

# 移動冗長マニピュレータの拘束条件付手先軌道追従制御

## Hand- Trajectory Tracking Control of Mobile Redundant Manipulator with Constraints

学 鷲野 悠人(岡山大) 正 見浪 護(岡山大)  
片岡 秀美(岡山大) 正 矢納 陽(岡山大)

Yuto WASHINO, Okayama University, wasshi@suri.sys.okayama-u.ac.jp  
Mamoru MINAMI, Okayama University  
Hidemi KATAOKA, Okayama University  
Akira YANOU, Okayama University

Recently, multi- joint manipulator is mainly used on production sites, such as factories. It's redundancy increases according to the degree-of-freedom of manipulator. It becomes possible to do complicated work and the obstacle avoidance ability can be improved. But, because the weight of manipulator increases along with the number of links rising, the control energy increases in order to prevent a hand's accuracy from decreasing. Here, human-being's behavior that utilizes bracing motion for e.g., writing characters on a paper, can be put into manipulator's control strategy. We consider that consumption energy can be cut down by the bracing. And we also expect that the hand's accuracy can be improved by contacting with surrounding environment and the total of consumption energy will be able to decrease. In this paper, the validity of bracing an elbow is shown by simulations, by using mobile manipulator whose elbow is attached on the ground.

**Key Words:** Constraint condition, Electrical consumption, Hand accuracy

### 1. 緒 言

現在、工場などの生産現場を中心として人間の腕や手と似た形状を持った多関節マニピュレータが用いられている。この多関節マニピュレータは、自由度が多いほど冗長性が増し障害物を回避する能力が向上したり、複雑な作業をすることが可能になるというメリットがあるが、リンクの数が増えるほどリンクによりマニピュレータの自重が増し、重力によって下にさがってしまう。それによって、手先の精度が悪くなったり、制御時に消費されるエネルギーが増加してしまう。一方、人間の身体も自由度が多いが、日常生活において無意識のうちに効率のいい姿勢をとっている。例えば、紙に字を書く時には肘や手首を机に接触させることがあげられる。この場合接触させない場合よりも少ない力で丁寧に字を書くことができる。一般的にはマニピュレータなどの産業用ロボットは、周囲の環境の中で物体に接触しないで使用されるが、このような人間の動作を模倣し、冗長マニピュレータを周囲の環境に接触させることで作業を行うときにエネルギーの消費を減らすことができると考える。これが確立されれば、レスキューロボットや工場などの生産現場などで利用されているマニピュレータに応用することによってそれらの発展につなげることができる。

### 2. ハンド拘束運動

ここでは拘束面に接触しつつリンク先端のハンドで接触作業を行うロボットについて考える。\$q \in R^s\$ を一般化座標、\$\tau \in R^s\$ を一般化入力、\$f\_n\$ を効力、\$f\_t\$ を摩擦力とすると、ハンド拘束状態の運動方程式は、

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau + \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial q^T} \right)^T \left\| \frac{\partial C}{\partial r^T} \right\| \right\} f_n - \left( \frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}}{\|\dot{r}\|} f_t \quad (1)$$

と表される。ただし、\$M\$ は \$s \times s\$ の慣性行列、\$H\$ と \$G\$ はコリオリ力・遠心力と重力の影響を表す \$s \times 1\$ の縦ベクトル、\$D\$ は関節の粘性摩擦係数を表す \$s \times s\$ の対角行列 \$D = \text{diag}[D\_1, D\_2, \dots, D\_s]\$ である。ここで、手先の位置姿勢ベクトル \$r \in R^s\$ と超曲面を表すスカラー関数の拘束条件 \$C\$ は順運動学関係式より、

$$r = r(q) \quad (2)$$

$$C(r(q)) = 0 \quad (3)$$

と表される。ここで拘束されるハンドは作業座標系の中で非拘束方向に運動できる自由度が残されていることから \$s > 1\$ である。また、本論文では一般化座標 \$q\$ は関節角度、一般化入力 \$\tau\$ は入力トルクを表す。ここで効力 \$f\_n\$ と摩擦力 \$f\_t\$ は直行であり、かつ \$f\_t = K f\_n\$ (\$K\$ は比例定数: \$0 < K \le 1\$) の2つの関係を仮定する。

### 3. 肘つき拘束運動

\$s\$ リンクマニピュレータの中間リンクが \$p\$ 個の拘束

$$C_i(r_i(q)) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

を受けているときの運動方程式について考える。ここで \$r\_i\$ は拘束を受けている第 \$i\$ リンクの位置/姿勢を表す運動学方程式であり、式 (2) と同様、

$$r_i = r_i(q) \quad (5)$$

である。ただし、\$r\_i\$ は厳密には \$q\$ 全てには依存しない。

式 (1) は、ハンド拘束運動を表している。拘束条件が複数存在する場合には、式 (1) の右辺第 2 項の拘束力の係数ベクトルと右辺第 3 項の摩擦力の係数ベクトルはそれぞれ、

$$\left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right)^T \left\| \frac{\partial C_i}{\partial r_i^T} \right\| = j_{ci}^T \quad (6)$$

$$\left( \frac{\partial r_i}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}_i}{\|\dot{r}_i\|} = j_{ti}^T \quad (7)$$

の \$s \times 1\$ の縦ベクトルとなる。さらに、

$$J_c^T = [j_{c1}^T, j_{c2}^T, \dots, j_{cp}^T] \quad (8)$$

$$J_t^T = [j_{t1}^T, j_{t2}^T, \dots, j_{tp}^T] \quad (9)$$

$$f_n = [f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{np}]^T \quad (10)$$

$$f_t = [f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tp}]^T \quad (11)$$

と定義する。\$J\_c^T, J\_t^T\$ は \$s \times p\$ 行列であり、\$f\_n, f\_t\$ は \$p \times 1\$ の縦ベクトルである。これらを考慮すると、\$p\$ 個の点で中間リンクが拘束されているマニピュレータの運動方程式は、

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau + J_c^T f_n - J_t^T f_t \quad (12)$$

となる。また、式(4)を時間  $t$  で2回微分し、 $\ddot{q}$  の拘束条件を求めると、

$$\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \dot{q}^T} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \dot{q}^T} \right) \right] \dot{q} + \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \dot{q} = 0 \quad (13)$$

が得られる。マニピュレータが常に拘束面に拘束されるためには、式(12)の解  $q(t)$  が時間  $t$  に無関係に式(4)を満たさなければならない。式(4)の時間微分によって得られた式(13)を満たす  $\dot{q}$  と式(12)の  $\ddot{q}$  が同じ値をとるとき、式(12)の  $q(t)$  は式(4)を満たすことになる。

#### 4. モータを含めたロボットダイナミクス

本研究では、マニピュレータの関節を動かすのに使用するモータを直流サーボモータの等価な電子回路とする。ここで、モータの端子電圧  $v_i$ 、抵抗  $R_i$ 、インダクタンス  $L_i$ 、回路を流れる電流  $i_i$ 、モータの角変位  $\theta_i$ 、発生トルク  $\tau_{gi}$ 、負荷トルク  $\tau_{Li}$ 、逆起電力  $v_{gi}$ 、モータの慣性モーメント  $I_{mi}$ 、逆起電力定数  $K_{Ei}$ 、トルク定数  $K_{Ti}$ 、減速機の粘性摩擦係数  $d_{mi}$  とする。このときモータについて次の関係式が成り立つ。式(14)は電圧方程式、式(15)は逆起電力、式(16)は運動方程式、式(17)は発生トルクである。

$$v_i(t) = L_i \dot{i}_i + R_i i_i(t) + v_{gi}(t) \quad (14)$$

$$v_{gi}(t) = K_{Ei} \dot{\theta}_i(t) \quad (15)$$

$$I_{mi} \ddot{\theta}_i = \tau_{gi}(t) - \tau_{Li}(t) - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (16)$$

$$\tau_{gi}(t) = K_{Ti} i_i(t) \quad (17)$$

ただし、磁界と各定数との関係から直流モータでは、 $K_{Ti} = K_{Ei} (= K_i)$  であることが知られている。

ここで、式(15)を式(14)に、式(17)を式(16)にそれぞれ代入すると、

$$v_i = L_i \dot{i}_i + R_i i_i + K_i \dot{\theta}_i \quad (18)$$

$$I_{mi} \ddot{\theta}_i = K_i i_i - \tau_{Li} - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (19)$$

となる。また、モータを減速比が  $k_i$  の歯車列を介してマニピュレータに取り付けた場合、

$$\theta_i = k_i q_i \quad (20)$$

$$\tau_{Li} = \frac{\tau_i}{k_i} \quad (21)$$

となり、式(18)、式(19)を  $\dot{i}_i$  と  $\tau_i$  の式にすると、

$$L_i \dot{i}_i = v_i - R_i i_i - K_i k_i \dot{q}_i \quad (22)$$

$$\tau_i = -I_{mi} k_i^2 \ddot{q}_i + K_i k_i i_i - d_{mi} k_i^2 \dot{q}_i \quad (23)$$

となる。式(22)、式(23)をベクトル、行列で表記する場合、

$$L \dot{i} = v - R i - K_m \dot{q} \quad (24)$$

$$\tau = -J_m \ddot{q} + K_m i - D_m \dot{q} \quad (25)$$

と置く。ここに、

$$v = [v_1, v_2, \dots, v_s]^T$$

$$i = [i_1, i_2, \dots, i_s]^T$$

であり、また、

$$L = \text{diag}[L_1, L_2, \dots, L_s]$$

$$R = \text{diag}[R_1, R_2, \dots, R_s]$$

$$K_m = \text{diag}[K_{m1}, K_{m2}, \dots, K_{ms}]$$

$$J_m = \text{diag}[J_{m1}, J_{m2}, \dots, J_{ms}]$$

$$D_m = \text{diag}[D_{m1}, D_{m2}, \dots, D_{ms}]$$

$$K_{mi} = K_i k_i, J_{mi} = I_{mi} k_i^2, D_{mi} = d_{mi} k_i^2$$

と定義し、すべて正の要素を持つ。

式(25)を式(12)に代入して整理すると、

$$(M(q) + J_m) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + g(q) + (D + D_m) \dot{q} = K_m i + J_c^T f_n - J_t f_t \quad (26)$$

となる。

#### 5. 拘束条件付きロボット/モータの連立方程式

摩擦力  $f_t$  は拘束力  $f_n$  に比例して決定されるため、比例定数を  $K_e$  とすると、 $f_t = K_e f_n$  となる。また、式(26)と式(13)の  $\dot{q}$  が同じ値をとるため、拘束力  $f_n$  は従属的に決定される。この関係を陽に表すため、式(26)、式(13)を、

$$(M + J_m) \ddot{q} - (J_c^T - J_t^T K_e) f_n = K_m i - H - g - (D + D_m) \dot{q} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \ddot{q} &= - \left[ \frac{\partial}{\partial q^T} \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \dot{q} \right] \dot{q} \\ &= - \dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \end{aligned} \quad (28)$$

と変形する。式(28)の左辺の  $\partial C_i / \partial q^T$  は  $1 \times s$  の横ベクトルであり、右辺の  $\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q}$  は  $1 \times 1$  のスカラーである。式(27)、式(28)、式(22)を合わせて  $p$  点の拘束を受けるモータを含むマニピュレータの運動方程式は次式であらわされる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K_e) & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_m i - H - g - (D + D_m) \dot{q} \\ - \dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - R i - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

ただし、

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_p]^T \quad (30)$$

の  $p \times 1$  の横ベクトルである。

$\tau$  の閉ループ系を考え、 $p \times n$  の行列  $B(q)$  が列がフルランクの時、次式が得られる。 $f_{nd}$  は目標抗力とする。

$$\begin{aligned} A(q) f_n &= a(q, \dot{q}) - B(q) B^+ (a - A f_{nd}) + (I - B^+ B) l \\ &= A f_{nd} \end{aligned} \quad (31)$$

$p \times p$  行列  $A$  が逆行列をもつ時、次式が得られる。

$$f_n = f_{nd} \quad (32)$$

#### 5.1 移動マニピュレータのトルク

$\sum_W$  と  $\sum_0$  の姿勢変換行列を  ${}^W R_0$  で表すと、 $\sum_W$  で表された  $\sum_0$  の並進速度  ${}^W \dot{P}_0$  と回転角速度  ${}^W \omega_0$  は、

$${}^W \dot{P}_0 = {}^W R_0 {}^0 V_0 = {}^W R_0 [V_0 \ 0 \ 0]^T \quad (33)$$

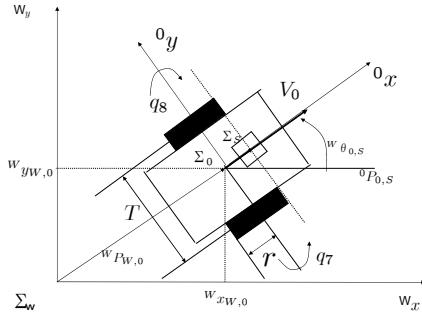


Fig. 1 mobile robot

$${}^W \omega_0 = [0 \quad 0 \quad \omega_0]^T \quad (34)$$

このモデルの中に重力加速度を考慮すると,  ${}^W g = [0 \quad 0 \quad -g]^T$  とおける. この時, リンク 0 の重力加速度を含めた並進加速度  ${}^W \ddot{P}_0$ , 回転角速度  ${}^W \dot{\omega}_0$  は, 式 (33), (34) より

$${}^W \ddot{P}_0 = {}^W \ddot{P}_0 - {}^W g = {}^W \dot{R}_0 {}^0 V_0 + {}^W R_0 {}^0 \dot{V}_0 - {}^W g \quad (35)$$

$${}^W \dot{\omega}_0 = [0 \quad 0 \quad \dot{\omega}_0]^T \quad (36)$$

${}^0 S_0$  を Fig1 のように  $\Sigma_0$  上でリンク 0 の重心とする.  $\Sigma_w$  で表された  $\Sigma_0$  の原点よりリンク 0 の重心までの位置ベクトル  ${}^W S_0$  は,  ${}^W S_0 = {}^W R_0 {}^0 S_0$  と表される. これを用い,  $\Sigma_w$  で表されたリンク 0 の重心の加速度  ${}^W \ddot{P}_{G0}$  を表すと,

$${}^W \ddot{P}_{G0} = {}^W \ddot{P}_0 + {}^W \dot{\omega}_0 \times {}^W S_0 + {}^W \omega_0 \times ({}^W \omega_0 \times {}^W S_0) \quad (37)$$

そしてその時に, リンク  $i$  の重心での  ${}^W \ddot{P}_{Gi}$  は式 (38) のように計算できる.

$${}^W \ddot{P}_{Gi} = {}^W \ddot{P}_i + {}^W \dot{\omega}_i \times {}^W S_i + {}^W \omega_i \times ({}^W \omega_i \times {}^W S_i) \quad (38)$$

次に, 求めた第  $i$  リンクの運動を起こさせるのに必要な力  ${}^W F_i (= m_i {}^W \ddot{P}_{Gi})$ ,  $m_i$  は第  $i$  リンクの質量) とトルク  ${}^W N_i (= {}^W I_i {}^W \dot{\omega}_i + {}^W \omega_i \times ({}^W I_i {}^W \omega_i))$ , ここで  ${}^W I_i$  は慣性テンソル) は第  $i+1$  リンクから第  $i$  リンクに伝わる力  $-{}^W f_{i+1}$  とトルク  $-{}^W n_{i+1}$  と, 第  $i-1$  リンクより加わる力  ${}^W f_i$  とトルク  ${}^W n_i$  より得られるので, 第  $i$  リンクの運動方程式を漸化式で表すと,

$${}^W f_i = {}^W f_{i+1} + m_i {}^W \ddot{P}_{Gi} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} {}^W n_i &= {}^W n_{i+1} + {}^W I_i {}^W \dot{\omega}_i + {}^W \omega_i \times ({}^W I_i {}^W \omega_i) \\ &+ {}^W S_i \times m_i {}^W \ddot{P}_{Gi} + {}^W P_{i,i+1} \times {}^W f_{i+1} \end{aligned} \quad (40)$$

また, ここで  $q_i$  を第  $i$  関節の回転角,  $I_{ai}$  をアクチュエータの慣性モーメント,  $C_i$  を粘性抵抗であるとすると, 式 (39), (40) で表された運動をするために第  $i$  関節軸に必要な駆動トルクは,

$$\tau_i = ({}^W n_i^T)^W z_i + I_{ai} \dot{q}_i + C_i \dot{q}_i \quad (41)$$

となる. 移動ロボットに固定された座標系  $\Sigma_0$  の原点に加わる力とトルクは, 式 (39), (40) において,  $i=0$  とすることで式 (42), (43) のように求められる.

$${}^W f_0 = {}^W f_1 + m_0 {}^W \ddot{P}_{G0} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} {}^W n_0 &= {}^W n_1 + {}^W I_0 {}^W \dot{\omega}_0 + {}^W \omega_0 \times ({}^W I_0 {}^W \omega_0) \\ &+ {}^W S_0 \times m_0 {}^W \ddot{P}_{G0} + {}^W P_{0,1} \times {}^W f_1 \end{aligned} \quad (43)$$

移動ロボットは  ${}^W x_0$  の並進運動と  ${}^W z_0$  周りの回転運動にしか自由度をもたないことと, この 2 つの自由度に対する移動ロボットの駆動力及び旋回トルクは, 左右の駆動輪が発生すべき

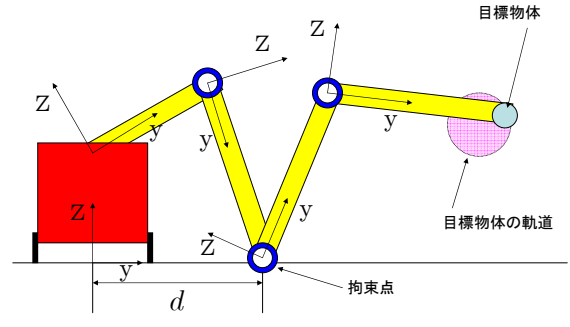


Fig. 2 mobile redundant manipulator

駆動トルク  $\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_R$  の足し引きで求めることができることを考えると, これらのトルクと  ${}^W f_0, {}^W n_0$  の間には次の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\tau}_R}{r} + \frac{\hat{\tau}_L}{r} &= {}^W f_0^T {}^W x_0 = ({}^W R_0 {}^0 f_0)^T {}^W R_0 {}^0 x_0 \\ &= ({}^0 f_0^T)^0 x_0 = f_0 \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{T}{2} \left( \frac{\hat{\tau}_R}{r} - \frac{\hat{\tau}_L}{r} \right) &= {}^W n_0^T {}^W z_0 = ({}^W R_0 {}^0 n_0)^T {}^W R_0 {}^0 z_0 \\ &= ({}^0 n_0^T)^0 z_0 = \tau_0 \end{aligned} \quad (45)$$

ここで  $r$  はそれぞれの車輪の半径で  $T$  は 2 つの車輪の中心の距離である.  $C_R, C_L$  を左右の駆動系の粘性抵抗,  $I_{aR}, I_{aL}$  を駆動系の左右の慣性モーメントとすると, モータの発生すべきトルク  $\tau_R, \tau_L$  は

$$\tau_R = \hat{\tau}_R + I_{aR} \ddot{q}_R + C_R \dot{q}_R \quad (46)$$

$$\tau_L = \hat{\tau}_L + I_{aL} \ddot{q}_L + C_L \dot{q}_L \quad (47)$$

と求めることができる. 以上の逆力学計算の中で  $\tau_L$  と  $\tau_R$  は  ${}^W f_0, {}^W n_0$  より求められたものであり, これらは  $V_0, \dot{V}_0, \omega_0, \dot{\omega}_0$  を変数として含んでいる.

## 6. シミュレーション

以上の内容を用いてシミュレーションを行う. 5 リンク移動マニピュレータの手先を円軌道を描く物体に追従させた場合で, 肘をついた時と肘をつかなかった時それぞれの手先追従精度と電氣的エネルギーの消費量を求め比較する. また, 関節を拘束する場合は, 拘束された関節の位置もシミュレーション開始時の座標でとどまるように制御する. このシミュレーションで用いるコントローラは以下のような PD 制御の電圧入力とする.

$$v = J^T \{ K_p (r_d - r) + K_d (\dot{r}_d - \dot{r}) \} \quad (48)$$

ここで  $J^T$  はヤコビの転置,  $K_p$  は比例ゲイン,  $r_d$  は目標座標,  $r$  は手先と拘束した関節の現在の座標,  $K_d$  は微分ゲイン,  $\dot{r}_d$  は目標速度,  $\dot{r}$  は手先と拘束した関節の現在の速度をそれぞれ表している. シミュレーションの設定条件として 5 リンクマニピュレータを用い, 1 リンク目は台車とリンクの間にある  $z$  軸回転を行うリンク長が 0 のリンクとする. 2 ~ 5 リンクは  $x$  軸回転を行う. その他のパラメータは質量  $m_i$ , リンク長  $L_i$  円柱リンクの半径  $r_i$ , 比例ゲイン  $K_{pi}$ , 微分ゲイン  $K_{di}$ , 関節の粘性摩擦係数  $D_i$ , 逆起電力定数, トルク定数  $K_i$ , 抵抗  $R_i$ , インダクタンス  $L_i$ , モータの慣性モーメント  $I_{mi}$ , 減速比  $k_i$ , 減速機の粘性摩擦定数  $d_{mi}$ , 初期関節角度  $q_i$ , 初期関節角速度  $\dot{q}_i$  とする. ただし,  $q_7$  は移動マニピュレータの右の車輪,  $q_8$  は左の車輪の角度とする. また, Fig.2 の  $d$  は原点から第 3 リンクの拘束点までの距離を示す. 第 2 リンクと第 3 リンクの角度は, Fig.2 のように原点から第 3 リンクの拘束点までの距離をかえることによって決定する.

## 6.1 目標物体追従シミュレーションによる手先精度と消費エネルギーの比較

ここでは5リンクの冗長移動マニピュレータを用いて目標物体の追従を行わせて、関節の拘束がある場合とない場合での手先精度と電氣的消費エネルギーの比較を行う。

それぞれのパラメータは、次の表に示す値とする。

Table 1 Parameters of simulation

	台車	第1リンク	第2リンク	第3~5リンク
$m_i [kg]$	50.0	20.0	20.0	20.0
$l_i [m]$	0.4	0.0	0.4	0.6
$r_i [m]$	0.01	0.04	0.04	0.04
$K_{pi}$	0.0	0.0	50000	50000
$K_{di}$	0.0	0.0	5000	5000
$D_i$	0.5	0.5	10.0	10.0
$K_i [V \cdot s / rad]$	0.203	0.203	0.203	0.203
$R_i [\Omega]$	1.1	1.1	1.1	1.1
$L_i [H]$	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
$I_{mi}$	0.000164	0.000164	0.000164	0.000164
$k_i$	3.0	3.0	3.0	3.0
$d_{mi}$	0.01	0.01	0.01	0.01

台車とリンクの初期角度は、 $q_0 = q_1 = 0 [rad]$ ,  $q_4 = 2.9 [rad]$ ,  $q_5 = -2.0 [rad]$  で  $q_2$  と  $q_3$  は Fig.2 の  $d$  の長さを変えることで決定する。

## 6.11 円軌道追従シミュレーションの条件設定

このシミュレーションでは5リンクの冗長移動マニピュレータの3リンク目の先端を地面で拘束する場合としない場合で手先を円運動する物体に追従させる時に手先の追従精度とエネルギー消費量を比較する。円軌道を描く物体の軌道を以下に示す。

$$x_d(t) = 0 \quad (49)$$

$$y_d(t) = 1.2 + 0.1 \sin\left(-\frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (50)$$

$$z_d(t) = 0.4 + 0.1 \cos\left(-\frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (51)$$

## 6.12 円軌道追従シミュレーションでの手先精度の比較

目標物体の描く座標と、マニピュレータが肘をついた状態とつかない状態での手先の軌跡を Fig.3 ~ Fig.6 に示す。Fig.3, Fig.4 は  $d=60$ , Fig.5, Fig.6 は  $d=80$  とした時のグラフである。

Fig.3 ~ Fig.6 より、拘束なしよりも拘束ありのほうが目標座標に精度良く追従できていることが分かる。

## 6.13 円軌道追従シミュレーションでの消費エネルギーの比較

マニピュレータが肘をついた状態とつかない状態でのエネルギー消費を表したグラフを Fig.7 ~ Fig.10 に示す。t=10 の時のそれぞれの条件でのエネルギー消費量は Table.2 のようになり、拘束なしよりも拘束ありのほうが少ないエネルギーで作業を行えることがわかる。

Table 2 Electric Consumption(t=10)

	$d = 60$	$d = 80$
拘束ありのエネルギー消費 (MJ)	1.74	1.1
拘束なしのエネルギー消費 (MJ)	38.0	84.2

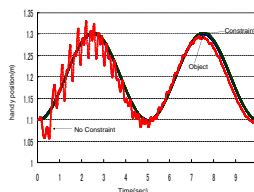


Fig. 3 Hand y position

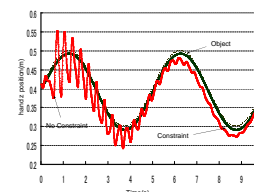


Fig. 4 Hand z position

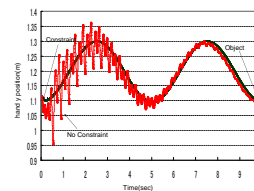


Fig. 5 Hand y position

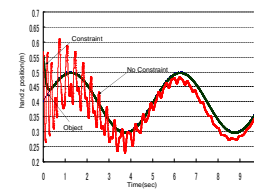


Fig. 6 Hand z position

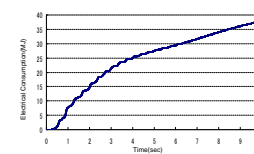


Fig. 7 Electric consumption(d=60, no constraint)

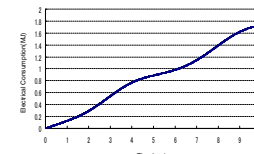


Fig. 8 Electric consumption(d=60, constraint)

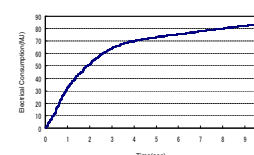


Fig. 9 Electric consumption(d=80, no constraint)

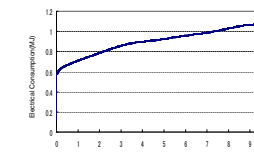


Fig. 10 Electric consumption(d=80, constraint)

## 7. 結 言

本報では、移動冗長マニピュレータで、関節を地面に拘束する場合としない場合で目標物体の追従を行った時の手先追従精度と消費エネルギーの比較を行い、拘束ありのほうが優れていることを示した。

これからは、実際の機械でもこのような結果が得られるかどうか調べていかななくてはならない。

## 文 献

- [1] 吉川恒夫, “ロボット制御基礎論”, コロナ社, 1988.
- [2] 山本 賢, “肘付き拘束運動を用いた軌道追従制御の改善”, 福井大学工学部知能システム工学科, 平成 18 年度卒業論文 (2007)
- [3] 山本 賢, “多点肘付きロボットの動力学モデルと手先軌道追従制御時の肘つき効果”, 福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻, 平成 20 年度修士論文 (2009)
- [4] 道上 佳世, “拘束条件に基づいた位置/力制御の改善”, 福井大学工学部知能システム工学科, 平成 19 年度卒業論文 (2008)
- [5] G. Wang, M. Minami, “Modeling and Control of Hyper-Redundant Mobile Manipulator Bracing Multi-Elbows for High Accuracy / Low-Energy Consumption”, Proceedings of SICE Annual Conference 2010, pp.2371-2376(2010).