

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

Relationship between Controlled performance of Bracing-constraint Motion and Bracing Position

○ 近藤 大介 (岡山大) 糸島 道之 (岡山大)
正 見浪 護 (岡山大) 正 矢納 陽 (岡山大)

Daisuke KONDO, Okayama University, kondo@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Michiyuki ITOSHIMA, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University
Akira YANOU, Okayama University

Considering that humans perform handwriting task with small powers by contacting elbow or wrist on a table, it is reasonable to deem that manipulators can save energy and simultaneously accomplish tasks precisely like humans by bracing intermediate links. First this paper discusses equation of motion of robot under bracing condition, based on the robot's dynamics with constraint condition including motor dynamics. Then a control method is proposed to control simulataneously bracing force and hand's trajectory tracking, followed by optimization of the elbow-bracing position that minimizes energy consumption.

Key Words: Manipulator, Constraint Motion, Bracing Position

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数が増えるにつれ重量が増大する。そのため超冗長マニピュレータは冗長性を利用して形状を多様に変更できる反面、ハンドの可搬重量は制限されていた。そこで、著者らは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、より少ない力で正確に字を書けることに着目した。冗長マニピュレータでも肘を環境に対して拘束することで省エネルギーでしかも高精度の作業が実現できる可能性がある。

著者らは、環境と接触するロボット作業について、抗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高精度の作業を実行できる冗長マニピュレータを提案してきた [2]。この結果に基づいて本報では講演発表会 [3][4][5] で発表してきた肘付き拘束状態のロボットの制御について抗力、ハンド位置および肘位置を同時に制御する制御方法を提案し、ハンド軌道追従特性と消費エネルギーの面から肘付き運動の有効性について議論する。さらにエネルギー最少規範に基づく肘付き位置とハンド負荷の影響に関する考察を行い、最適肘付き位置と目標ハンド軌道および手先負荷との関係を議論する。

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、

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

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。

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、

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

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

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、

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

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 $\mathbf{q}(t)$ 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 $\dot{\mathbf{q}}$ 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

$$\mathbf{f}_t = \mathbf{K} \mathbf{f}_n, \quad \mathbf{K} = \text{diag}[K_1, K_2, \dots, K_p] \quad (16)$$

$$0 < K_i < 1, (i = 1, 2, \dots, p)$$

と表される [?] から、式 (14) は以下ようになる。

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

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。

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

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

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

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

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。

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

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である。式 (4) と式 (14) の関係と同様に、式 (23) を満たす $\ddot{\mathbf{q}}$ と式 (23) の $\dot{\mathbf{q}}$ 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。

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

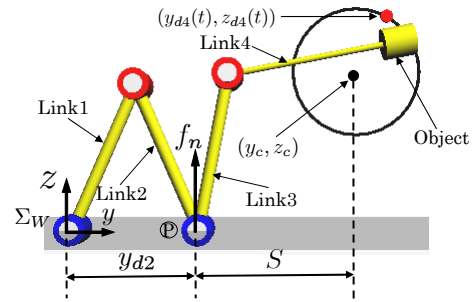


Fig.1 Simulation model

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。

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

ここで、 $\tilde{\mathbf{J}}_2^T$ 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 肘付きハンド軌道追従シミュレーション

この章では 4 リンクマニピュレータによるシミュレーションを行う。シミュレーションで用いるモデルを図 1 に示す。4 リンクマニピュレータの物理パラメータは以下のように設定した。リンクの質量 $m_i = 1.0$ [kg]、長さ $l_i = 0.5$ [m]、関節の粘性摩擦係数 $D_i = 2.9$ [N·m·s/rad]、トルク定数 $K_i = 0.2$ [N·m/A]、抵抗 $R_i = 0.6$ [Ω]、インダクタンス $L_i = 0.1$ [H]、モータの慣性モーメント $I_{mi} = 1.64 \times 10^{-4}$ [kg·m²]、減速比 $k_i = 3.0$ 、減速機の粘性摩擦係数 $d_{mi} = 0.1$ [N·m·s/rad] ($i = 1, 2, 3, 4$) である。

また手先の目標軌道を次式で与える。

$$y_d(t) = 0.2 \cos \frac{2\pi}{10} t + y_c \quad (29)$$

$$z_d(t) = 0.2 \sin \frac{2\pi}{10} t + z_c \quad (30)$$

4.1 肘付きの有効性

この節では肘付きの有効性について示す。評価する指標として消費エネルギーと手先制御の精度を用いる。また、消費エネル

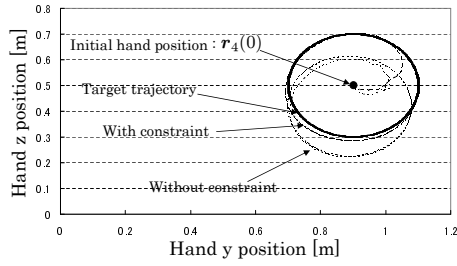


Fig.2 Position time profile of hand

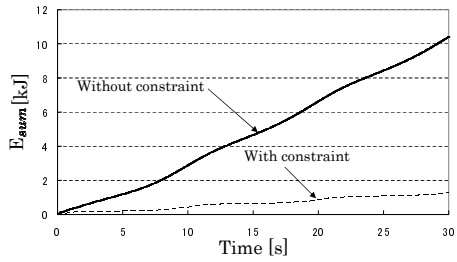


Fig.3 Comparison of energy consumption

ギアの導出方法を以下に示す。時刻 $0 \sim T$ [s] 間のマニピュレータの i リンクでのモータ消費エネルギーは次式で与えられる。

$$E_i(T) = \int_0^T v_i(t) I_i(t) dt \quad (31)$$

$$E_{sum}(T) = \sum_{i=1}^4 E_i(T) \quad (32)$$

ここでは、マニピュレータの第2関節を肘とみなし、肘を拘束する場合としない場合の2種類のシミュレーションを行った。図1に示す目標軌道の中心位置を $(y_c, z_c) = (0.9, 0.5)$ [m] と設定し、初期ハンド位置を $(0.9, 0.5)$ 、初期肘付き位置を $(0.4, 0)$ と設定した。初期時刻 $t = 0$ から $t = 30$ [s] までの肘を付く場合と付かない場合それぞれの手先軌道と消費エネルギーを図2、図3に示す。図2より、肘を拘束すれば手先の精度は良くなること分かる。また、図3より消費エネルギーは $1/8 \sim 1/10$ 程度削減できていることが分かる。つまり、肘付き運動が有効であることが分かる。

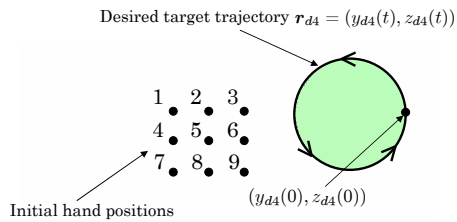


Fig.4 Initial hand positions

4.2 ハンド軌道追従特性と初期値依存性

図4にハンドの目標軌道とその初期位置を示す。ハンドの初期位置として異なる位置の1~9の9点を設定した。まず肘付き拘束を利用する場合について考察する。肘付き抗力の目標値はリンク質量総計を 4 [kg] と設定したことを考慮し、 $f_{n2d} = 30$ [N] と与えた。式(27)の y_{2d} は $y_{2d} = 0.4$ [m] とし、ゲインは $K_{p4} = \text{diag}[300, 300]$ 、 $K_{d4} = \text{diag}[100, 100]$ 、 $K_{p2y} = 150$, [N/m], $K_{d2y} = 75$, [Ns/m] と設定した。

また、シミュレーションにおいて目標軌道と手先軌道の誤差 e

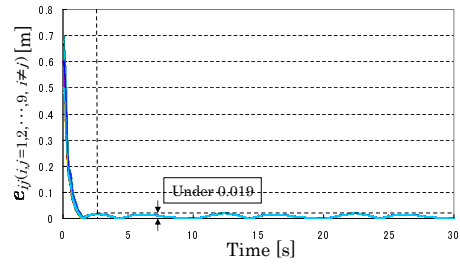


Fig.5 Error of the hand

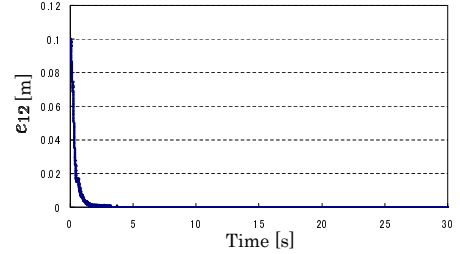


Fig.6 Error profile between the trajectory started from initial point1 in Fig.4 and the trajectory started from point2

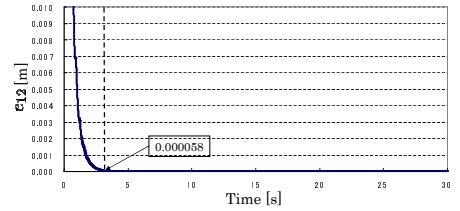


Fig.7 Expanded error profile in Fig.6

を以下のように定義する。

$$e(t) = \sqrt{(y_{d4} - y_4)^2 + (z_{d4} - z_4)^2} \quad (33)$$

また、初期位置1~9の中で i 点から始まるハンド軌道 (y_{4i}, z_{4i}) と j 点から始まる軌道 (y_{4j}, z_{4j}) の誤差 $e_{ij}(t)$ を以下のように定義する。

$$e_{ij}(t) = \sqrt{(y_{4i} - y_{4j})^2 + (z_{4i} - z_{4j})^2} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 9, i \neq j) \quad (34)$$

ただし、 i, j は、図4における1~9を表す。図5を見ると、1~9の初期位置からスタートした式(34)与えられるハンド軌道の軌道追従誤差 $e_{ij}(t)$ は、ほぼ重なっており、すべて3秒以降 0.019 [m] 以下と減少している。次に初期位置1と2の軌道の差 $e_{12}(t)$ を図6に、その拡大図を図7に示す。3秒以降軌道の差は、 5.8×10^{-5} [m] 以下に収まり続けている。表示はしていないが他のすべての軌道間の差も同様であり、ハンド軌道追従実験の初期位置による違いは3秒以降は無視できる程度に減少していると判断できる。以上より $t = 3$ [s] 以降は初期値に依存した影響は無視できる程度に減少した。

4.3 肘付き位置の最適化

この節では肘付き位置の最適化について述べる。前節のシミュレーションより、 $t = 3$ [s] 以降、初期位置の影響は無視できると考えてよいことを確認できたので、 $t = 3$ [s] 以降の消費エネルギー $E_{sum}^*(T)$ を評価の指標として肘付き位置の最適化を行う。

$$E_i^*(T) = \int_3^T v_i(t) I_i(t) dt \quad (35)$$

$$E_{sum}^*(T) = \sum_{i=1}^4 E_i^*(T) \quad (36)$$

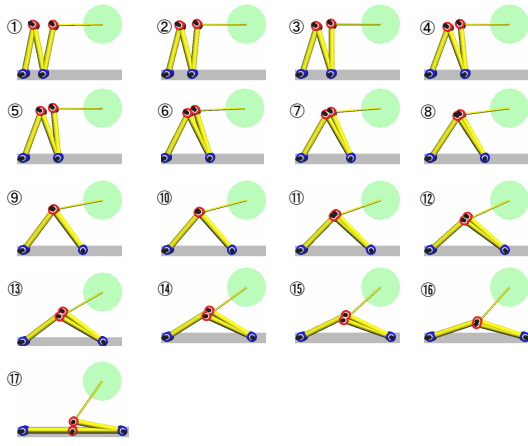


Fig.8 Desired elbow-bracing position in simulation

ハンド負荷質量 M をパラメータとして 0.0, 0.4, 0.8, 1.2[kg] と変化させる。また目標軌道の中心位置を $(y_c, z_c) = (0.8, 0.5), (0.9, 0.5), (1.0, 0.5)$ と与え、その3通りを A, B, C と名前を付けて表すものとする。また目標肘付き位置 y_{d2} 及び初期肘付き位置 $y_2(0)$ を図8の①から⑱に示す。さらに初期ハンド位置を目標軌道の中心として与えたため、A, B, C それぞれの目標軌道に対し、初期ハンド位置を A(0.8, 0.5), B(0.9, 0.5), C(1.0, 0.5) と設定した。

図9~12において、縦軸は式(36)で与える消費エネルギーである。また図9の横軸である肘付き位置とは図1における作業座標系 Σ_W の原点から肘付き位置⑯地点までの距離を表す。手先に付けた対象物の質量 M を 0.0~1.2[kg] まで 0.4[kg] ずつ変化させて、それぞれの場合に対して図8のように肘付き位置を変化させてシミュレーションを行った。肘付き位置の変化と目標軌道中心位置の変化に対する消費エネルギーのグラフを図9~12に示す。

ここで図1に示す目標軌道中心位置と肘付き位置の間の距離を“ S ”とし、 $S = y_c - y_{d2}$ で与えるものとする。目標軌道中心位置が A の場合の各ハンド負荷に対応する最適な肘付き距離 S は、図9の場合、 $S = 0.8 - 0.4 = 0.4$ [m] となる。同様にして、図9~12より S は、 0.40 [m] ($M = 0.0$)[kg], 0.30 ($M = 0.4$), 0.20 ($M = 0.8$), 0.15 ($M = 1.2$)

よって、ハンド負荷 M が増加するにつれ、目標軌道に近い位置で肘を付く方が消費エネルギーが少なくなることを示している。

図9~12のそれぞれの消費エネルギーは U 字型をしており、肘付き位置が目標軌道に近すぎる場合、エネルギー消費量は増加する。また、図9~12よりハンド負荷が大きくなるにつれて消費エネルギーが最低となる最適肘付き位置が判別しにくくなるのが分かる。

さらに、図9よりハンド負荷 M が零の場合の最小のエネルギーは、A, B, C に関わらず 0.8 kJ であり、 M が増加するにつれ、図10より、最小のエネルギーは 1.6 ($M = 0.4$) である。同様にして 2.5 ($M = 0.8$), 3.8 ($M = 1.2$) となる。以上より、手先負荷の増加とともに最低消費エネルギーが増加することがわかる。

また、図9~12において、肘付き位置 y_{d2} を①0.2から⑱1.0まで変化させたとき、最大のエネルギーと最小のエネルギーの差が M が増えるにつれて増加することが分かる。肘付き位置に依存した消費エネルギーの差は、ハンド負荷が大きいほど顕著であり、重量物を把持しているほど、肘付きを最適化する効果が大いことが分かる。

5 結言

本論文では、ハンド軌道追従精度とエネルギー消費の点でロボットの肘付き運動のメリットを、肘付きを行わないロボットの運動と肘付きを行うロボットの運動を比較することで議論した。その結果肘付きによってロボットの軌道追従精度は向上し、かつエネルギー消費は減少することを明らかにした。さらにエネルギー消費を最小化する肘付き位置は、目標ハンド軌道の位置と手先負荷重量に依存して変化することを示した。今後は、本報のシミュレーションで得られた結果から、実時間での肘付き位置最適化制御を行う予定である。

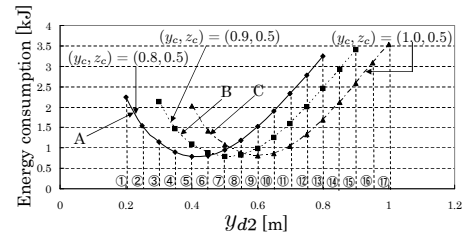


Fig.9 Evaluation of energy consumption ($M=0.0$)

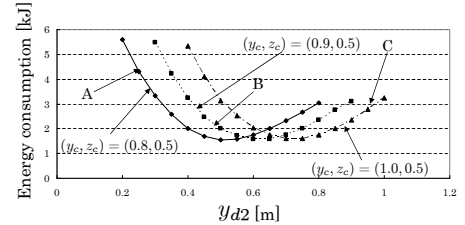


Fig.10 Evaluation of energy consumption ($M=0.4$)

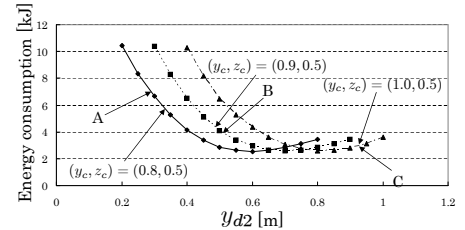


Fig.11 Evaluation of energy consumption ($M=0.8$)

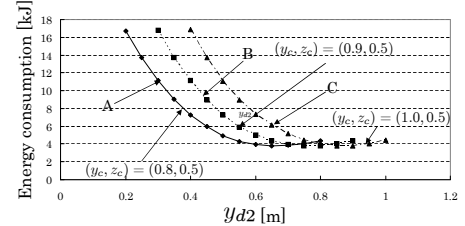


Fig.12 Evaluation of energy consumption ($M=1.2$)

References

- [1] G. S. Chirikjian and J. W. Burdick, "A Hyper-Redundant Manipulator," IEEE Robotics and Automation Magazine, pp.22-29, 1994.
- [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回コンピューターショナル・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.