

# 降下法による時変肘付き位置最適化制御

Descent Method for Optimizing Time-varying Position

○ 時末直 (岡山大)      李想 (岡山大)  
 正 見浪護 (岡山大)    正 松野隆幸 (岡山大)  
 正 矢納陽 (岡山大)

Tadashi TOKISUE, Okayama University, medelox@okayama-u.ac.jp

Xiang LI, Okayama University

Mamoru MINAMI, Okayama University

Takayuki MATSUNO, Okayama University

Akira YANOU, Okayama University

Manipulators with high redundancy can variedly change the configurations through the redundancy. But, the weight of redundant manipulator also becomes heavy as the redundancy degree increases, which causes that more energy should be needed to accurately control the manipulator hand position. So, considering human writing motion that human could save energy and write letters correctly by contacting elbow or wrist on a table, we think the redundant manipulator is also able to achieve energy-saving and high-precision simultaneously by the similar motion such as bracing elbows. In previous research, we have proposed control method that redundant manipulator can work high-precision task with less energy consumption by contacting elbow on environments and using constraint force. We propose in this thesis to optimize the elbow contacting position while conducting hand tracking task, showing that energy consumption was reduced drastically by bracing elbow on optimal position.

**Key Words:** Manipulator, Constraint Motion, Bracing Position, Energy Consumption, Optimization

## 1 緒言

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 Chirikjian と Burdick[1] により紹介されている。しかし高い冗長性を持つマニピュレータはリンクの数が多いほど高い冗長性を持ち、その冗長性を利用して形状を多様に変更できる。しかし、リンクの数が増えるほど自重で手先が下がり、制御するために大きなエネルギーが必要となる問題が存在する。そこで、Fig.1 に示すように人間が字を書く動作を行うときに机に肘や手首を付くことによって正確に字を書き、かつ少ないエネルギーで字が書けるように、Fig.2 に示すように冗長マニピュレータにおいても肘を付くことによって人間の場合と同様の結果が得られるのではないかと考えた。

先行研究において、マニピュレータの肘を周囲の環境に接触させ抗力を利用することで、より少ない消費エネルギーで高精度の作業を実行できる冗長マニピュレータの制御方法を提案してきた [2][3][4][5][6]。また、エネルギー最小規範に基づく肘付き位置に関して考察を行った。その結果、適切な位置に肘を付くことで、消費エネルギーを大きく削減できることが明らかになった。これに基づき降下法を用いて、消費エネルギーを最小化する肘付き位置の最適化法を提案し、その有効性を確認したので報告する。

## 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。 $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$  を関節角ベクトル、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$  を入力ベクトル、 $\mathbf{f}_n$  を抗力、 $\mathbf{f}_t$  を摩擦力とすると、ハンド拘束状態の運動方程式は、

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \right\} \mathbf{f}_n - \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}}{\|\dot{\mathbf{r}}\|} \mathbf{f}_t \quad (1)$$



Fig.1 A posture when we write a letter

と表される。ただし以下で述べる拘束を満たすことで、上式中の  $\dot{\mathbf{r}}/\|\dot{\mathbf{r}}\|$  は拘束表面の接平面方向に存在することが保証される。また  $\mathbf{M}$  は  $n \times n$  の慣性行列、 $\mathbf{h}$  と  $\mathbf{g}$  はコリオリ力・遠心力と重力の影響を表す  $n \times 1$  のベクトル、 $\mathbf{D}$  は関節の粘性摩擦係数を表す  $n \times n$  の対角行列  $\mathbf{D} = \text{diag}[D_1, D_2, \dots, D_n]$  である。ここで、手先の位置・姿勢ベクトル  $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^m$  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、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

$$C(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = 0 \quad (3)$$

と表される。

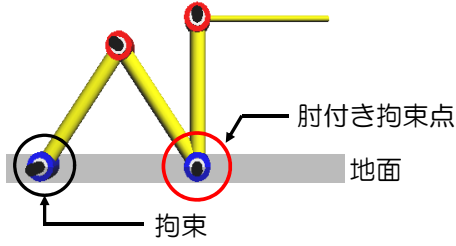


Fig.2 Manipulator with elbow

## 2.2 肘付き拘束運動

本節では複数点拘束を表現するモデリングを行う.  $n$  リンクマニピュレータの中間リンクが  $p$  個の拘束

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{r}(\mathbf{q})) &= [C_1(\mathbf{r}_1(\mathbf{q})), C_2(\mathbf{r}_2(\mathbf{q})), \dots, C_p(\mathbf{r}_p(\mathbf{q}))]^T \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4)$$

を受けているときの運動方程式について考える. ここで  $\mathbf{r}_i$  は拘束を受けている第  $i$  リンクの位置であり, 式 (2) と同様に次式を定義する.

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(\mathbf{q}) \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_i(\mathbf{q}) = [\tilde{\mathbf{J}}_i(\mathbf{q}), \mathbf{0}] \quad (7)$$

式 (7) では,  $\mathbf{J}_i$  は  $m \times n$  の行列,  $\tilde{\mathbf{J}}_i$  は  $m \times i$  の行列, ゼロ部分行列  $\mathbf{0}$  は,  $m \times (n - i)$  である.

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,

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

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

の  $n \times 1$  のベクトルとなる. さらに

$$\mathbf{J}_c^T = [\mathbf{j}_{c1}^T, \mathbf{j}_{c2}^T, \dots, \mathbf{j}_{cp}^T] \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_t^T = [\mathbf{j}_{t1}^T, \mathbf{j}_{t2}^T, \dots, \mathbf{j}_{tp}^T] \quad (11)$$

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

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

と定義する.  $\mathbf{J}_c^T$ ,  $\mathbf{J}_t^T$  は  $n \times p$  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,

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ci}^T \mathbf{f}_{ni}) - \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ti}^T \mathbf{f}_{ti}) \\ = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_c^T \mathbf{f}_n - \mathbf{J}_t^T \mathbf{f}_t \end{aligned} \quad (14)$$

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

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

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  $\mathbf{q}(t)$  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 (15) を満たす  $\ddot{\mathbf{q}}$

と式 (14) の  $\ddot{\mathbf{q}}$  が同じ値をとるとき, 式 (14) の  $\mathbf{q}(t)$  は式 (4) を満たすことになる.

ここで抗力  $\mathbf{f}_n$  と摩擦力  $\mathbf{f}_t$  について

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_t = \mathbf{K} \mathbf{f}_n, \quad \mathbf{K} = \text{diag}[K_1, K_2, \dots, K_p] \\ 0 < K_i < 1, (i = 1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (16)$$

と表される [7] から, 式 (14) は以下のようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + (\mathbf{J}_c^T - \mathbf{J}_t^T \mathbf{K}) \mathbf{f}_n \end{aligned} \quad (17)$$

## 2.3 肘付き時の抗力の導出

本節では  $\mathbf{f}_n$  の導出方法について述べる. 式 (14), (15) から  $\ddot{\mathbf{q}}$  を消去し, 整理すると, 以下の式が得られる.

$$\mathbf{A} \mathbf{f}_n = \mathbf{a} - \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} \quad (18)$$

ただし, それぞれの変数は以下のように定義する.

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_c - \mathbf{B} \mathbf{J}_t^T \mathbf{K} \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_c = (\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}^T) \mathbf{M}^{-1} (\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}^T)^T \quad (20)$$

$$\mathbf{B} = \left\| \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \left( \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \mathbf{M}^{-1} \quad (21)$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{B} \{ \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} \} - \left\| \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{\mathbf{q}} \quad (22)$$

抗力  $\mathbf{f}_n$  と入力トルク  $\boldsymbol{\tau}$  の関係は代数方程式で表されることがわかる.  $\mathbf{f}_n$  は  $p$  次元ベクトルであり,  $\boldsymbol{\tau}$  は  $n$  次元ベクトルで  $n > p$  であるから,  $\mathbf{f}_n$  を実現する  $\boldsymbol{\tau}$  には拘束冗長性がある.

## 2.4 ロボット・モータの連立方程式

モータの電流をベクトル  $\mathbf{I}$  で表し, 式 (17) にモータのダイナミクスを加えると次式となる.

$$\begin{aligned} (\mathbf{M}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}_m) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + (\mathbf{D} + \mathbf{D}_m) \dot{\mathbf{q}} \\ = \mathbf{K}_m \mathbf{I} + (\mathbf{J}_c^T - \mathbf{J}_t^T \mathbf{K}) \mathbf{f}_n \end{aligned} \quad (23)$$

ここで  $\mathbf{J}_m$  はモータのロータの慣性モーメントを表す対角行列,  $\mathbf{D}_m$  はモータの粘性抵抗係数行列,  $\mathbf{K}_m$  はモータのトルク定数行列,  $\mathbf{v}$  はモータへの印加電圧である. 式 (4) と式 (14) の関係と同様に, 式 (15) を満たす  $\ddot{\mathbf{q}}$  と式 (23) の  $\ddot{\mathbf{q}}$  が同じ値をとるとき, 式 (23) の  $\mathbf{q}(t)$  は式 (4) を満たすことになる. さらに次式のモータの印可電圧と電流との関係

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{v} - \mathbf{R}\mathbf{I} - \mathbf{K}_m \dot{\mathbf{q}} \quad (24)$$

を, 式 (15) および式 (23) と連立させると, モータのダイナミクスを含み,  $p$  点で肘を拘束された  $n$  リンクマニピュレータの運動方程式は, 次のように表される.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{J}_m & -(\mathbf{J}_c^T - \mathbf{J}_t^T \mathbf{K}) & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{f}_n \\ d\mathbf{I}/dt \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_m \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{h} - \mathbf{g} - (\mathbf{D} + \mathbf{D}_m) \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{v} - \mathbf{R}\mathbf{I} - \mathbf{K}_m \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

## 3 拘束冗長性を利用する肘付き位置/力制御

モータのダイナミクスを考慮しない場合, 目標抗力  $\mathbf{f}_{nd}$  を実現する解  $\boldsymbol{\tau}$  は式 (18) より,

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}^+ (\mathbf{a} - \mathbf{A} \mathbf{f}_{nd}) + (\mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B}) \mathbf{l} \quad (26)$$

となる. ただし  $\mathbf{B}^+$  は  $\mathbf{B}$  の疑似逆行列である.  $\text{rank}(\mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B}) = n - p$  であり,  $\mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B}$  は無次元の行列であるから,  $\mathbf{l}$  はトルク

の次元を持つ。  $\mathbf{l}$  を新しい入力とし、  $\mathbf{B}$  の零空間  $\mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B}$  を通して手先目標軌道  $\mathbf{r}_d$  を追従するためや肘付き位置の制御に使うことができる。 疑似逆行列の性質によって、  $\mathbf{l}$  に任意の入力を加えても  $\mathbf{f}_{nd}$  の実現には影響を与えない。 よって  $\mathbf{l}$  をハンドの軌道追従などのタスクに用いることができ、このタスクと  $\mathbf{f}_{nd}$  を実現するタスクは非干渉化できる。

ここでは  $\mathbf{l}$  の決定方法について述べる。 本報のシミュレーションでは、4リンクマニピュレータの4自由度をそれぞれ肘の抗力の制御に1自由度、肘の位置制御に1自由度、手先の位置制御に2自由度の合計4自由度全てを利用してマニピュレータの制御を行う。

$$\mathbf{l} = \tilde{\mathbf{J}}_{2y}^T [K_{p2y}(y_{d2} - y_2) + K_{d2y}(\dot{y}_{d2} - \dot{y}_2)] + \mathbf{J}_4^T [K_{p4}(\mathbf{r}_{d4} - \mathbf{r}_4) + K_{d4}(\dot{\mathbf{r}}_{d4} - \dot{\mathbf{r}}_4)] \quad (27)$$

ここで、  $\tilde{\mathbf{J}}_{2y}^T$  は式 (7) で定義されている  $\tilde{\mathbf{J}}_2^T$  を構成する列ベクトル  $\tilde{\mathbf{J}}_2^T = [\tilde{\mathbf{j}}_{2y}^T, \tilde{\mathbf{j}}_{2z}^T]$  中の第1列である。

式 (26) は直接トルクを発生させることができるダイレクトモータで駆動されるロボットでは実現できるが、通常のモータの入力は電圧である。 本報では、式 (26) のコントローラの代わりに、次式を用いる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}_v [\mathbf{B}^+(\mathbf{a} - \mathbf{A}\mathbf{f}_{nd}) + (\mathbf{I} - \mathbf{B}^+ \mathbf{B})\mathbf{l}] \quad (28)$$

#### 4 最適化手法

本報において、肘付き位置の最適化とは肘付きマニピュレータの消費エネルギーを最小化する位置に肘を付くことである [6]。ここでは肘付き状態で与えられる目的の運動は周期  $T$  の周期運動であることを想定する。 本報では、肘付き位置の最適化手法として降下法を用いて、消費エネルギーの最小化を図る。

##### 4.1 降下法

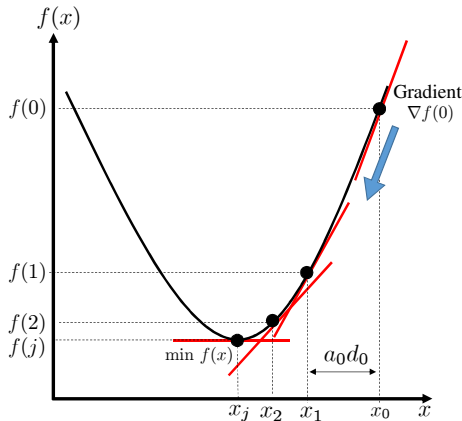


Fig.3 Schema of descent method

最急降下法とは、ある初期点から出発して目的関数  $f(x)$  の値を徐々に減少させるような、すなわち

$$f(x_0) > f(x_1) > f(x_2) > \dots > f(x_j) > \dots \quad (29)$$

となる点列  $x_j$  を系統的に生成する手法である。

降下法では、現在の点  $x_j$  において、まず降下方向の傾き  $d_j$  を決定し、次に定数  $a$  を用いて更新する。

$$x_{j+1} = x_j + ad_j \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (30)$$

また、降下方向  $d_j$  以下の式で表される。

$$d_j = -\nabla f(x_j) \quad (31)$$

##### 4.2 肘付きマニピュレータへの応用

この節では、前節の降下法の肘付きマニピュレータへの応用を考える。

ここで、評価する  $j$  番目の繰り返し運動の一周期間の消費エネルギーを以下の式で算出する。

$$E_i = \int_{jT}^{(j+1)T} v_i(t) I_i(t) dt \quad (32)$$

$$E_{sum_j} = \sum_{i=1}^4 E_i \quad (33)$$

次に、現在の目標肘付き位置  $y_{d2_j}$  において、まず降下方向  $d_j$  を決定し、次にステップ幅  $a_j$  を定め、更新式

$$y_{d2_{j+1}} = y_{d2_j} + ad_j \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (34)$$

また、降下方向  $d_j$  以下の式で表される。

$$d_j = -\frac{\partial}{\partial y_{d2_j}} E_{sum_j} \quad (35)$$

ただし、式 (35) を直接求めるのは困難なため、以下の近似した式を用いる。

$$d_j = -\frac{E_{sum_j}(y_{d2_j} + h) - E_{sum_j}(y_{d2_j})}{h} \quad (36)$$

ただし、 $h$  は微小な値とする。

##### 5 消費エネルギー最小化シミュレーション

この章では、肘付きマニピュレータの目標軌道追従シミュレーションで前章で述べた降下法の有効性を確認し、対象物保持状態における肘付きマニピュレータの消費エネルギー最小化を行う。

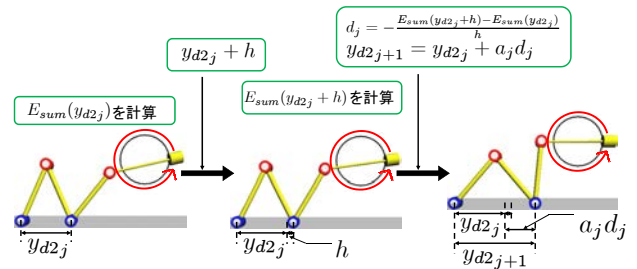


Fig.4 Flow of descent method

シミュレーションでのパラメータ及び条件を以下に示す。

リンクの質量:  $m_i = 1.0$  [kg], リンクの長さ:  $l_i = 0.5$  [m], 関節の粘性摩擦係数:  $D_i = 2.9$  [ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ], トルク定数:  $K_i = 0.2$  [ $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$ ], 抵抗:  $R_i = 0.6$  [ $\Omega$ ], インダクタンス:  $L_i = 0.1$  [H], モータの慣性モーメント:  $I_{mi} = 1.64 \times 10^{-4}$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ], 減速比:  $k_i = 3.0$ , 減速機の粘性摩擦係数:  $d_{mi} = 0.1$  [ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ] ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), 定数:  $a = 1.0 \times 10^{-6}, 5.0 \times 10^{-6}, 1.0 \times 10^{-5}$ , 微小な値:  $h = 0.025$  [m], 制御ゲイン:  $\mathbf{K}_{p4} = \text{diag}[400, 400]$  [ $\text{N}/\text{m}$ ],  $\mathbf{K}_{d4} = \text{diag}[200, 200]$  [ $\text{Ns}/\text{m}$ ],  $K_{p2y} = 400$  [ $\text{N}/\text{m}$ ],  $K_{d2y} = 200$  [ $\text{Ns}/\text{m}$ ], シミュレーション時間:  $t = 400$  [s], 初期肘付き位置:  $y_{d2_0} = 0.4$ , 初期ハンド位置:  $(y_{d4_0}, z_{d4_0}) = (1.0, 0.5)$  [m], 目標軌道:

$$y_d(t) = 0.2 \cos \frac{2\pi}{10} t + 1.0 \quad (37)$$

$$z_d(t) = 0.2 \sin \frac{2\pi}{10} t + 0.5 \quad (38)$$

Fig.4 は降下法のアルゴリズムの流れを示しており、この図のように目標肘付き位置を更新し、エネルギー最小化するように肘付き位置の最適化を行う。

Figs.5-7 に、 $a = 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $5.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-5}$  における降下法の更新回数  $j$  回目の時の消費エネルギー  $E_{sumj}$  (棒) と目標肘付き位置  $y_{d2j}$  (点線) を示している。これら全ての場合において、目標肘付き位置  $y_{d2}$  を更新する毎に消費エネルギーが削減されている。このことから、降下法が有効であると言える。また、Fig.7 において、 $y_{d2}$  は 0.6 [m] に収束しており、最適肘付き位置は 0.6 [m] であると推測できる。

Fig.8 は  $a = 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $5.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-5}$  と変化させたときの  $y_{d2}$  の比較を行っている。この図より、 $a_j$  を変更することで、 $y_{d2}$  の最適値への収束速度を早くなることが分かる。また、収束速度は  $a_j$  の微小な変化に対して、大きく変化することが分かる。

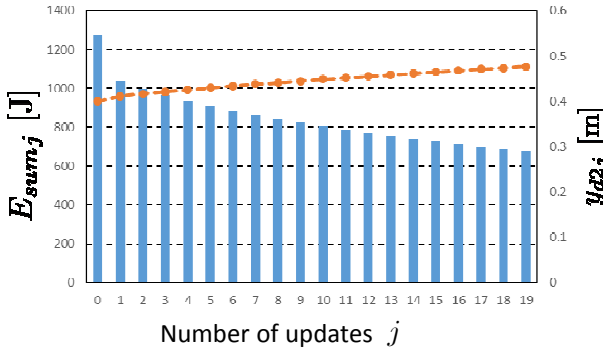


Fig.5 Variation of energy consumption and target bracing point ( $a = 1.0 \times 10^{-6}$ )

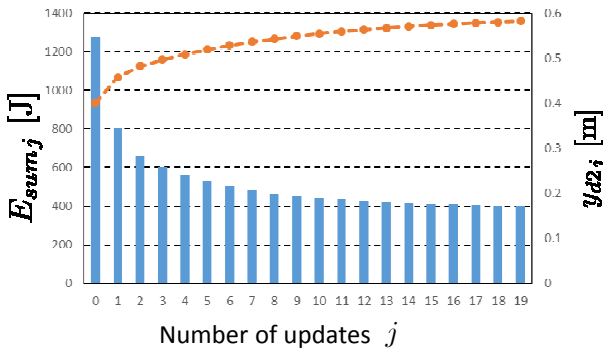


Fig.6 Variation of energy consumption and target bracing point ( $a = 5.0 \times 10^{-6}$ )

## 6 結言

本論文では肘付き冗長マニピュレータにおける肘付き位置と消費エネルギーの関係について考察を行い、その考察に基づき消費エネルギー最小化に向けた肘付き位置の最適化手法 (降下法) を提案した。また、その最適化手法をシミュレーションに組み込み、有効性を確認した。しかし、パラメータによっては消費エネルギーが稀に増加する場合や最適肘付き位置への収束速度遅くなる場合がある。そこで、今後の課題としては、定数  $a$  を時変にし、収束速度を早くしたり、別の最適化手法を用いることが挙げられる。

## 参考文献

[1] G. S. Chirikjian and J. W. Burdick, "A Hyper-Redundant Manipulator," IEEE Robotics and Automation Magazine, pp.22-29, 1994.

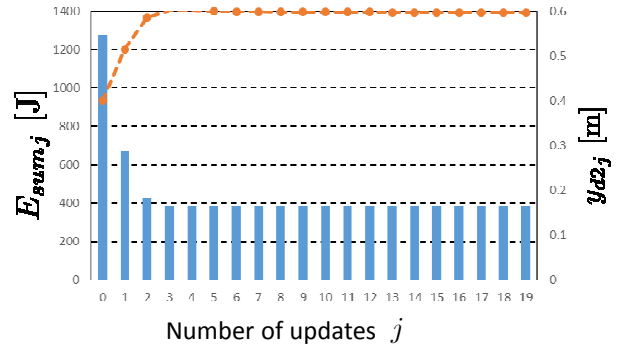


Fig.7 Variation of energy consumption and target bracing point ( $a = 1.0 \times 10^{-5}$ )

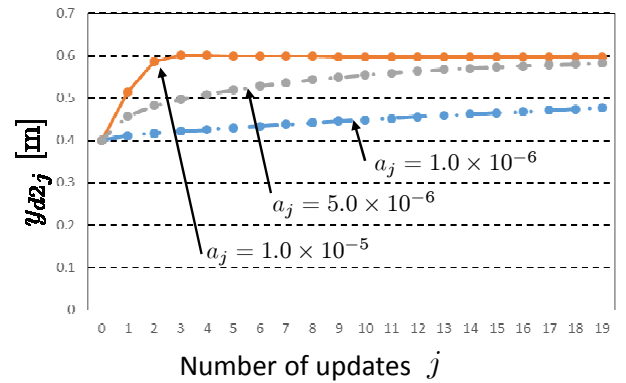


Fig.8 Comparing each of  $y_{d2j}$  by varying  $a$

- [2] Gu, W., Kataoka, H., Yu, F., Maeba, T., Minami, M. and Yanou, A., "Control of Hyper-Redundancy Mobile Manipulator with Multi-Elbows braced for High Accuracy/Low-Energy Consumption," 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 1A1-4, 2011.
- [3] 糸島道之, 前場友秀, 見浪護, 矢納陽, "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", システム・情報部門 学術講演会, 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2B2-3, 2011.
- [4] 糸島道之, 尾崎壮紘, 前場友秀, 見浪護, 矢納陽, "肘付き拘束冗長性を利用したハンド軌道追従と拘束運動の非干渉制御", 第 2 回コンピュータショナル・インテリジェンス研究会, pp.57-64, 2012.
- [5] 近藤大介, 糸島道之, 見浪護, 矢納陽, "拘束状態を利用するマニピュレータの肘付き位置の最適化", 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 347-1, 2013.
- [6] 近藤大介, 糸島道之, 見浪護, 矢納陽, "肘付き拘束運動の制御性能と肘付き位置の関係について", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014
- [7] 河村 末久, 矢野 章成, 樋口 誠宏, 杉田 忠彰, "研削加工と砥粒加工", 加工学基礎 2, 共立出版, 1984.
- [8] 新宿大五郎, 渋谷次郎, 東京 学, "キャストイングマニピュレーションに関する研究 (第 1 報, 可変長の紐状柔軟リンクを有するマニピュレータの提案とそのスイング制御法)", 機論 C 編, vol.64-626, pp.3854-3861, 1998.
- [9] Shinjuku, D., Shibuya, J. and Tokyo, M., "Swing Motion Control of Casting Manipulation," IEEE Control Systems, vol.19-4, pp.56-64, 1999.