

## 位置／力空間における肘付き冗長性を利用した マニピュレータの制御

○糸島 道之 前場 友秀 見浪 護 矢納 陽 (岡山大学)

### Control of Manipulator Using Bracing Redundancy Based on Position/Force Generalized Space

\*M. Itoshima, T. Maeba, M. Minami and A. Yanou (Okayama University)

**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.

**Key Words:** Constraint motion, Position/Force control method, energy efficiency

### 1 緒言

人間は字を書く動作において手首や肘を机につくことで、より少ない力でペンを持ち、より正確に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拘束接地による反力を利用することで重力の影響を抑え、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、マニピュレータの肘付き動作を提案する。

この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の力学モデルを提案する。この支持する姿勢はFig.1のような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い複雑な構造の物体で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重量が増加する、その結果としてマニピュレータを制御することが難しくなる。この問題を解くために私たちは字を書いたり、いすに座るなどの人間の行動を観察することによって効率的な運動制御方法についていくつかのアイディアを得た。

一方、運動学的冗長マニピュレータは集中的に研究され、その影響は数十年前に Chirikjian と Burdick<sup>1)</sup>により紹介されている。高い冗長性はマニピュレータの構造による大きな重量を負うので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がハンドの負荷は微小なものに制限されていた。多数の研究は、たとえば障害を避けたり<sup>2)-5)</sup>、実際の基準を考慮した形状の最適化<sup>6), 7)</sup>などの冗長性を利用する方法<sup>8)-11)</sup>を議論したにも関わらず、大きな重量の問題が工場の実際の状況で役立つレベルの研究では今までのところ解決に至っていない。

今まで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いいくつかの研究があった。West と Asada<sup>12)</sup>は拘束されたマニピュレータの位置／力混合の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接触の運動学的モデルが Oussama Khatib<sup>13), 14)</sup>（ばねモデルとして環境と接触を仮定している）によって提案された。しかし物体の接触表面の変形は非常に大きな接触力が必要なので接触している環境は硬いと考えられている。したがって、鉄のばね定数は約  $10^6 [N/m]$  であるので環境を表すばねモデルは自然ではないと考えている。つまりこの接触環境モデルは実物との接触を表す実際の手法ではない。これに反してこの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議論する。

接触力は力検出によるものよりむしろ計算により得ることができる力情報を意味する入力一般化力<sup>18)</sup>と明確な代数関数としての拘束式とダイナミクスの式から得られる。二足歩行ロボットで解析する Peng<sup>19)</sup>により注目させられた式(1)はロボットの手先が三次元空間で表面に触れているときのコントローラの運動学的代数関係も示す。

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

$f_n$  は拘束面の抗力、 $\mathbf{q}$  は関節角度、 $a(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  と  $\mathbf{b}^T(\mathbf{q})$  は次章で定義されるスカラー関数と列ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$  は入力トルクである。この代数方程式は知られていて、Peng<sup>19)</sup>により抗力のセンサー機能を初めてロボット工学に適用された。

本論文で提案した位置と力を制御する方法は式(1)に基づいている。Peng の方法は力センサーとして式(1)を使っている反面、私たちは目標  $f_{nd}$  を達成するための  $\boldsymbol{\tau}$  を計算するために式を使った。式(1)は二つの事実に基づいている。最初の事実はマニピュレータは剛体で代数関数である式(1)により直接に変化を伝える力伝達プロセスである。これに反して、速度と位置の発生は時間のかかるプロセスである。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  $\boldsymbol{\tau}$  は拘束運動で抗力  $f_n$  に対していくつかの冗長性を持つことである。式(1)に関しては、 $f_{nd}$  はスカラー、 $\boldsymbol{\tau}$  はベクトルである。したがって、 $f_{nd}$  を達成するための  $\boldsymbol{\tau}$  には

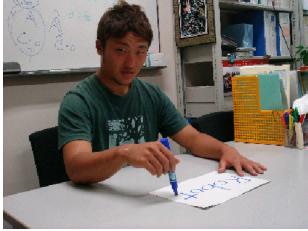
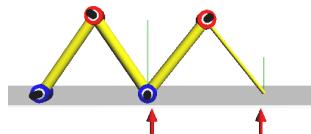


Fig. 1: Human's writing motion Fig. 2: Simulation screen



冗長性がある。私たちはこれを”Bracing Redundancy”と名づけた。入力  $\tau$  は抗力  $f_n$  に比べ冗長性がある点と式(1)に示すようにすぐに完了する  $\tau$  から  $f_{nd}$  への力伝達を利用することにより、拘束している関節の位置と力を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複数点拘束し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、複数点の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。 $\mathbf{q} \in R^s$  を一般化座標、 $\boldsymbol{\tau} \in R^s$  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、

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

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  $\mathbf{r} \in R^s$  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、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{q}) \quad (3)$$

$$C(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = 0 \quad (4)$$

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  $\mathbf{q}$  は関節角度、一般化入力  $\boldsymbol{\tau}$  は入力トルクを表す。ここで抗力  $f_n$  と摩擦力  $f_t$  について 2 つの関係を仮定する。

$$f_t = Kf_n \quad (0 < K \leq 1) \quad (5)$$

### 2.2 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

$$C_i(\mathbf{r}_i(\mathbf{q})) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

を受けているときの運動方程式について考える。ここで  $\mathbf{r}_i$  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(3)と同様、

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

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

である。

式(2)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(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、

$$\left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| = \mathbf{j}_{ci}^T \quad (9)$$

$$\left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}_i}{\|\dot{\mathbf{r}}_i\|} = \mathbf{j}_{ti}^T \quad (10)$$

の  $s \times 1$  のベクトルとなる。さらに、

$$\mathbf{J}_c^T = [\mathbf{j}_{c1}^T, \mathbf{j}_{c2}^T, \dots, \mathbf{j}_{cp}^T] \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_t^T = [\mathbf{j}_{t1}^T, \mathbf{j}_{t2}^T, \dots, \mathbf{j}_{tp}^T] \quad (12)$$

$$\mathbf{f}_n = [f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{np}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{f}_t = [f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tp}]^T \quad (14)$$

と定義する。 $\mathbf{J}_c^T$ ,  $\mathbf{J}_t^T$  は  $s \times p$  行列であり、 $\mathbf{f}_n$ ,  $\mathbf{f}_t$  は  $p \times 1$  のベクトルである。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、

$$\begin{aligned} M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + h(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + g(\mathbf{q}) + D\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ci}^T f_{ni}) - \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ti}^T f_{ti}) \\ = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_c^T \mathbf{f}_n - \mathbf{J}_t^T \mathbf{f}_t \end{aligned} \quad (15)$$

となる。また、式(6)を時間  $t$  で 2 回微分し、 $\ddot{\mathbf{q}}$  の拘束条件を求めるとき、

$$\left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \dot{\mathbf{q}} \right] \dot{\mathbf{q}} + \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \ddot{\mathbf{q}} = 0 \quad (16)$$

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(15)の解  $\mathbf{q}(t)$  が時間  $t$  に無関係に式(6)を満たさなければならない。式(6)の時間微分によって得られた式(16)を満たす  $\ddot{\mathbf{q}}$  と式(15)の  $\ddot{\mathbf{q}}$  が同じ値をとるととき、式(15)の  $\mathbf{q}(t)$  は式(6)を満たすことになる。

### 2.3 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。

$$\text{電圧方程式} : v_i(t) = L_i \dot{i}_i + R_i i_i(t) + v_{gi}(t) \quad (17)$$

$$\text{逆起電力} : v_{gi}(t) = K_{Ei} \dot{\theta}_i(t) \quad (18)$$

$$\text{運動方程式} : I_{mi} \ddot{\theta}_i = \tau_{gi}(t) - \tau_{Li}(t) - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (19)$$

$$\text{発生トルク} : \tau_{gi}(t) = K_{Ti} i_i(t) \quad (20)$$

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(18)を式(17)に、式(20)を式(19)にそれぞれ代入すると、

$$v_i = L_i \dot{i}_i + R_i i_i + K_i \dot{\theta}_i \quad (21)$$

$$I_{mi} \ddot{\theta}_i = K_i i_i - \tau_{Li} - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (22)$$

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、

$$\theta_i = k_i q_i \quad (23)$$

$$\tau_{Li} = \frac{\tau_i}{k_i} \quad (24)$$

となり、式(21)、式(22)を  $\dot{i}_i$  と  $\tau_i$  の式にすると、

$$L_i \dot{i}_i = v_i - R_i \dot{i}_i - K_i k_i \dot{q}_i \quad (25)$$

$$\tau_i = -I_{mi} k_i^2 \ddot{q}_i + K_i k_i i_i - d_{mi} k_i^2 \dot{q}_i \quad (26)$$

となる。式(25)、式(26)をベクトル、行列で表記する場合、

$$L \dot{i} = v - Ri - K_m \dot{q} \quad (27)$$

$$\tau = -J_m \ddot{q} + K_m i - D_m \dot{q} \quad (28)$$

と置く。ここに、

$$\begin{aligned} v &= [v_1, v_2, \dots, v_s]^T \\ i &= [i_1, i_2, \dots, i_s]^T \end{aligned}$$

であり、また、

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

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

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

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

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

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

と定義し、すべて正の要素を持つ。

式(28)を式(15)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} (M(\mathbf{q}) + J_m) \ddot{q} + h(\mathbf{q}, \dot{q}) + g(\mathbf{q}) + (D + D_m) \dot{q} \\ = K_m i + J_c^T f_n - J_t^T f_t \quad (29) \end{aligned}$$

となる。(15)と式(16)の関係と同様に、式(16)を満たす  $\ddot{q}$  と式(29)の  $\ddot{q}$  が同じ値をとるとき、式(29)の  $\mathbf{q}(t)$  は式(6)を満たすことになる。

## 2.4 複数拘束条件付、ロボット/モータの連立方程式

式(29)と式(16)の  $\ddot{q}$  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(29)、(16)と、抗力  $f_n$  と摩擦力  $f_t$  の関係式(5)を用いると

$$\begin{aligned} (M(\mathbf{q}) + J_m) \ddot{q} - (J_c^T - J_t^T K) f_n \\ = K_m i - h - g - (D + D_m) \dot{q} \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \ddot{q} &= - \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}} \right) \dot{q} \right] \dot{q} \\ &= - \dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{q} \quad (31) \end{aligned}$$

と変形する。式(31)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  $\dot{q}^T \left[ (\partial / \partial \mathbf{q}) (\partial C_i / \partial \mathbf{q}^T) \right] \dot{q}$  はスカラーである。式(30)、式(31)、式(27)を合わせて以下の様な式に表す。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K) & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_m i - h - g - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - Ri - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (32) \end{aligned}$$

ただし、

$$\mathbf{C} = [C_1, C_2, \dots, C_p]^T \quad (33)$$

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、 $\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}^T$  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、

$$M^* = \begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K) & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$c = \begin{bmatrix} K_m i - h - g - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - Ri - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (35)$$

とおくと、式(32)は、

$$M^* \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} = c \quad (36)$$

と表される。式(36)を未知である  $\ddot{q}$ 、 $f_n$ 、 $i$  の式にすると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ i \end{bmatrix} = M^{*-1} c \quad (37)$$

となり、未知である  $\ddot{q}$ 、 $f_n$ 、 $i$  を同時に求めることができる。

## 2.5 肘付き時の抗力の導出

本節では拘束点が1ヶ所 ( $p = 1$ ) の場合を考える。式(15)、(16)から  $f_n$  が計算できる。まず、

$$\left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}} \right) M^{-1} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \triangleq m_{ci} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (38)$$

そこで得られる

$$f_{ni} = a_i - b_i^T \boldsymbol{\tau} - b_i^T \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^p J_{ctl}^T f_{nl} \quad (i = 1, \dots, p) \quad (39)$$

ただし、 $j_{ct}^T$  は式(5)より以下のように定義する。

$$j_{ct}^T = j_c^T - j_t^T K \quad (40)$$

また

$$m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C_i}{\partial r} \right\| \left\{ - \left[ \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{\partial C_i}{\partial q} \right) \dot{q} \right] \dot{q} + \left( \frac{\partial C_i}{\partial q} \right) M^{-1} (\mathbf{h} + \mathbf{g}) \right\} \triangleq a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (41)$$

$$m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C_i}{\partial r} \right\| \left\{ \left( \frac{\partial C_i}{\partial q} \right) M^{-1} \right\} \triangleq \mathbf{b}_i^T(\mathbf{q}) \quad (42)$$

$a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  はスカラーである。 $\tau$  を含まない項の和である  $\mathbf{b}_i^T(\mathbf{q}) \in R^{1 \times l}$  は  $\tau$  を抗力  $f_{ni}$  に投影するベクトルである。ここで、上式を展開する。

$$\begin{bmatrix} 1 & (\mathbf{b}_1, j_{ct2}) & \cdots & (\mathbf{b}_1, j_{ctp}) \\ (\mathbf{b}_2, j_{ct1}) & 1 & \cdots & (\mathbf{b}_2, j_{ctp}) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{b}_p, j_{ct1}) & (\mathbf{b}_p, j_{ct2}) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{n1} \\ f_{n2} \\ \vdots \\ f_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^T \\ \mathbf{b}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{b}_p^T \end{bmatrix} \tau \quad (43)$$

上式を簡略化して表すと

$$\mathbf{A}\mathbf{f}_n = \mathbf{a} - \mathbf{B}\tau \quad (44)$$

ただし、 $\mathbf{A}$  は  $p \times p$  の行列、 $\mathbf{a}$  は  $p \times 1$  のベクトル、 $\mathbf{B}$  は  $p \times n$  の行列である。 $\tau$  は  $n$  次元であり、 $p < n$  より  $p$  次元ベクトル  $f_n$  を決定する  $\tau$  は冗長性を持つていることがわかる。この点と式(39)から入力トルク  $\tau$  と抗力  $f_n$  の間にはいくらかの冗長性があることを主張できる。この条件は運動学的冗長性とともに類似している。

### 3 コントローラ

この章では、位置／力制御器を紹介する。抗力とトルクの関係を表す式(39)より以下の式を得る。

$$\tau = \mathbf{B}^+(\mathbf{q})(\mathbf{a}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{A}\mathbf{f}_{nd}) + \mathbf{M}_1 \Delta \tau \quad (45)$$

ここで、 $\mathbf{M}_1$  の定義は

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B} \quad (46)$$

$\mathbf{I}$  は  $s \times s$  の単位行列、 $\mathbf{f}_{nd}$  は目標抗力、 $\mathbf{B}^+$  は  $\mathbf{B}$  の疑似逆行列であり、

$$\mathbf{B}^+ = \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \quad (47)$$

$\Delta \tau$  は式(48)で表される任意のベクトルであり、拘束する肘の位置を制御するために用いる。ただし、 $k$  は拘束するリンクの番号を示しており、 $k = 2, 4$  の場合を考える。

$$\begin{aligned} \Delta \tau = J_2^T [\mathbf{p}_i \mathbf{K}_{pi}(\mathbf{p}_i, \mathbf{r}_{2d} - \mathbf{r}_2) + \mathbf{p}_i \mathbf{K}_{di}(\mathbf{p}_i, \dot{\mathbf{r}}_{2d} - \dot{\mathbf{r}}_2)] \\ + J_4^T [\mathbf{p}_i \mathbf{K}_{pi}(\mathbf{p}_i, \mathbf{r}_{4d} - \mathbf{r}_4) + \mathbf{p}_i \mathbf{K}_{di}(\mathbf{p}_i, \dot{\mathbf{r}}_{4d} - \dot{\mathbf{r}}_4)] \end{aligned} \quad (48)$$

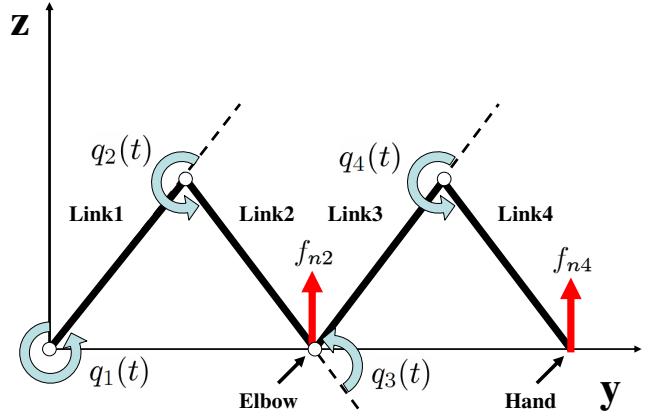


Fig. 3: Model

ここで  $\mathbf{K}_{pi}$  と  $\mathbf{K}_{pk}$  は比例ゲイン、微分ゲインを表す行列、 $\mathbf{r}_{id}(\mathbf{q})$  は手先の目標位置ベクトル、 $\mathbf{r}_i(\mathbf{q})$  は実際の位置ベクトル、 $\mathbf{r}_{kd}(\mathbf{q})$  は拘束面に沿って拘束されたリンクの目標位置ベクトル、 $\mathbf{r}_k(\mathbf{q})$  は第  $k$  リンクの実際の位置ベクトルである。式(44)と式(45)を組み合わせると次の式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{f}_n &= \mathbf{a} - \mathbf{B}\{\mathbf{B}^+(\mathbf{a} - \mathbf{A}\mathbf{f}_{nd}) + (\mathbf{I} - \mathbf{B}^+\mathbf{B})\Delta\tau\} \\ &= \mathbf{a} - (\mathbf{a} - \mathbf{A}\mathbf{f}_{nd}) + (\mathbf{BI} - \mathbf{BB}^+\mathbf{B})\Delta\tau \\ &= \mathbf{A}\mathbf{f}_{nd} \end{aligned} \quad (49)$$

$\|\mathbf{A}\| \neq 0$  となるとき

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{f}_{nd} \quad (50)$$

となる。

### 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。手先の目標抗力を  $f_{4d} = 10[\text{N}]$ 、肘の目標抗力を  $f_{2d} = 20[\text{N}]$ 、手先の目標軌道  $y_{4d}$  と肘の目標軌道  $y_{2d}$  を以下のように与える。

$$y_{2d} = 0.1 \sin \frac{2\pi}{T} t + 0.5 \quad (51)$$

$$y_{4d} = 0.1 \cos \frac{2\pi}{T} t + 1.0 \quad (52)$$

ただし、周期を  $T = 10[\text{sec}]$ 、シミュレーション時間  $= 8[\text{sec}]$ 、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  $(q_1, q_2, q_3, q_4) = (-0.2\pi, -0.6\pi, 0.6\pi, -0.6\pi)[\text{rad}]$  とする。また、Fig.3 は肘や手先の位置、抗力  $f_{n2}$ 、 $f_{n4}$ 、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  $\mathbf{k}_p$  と速度ゲイ

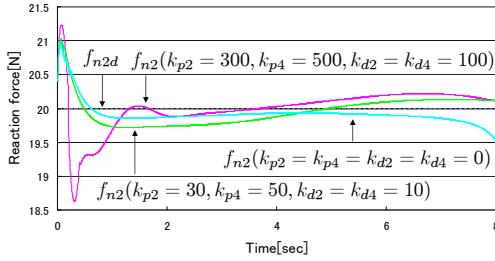


Fig. 4: Reaction force of the elbow

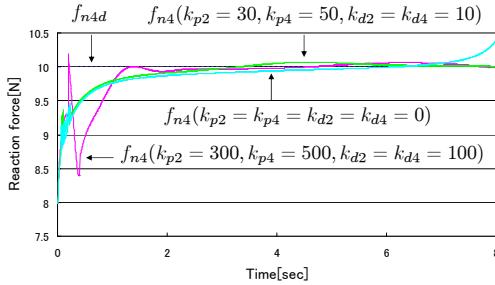


Fig. 5: Reaction force of the hand

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, 5は肘と手先の目標抗力と実際の抗力、Fig.6, 7は肘と手先の目標軌道と実際の軌道を示している。

Figs.4-7において、適切なゲイン ( $k_{p2} = 300, k_{p4} = 500, k_{d2} = k_{d4} = 100$ ) を設計した場合、抗力  $f_{n2}, f_{n4}$  および、肘・手先の位置  $y_2, y_4$  はそれぞれ目標値である  $f_{nd2}, f_{nd4}, y_{d2}, y_{d4}$  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。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、抗力の値がほとんど変化しないことを示している。つまり、力制御と位置制御（式(45)の右辺第1項と第2項）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 Ma-
- nipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp.670-677, 1999.
- 4) Leon Zlajpah and Bojan Nemec, “Kinematic Control Algorithms for On-line Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator”, *International 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.Ashrafiou 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

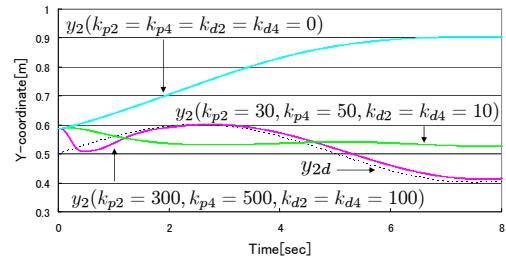


Fig. 6: Elbow's contacting position in y-axis

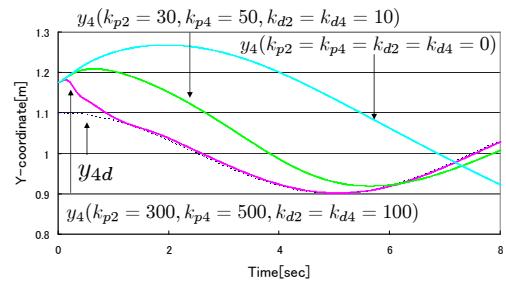


Fig. 7: Hand's contacting position in y-axis

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
- 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.