

# 拘束代数方程式を利用した 非干渉化位置/力同時制御

片岡 秀美 前場 友秀 見浪 護 矢納 陽 (岡山大学)

## The Decoupling Position/Force Control Simultaneous Control Using The Bracing Algebra Equation

\*H. Kataoka, T. Maeba, M. Minami and A. Yanou  
(Okayama University:1-1-1, tushimanaka, Okayama-shi, Okayama)

**Abstract**— Considering that human can do accurate task with small powers by contacting elbow or wrist on a table, redundant introduces manipulators can save energy and do a task more precisely like human by bracing itself. This paper bracing redundancy that exists in the movement of the manipulator with contacting of its elbows. Although dimensions of movement decreases by constraint, this decreased dimensions can change to the dimensions that control force. Based on this fact, we propose a method to control position force of the manipulator by using the bracing redundancy. That is, this paper shows that the dimension of a position and force can be used effectively, simultaneously can do hand's trajectory tracking and control reaction force of the elbow by simulations.

### 1 緒言

人間は字を書く動作において手首や肘を机に付くことで、付かないときより少ないエネルギーで正確な字を書けることを経験的に知っている。これは人間の習熟した行動の一例である。ロボットがこのように環境との接触による反力を利用して重力の影響が抑制され、より少ない消費エネルギーで精度の高い作業を行えるのではないかと考え、肘付きマニピュレータについての議論を行う。

本論文で私たちは複数のリンクがテーブルや床などの環境に接触するマニピュレータについて考える。前述したように、このような状況は Fig.1 で示されるように字を書くなどの人間の一般的な動作で見られる。冗長マニピュレータは冗長自由度を使うことで複雑な作業を行うことができる。しかし冗長自由度が増加するにつれてマニピュレータのリンク数や重量が増加し、その結果マニピュレータを制御することが難しくなる。この問題を解決するためには字を書いたり、椅子に座るなどの人間の行動を模倣した制御方法が有効であると考える。

運動学に基づいた冗長マニピュレータは幅広く研究され、その効果は数十年前に Chirikjian と Burdick<sup>1)</sup> により紹介されている。しかし、高い冗長性に反比例してマニピュレータは大きな重量を持つ。そのためマニピュレータのハンドは三次元空間で動くことができる一方でハンドへの負荷は微小なものに制限されていた。多くの研究では、障害物回避や<sup>2),5)</sup>、形状の最適化<sup>6),7)</sup>などの冗長性を利用する方法<sup>8)-11)</sup>が議論されているが、現段階では重量の問題が工場での使用に役立つレベルには達していない。

これまでも環境に接触している冗長マニピュレータの有効性と精度を議論した研究例は存在する。West と Asada<sup>12)</sup> は拘束されたマニピュレータの位置/力同時制御コントローラを設計するための一般的な運動学的接触モデルを提案した。そしてマニピュレータの接触動作を制御するために複数点接触の運動学モデルが Oussama Khatib<sup>13),14)</sup> (接触面がばねモデルとして仮定されている) によって提案された。しかし接触面は

硬いものとして考えることが妥当である。一例として、鉄のばね定数は約  $10^6$  [N/m] であり環境を表すばねモデルは自然ではないと考える。つまりこの接触モデルは現実的ではない。そのため、本論文で私たちは環境の接触による変形がない硬い接触モデルを扱う。

そして、接触力は明確な代数関数として、拘束式と運動方程式から得られる。ロボティクスの分野では Peng<sup>19)</sup> により最初に適用された式 (1) はロボットの手先が拘束されているときの、入力トルクと抗力の代数関係を表している。

$$f_n = a(q, \dot{q}) - b^T(q)\tau \quad (1)$$

$f_n$  は抗力、 $q$  は関節角度、 $a(q, \dot{q})$  と  $b^T(q)$  は次章で定義されるスカラー関数と行ベクトル、 $\tau$  は入力トルクベクトルである。

本論文で提案する位置と力を制御するコントローラは式 (1) に基づいている。Peng の方法は力センサーとして式 (1) を使っているが、私たちは目標  $f_{nd}$  を達成するための  $\tau$  を計算するために用いた。式 (1) の存在は2つの重要な事実を意味する。最初の事実は代数関数である式 (1) により入力トルクが決定された瞬間に抗力が計算できる。これに反して、角速度および角度は、積分により決定されるため、入力トルクの決定から積分時間遅れた後に求まる。この代数関係を使うことにより、時間のずれがなく目標の抗力に制御することが可能である。もう一つの重要な事実は入力  $\tau$  は拘束運動において抗力  $f_n$  に対して冗長性を持つことである。式 (1) に関しては、 $f_n$  はスカラー、 $\tau$  はベクトルである。したがって、 $f_{nd}$  を達成するための  $\tau$  には冗長性がある。すなわち、拘束を行うことで運動に関する次元は減少するが、この減少した次元は力を制御するための次元に変化する。私たちはこれを“Bracing Redundancy”と名づけた。この冗長性と  $b^T(q)$  の零空間および値域空間を利用して、拘束している関節の位置、軌道追従と力を同時かつ非干渉に制御できる新しいコントローラを提案した。このコントローラは1点を地面に拘束し、もう1点に軌道追従させている状況において同時に位置と力の制御を行うことが可能であ

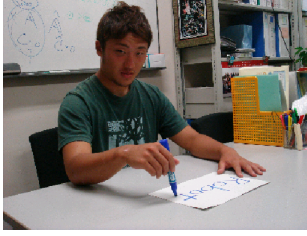


Fig. 1: Human's writing motion

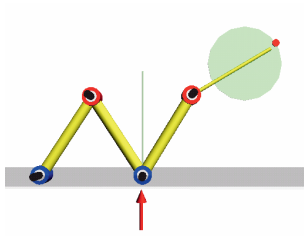


Fig. 2: Simulation screen

る．本論文では，提案したコントローラが有効であるかという点，位置と力のそれぞれが互いに非干渉に制御できるという点をシミュレーションにより確認する．

## 2 拘束運動のモデリング

### 2.1 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， $f_n$  を抗力， $f_t$  を摩擦力とすると，ハンド拘束状態の運動方程式は，

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} \\ = \tau + \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial q^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C}{\partial r^T} \right\| \right\} f_n - \left( \frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}}{\|\dot{r}\|} f_t \end{aligned} \quad (2)$$

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，

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

$$C(r(q)) = 0 \quad (4)$$

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．ここで抗力  $f_n$  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:  $0 < K \leq 1$ ) の2つの関係を仮定する．

### 2.2 肘つき拘束運動

$s$  リンクマニピュレータの  $p$  個の関節が拘束

$$C_i(r_i(q)) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

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  $i$  リンクの位置ベクトルであり，式 (3) と同様，

$$r_i = r_i(q) \quad (6)$$

$$\dot{r}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (7)$$

である．

拘束条件が複数存在する場合には，式 (2) の右辺第 2 項の抗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，

$$\left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C_i}{\partial r^T} \right\| = j_{ci}^T \quad (8)$$

$$\left( \frac{\partial r_i}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}_i}{\|\dot{r}_i\|} = j_{ti}^T \quad (9)$$

の  $s \times 1$  のベクトルとなる．さらに，

$$J_c^T = [j_{c1}^T, j_{c2}^T, \dots, j_{cp}^T] \quad (10)$$

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

$$f_n = [f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{np}]^T \quad (12)$$

$$f_t = [f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tp}]^T \quad (13)$$

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  $p \times 1$  のベクトルである．これらを考慮すると，リンクの  $p$  個の点々が拘束されているマニピュレータの運動方程式は，

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} \\ = \tau + \sum_{i=1}^p (j_{ci}^T f_{ni}) - \sum_{i=1}^p (j_{ti}^T f_{ti}) \\ = \tau + J_c^T f_n - J_t^T f_t \end{aligned} \quad (14)$$

となる．また，式 (5) を時間  $t$  で 2 回微分し， $\dot{q}$  の拘束条件を求めると，

$$\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C}{\partial q^T} \right) \dot{q} \right] + \left( \frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \ddot{q} = 0 \quad (15)$$

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 (14) の解  $q(t)$  が時間  $t$  に無関係に式 (5) を満たさなければならない．式 (5) の時間微分によって得られた式 (15) を満たす  $\dot{q}$  と式 (14) の  $\ddot{q}$  が同じ値をとるとき，式 (14) の  $q(t)$  は式 (5) を満たすことになる．

### 2.3 肘付き時の抗力の導出

マニピュレータの運動方程式は，式 (2) より与えられている． $C$  が独立な拘束条件であることと， $M^{-1}$  が決定行列であることより， $f_n$  の係数  $\left( \frac{\partial C}{\partial q} \right) M^{-1} \left( \frac{\partial C}{\partial q} \right)^T$  は  $q$  に関わらず正値であるため，式 (2) は  $f_n$  に関して一意に解くことができる．

$$\left( \frac{\partial C}{\partial q} \right) M^{-1} \left( \frac{\partial C}{\partial q} \right)^T \triangleq m_c \quad (16)$$

と置くと， $f_n$  の解は，

$$\begin{aligned} f_n = m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial r} \right\| \left\{ -\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C}{\partial q} \right) \dot{q} \right] \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial C}{\partial q} \right) M^{-1} \left[ h + g + \left( \frac{\partial r}{\partial q} \right)^T \frac{\dot{r}}{\|\dot{r}\|} f_t \right] \right\} \\ - m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial r} \right\| \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial q} \right) M^{-1} \right\} \tau \end{aligned} \quad (17)$$

となる．ここで，

$$m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \mathbf{r}} \right\| \left\{ -\dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right) \dot{\mathbf{q}} \right] + \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right) M^{-1}(\mathbf{h} + \mathbf{g}) \right\} \triangleq a(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (18)$$

$$m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \mathbf{r}} \right\| \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right) M^{-1} \right\} \triangleq b^T(\mathbf{q}) \quad (19)$$

と置くと，式 (17) は式 (18)，式 (19) より，

$$f_n = a(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + b^T(\mathbf{q}) \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}}{\|\dot{\mathbf{r}}\|} f_t - b^T(\mathbf{q}) \tau \quad (20)$$

とまとめられる． $a(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  はスカラーであり， $\tau$  を含まない項の和である． $b^T(\mathbf{q})$  は  $\tau$  の係数ベクトルである．上式より拘束力  $f_n$  は  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \tau$  と  $f_t$  に従属して定まることわかる．

#### 2.4 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．

$$\text{電圧方程式： } v_i(t) = L_i \dot{i}_i + R_i i_i(t) + v_{gi}(t) \quad (21)$$

$$\text{逆起電力： } v_{gi}(t) = K_{Ei} \dot{\theta}_i(t) \quad (22)$$

$$\text{運動方程式： } I_{mi} \ddot{\theta}_i = \tau_{gi}(t) - \tau_{Li}(t) - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (23)$$

$$\text{発生トルク： } \tau_{gi}(t) = K_{Ti} i_i(t) \quad (24)$$

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

ここで，式 (22) を式 (21) に，式 (24) を式 (23) にそれぞれ代入すると，

$$v_i = L_i \dot{i}_i + R_i i_i + K_i \dot{\theta}_i \quad (25)$$

$$I_{mi} \ddot{\theta}_i = K_i i_i - \tau_{Li} - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (26)$$

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，

$$\theta_i = k_i q_i \quad (27)$$

$$\tau_{Li} = \frac{\tau_i}{k_i} \quad (28)$$

となり，式 (25)，式 (26) を  $\dot{i}_i$  と  $\tau_i$  の式にすると，

$$L_i \dot{i}_i = v_i - R_i i_i - K_i k_i \dot{q}_i \quad (29)$$

$$\tau_i = -I_{mi} k_i^2 \ddot{q}_i + K_i k_i i_i - d_{mi} k_i^2 \dot{q}_i \quad (30)$$

となる．式 (29)，式 (30) をベクトル，行列で表記する場合，

$$L \dot{\mathbf{i}} = \mathbf{v} - R \mathbf{i} - K_m \dot{\mathbf{q}} \quad (31)$$

$$\boldsymbol{\tau} = -J_m \ddot{\mathbf{q}} + K_m \mathbf{i} - D_m \dot{\mathbf{q}} \quad (32)$$

と置く．ここに，

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

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

であり，また，

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

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

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

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

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

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

と定義し，すべて正の要素を持つ．

式 (32) を式 (14) に代入して整理すると，

$$(M(\mathbf{q}) + J_m) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + (D + D_m) \dot{\mathbf{q}} = K_m \mathbf{i} + J_c^T f_n - J_t^T f_t \quad (33)$$

となる．(14) と式 (15) の関係と同様に，式 (15) を満たす  $\dot{\mathbf{q}}$  と式 (33) の  $\ddot{\mathbf{q}}$  が同じ値をとるとき，式 (33) の  $\mathbf{q}(t)$  は式 (5) を満たすことになる．

#### 2.5 複数拘束条件付，ロボット/モータの連立方程式

式 (33) と式 (15) の  $\dot{\mathbf{q}}$  が同じ値をとるため，抗力  $f_n$  は従属的に決定される．この関係を表すため，式 (33)，(15) と，抗力  $f_n$  と摩擦力  $f_t$  の関係式  $f_t = K f_n$  を用いると

$$(M(\mathbf{q}) + J_m) \ddot{\mathbf{q}} - (J_c^T - J_t^T K) f_n = K_m \mathbf{i} - \mathbf{h} - \mathbf{g} - (D + D_m) \dot{\mathbf{q}} \quad (34)$$

$$\left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \ddot{\mathbf{q}} = -\dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \dot{\mathbf{q}} \right] \quad (35)$$

と変形する．式 (35) の左辺の  $\partial C_i / \partial \mathbf{q}^T$  は  $1 \times s$  の横ベクトルであり，右辺の  $\dot{\mathbf{q}}^T \left[ (\partial / \partial \mathbf{q}) (\partial C_i / \partial \mathbf{q}^T) \dot{\mathbf{q}} \right]$  はスカラーである．式 (34)，式 (35)，式 (31) を合わせて以下のような式に表す．

$$\begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K) & \mathbf{0} \\ \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ f_n \\ \dot{\mathbf{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_m \mathbf{i} - \mathbf{h} - \mathbf{g} - (D + D_m) \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \dot{\mathbf{q}} \right] \\ \mathbf{v} - R \mathbf{i} - K_m \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

ただし，

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_p]^T \quad (37)$$

の  $p \times s$  行列である．ここで，慣性項  $(M + J_m)$  は  $s \times s$  行列，抗力の係数ベクトル  $(j_c^T - j_t^T K)$  は  $s \times p$  の縦ベクトル， $\partial C / \partial \mathbf{q}^T$  は  $p \times s$  の横ベクトル，インダク

タンス  $L$  は  $s \times s$  の対角行列である．さらに，

$$M^* = \begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K) & \mathbf{0} \\ \frac{\partial C}{\partial \dot{q}^T} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & L \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$c = \begin{bmatrix} K_m i - h - g - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left( \frac{\partial C}{\partial \dot{q}^T} \right) \dot{q} \right] \\ v - R i - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (39)$$

とおくと，式 (36) は，

$$M^* \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} = c \quad (40)$$

と表される．式 (40) を未知数である  $\ddot{q}$ ， $f_n$ ， $i$  の式にすると，

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} = M^{*-1} c \quad (41)$$

となり，未知数である  $\ddot{q}$ ， $f_n$ ， $i$  を同時に求めることができる．

### 3 コントローラ

この章では，位置/力制御器を提案する．抗力とトルクの関係を表す式 (20) に摩擦力  $f_t = K f_n$  を代入した状態を考える．すなわち本章における  $b^T$  と式 (20) の  $b^T$  は別であると考える．

$$v = (b^T)^+ \{a - f_{nd}\} + M_1 M_1^+ \Delta \tau_1 + M_1 M_2 \Delta \tau_2 \quad (42)$$

ここで， $M_1$ ， $M_2$  は以下のように定義する．

$$M_1 = I - (b^T)^+ b^T \quad (43)$$

$$M_2 = I - M_1^+ M_1 \quad (44)$$

$I$  は  $s \times s$  の単位ベクトル， $f_{nd}$  は拘束力の目標値， $(b^T)^+$  は  $b^T$  の擬似逆行列であり，以下のように定義される．

$$(b^T)^+ = (b^T)^T \{b^T (b^T)^T\}^{-1} \quad (45)$$

任意ベクトルである以下の  $\Delta \tau_1$  と  $\Delta \tau_2$  は，手先の制御および肘の制御を求めることに用いる．

$$\Delta \tau_1 = J^T [K_{p4} (r_{4d} - r_4) + K_{d4} (\dot{r}_{4d} - \dot{r}_4)] \quad (46)$$

$$\Delta \tau_2 = J^T [K_{p2} (r_{2d} - r_2) + K_{d2} (\dot{r}_{2d} - \dot{r}_2)] \quad (47)$$

ここで， $K_{pi}$  と  $K_{di}$  は比例ゲイン，微分ゲインを表す行列， $r_{id}(q)$  は，リンクの先端の目標位置ベクトルであり， $r_i(q)$  はリンクの先端の位置ベクトルである．よって，式 (20) と式 (42) より，以下の式が得られる．

$$f_n = a - b^T [(b^T)^+ \{a - f_{nd}\} + M_1 M_1^+ \Delta \tau_1 + M_1 M_2 \Delta \tau_2] \quad (48)$$

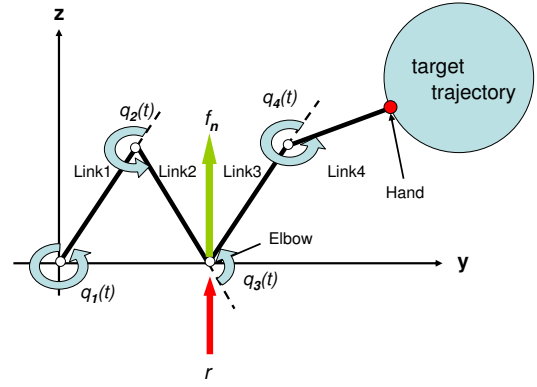


Fig. 3: Model

ここで，

$$b^T (I - (b^T)^+ b^T) M_1^+ = \mathbf{0} \quad (49)$$

$$b^T (I - (b^T)^+ b^T) M_2 = \mathbf{0} \quad (50)$$

であることから，よって式 (48) は以下ようになる．

$$f_n = a + f_{nd} - a \quad (51)$$

$$= f_{nd} \quad (52)$$

式 (52) より，抗力  $f_n$  は，目標値である  $f_{nd}$  に一致することが示された．

### 4 シミュレーション

この章では，位置と力の制御は干渉しないことをシミュレーションの結果により示す．ここで，物理パラメータを次のように設定した．それぞれのリンクの質量を  $m_i = 1.0[\text{kg}]$ ，長さを  $l_i = 0.5[\text{m}]$ ，関節の粘性摩擦係数を  $D_i = 2.9$ ，トルク定数を  $K_i = 0.2$ ，抵抗を  $R_i = 0.6[\Omega]$ ，インダクタンスを  $L_i = 0.17[\text{H}]$ ，モータの慣性モーメントを  $I_{mi} = 1.64 \times 10^{-4}$ ，減速比を  $k_i = 3.0$ ，減速器の粘性摩擦係数を  $d_{mi} = 0.1$  とし，パラメータは実際のモータの仕様書から得ている．ここで，第2リンクの先端を肘，第4リンクの先端を手先とし，以降で使用する．肘の目標抗力を  $f_{2d} = 30[\text{N}]$ ，肘の目標位置を  $r_{2d} = 0.54[\text{m}]$  とする．また，追従する円軌道を， $(x,y,z) = (0.0, 1.1, 0.6)$  を中心とする半径  $0.2[\text{m}]$  の円と設定し，この円軌道を周期  $T = 10[\text{sec}]$  で半時計周りにマニピュレータの手先が追従するものとする．

シミュレーション時間を  $20[\text{sec}]$ ，サンプリングタイムを  $5[\text{msec}]$  とし，リンクの初期関節角度をそれぞれ  $(q_1, q_2, q_3, q_4) = (-0.2\pi, -0.6\pi, 0.8\pi, -0.4\pi)[\text{rad}]$  とする．また，Fig.3 は肘や手先の位置，抗力  $f_n$ ，関節角度  $q_i$  などを示した図である．この条件で比例ゲイン  $k_p$  と速度ゲイン  $k_d$  を変化させて行ったシミュレーションの結果を以下に示す．Fig.4 は肘の目標抗力と実際の抗力，Fig.5 は肘の目標位置と実際の位置，Fig.6 は手先の目標軌道と実際の軌道を示している．

Fig.4 および Fig.5 において，適切なゲイン ( $k_p = 300$ ， $k_d = 50$ ， $k_{pe} = 100$ ， $k_{de} = 20$ ) を設計した場合，肘の抗力  $f_{n2}$  および，肘の位置  $r_2$  はそれぞれ目標値である  $f_{n2d}$ ， $r_{2d}$  に追従している．すなわち，設計したコントローラは位置/力を同時に制御可能であると言える．

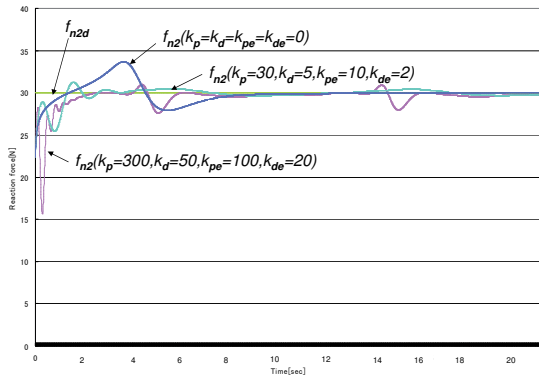


Fig. 4: Reaction force of the elbow

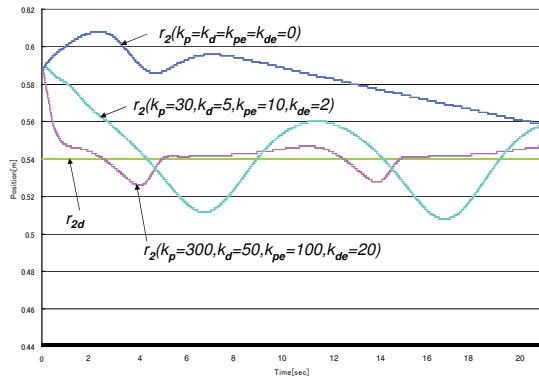


Fig. 5: Position of the elbow

また、Figs.4, 5 は位置制御に用いる比例ゲインおよび微分ゲインを変化させても、肘の抗力と位置の値が大きく変化していないことを示している。つまり、力制御と位置制御（式 (42) の右辺第 1 項と第 2 項以降）は互いに非干渉であることが確認できる。

## 5 結言

本論文では、拘束によって減少する運動の自由度が力を制御可能な自由度を与えるという点に着目し、マニピュレータの位置と力を同時に制御可能なコントローラを提案した。そして、数値シミュレーションにより、設計したコントローラの有効性と位置/力制御が互いに非干渉であることを示した。

## 参考文献

- 1) G.S.Chirikjian, J.W.Burdick:“A Hyper-Redundant Manipulator”, IEEE Robotics & Automation Magazine, December 1994, pp.22-29 (1994)
- 2) Glass K., Colbaugh R., Lim D. and Seraji H, “Real-time collision avoidance for redundant manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.11, pp.448-457, 1995.
- 3) Homayoun Seraji and Bruce Bon, “Real-Time Collision Avoidance for Position-Controlled Manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp.670-677, 1999.
- 4) Leon Zlajpah and Bojan Nemeč, “Kinematic Control Algorithms for On-line Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator”, *International*

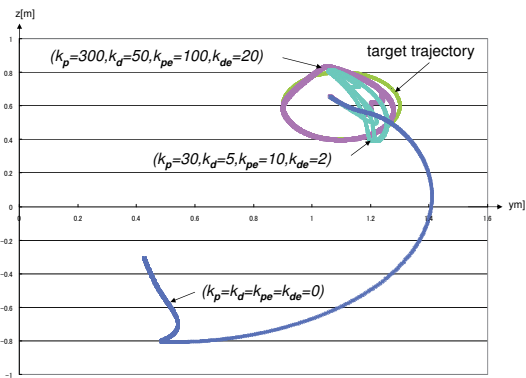


Fig. 6: Hand's trajectory

*Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Vol.2, pp.1898-1903, 2002.*

- 5) Kwang-Kyu Lee and Martin Buss, “Obstacle Avoidance for Redundant Robots Using Jacobian Transpose Method”, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, pp.3509-3514, 2007.
- 6) Ryo Kurazume and Tsutomu Hasegawa, “Impedance Matching for Free Flying Robots”, (in Japanese) *Proc. 20th Annu. Conf. Robot. Soc. Jpn.*, p. 3J16, 2002.
- 7) Ryo Kurazume and Tsutomu Hasegawa, “A New Index of Serial-Link Manipulator Performance Combining Dynamic Manipulability and Manipulating Force Ellipsoid”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.22, No.5, pp.1022-1028, 2006.
- 8) F.Fahimi, H.Ashrafiuon and C.Nataraj:“Obstacle Avoidance for Spatial Hyper-Redundant Manipulators”, The First Asian Conference on Multibody Dynamics 2002, July 31-August 2, 2002, Iwaki, Fukushima, Japan.
- 9) Shugen Ma, Watanabe.M, Kondo.H:“Dynamic control of curve-constrained hyper-redundant manipulators”, *Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 2001. Proceedings 2001 IEEE International Symposium, 29 July-1 Aug. 2001 pp,83-88.
- 10) Oda.N, Murakami.T, Ohnishi.K,:“A force based motion control strategy for hyper-redundant manipulator”, *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 97. 23rd International Conference, Volume 3, 9-14 Nov. 1997 pp,1385-1390 vol.3.*
- 11) Hirose.S, Chu.R:“Development of a light weight torque limiting M-Drive actuator for hyper-redundant manipulator Float Arm”, *Robotics and Automation*, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference, Volume 4, 10-15 May 1999 pp,2831-2836 vol.4 .

- 12) West,H.,and Asada,H.,“A Method for the Design of Hybrid Position/Force Controllers for Manipulators Constrained by Contact with the Environment”, Proc. of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.251-260
- 13) Jaeheung Park and Oussama Khatib ,“Multi-Link Multi-Contact Force Control for Manipulators”, Proc. of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2005, pp.3624-3629
- 14) Anna Petrovskaya, Jaeheung Park and Oussama Khatib “Probabilistic Estimation of Whole Body Contacts for Multi-Contact Robot Control”, Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2007, pp.568-573  
Modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion based on jam resolution”, Proceedings of International Conference of Robotics and Automation, pp.3807-3814, 2009
- 15) Takeshi Ikeda and Mamoru Minami:“Research of Grinding Robot without Force Sensor by Using Algebraic Equation”(in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(C), Vol.71, No.702, pp.270-277, 2005.
- 16) M.W.Walker and D.E.orin:“Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms”, ASME J.of DSMC,104, pp.205-211, 1982
- 17) L.R.Hunt, R.Su and G.Meyer:“Global Transformation of Non Linear system,” IEEE Trans. AC., 28-1, pp.24-31, 1983
- 18) Takeshi Ikeda, Mamoru Minami, “Research of Grinding Robot without Force Sensor by Using Algebraic Equation(in Japanese),” Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(C), Vol.71, No.702, pp.270-277, 2005.
- 19) Z. X. Peng, N. Adachi, “Position and Force Control of Manipulators without Using Force Sensors(in Japanese),” Trans. of JSME(C), Vol.57, No.537, pp.1625-1630, 1991.