrix} I_{cxx} & I_{cxy} & I_{cxz} \\ I_{cyx} & I_{cyy} & I_{cyz} \\ I_{czx} & I_{czy} & I_{czz} \end{bmatrix} \tag{40}$$

並進速度に関するヤコビ行列を $J_{cvi}(q)$ とおき, 回転速度に関するヤコビ行列を $J_{c\omega i}(q)$ とおくと, 並進と回転のヤコビアンは以下のように示される.

$$\begin{cases} {}^0v_{ci} = J_{cvi}(q)\dot{q} & (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \\ {}^0\omega_{ci} = J_{c\omega i}(q)\dot{q} & (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \end{cases} \tag{41}$$

$\Sigma_0$ から見た各リンクの重心の角速度ベクトル ${}^0\omega_{ci}$ を, 回転行列 ${}^0R_i$ を用いて各リンクから見た各リンクの重心の角速度ベクトル ${}^i\omega_{ci}$ に変換する. 各リンクの慣性テンソルと

ヤコビアンより, 運動エネルギーは以下のようになる. (ただし $i=1,2,3,4,5,6$ とする)

$$T_i = \frac{1}{2} m_i {}^0v_{ci}^T {}^0v_{ci} + \frac{1}{2} {}^i\omega_{ci}^T I_{ci} {}^i\omega_{ci} \tag{42}$$

第 $i$ リンクの重心位置の $z$ 成分を $p_{czi}$ とおくと, ポテンシャルエネルギーは以下のようになる. (ただし $i=1,2,3,4,5,6$ とする)

$$U_i = m_i g {}^0p_{czi} \tag{43}$$

運動エネルギー $T$ と, ポテンシャルエネルギー $U$ より, ラグランジアンは以下のようになる.

$$L = T - U \tag{44}$$

よって, ラグランジの方程式は以下のようになる.

$$M(q)\ddot{q} + h(q,\dot{q}) + g(q) = \tau \tag{45}$$

## 5 パラメータ同定

### 5.1 基底パラメータによる運動方程式の表現

参考文献 [6][7][8] を参考に $0,1,2$ 次モーメントを導入しパラメータ同定をする為の運動方程式を導出した. ロボットアームのリンクを手先位置に向かって 1, 2, 3, 4, 5, 6 と番号をつける. 各リンクより先の質量の合計を 0 次モーメントで $\bar{m}_i$, 質量と位置の積を 1 次モーメントで ${}^0\bar{p}_i$, 慣性モーメントを 2 次モーメントで ${}^iJ_i$, 0 座標系から見た $i$ 座標系から $j$ 座標系のベクトルを ${}^0p_{j,i}$ とし, パラメータを定義する. ただし, 和の記号で下の数字が上の数字を上回る場合は 0 とする.

$$\bar{m}_i = \sum_{j=i}^{6} m_j \tag{46}$$

$${}^0\bar{p}_i = \bar{m}_{i+1} {}^0p_{i+1} + m_i {}^0p_{ci} \tag{47}$$

$$S_{{}^0\bar{p}_i} = \sum_{j=i}^{6} {}^0\bar{p}_i \tag{48}$$

$${}^iJ_i = {}^iI_i + \bar{m}_{i+1}\{({}^ip_i^T {}^ip_i)E - {}^ip_i {}^ip_i^T\} \tag{49}$$

$${}^0p_{j,i} = \sum_{s=j}^{i-1} {}^0p_{s,s+1} \tag{50}$$

上式を用いて, 運動方程式は以下のように求められる.

$$\sum_{j=1}^{6} M(i,j)\ddot{\theta}_j + \sum_{j=1}^{6}\sum_{k=1}^{6}\left(\frac{\partial M(i,j)}{\partial\theta_k} - \frac{\partial M(k,j)}{2\partial\theta_i}\right)\dot{\theta}_k\dot{\theta}_j - z_i(S_{{}^0\bar{p}_i} \times g^T) = \tau_i$$

$$1 \le j \le i \le 6, M(i,j) = M(j,i) \tag{51}$$

ただし, $g$ は重力ベクトルである.
参考文献 [6][7][8] に従い運動方程式を整理すると, 同定できる最小の基底パラメータに関する式表現が求まる. 基底パラメータ $\psi$ を以下の様に示す.

$\psi_1 = {}^1J_{1zz} + {}^2J_{2yy} + {}^3J_{3yy} + 2\,{}^2p_{3z}{}^3\bar{p}_{3z}$
$\psi_2 = {}^2J_{2zz}$
$\psi_3 = {}^2\bar{p}_{2x}$
$\psi_4 = {}^2\bar{p}_{2y}$
$\psi_5 = {}^3J_{3zz} + {}^4J_{4yy}$
$\psi_6 = {}^3\bar{p}_{3x}$
$\psi_7 = {}^3\bar{p}_{3y} - {}^4\bar{p}_{4z}$
$\psi_8 = {}^4J_{4zz} + {}^5J_{5yy}$
$\psi_9 = {}^4\bar{p}_{4x}$
$\psi_{10} = {}^4\bar{p}_{4y} - {}^5\bar{p}_{5z}$
$\psi_{11} = {}^5J_{5zz} + {}^6J_{6yy}$
$\psi_{12} = {}^5\bar{p}_{5x}$
$\psi_{13} = {}^5\bar{p}_{5y} - {}^6\bar{p}_{6z}$
$\psi_{14} = {}^6J_{6zz}$
$\psi_{15} = {}^6\bar{p}_{6x}$
$\psi_{16} = {}^6\bar{p}_{6y}$
$\psi_{17} = {}^2J_{2xx} - {}^2J_{2yy}$
$\psi_{18} = {}^2J_{2xz} - {}^2p_{3x}{}^3\bar{p}_{3z}$
$\psi_{19} = {}^2J_{2xy}$
$\psi_{20} = {}^2J_{2yz}$
$\psi_{21} = {}^3J_{3xx} - {}^3J_{3yy} + {}^4J_{4yy}$
$\psi_{22} = {}^3J_{3xz}$
$\psi_{23} = {}^3J_{3xy} + {}^3p_{4x}{}^4\bar{p}_{4z}$
$\psi_{24} = {}^3J_{3yz} + {}^3p_{4z}{}^4\bar{p}_{4z}$
$\psi_{25} = {}^4J_{4xx} - {}^4J_{4yy} + {}^5J_{5yy}$
$\psi_{26} = {}^4J_{4xz}$
$\psi_{27} = {}^4J_{4xy} + {}^4p_{5x}{}^5\bar{p}_{5z}$
$\psi_{28} = {}^4J_{4yz} + {}^4p_{5z}{}^5\bar{p}_{5z}$
$\psi_{29} = {}^5J_{5xx} - {}^5J_{5yy} + {}^6J_{6yy}$
$\psi_{30} = {}^5J_{5xz}$
$\psi_{31} = {}^5J_{5xy} + {}^5p_{6x}{}^6\bar{p}_{6z}$
$\psi_{32} = {}^5J_{5yz} + {}^5p_{6z}{}^6\bar{p}_{6z}$
$\psi_{33} = {}^6J_{6xx} - {}^6J_{6yy}$
$\psi_{34} = {}^6J_{6xz}$
$\psi_{35} = {}^6J_{6xy}$
$\psi_{36} = {}^6J_{6yz}$
$\psi_{37} = d_1$
$\psi_{38} = d_2$
$\psi_{39} = d_3$
$\psi_{40} = d_4$
$\psi_{41} = d_5$
$\psi_{42} = d_6$
$\psi_{43} = \tau_{fk1}$
$\psi_{44} = \tau_{fk2}$
$\psi_{45} = \tau_{fk3}$
$\psi_{46} = \tau_{fk4}$
$\psi_{47} = \tau_{fk5}$
$\psi_{48} = \tau_{fk6}$
$\psi_{49} = \tau_{fs1}$
$\psi_{50} = \tau_{fs2}$
$\psi_{51} = \tau_{fs3}$
$\psi_{52} = \tau_{fs4}$
$\psi_{53} = \tau_{fs5}$
$\psi_{54} = \tau_{fs6}$

参考文献 [6][7][8] より求められる基底パラメータ, 粘性摩擦, 摩擦より基底パラメータ $\psi$ を,

$$\psi_m = [\psi_1, \cdots, \psi_{36}]^T, \psi_{fk} = [d_1, \cdots, d_6\tau_{fk1}, \cdots \tau_{fk6}]^T,$$

$$\psi_{fs} = [\tau_{fs1}, \cdots, \tau_{fs6}]^T$$

のように定義する.
式 (51) と基底パラメータ $\psi$ よりパラメータ同定をする為の運動方程式は粘性摩擦係数 $D$, 摩擦 $E(\dot{q},q)$, ギア比 $G$ を用いて以下のように示される.

$$M(q;\psi_m)\ddot{q} + h(q,\dot{q};\psi_m) + g_t(q;\psi_m) + D\dot{q} + E(\dot{q},q) = G^T\tau \tag{52}$$

$$E_i(\dot{q},q) = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}$$

$$E_i(\dot{q},q) = \begin{cases} \tau_{fki}\mathrm{sgn}(\dot{q}_i) & \text{if} \quad \dot{q}_i \neq 0 \\ \pm\tau_{fsi} & \text{if} \quad \dot{q}_i = 0 \end{cases} \quad (\mathrm{i} = 1,2,3,4,5,6)$$

式 (52) を書き直すとパラメータ同定するための式が以下のように 2 つ求まる.

1. $\dot{q} \neq 0$ のとき

$$A(q,\dot{q},\ddot{q}) \begin{bmatrix} \psi_{fm} \\ \psi_{fk} \end{bmatrix} = Z \tag{53}$$

2. $\dot{q} = 0, \ddot{q} = 0$ のとき

$$A(q) \begin{bmatrix} \psi_{fm} \\ \psi_{fs} \end{bmatrix} = Z \tag{54}$$

### 5.2 パラメータ同定の手法

静止摩擦と重力項に関わるパラメータは, ロボットアームを適当な姿勢で静止させ, そのときの角度と釣合いトルクとを測定する静力学試験から求める.

### 5.3 パラメータ同定結果

静力学試験により求めた重力項と静止摩擦に関わるパラメータの推定結果を表 2 に示す.

表 2 推定結果

| パラメータ | 変数 | 推定値 |
|---|---|---|
| $\psi_3$ | ${}^2\bar{p}_{2x}$ | 3.727[kg·m] |
| $\psi_4$ | ${}^2\bar{p}_{2y}$ | 0.1809[kg·m] |
| $\psi_6$ | ${}^3\bar{p}_{3x}$ | 0.05541[kg·m] |
| $\psi_7$ | ${}^3\bar{p}_{3y}$ | -1.372[kg·m] |
| $\psi_9$ | ${}^4\bar{p}_{4x}$ | 0.2392[kg·m] |
| $\psi_{10}$ | ${}^4\bar{p}_{4y} - {}^5\bar{p}_{5z}$ | 0.03413[kg·m] |
| $\psi_{12}$ | ${}^5\bar{p}_{5x}$ | 0.3039[kg·m] |
| $\psi_{13}$ | ${}^5\bar{p}_{5y} - {}^6\bar{p}_{6z}$ | -0.2928[kg·m] |
| $\psi_{15}$ | ${}^6\bar{p}_{6x}$ | 0.06363[kg·m] |
| $\psi_{16}$ | ${}^6\bar{p}_{6y}$ | -0.03253[kg·m] |
| $\psi_{49}$ | $\tau_{fs1}$ | 4.292[N·m] |
| $\psi_{50}$ | $\tau_{fs2}$ | 7.504[N·m] |
| $\psi_{51}$ | $\tau_{fs3}$ | 4.533[N·m] |
| $\psi_{52}$ | $\tau_{fs4}$ | 3.429[N·m] |
| $\psi_{53}$ | $\tau_{fs5}$ | 3.439[N·m] |
| $\psi_{54}$ | $\tau_{fs6}$ | 1.967[N·m] |

静止摩擦は, 各軸同じモータを使っており, ギア比に多少の違いがあるためずれはあるが近い値であるのでおかしくない結果が得られた. 重力項に関わるパラメータについては推定したパラメータを基に実験機で重力補償を行い, かつロボットアームは各軸対称性のあるリンクをしているため機構的に妥当な結果が得られたと考察した.

## 6 アーム関節の PID 制御

各関節角をフィードバックし, 各モータの角度を PID 制御するブロック線図を図 4 に示す.

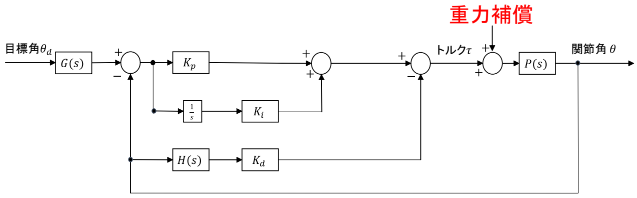


図 4 ブロック線図

目標値から軌道生成する伝達関数 $G(s)$ と疑似微分フィルタ $H(s)$ は以下のようにした.

$$G(s) = \left(\frac{1}{Ts+1}\right)^2, H(s) = \frac{6}{s+6}s \tag{55}$$

$P(s)$ は制御対象である. モーションキャプチャーから得られるマーカーの $(x,y,z)$ 座標を基に逆運動学で各関節角を求め, それを目標値としている.

## 7 ラケット位置 · 姿勢制御系の設計

この章では文献 [10] を参考にボールの打ち上げと安定化を実現するためにラケットの位置 · 姿勢に対する制御方針を考える.

### 7.1 ラケット位置制御系の設計

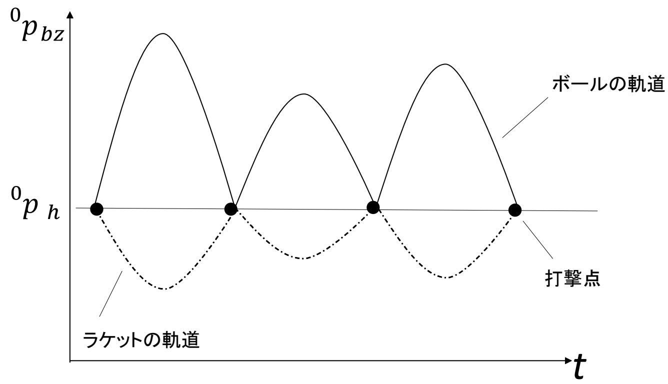


図 5 ラケット位置制御

図 5 にあるように, ラケットの目標位置の $z$ 座標については任意に設定した打撃面 ${}^0p_h$ を対称として, ボールの $z$ 座標を反転したものと, 適当なゲイン $k_h$ との積を目標値としている. ラケットの目標位置の $(x,y)$ 座標についてはボールの $(x,y)$ 座標を目標位置としボールに追従する. 従って

ラケットの目標位置 ${}^0p_d$ は以下の式 (56) で与えられる．

$$
{}^0p_d = \begin{bmatrix} {}^0p_{bx} \\ {}^0p_{by} \\ {}^0p_h - k_h({}^0p_{bz} - {}^0p_h) \end{bmatrix} \tag{56}
$$

ここでボールの位置座標を $\begin{bmatrix} {}^0p_{bx} & {}^0p_{by} & {}^0p_{bz} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ とし, $k_h$ はラケットの $z$ 方向の軌道を押さえる正の定数とする．

### 7.2　ラケット姿勢制御系の設計

ラケットの目標姿勢についてはボールの基準点からの $y$ 方向のズレを修正するために, ラケットの初期位置の $y$ 座標 ${}^0p_y$ と, ボールの $y$ 座標の差と, 適当なゲイン $k_x$ の積をラケットの $x$ 軸周りの目標姿勢とした．同様に, ボールの基準点からの $x$ 方向のズレを修正するために, ラケットの初期位置の $x$ 座標 ${}^0p_x$ とボールの $x$ 座標の差と, 適当なゲイン $k_y$ の積をラケットの $y$ 軸周りの目標姿勢とした．また手先のラケットを円筒形で自然に動したいため, ボールの $(x, y)$ 座標のなす角度をラケットの $z$ 軸周りの目標姿勢とした．従ってラケットの目標姿勢 ${}^0\theta_d$ は以下の式 (57) のようにしている．

$$
{}^0\theta_d = \begin{bmatrix} -k_x({}^0p_{by} - {}^0p_y) \\ k_y({}^0p_{bx} - {}^0p_x) \\ \mathrm{atan2}({}^0p_{by}, {}^0p_{bx}) \end{bmatrix} \tag{57}
$$

## 8　実験結果

### 8.1　マーカーを用いた実験

この節では 7 章の制御系でマーカーを動かしたときの実験結果を示す．ラケットが水平となるように打ち上げの際の初期姿勢 $q = [0 \quad 60 \quad 10 \quad 0 \quad -70 \quad 0]^T$[deg] としており, その時 ${}^0p_x = 0.459$[m], ${}^0p_y = 0$[m] である．今回, 打撃面の高さは ${}^0p_h = 0.2$[m] とした．また, 上記の各ゲインは $k_h = 0.25$, $k_x = k_y = \frac{20}{180}\pi$[rad/m] としている．

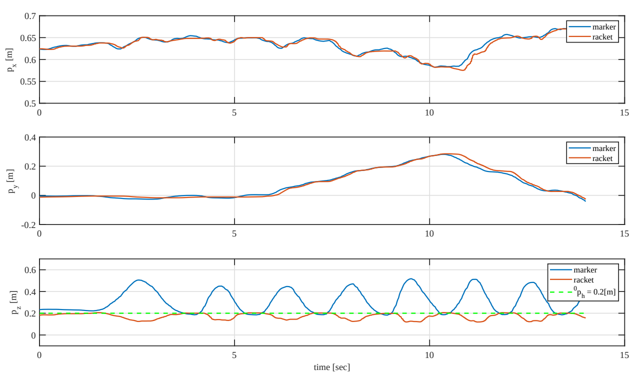


図 6　tracking

図 6 から分かるようにラケットの $x, y$ 座標はマーカーに追従している．ラケットの $z$ 座標については, マーカーの $z$ 座標を反転し, $k_h$ 倍した値となっていることが確認でき, 理想とする制御が実現できていることが分かる．次の節では, 実際に卓球ボールを用いた実験について述べる．

### 8.2　実際の卓球ボールによる打ち上げ結果

卓球ボールの打ち上げの実験を行ったが数回程度しか成功していない．その問題点としては, モーションキャプチャから得られるデータの転送に遅れが生じていることや, またラケット接合部がしなることによりボールの反発係数が低くなることが挙げられる．

## 9　おわりに

今回, ボールを打ち上げるための制御系の設計を行い, マーカーを用いて想定通りの動作をしていることが確認できた．また, 実験で得られたデータを基にパラメータ同定をすることで, 重力項に関わるパラメータを求め, 重力補償を実現することが出来た．現状では打ち上げは数回程度しか出来ていないので, 今後は, ボールの打ち上げ実験をする際の問題点を改善し, 打ち上げ回数の向上を目指す．

## 参考文献

[1] 永井 清, 土橋 宏規 :「ロボティクスシリーズ 8　ロボット機構学」．コロナ社，東京，2015.

[2] John J.Craig :「ロボティクス-機構・力学・制御」．共立出版社，東京，2016.

[3] 吉川 恒夫 :「ロボット制御基礎論」．コロナ社，東京，2016.

[4] 小林 尚登，増田 良介 ほか :「ロボット制御の実際」．コロナ社，東京，2003.

[5] 美多 勉, 大須賀 公一 :「ロボット制御工学入門」．コロナ社，東京，1989.

[6] 吉田 浩治, 池田 展也, 前田 浩一 : “6 自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的研究”．日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.564-573, 1993.

[7] H. Maeda, K. Yoshida and K. Osuka : “Base Parameters of Manipulator Dynamic Models”．IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol.6, No.3, pp312-321, 1990.

[8] 前田 浩一 : “ロボットアームの動的モデルと同定”．日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp203-208, 1989.

[9] OptiTrack 社 http://www.mocap.jp/optitrack/index.html

[10] Akira Nakashima and Yoshikazu Hayakawa. : “Ping-Pong Ball Jugglings by Robot Manipulator based on Discrete Control System”．2006.