

肘付き制御によるマニピュレータの作業精度と エネルギー効率の改善

○李 想 見浪 護 (岡山大学)

Merits Concerning Energy-consumption and Trajectory-tracking Accuracy Derived from Elbow-bracing Manipulator

*X.Li M.Minami (Okayama University)

Abstract- Considering that humans perform handwriting task with reduced powers by contacting elbow or wrist on a table, it is reasonable to deem that manipulators can save energy and simultaneously accomplish writing tasks precisely like humans by bracing intermediate links such as elbow or wrist. First this paper discusses equation of motion of robot under bracing constraint condition, based on the robot's dynamics with constraint condition including motor dynamics. Then a control method to utilize the constraint dynamics is proposed to control simultaneously bracing force and hand's trajectory in work space. Even though the model used for the simulation analyses is simple four-links manipulator, the simple structure can help understand even more clearly the effects got by bracing part of the manipulator. This paper demonstrates the merits of the strategy to utilize bracing by comparing the contacting motions with non-contacting motions, including; (1) the energy consumption can be reduced; (2) the hand trajectory tracking becomes accurate; (3) there is an optimum contacting point that minimize the energy consumption on condition that trajectory-tracking task be given to the hand.

Key Words: Bracing manipulator, Energy-consumption, Numerical simulation

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 Burdick¹⁾ 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。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、次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。



Fig. 1: Human's writing motion

Whitcomb⁵⁾ は、ロボットの拘束状態の運動と制御に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ー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 Asada¹⁴⁾ 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。

本報では、(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, 12, 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。

$$A\mathbf{f}_n = \mathbf{a} - \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

\mathbf{f}_n は抗力、 \mathbf{A} と \mathbf{a} 、 \mathbf{B} は次章で定義されるベクトルと行列、 $\boldsymbol{\tau}$ は入力トルクベクトルである。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。上式は、二足歩行の分野で Hemami¹⁵⁾ が導出し、ロボティクスの分野では Peng¹⁶⁾ により最初に適用された。Peng は $\boldsymbol{\tau}$ を入力とし、 \mathbf{f}_n を出力とすることで、式(1)を力センサーとして用いている。本論文では逆に目標抗力 \mathbf{f}_{nd} を達成するための入力トルク $\boldsymbol{\tau}$ 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報では講演発表会^{18, 19, 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

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{r}(\mathbf{q})) &= [C_1(\mathbf{r}_1(\mathbf{q})), C_2(\mathbf{r}_2(\mathbf{q})), \dots, C_p(\mathbf{r}_p(\mathbf{q}))]^T \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

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

式(4)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。

本報では、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、

$$\left(\frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| = \mathbf{j}_{ci}^T \quad (5)$$

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

の $n \times 1$ のベクトルとなる。さらに

$$\mathbf{J}_c^T = [\mathbf{j}_{c1}^T, \mathbf{j}_{c2}^T, \dots, \mathbf{j}_{cp}^T] \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_t^T = [\mathbf{j}_{t1}^T, \mathbf{j}_{t2}^T, \dots, \mathbf{j}_{tp}^T] \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_n = [f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{np}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{f}_t = [f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tp}]^T \quad (10)$$

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、

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ci}^T f_{ni}) - \sum_{i=1}^p (\mathbf{j}_{ti}^T f_{ti}) \\ = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_c^T \mathbf{f}_n - \mathbf{J}_t^T \mathbf{f}_t \end{aligned} \quad (11)$$

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

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

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、式(11)の解 $\mathbf{q}(t)$ が時間 t に無関係に式(2)

を満たさなければならない。式(2)の時間微分によって得られた式(12)を満たす $\ddot{\mathbf{q}}$ と式(11)の $\ddot{\mathbf{q}}$ が同じ値をとるとき、式(11)の $\mathbf{q}(t)$ は式(2)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、動摩擦係数 K_i を用いて

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_t = \mathbf{K} \mathbf{f}_n, \quad \mathbf{K} = \text{diag}[K_1, K_2, \dots, K_p] \\ 0 < K_i < 1, (i = 1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (13)$$

と表される²¹⁾から、式(11)は以下のようになる。

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

2.2 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。まず、式(11)、(12)から $\ddot{\mathbf{q}}$ を消去し、 $(\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}^T) \mathbf{M}^{-1} (\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}^T)^T = \mathbf{M}_c$ と置くと、

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_c \mathbf{f}_n &= \left\| \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \left(\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_t^T \mathbf{K} \mathbf{f}_n + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} \\ &\quad + \mathbf{g} - \boldsymbol{\tau}) - \left\| \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \dot{\mathbf{q}}^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。さらに

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

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

と置くと、式(15)は、

$$\mathbf{M}_c \mathbf{f}_n = \mathbf{B} \mathbf{J}_t^T \mathbf{K} \mathbf{f}_n - \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{a} \quad (18)$$

となる。さらに

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

と置くことにより、式(1)が得られる。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。

2.3 ロボット・モータの連立方程式

モータの電流をベクトル \mathbf{I} で表し、式(14)にモータのダイナミクスを加えると次式となる。

$$\begin{aligned} (\mathbf{M}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}_m) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + (\mathbf{D} + \mathbf{D}_m) \dot{\mathbf{q}} \\ = \mathbf{K}_m \mathbf{I} + (\mathbf{J}_c^T - \mathbf{J}_t^T \mathbf{K}) \mathbf{f}_n \end{aligned} \quad (20)$$

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(2)と式(11)の関係と同様に、式(12)を満たす $\ddot{\mathbf{q}}$ と式(11)の $\ddot{\mathbf{q}}$ が同じ値をとるとき、式(11)の $\mathbf{q}(t)$ は式(2)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

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{v} - \mathbf{RI} - \mathbf{K}_m \dot{\mathbf{q}} \quad (21)$$

を、式(12)および式(11)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。

$$\begin{bmatrix} M + J_m & -(J_c^T - J_t^T K) & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ dI/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_m i - h - g - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - RI - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

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 f_{nd} を実現する解 τ は式(1)より、

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

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るから、 l はトルクの次元を持つ。 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 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。

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

ここで、 \tilde{j}_{2y}^T は式(4)で定義されている \tilde{J}_2^T を構成する列ベクトル $\tilde{J}_2^T = [\tilde{j}_{2y}^T, \tilde{j}_{2z}^T]$ 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、 J_4 は第4リンクのヤコビ行列であり、 K_{p4} 、 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。

式(23)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(23)のコントローラの代わりに、次式を用いる。

$$v = K_v [B^+(a - Af_{nd}) + (I - B^+B)l] \quad (25)$$

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

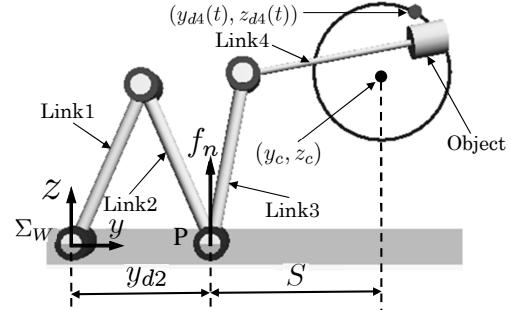


Fig. 2: Simulation model

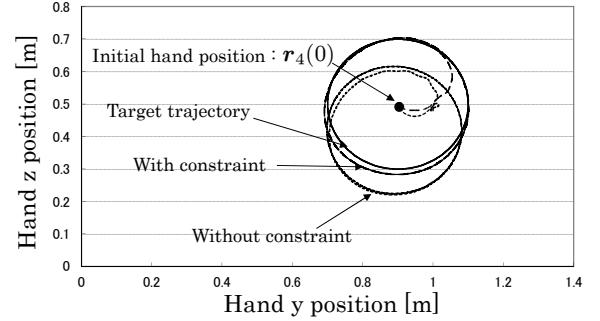


Fig. 3: Position time profile of hand

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。

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

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

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 $0 \sim T$ [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。

$$E_i(T) = \int_0^T v_i(t) I_i(t) dt \quad (28)$$

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

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分かる。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。

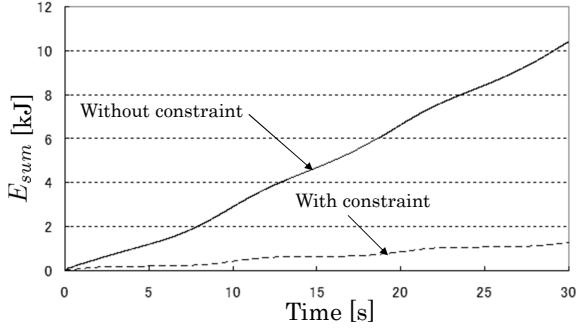
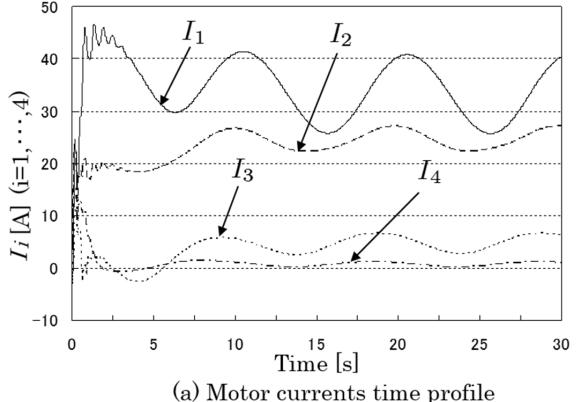
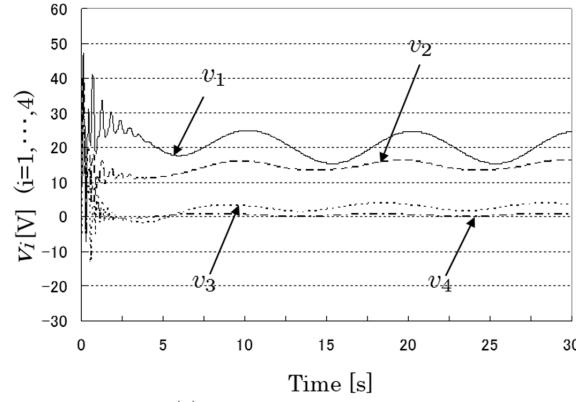


Fig. 4: Comparison of energy consumption defined by Eq.(29)



(a) Motor currents time profile

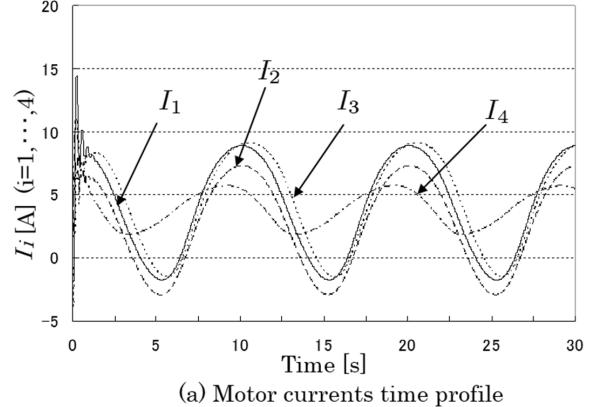


(b) Input voltage time profile

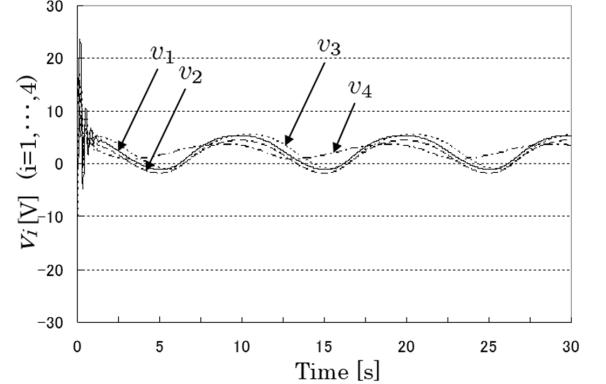
Fig. 5: Input voltages and currents of motors without bracing

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 $t = 30[\text{s}]$ の (a) モータ電流 (b) モータ印可電圧を示す。式(26), 式(27)よりハンドの軌道追従の周期は $10[\text{s}]$ であるので Fig.5 には周期 $10[\text{s}]$ 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 $1/10$ ほど小さいことが分かる。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。他の関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。



(a) Motor currents time profile



(b) Input voltage time profile

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

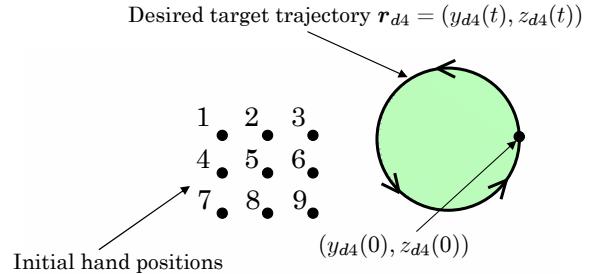


Fig. 7: Initial hand positions

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 $1 \sim 9$ 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 $4 [\text{kg}]$ と設定したことを考慮し、 $f_{n2d} = 30[\text{N}]$ と与えた。式(24)の y_{2d} は $y_{2d} = 0.4[\text{m}]$ とし、ゲインは $\mathbf{K}_{p4} = \text{diag}[100, 100], [\text{N}/\text{m}], \mathbf{K}_{d4} = \text{diag}[33, 33], [\text{Ns}/\text{m}], K_{p2y} = 150, [\text{N}/\text{m}], K_{d2y} = 75, [\text{Ns}/\text{m}]$ と設定した。また、初期ハンド位置は Fig.7 に示す $1 \sim 9$ の位置であり、初期肘付き位置は全ての場合について $(0.4, 0)$ と固定した。 $1 \sim 9$ 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。次にハンドの軌道追従ゲインを $\mathbf{K}_{p4} = \text{diag}[200, 200], \mathbf{K}_{d4} = \text{diag}[66, 66]$ とした場

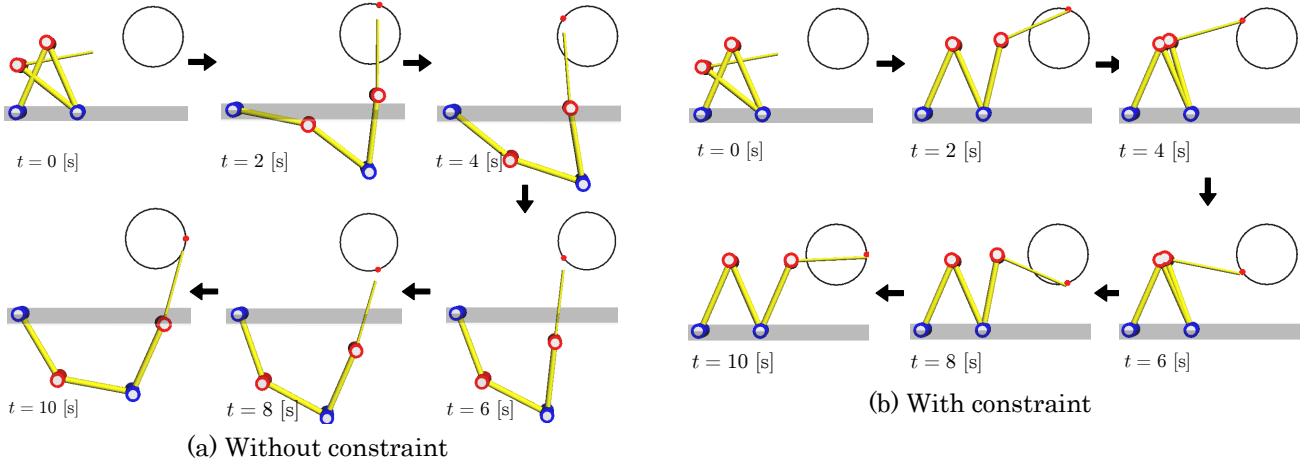


Fig. 10: Transition diagram of the manipulator's configuration

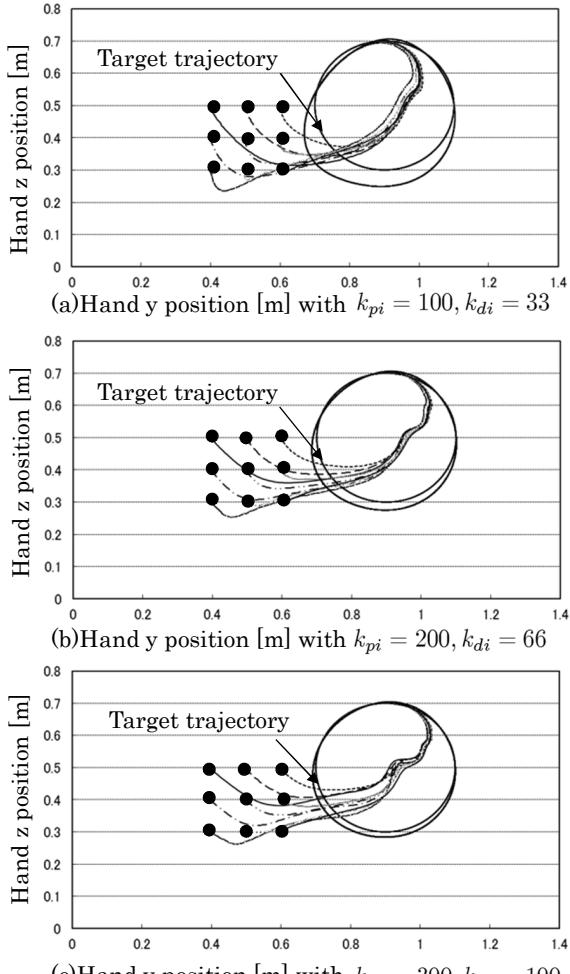


Fig. 8: Position time profiles of hand with constraint

合の結果を Fig.8(b) に, $\mathbf{K}_{p4} = \text{diag}[300, 300]$, $\mathbf{K}_{d4} = \text{diag}[100, 100]$ 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式(25)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, $\partial C / \partial \mathbf{q}^T$ は零ベクトルと考えられるから, $\mathbf{B} = \mathbf{0}$

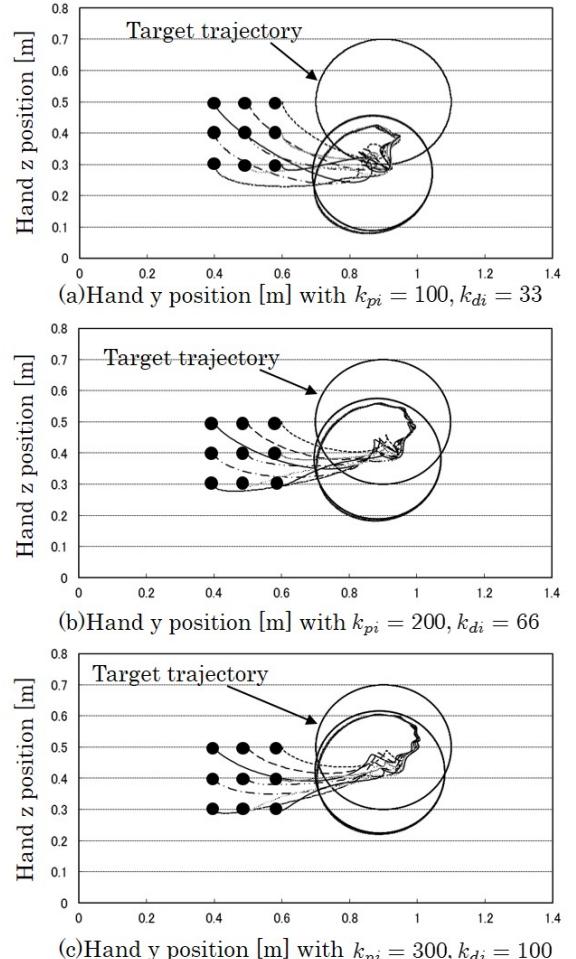


Fig. 9: Position time profiles of hand without constraint

であり, 式(23)より, $\tau = \mathbf{l}$ となる。また, 式(25)より, 肘付き位置の制御部分は存在しないので, \mathbf{l} は右辺第2項のみとなる。この \mathbf{l} を式(25)に代入すると, 次式の制御則が得られる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}_v [\mathbf{J}_4^T (\mathbf{K}_{p4}(\mathbf{r}_{d4} - \mathbf{r}_4) + \mathbf{K}_{d4}(\dot{\mathbf{r}}_{d4} - \dot{\mathbf{r}}_4))] \quad (30)$$

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

くなっている、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。これは、もともと式(25)、式(25)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。これに対して、(b) では全体の形状制御を行っていないにも関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。

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

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。

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

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式(32)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 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。

$$E_i^*(T) = \int_3^T v_i(t) I_i(t) dt \quad (33)$$

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

ハンド負荷質量 M をパラメータとして $0.0, 0.2, \dots, 1.2$ [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 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。

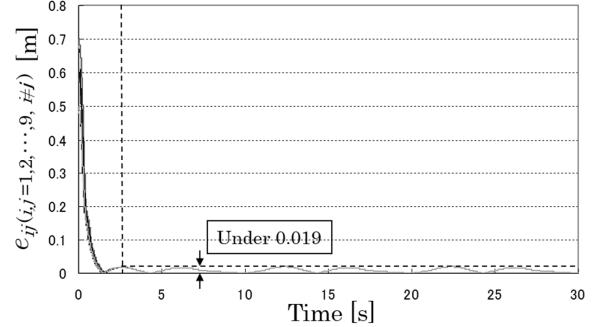


Fig. 11: Error of the hand

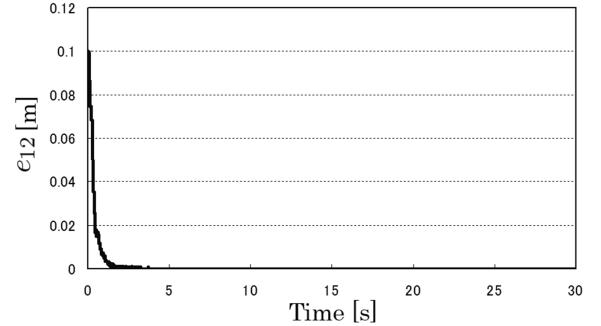


Fig. 12: Error profile between the trajectory started from initial point1 in Fig.7 and the trajectory started from point2

Fig.15 はハンド負荷がゼロの条件であり、その縦軸は式(34)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] であることが分かる。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。

次に、手先に付けた対象物の質量 M を $0.2 \sim 1.2$ [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が 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

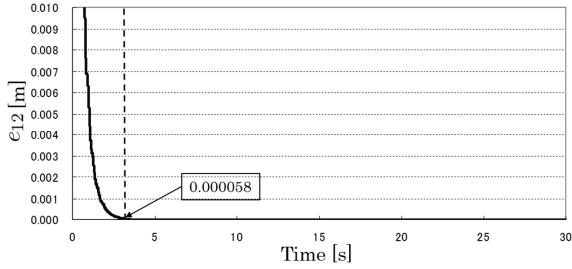


Fig. 13: Expanded error profile in Fig. 12

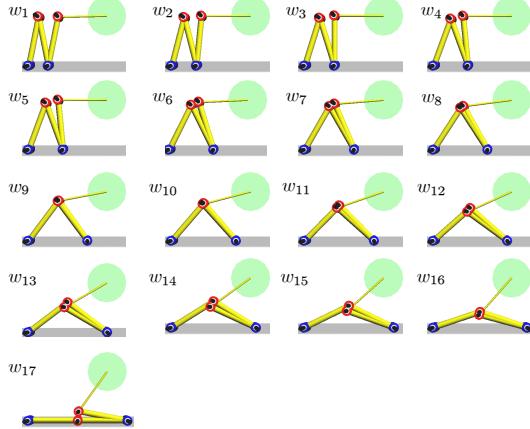


Fig. 14: Desired elbow-bracing position in simulation:
 $w_1 : y_{d2} = y_2(0) = 0.20, \quad w_2 : y_{d2} = y_2(0) = 0.25$
 $w_3 : y_{d2} = y_2(0) = 0.30, \quad w_4 : y_{d2} = y_2(0) = 0.35$
 $w_5 : y_{d2} = y_6(0) = 0.40, \quad w_6 : y_{d2} = y_2(0) = 0.45$
 $w_7 : y_{d2} = y_9(0) = 0.50, \quad w_8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

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分かる。

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 に関わらず 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} を $w_1 : 0.2$ 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きいことが分かる。

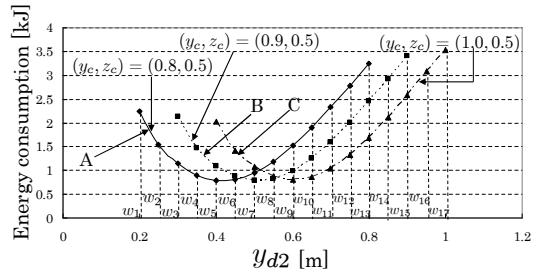


Fig. 15: Evaluation of energy consumption($M=0.0$)

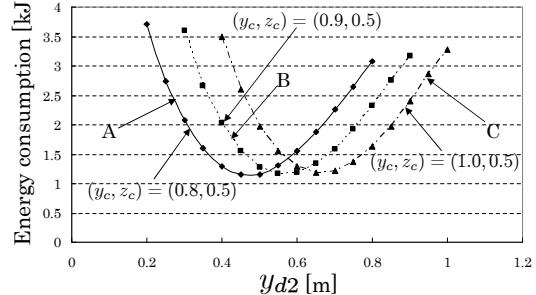


Fig. 16: Evaluation of energy consumption($M=0.2$)

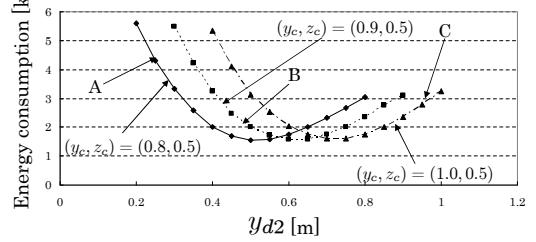


Fig. 17: Evaluation of energy consumption($M=0.4$)

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。

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)
- 2) K. Glass, R. Colbaugh, D. Lim and H. Seraji: Real-time collision avoidance for redundant manipulators; *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.11, pp.448-457 (1995)
- 3) 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)

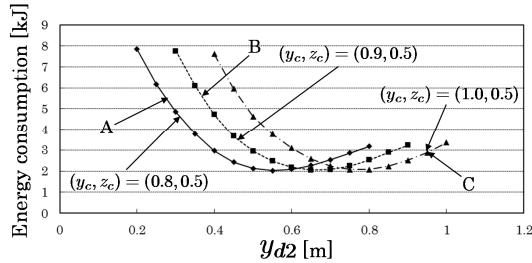


Fig. 18: Evaluation of energy consumption($M=0.6$)

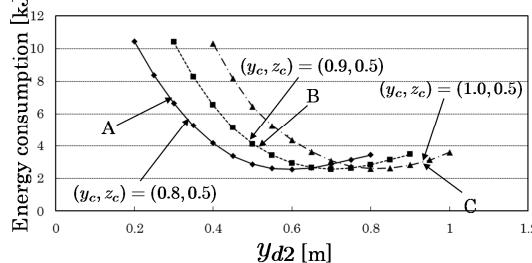


Fig. 19: Evaluation of energy consumption($M=0.8$)

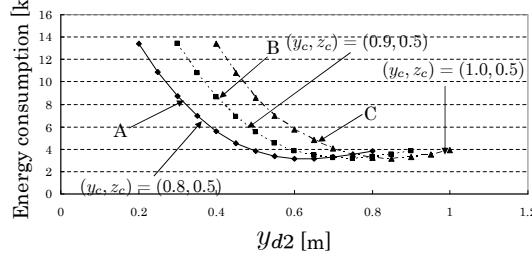


Fig. 20: Evaluation of energy consumption($M=1.0$)

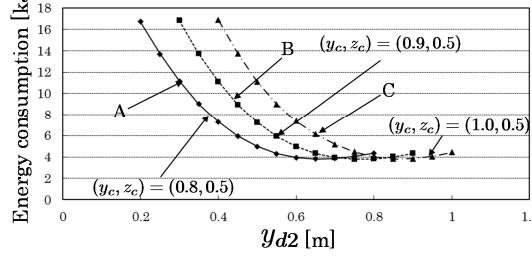


Fig. 21: Evaluation of energy consumption($M=1.2$)

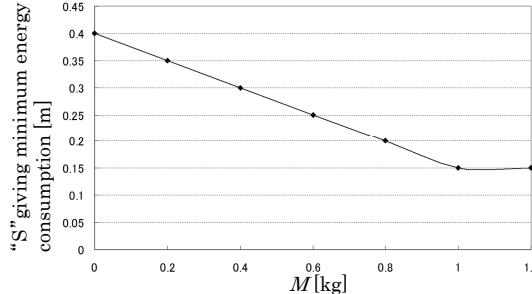


Fig. 22: Best bracing distance “ S ” to give minimum energy consumption when the center of the target trajectory being set at A(0.8,0.5)[m]

- 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-

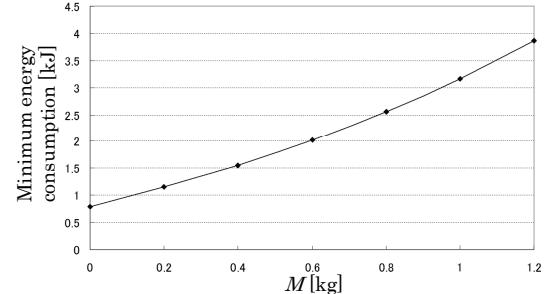


Fig. 23: Minimum energy consumption given by best bracing distance “ S ” by changing hand load “ M ” from 0 to 1.2 [kg]

- 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 Multi-Contact 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)
 - 19) 糸島道之, 尾崎壮祐, 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化制御; 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)
 - 20) 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)
 - 21) 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)