395

論 文

ロボットの肘付き拘束運動制御時の肘付き効果の検討*

近藤 大介†・糸島 道之‡・見浪 護†・矢納 陽†

Examination of Bracing Effects during Bracing-controlled Robot Motions*

Daisuke Kondo[†], Michiyuki Itoshima[‡], Mamoru Minami[†] and Akira Yanou[†]

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 simulateneously bracing force and hand's trajectory tracking, followed by optimization of the elbow-bracing position that minimizes energy consumption.

1. はじめに

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、高い冗長性をも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。多くの研究では障害物回避 [2,3] や形状の最適化などの冗長性を利用する方法 [4] が議論されているが、現段階では超冗長マニピュレータは実用的レベルには達していない。

Fig.1に示すように、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 けることを経験的に知っている。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。そこで、つ ぎに環境に拘束されて運動するマニピュレータについて 考える。

Whitcomb[5]は、ロボットの拘束状態の運動と制御に

- [†] 岡山大学 大学院 自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University; 3-1-1, Tsushimanaka, Kita ku, Okayama city, Okayama 700-8530, JAPAN
- [‡]株式会社 NTT データ・アイ NTT DATA i Corporation; Iidabashi Bldg., 1-18, Ageba-cho, Shijuku-ku, Tokyo 162-0824, JAPAN
- Key Words: constraint motion.



Fig. 1 Human's writing motion

ついて的確な分類を行った.すなわち (a):変形しないロ ボットと変形する環境を前提にしたモデルベースト制御 [6,7], (b):位置/速度制御をベースにした変形しないロ ボットと変形する環境を前提にした制御 [8] という分類 である.また Oussama Khatib は (b)の範疇で,接触動 作を制御するために複数点接触の運動学モデル [9,10] を 提案した.最後に (c):変形しないロボットと変形しない 環境を前提にした制御法 [11] という分類もある.山根と 中村は,この枠組みの中でヒューマノイドの歩行 [12] と ダイナミクスフィルタの概念を提案している [13].

以上はロボットの肘付き運動を議論するための, 超冗 長マニピュレータと拘束状態の運動についての今までの 研究の流れである.これまでに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[14]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

^{*} 原稿受付 2013年7月19日

般的な運動学的接触モデルを提案した.

本論文では,(c)の変形しないロボットと変形しない 環境を前提にしたロボット [11-13]の制御方法について 考える.この前提条件のもとでは,拘束条件と運動方程 式から(1)式に示す代数方程式が得られる.

$$Af_n = a - B\tau \tag{1}$$

 f_n は抗力, $A \ge a$, B は次章で定義されるベクトルと行列, τ は入力トルクベクトルである. (1)式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.上式は,二足歩行の分野でHemami[15] が導出し,ロボティクスの分野ではPeng[16] により最初に適用された. Peng は τ を入力とし, f_n を出力と考えることで, (1)式を力センサとして用いている.本論文では逆に目標抗力 f_{nd} を達成するための入力トルク τ を計算するために用いる.

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 [17]. この結果に基づいて本論文 では講演発表会 [18-20] 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 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

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{r}(\boldsymbol{q})) = [C_1(\boldsymbol{r}_1(\boldsymbol{q})), C_2(\boldsymbol{r}_2(\boldsymbol{q})), \cdots, C_p(\boldsymbol{r}_p(\boldsymbol{q}))]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{0}$$
(2)

を受けているときの運動方程式について考える.ここで q は関節角ベクトルであり、 r_i は拘束を受けている第iリンクの位置である. r_i とqの関係および \dot{r}_i と \dot{q} の関 係を以下に求める.

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{r}_i(\boldsymbol{q}) \tag{3}$$

$$\dot{\boldsymbol{r}}_i = \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}, \ \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}) = [\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}), \boldsymbol{0}]$$
 (4)

(4) 式では、 J_i は $m \times n$ の行列、 \tilde{J}_i は $m \times i$ の行列、ゼ 口部分行列**0**は、 $m \times (n-i)$ である.

本論文では,拘束条件が複数存在する場合を考え,抗 力の作用方向を表す係数ベクトルと摩擦力の係数ベクト ルはそれぞれ,

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

$$(5)$$

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{r}_i}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}}\right) \quad \frac{\boldsymbol{r}_i}{\|\dot{\boldsymbol{r}}_i\|} = \boldsymbol{j}_{ti}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

の $n \times 1$ のベクトルとなる. さらに

$$\boldsymbol{J}_{c}^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{j}_{c1}^{\mathrm{T}}, \, \boldsymbol{j}_{c2}^{\mathrm{T}}, \, \cdots, \, \boldsymbol{j}_{cp}^{\mathrm{T}}]$$
(7)

$$\boldsymbol{J}_{t}^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{j}_{t1}^{\mathrm{T}}, \, \boldsymbol{j}_{t2}^{\mathrm{T}}, \, \cdots, \, \boldsymbol{j}_{tp}^{\mathrm{T}}]$$

$$\tag{8}$$

$$f_n = [f_{n1}, f_{n2}, \cdots, f_{np}]^{\mathbf{1}}$$
 (9)

$$\boldsymbol{f}_t = [f_{t1}, f_{t2}, \cdots, f_{tp}]^{\mathrm{T}}$$
 (10)

と定義する. J_c^{T} , J_t^{T} は $n \times p$ 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, 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,

$$M(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\ddot{q}} + \boldsymbol{h} (\boldsymbol{q}, \boldsymbol{\dot{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{\dot{q}}$$

= $\boldsymbol{\tau} + \sum_{i=1}^{p} (\boldsymbol{j}_{ci}^{\mathrm{T}} f_{ni}) - \sum_{i=1}^{p} (\boldsymbol{j}_{ti}^{\mathrm{T}} f_{ti})$
= $\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{J}_{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_{n} - \boldsymbol{J}_{t}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_{t}$ (11)

となる. また, (2) 式を時間 t で 2 回微分し, **q** の拘束 条件を求めると,

$$\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right] \dot{\boldsymbol{q}} + \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}$$
(12)

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.(11)式の解q(t)が時間tに無関係に(2)式 を満たさなければならない.(2)式の時間微分によって 得られた(12)式を満たす \ddot{q} と(11)式の \ddot{q} が同じ値をと るとき,(11)式のq(t)は(2)式を満たすことになる.

ここで抗力 \boldsymbol{f}_n と摩擦力 \boldsymbol{f}_t について,動摩擦係数 K_i を用いて

$$\boldsymbol{f}_{t} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{f}_{n}, \quad \boldsymbol{K} = \operatorname{diag}[K_{1}, K_{2}, \cdots, K_{p}] \quad (13)$$
$$0 < K_{i} < 1, (i = 1, 2, \cdots, p)$$

と表される [21] から, (11) 式は以下のようになる.

$$\begin{split} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D} \dot{\boldsymbol{q}} \\ &= \boldsymbol{\tau} + (\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{J}_t^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K}) \boldsymbol{f}_n \qquad (14) \end{split}$$

2.2 肘付き時の抗力の導出

本節では f_n の導出方法について述べる.まず, (11), (12)式から \ddot{q} を消去し, $(\partial C/\partial q^{\mathrm{T}})M^{-1}(\partial C/\partial q^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = M_c$ とおくと,

$$\boldsymbol{M}_{c}\boldsymbol{f}_{n} = \left\| \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}} \right\| \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \boldsymbol{M}^{-1} (\boldsymbol{J}_{t}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K} \boldsymbol{f}_{n} + \boldsymbol{D} \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} + \boldsymbol{g} - \boldsymbol{\tau}) - \left\| \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}} \right\| \boldsymbol{\dot{q}}^{\mathrm{T}} \left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right] \boldsymbol{\dot{q}} (15)$$

が得られる. さらに

$$\boldsymbol{B} = \left\| \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}} \right\| \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \boldsymbol{M}^{-1}$$
(16)

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{B} \{ \boldsymbol{D} \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} + \boldsymbol{g} \} - \left\| \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}} \right\| \dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right] \dot{\boldsymbol{q}} \quad (17)$$

とおくと、(15)式は、

$$\boldsymbol{M}_{c}\boldsymbol{f}_{n} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{J}_{t}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{f}_{n} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{a}$$
(18)

となる. さらに

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

とおくことにより, (1)式 が得られる. 抗力 f_n と入力 トルク τ の関係は代数方程式で表されることがわかる. f_n は p 次元ベクトルであり, τ は n 次元ベクトルで n > p であるから, f_n を実現する τ には拘束冗長性が ある.

2.3 ロボット・モータの連立方程式

モータの電流をベクトル**I**で表し,(14)式にモータの ダイナミクスを加えると次式となる.

$$(\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{J}_m) \ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + (\boldsymbol{D} + \boldsymbol{D}_m) \dot{\boldsymbol{q}}$$

= $\boldsymbol{K}_m \boldsymbol{I} + (\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{J}_t^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K}) \boldsymbol{f}_n$ (20)

ここで 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. D_m はモータの粘性抵抗係数行列. K_m はモー タのトルク定数行列である.(2)式と(11)式の関係と同 様に,(12)式を満たす \ddot{q} と(20)式の \ddot{q} が同じ値をとる とき,(20)式のq(t)は(2)式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

$$\boldsymbol{L}\frac{d\boldsymbol{I}}{dt} = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{R}\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_m \dot{\boldsymbol{q}}$$
(21)

を,(12)式および(20)式と連立させると,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,つぎのように表される.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} + \boldsymbol{J}_{m} & -(\boldsymbol{J}_{c}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{J}_{t}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}) & \boldsymbol{0} \\ \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{f}_{n} \\ d\boldsymbol{I}/dt \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{m}\boldsymbol{i} - \boldsymbol{h} - \boldsymbol{g} - (\boldsymbol{D} + \boldsymbol{D}_{m})\dot{\boldsymbol{q}} \\ -\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{v} - \boldsymbol{R}\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{m}\dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix}$$
(22)

拘束冗長性を利用する肘付き位置/カ 制御

モータのダイナミクスを考慮しない場合,目標抗力 f_{nd} を実現する解 τ は(1)式より,

$$\tau = B^{+}(a - Af_{nd}) + (I - B^{+}B)l$$
(23)

となる.ただし B^+ はBの疑似逆行列である.rank $(I - B^+B) = n - p$ であり, $I - B^+B$ は無次元の行列であ



Fig. 2 Simulation model

るから、lはトルクの次元をもつ.lを新しい入力とし、 **B**の零空間 $I - B^+ B$ を通して手先目標軌道 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、lに任意の入力を加えても f_{nd} の実現には影響を与えない.よって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 f_{nd} を実現するタスクは非干渉化できる.

ここではしの決定方法について述べる.本論文のシミュ 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自由度すべ てを利用してマニピュレータの制御を行う.

$$l = \tilde{j}_{2y}^{-1} [K_{p2y}(y_{d2} - y_2) + K_{d2y}(\dot{y}_{d2} - \dot{y}_2)] + J_4^{-1} [K_{p4}(r_{d4} - r_4) + K_{d4}(\dot{r}_{d4} - \dot{r}_4)]$$
(24)

ここで、 $\tilde{\boldsymbol{j}}_{2y}^{\mathrm{T}}$ は(4)式で定義されている $\tilde{\boldsymbol{J}}_{2}^{\mathrm{T}}$ を構成する 列ベクトル $\tilde{\boldsymbol{J}}_{2}^{\mathrm{T}} = [\tilde{\boldsymbol{j}}_{2y}^{\mathrm{T}}, \tilde{\boldsymbol{j}}_{2z}^{\mathrm{T}}]$ の中の第1列である.また、 K_{p2y} 、 K_{d2y} はそれぞれ Fig. 2に示す第2リンクの y 軸 方向の位置と速度の制御ゲインであり、 \boldsymbol{J}_{4} は第4リンク のヤコビ行列であり、 \boldsymbol{K}_{p4} 、 \boldsymbol{K}_{d4} はそれぞれ第4リンク の位置と速度の制御ゲイン行列である.

(23) 式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.本論文では,(23)式の コントローラの代わりに,次式を用いる.

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{v}} \left[\boldsymbol{B}^{+} (\boldsymbol{a} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{f}_{nd}) + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{B}^{+} \boldsymbol{B}) \boldsymbol{l} \right]$$
(25)

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Fig.2 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} =1.64×10⁻⁴ [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







Fig. 4 Comparison of energy consumption defined by Eq.(29)

ある.

また手先の目標軌道を次式で与える.

$$y_d(t) = 0.2\cos\frac{2\pi}{10}t + y_c \tag{26}$$

$$z_d(t) = 0.2\sin\frac{2\pi}{10}t + z_c \tag{27}$$

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, 消費エネルギーの導出方法を以下に示す. 時刻 0~ 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.

$$E_{i}(T) = \int_{0}^{T} v_{i}(t)I_{i}(t)dt$$
(28)

$$E_{sum}(T) = \sum_{i=1}^{4} E_i(T)$$
 (29)

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. Fig. 2 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 Fig. 3, Fig. 4 に示す. Fig. 3 より、肘を拘束すれば手先の精度は良くなることがわかる.また、Fig. 4 より消費エネルギーは 1/8~1/10程度削減できていることがわかる.つまり、肘付き運動



Fig. 5 Input voltages and currents of motors without bracing



Fig. 6 Input voltages and currents of motors with 2nd link bracing



Desired target trajectory $\mathbf{r}_{d4} = (y_{d4}(t), z_{d4}(t))$

Fig. 8 Position time profiles of hand with constraint

が有効であることがわかる.

肘を付かない場合と肘を付く場合の消費エネルギーの 差について検討するため, Fig.5 に肘を付かない場合の t=0からt=30[s]の(a)モータ電流(b)モータ印可電圧 を示す.(26)式,(27)式よりハンドの軌道追従の周期は 10[s]であるのでFig.5 には周期10[s]の変動とt=0直後 の過渡応答が見られる.

この肘付きなしの運動と比較するために Fig. 6 に肘を 付く場合を示す. Fig. 5(a) と Fig. 6(a) の第一関節のモー タ電流 I_1 を比較すると約 1/10 ほど小さいことがわかる. また Fig. 5(b) と Fig. 6(b) の第一関節のモータ印可電圧 v_1 を比較すると約 1/7 ほど小さくなっている. ほかの関



Fig. 9 Position time profiles of hand without constraint

節のモータの比較も同様であり、その結果 Fig.4の消費 エネルギーの差が生じたものと考えられる.

4.2 ハンド軌道追従特性と初期値依存性

Fig.7 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. (24) 式の y_{2d} は $y_{2d} = 0.4$ [m] とし、ゲインは $K_{p4} =$ diag[100,100], [N/m], $K_{d4} = diag[33,33]$, [Ns/m], K_{p2y} =150, [N/m], K_{d2y} =75, [Ns/m]と設定した. また, 初 期ハンド位置はFig.7に示す1~9の位置であり、初期肘 付き位置はすべての場合について (0.4,0) と固定した. 1 ~9の初期位置からスタートしたハンドの軌道追従結果を Fig.8(a) に示す.時間の経過とともにすべての軌道は一 つの軌道に収束している. つぎにハンドの軌道追従ゲイ ンを $K_{p4} = \text{diag}[200, 200], K_{d4} = \text{diag}[66, 66] とした場$ 合の結果を Fig. 8(b) に, $K_{p4} = \text{diag}[300, 300], K_{d4} =$ diag[100,100] とした場合の結果を Fig. 8(c) に示す.

以上の肘付き拘束条件を与えた場合の結果と比較する ため,肘を拘束しない条件の軌道追従結果を Fig.9 に示 す.この場合の制御則は (25) 式の肘付き拘束時の制御 則と同等の以下の式で表される.拘束条件がない場合,



Fig. 10 Transition diagram of the manipulator's configuration

 $\partial C/\partial q^T$ は零ベクトルと考えられるから, B = 0 であり, (23)式より, $\tau = l$ となる.また, (24)式より, 肘付き位置の制御部分は存在しないので, lは右辺第2項のみとなる.この $l \in (25)$ 式に代入すると, 次式の制御則が得られる.

$$v = K_v [J_4^{\mathrm{T}} (K_{p4} (r_{d4} - r_4) + K_{d4} (\dot{r}_{d4} - \dot{r}_4))]$$
 (30)

拘束条件を与えないこと以外のすべての条件は, Fig.8 の条件と等しい.図より明らかに軌道追従誤差が大きく なっており,肘付き拘束の利点は明らかである.

Fig. 10はFig. 7に示す初期ハンド位置1から目標軌道 追従運動を始めた場合における,(a)肘付きなし,(b)肘付 きありのロボットの形状の推移を示している.Fig. 10(a) では,ロボットの形状が大きく変化している.Cれは, もともと(24)式,(25)式で与えられる制御方法はロボッ トの形状に関する制御を行っていないため,肘付きのな い場合の制御式(30)も形状を制御するように意図されて いないためである.Cれに対して,(b)では全体の形状 制御を行っていないにもかかわらず肘付きにより大きな 形状の変化は見られない.

ここで, Fig. 8(c) の場合について考える. 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 を以下のよ うに定義する.

$$e(t) = \sqrt{(y_{d4} - y_4)^2 + (z_{d4} - z_4)^2} \tag{31}$$

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.

$$e_{ij}(t) = \sqrt{(y_{4i} - y_{4j})^2 + (z_{4i} - z_{4j})^2)}$$
(32)
(i,j = 1,2,...,9, i \neq j)

ただし, *i*,*j* は Fig. 7 における 1~9 を表す.

Fig. 11 を見ると、1~9の初期位置からスタートした (32)式で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. つぎに初期位置 1 と 2 の軌道の差 $e_{12}(t)$ を Fig. 12 に, その拡大図を Fig. 13 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 していないがほか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 響はない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.

$$E_{i}^{*}(T) = \int_{3}^{T} v_{i}(t)I_{i}(t)dt$$
(33)

$$E_{sum}^{*}(T) = \sum_{i=1}^{4} E_{i}^{*}(T)$$
(34)

ハンド負荷質量 M をパラメータとして 0.0, 0.2, …, 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} および初期肘付き位置 $y_2(0)$ を Fig. 14の w_1 から w_{17} 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.

Fig. 15 はハンド負荷がゼロの条件であり、その縦軸は (34)式で与える消費エネルギーである。またFig. 15の横 軸である肘付き位置とはFig. 2 における作業座標系 Σ_W の原点から肘付き位置 P 地点までの距離を表す。Fig. 15 より、ハンド負荷 M = 0 の場合、目標軌道の中心位置 (y_c, z_c)が A: (0.8, 0.5), B: (0.9, 0.5), C: (1.0, 0.5) と移動 するにつれて、最適肘付き位置は、0.4, 0.5, 0.6[m] であ



Fig. 12 Error profile between the trajectory started from initial point1 in Fig.7 and the trajectory started from point2



Fig. 13 Expanded error profile in Fig.12

ることがわかる. 図中の A, B, C は上記の目標軌道の 位置を表す A, B, C に対応している. また図より A, B, C と目標軌道中心位置が Fig.2 に示す y 軸正方向に変化 するにつれ,曲線の最低値を与える最適肘付き位置も y 軸正方向に移っている.

つぎに,手先に付けた対象物の質量 M を 0.2~1.2[kg] まで 0.2[kg] ずつ変化させて,それぞれの場合に対して Fig. 14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 Figs. 16~21 に 示す.

ここで Fig. 2 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、Fig. 15 の場合、S = 0.8 - 0.4 =0.4[m]となる。Fig. 16 の場合は、ほぼ $y_{d2} = 0.45$ で 最低であるから S = 0.8 - 0.45 = 0.35となる。同様に



Fig. 14 Desired elbow-bracing position in simulation: $w_1: y_{d2} = y_2(0) = 0.20,$ $w_2: y_{d2} = y_2(0) = 0.25$ $w_4: y_{d2} = y_2(0) = 0.35$ $w_3: y_{d2} = y_2(0) = 0.30,$ $w_5: y_{d2} = y_6(0) = 0.40,$ $w_6: y_{d2} = y_2(0) = 0.45$ $w_7: y_{d2} = y_9(0) = 0.50,$ $w_8: y_{d2} = y_2(0) = 0.55$ $w_{10}: y_{d2} = y_2(0) = 0.65$ $w_9: y_{d2} = y_2(0) = 0.60,$ $w_{11}: y_{d2} = y_2(0) = 0.70,$ $w_{12}: y_{d2} = y_2(0) = 0.75$ $w_{13}: y_{d2} = y_2(0) = 0.80,$ $w_{14}: y_{d2} = y_2(0) = 0.85$ $w_{15}: y_{d2} = y_2(0) = 0.90,$ $w_{16}: y_{d2} = y_2(0) = 0.95$ $w_{17}: y_{d2} = y_2(0) = 1.00$, where y_{d2} is given by Eq.(24)

して、Figs.15~21 より S は、0.40[m](M = 0.0)[kg], 0.35(M = 0.2), 0.30(M = 0.4), 0.25(M = 0.6), 0.20(M = 0.8), 0.15(M = 1.0), 0.15(M = 1.2) となり、これを図示したものをFig.22に示す。

Fig. 22より,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.

Figs.15~21 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,Figs.15~21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ことがわかる.

さらに、Fig. 15 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 にかかわらず 0.8 kJ であり、 M が増加するにつれ、Fig. 16 より、最小のエネルギー は 1.1 kJ(M=0.2)、Fig. 17 より 1.6(M=0.4) である。同 様にして 2.0 (M=0.6)、2.5 (M=0.8)、3.1 (M=1.0)、 3.8 (M=1.2) となる。以上をまとめて Fig. 23 に示す。図 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、Figs. 15~21において、肘付き位置 $y_{d2} & w_1:0.2$ から $w_{17}:1.0$ 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わかる。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きいことがわかる。











Fig. 18 Evaluation of energy consumption (M=0.6)

Fig. 19 Evaluation of energy consumption (M=0.8)

5. おわりに

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



Fig. 22 Best bracing distance "S" to give minimum energy consumption when the center of the target trajectory being set at A(0.8, 0.5)[m]



Fig. 23 Minimum energy consumption given by best bracing distance "S" by changing hand load "M" from 0 to 1.2 [kg]

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 論文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.

参考文献

- G. S. Chirikjian and J. W. Burdick: A hyperredundant manipulator; *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 22–29 (1994)
- [2] K. Glass, R. Colbaugh, D. Lim and H. Seraji: Realtime collision avoidance for redundant manipulators; *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.11, pp. 448–457 (1995)
- H. Seraji and B. Bon: Real-time collision avoidance for position-controlled manipulators; *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp. 670–677 (1999)
- [4] S. Hirose and R. Chu: Development of a light weight torque limiting M-drive actuator for hyper-redundant manipulator float arm; *Robotics and Automation*, 1999. Proc. of IEEE International Conference, Vol. 4, pp.2831–2836 (1999)
- [5] J. Roy and L. L. Whitcomb: Adaptive force control of position/velocity controlled robots: Theory and experiment; *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 2, pp. 121–137 (2002)
- [6] B. Siciliano and L. Villani: A passivity-based approach to force regulation and motion control of robot manipulators; *Automatica*, Vol. 32, No. 3, pp. 443–447 (1996)
- [7] L. Villani, C. C. de Wit and B. Brogliato: An exponentially stable adaptive control for force and position tracking of robot manipulators; *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 44, pp. 778–802 (1999)
- [8] J. D. Schutter and H. V. Brussel: Compliant robot motion 2. A control approach based on external control loops; *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 7, No. 4, pp. 18–33 (1988)
- [9] J. Park and O. Khatib: Multi-link multi-contact force control for manipulators; *Proc. of 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3624–3629 (2005)
- [10] A. Petrovskaya, J. Park and O. Khatib: Probabilistic estimation of whole body contacts for multicontact robot control; *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 568– 573 (2007)
- [11] T. Yoshikawa: Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—Description of hand constraints and calculation of joint driving force; *IEEE J. on Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 386–392 (1987)
- [12] K. Yamane and Y. Nakamura: O(N) forward dynamics computation of open kinematic chains based on the principle of virtual work; *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2824–2831 (2001)
- [13] K. Yamane and Y. Nakamura: Dynamics filter concept and implementation of on-line motion generator

for human figures; *IEEE Transactions on Robotics* and Automation, Vol. 19, No. 3, pp. 421–432 (2003)

- [14] H. West and H. Asada: A method for the design of hybrid position/force controllers for manipulators constrained by contact with the environment; *Proc.* of *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 251–260 (1985)
- [15] H. Hemami and B. F. Wyman: Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in the frontal plane; *IEEE Trans.* on Automatic Control, Vol. AC-24, No. 4, pp. 526– 535 (1979)
- [16] Z. X. Peng and N. Adachi: Position and force control of manipulators without using force sensors (in Japanese); Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers(C), Vol. 57, pp. 1625–1630 (1991)
- [17] W. Gu, H. Kataoka, F. Yu, T. Maeba, M. Minami and A. Yanou: 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)
- [18] 糸島,前場,見浪,矢納: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)
- [19] 糸島, 尾崎, 前場, 見浪, 矢納: 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化制御;第2回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会, pp. 57-64 (2012)
- [20] 近藤,糸島,見浪,矢納: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)
- [21] 河村, 矢野, 樋口, 杉田: 研削加工と砥粒加工, 加工学基礎2, 共立出版 (1984)

著者略歴





1990年9月13日生.2013年岡山大学 工学部システム工学科卒業,同年,同大学 大学院自然科学研究科機械システム工学専 攻博士前期課程入学,現在に至る.

いとしま みちゅき 糸島 道之



2011年岡山大学工学部システム工学科 卒業,2013年同大学大学院自然科学研究 科機械システム工学専攻博士前期課程修 了.同年,株式会社NTTデータ・アイに 入社,現在に至る.

^為 える 見 ね ^{* もる} (正会員)



1979年大阪府立大学工学部航空工学科 卒業,1981年大阪府立大学工学研究科航 空工学専攻修士課程修了,1993年金沢大学 大学院自然科学研究科博士課程修了,1994 年福井大学工学部機械工学科助教授,2002 年同学部知能システム工学科教授,2010

年岡山大学大学院自然科学研究科教授,現在に至る.ロボットの力学,拘束運動,力制御,移動マニピュレータの制御, 画像認識,ビジュアルサーボイングなどの研究に従事.博士 (工学).日本機械学会,計測自動制御学会,IEEEなどの 会員.



1996年岡山大学工学部情報工学科卒業, 1998年岡山大学大学院工学研究科修士課 程修了,2001年同大学大学院自然科学研 究科博士課程修了.同大学大学院研究生を 経て,2002年近畿大学工学部助手.2004 年同講師を経て,2009年岡山大学大学院

自然科学研究科助教,現在に至る.予測制御に関する研究に 従事.博士(工学).計測自動制御学会,日本機械学会など の会員.