

ロボットの肘つき動作のモデリングと高精度省エネルギー効果

福井大学 ○陳 光華, 山本 賢, 王 庚, 見浪 護

High Accuracy/Low Energy Consumption Effect of Constraint Utilization of Robot

○ Guanghai CHEN, Masaru YAMAMOTO, Geng WANG and Mamoru MINAMI, University of Fukui

Abstract: In this paper, it proposes a dynamical robot model with multi-point elbow(Its modeling is realized through the integration of constrained multi-point state and motion equation). The simulation result shows that energy consumption when elbow is attached less than elbow is not attached.

1 緒言

多関節マニピュレータはリンクの数が増えるほど自重が増してしまい、制御する為にはより大きな力が必要となる。また、自重によって手先が下がってしまい、手先の精度も悪くなる。そこで、人間が肘をつくことによって少ない力で正確に作業を行えることを考え、同様に多関節マニピュレータにも同じことが言えるであろうと考える。本研究では、多点肘つきロボットの動力学モデル(多点拘束状態と運動方程式の統合によりモデル化を実現)を提案し、このモデルを使用して、肘をついたほうが肘をつかない時より少ない消費エネルギーで正確に作業が行えることをシミュレーションにより示す。

2 拘束運動

2.1 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 θ_i 、発生トルク τ_{gi} 、負荷トルク τ_{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 [2]。

$$\text{電圧方程式} : v_i(t) = L_i \dot{i}_i + R_i i_i(t) + v_{gi}(t) \quad (1)$$

$$\text{逆起電力} : v_{gi}(t) = K_{Ei} \dot{\theta}_i(t) \quad (2)$$

$$\text{運動方程式} : I_{mi} \ddot{\theta}_i = \tau_{gi}(t) - \tau_{Li}(t) - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (3)$$

$$\text{発生トルク} : \tau_g(t) = K_{Ti} i_i(t) \quad (4)$$

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(2)を式(1)に、式(4)を式(3)にそれぞれ代入すると、

$$v_i = L_i \dot{i}_i + R_i i_i + K_i \dot{\theta}_i \quad (5)$$

$$I_{mi} \ddot{\theta}_i = K_i i_i - \tau_{Li} - d_{mi} \dot{\theta}_i \quad (6)$$

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、

$$\theta_i = k_i q_i \quad (7)$$

$$\tau_{Li} = \frac{\tau_i}{k_i} \quad (8)$$

となり、式(5)、式(6)を \dot{i}_i と τ_i の式にすると、

$$L_i \dot{i}_i = v_i - R_i i_i - K_i k_i \dot{q}_i \quad (9)$$

$$\tau_i = -I_{mi} k_i^2 \ddot{q}_i + K_i k_i i_i - d_{mi} k_i^2 \dot{q}_i \quad (10)$$

となる。式(9)、式(10)をベクトル、行列で表記する場合、

$$L \dot{i} = v - R i - K_m \dot{q} \quad (11)$$

$$\tau = -J_m \ddot{q} + K_m i - D_m \dot{q} \quad (12)$$

と置く。ここに、

$$v = [v_1, v_2, \dots, v_s]^T$$

$$i = [i_1, i_2, \dots, i_s]^T$$

であり、また、

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

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

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

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

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

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

と定義し、すべて正の要素を持つ。

式(12)から運動方程式と一緒に整理すると、

$$(M(q) + J_m) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) + (D + D_m) \dot{q} = K_m i + J_c^T f_n - J_t^T f_t \quad (13)$$

となる。

2.2 複数拘束条件付、ロボット/モータの連立方程式

式(13)の \ddot{q} をとるため、拘束力 f_n は従属的に決定される。この関係を陽に表すため、式(13)を、

$$(M + J_m) \ddot{q} - J_c^T f_n = K_m i - H - G - (D + D_m) \dot{q} - J_t^T f_t \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial C_i}{\partial q^T}\right) \ddot{q} = - \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_i}{\partial q} \right) \dot{q} \right] \dot{q}$$

$$= - \dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_i}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \quad (15)$$

と変形する。式(15)の左辺の $\partial C_i / \partial q^T$ は $1 \times s$ の横ベクトルであり、右辺の $\dot{q}^T \left[(\partial / \partial q) (\partial C_i / \partial q^T) \right] \dot{q}$ は 1×1 のス

カラーである。式(14),式(15),式(9)を合わせて以下の様な式に表す。ただし,摩擦係数 $j_{ti}^T f_{ti} = 0 (i = 1, 2, \dots, p)$ とする。

$$\begin{bmatrix} M + J_m & -j_{c1}^T & \cdots & -j_{cp}^T & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial C_1}{\partial q^T} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial C_p}{\partial q^T} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & L_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_{n1} \\ \vdots \\ f_{np} \\ \dot{i}_1 \\ \vdots \\ \dot{i}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_m \dot{i} - H - G - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_1}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ \vdots \\ -\dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_p}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ v_1 - R_1 \dot{i}_1 - K_{m1} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ v_i - R_s \dot{i}_s - K_{mi} \dot{q}_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

慣性項 $(M + J_m)$ が $s \times s$ 行列, 拘束力の係数ベクトル j_{ci}^T が $s \times 1$ の縦ベクトル, $\partial C_i / \partial q^T$ が $1 \times s$ の横ベクトル, インダクタンス L が $s \times s$ の対角行列であることより, 式(16)の左辺第1項の行列は $(2s + p) \times (2s + p)$ 行列である。

式(16)は式(11)の定義を用いると次のように表される。

$$\begin{bmatrix} M + J_m & -J_c^T & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_m \dot{i} - H - G - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - R \dot{i} - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (17)$$

ただし,

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_p]^T \quad (18)$$

の $p \times s$ 行列である。さらに,

$$M^* = \begin{bmatrix} M + J_m & -J_c^T & 0 \\ \frac{\partial C}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$b = \begin{bmatrix} K_m \dot{i} - H - G - (D + D_m) \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left[\frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C}{\partial q^T} \right) \right] \dot{q} \\ v - R \dot{i} - K_m \dot{q} \end{bmatrix} \quad (20)$$

とおくと, 式(17)は,

$$M^* \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ \dot{i} \end{bmatrix} = b \quad (21)$$

と表される。これが提案する複数拘束条件付, ロボット/モータの連立方程式である。

3 順動力学の解法

マニピュレータの運動方程式を陽に求めることは困難である。特に本研究では肘をつくことによってハンドを遠くまで伸ばし, 作業範囲を広げる冗長マニピュレータを想定しているため, 式(13)の運動方程式を求めることになる。

このような多リンクマニピュレータの運動方程式を解析的に求めることはとても難しく, 不可能と考えてもよい。従って, ニュートン・オイラー法を利用して, 解析的に求めることの難しい運動方程式(13)を数値的に簡単に解くことができる方法がすでに提案されている [3][4]。まず, 式(13)を次のように置く。

$$M_J \ddot{q} + B_J = \tilde{\tau} \quad (22)$$

ただし,

$$\begin{aligned} M_J &= M(q) + J_m \\ B_J &= H(q, \dot{q}) + G(q) + (D + D_m) \dot{q} \\ \tilde{\tau} &= K_m \dot{i} + J_c^T f_n - J_t^T f_t \end{aligned} \quad (23)$$

である。式(22)の運動方程式をニュートン・オイラー法により, 正順計算を根元のリンクから各リンクごとにハンドまで行い, 逆順計算を逆方向におこなうことにより,

$$\tilde{\tau}_i = {}^i z_i^{Ti} n_i + J_{mi} \ddot{q}_i + (D_i + D_{mi}) \dot{q}_i \quad (23)$$

と求めることができる。式(22)の運動方程式は式(23)より $\tilde{\tau} = [\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2, \dots, \tilde{\tau}_n]^T$ と求めることができる。

次に \ddot{q} を求めるのに必要な $s \times s$ 行列 M_J と $s \times 1$ の縦ベクトル B_J を計算する。この計算に上で示したニュートン・オイラー法を利用する。まず $\tilde{\tau} = INV[q, \dot{q}, \ddot{q}, g]$ と置くと式(22)は,

$$M_J \ddot{q} + B_J = INV[q, \dot{q}, \ddot{q}, g] \quad (24)$$

と置くことができる。式(24)に $\ddot{q} = 0$ を代入すると,

$$B_J = INV[q, \dot{q}, 0, g] \quad (25)$$

となり, B_J が求まる。次に, 式(24)に $g = 0, \dot{q} = 0, \ddot{q} = e_i (i = 1, 2, \dots, s)$ を代入すると,

$$m_i = M_J e_i = INV[q, 0, e_i, 0] \quad (26)$$

となる。 m_i は慣性行列 M の第 i 列の成分であり, e_i は第 i 行目が1で, 他は全て0の $l \times 1$ 行列であるので, 式(26)より $M_J = [m_1, m_2, \dots, m_l]$ が求まる。

4 軌道追従のシミュレーション

以上の内容を用いて円軌道追従のシミュレーションを行う。また, コントローラーは以下のようなPD制御の電圧入力とする。

$$v = k_p(q_d - q) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (27)$$

$$r_d(t) = f(q_d) \quad (28)$$

$$q_d = f^{-1}(r_d(t)) \quad (29)$$

k_p は比例ゲインを表す $s \times s$ の対角行列, k_d は速度ゲインを表す $s \times s$ の対角行列であり, q_d, \dot{q}_d はそれぞれ目標の関節角度, 関節角速度である.

今回のシミュレーションの設定条件として, 質量 $m_i = 0.1[kg]$, リンク長 $l_1 = 0[m], l_j = 0.3[m]$, 円柱リンクの半径 $r_i = 0.01[m]$, 比例ゲイン $k_{pi} = 500$, 速度ゲイン $k_{di} = 20$, 関節の粘性摩擦係数 $D_i = 0.5$, 逆起電力定数, トルク定数 $K_i = 0.203$, 抵抗 $R_i = 1.1[\Omega]$ インダクタンス $L_i = 0.0017[H]$, モータの慣性モーメント $I_{mi} = 0.000164$, 減速比 $k_i = 3.0$, 減速機の粘性摩擦係数 $d_{mi} = 0.01$, 摩擦力 $f_{ti} = 0$ とし, 各関節の初期状態を, $q_1(0) = 0, q_2(0) = 0.25\pi, q_3(0) = 0.5\pi, q_4(0) = -0.5\pi, q_5(0) = 0.25\pi, q_6(0) = 0.25\pi, q_7(0) = -0.5\pi, q_8(0) = 0.25\pi, q_9(0) = -0.25\pi, \dot{q}_1(0) = 0.25\pi [rad], \dot{q}_i = 0 [rad/s]$ とする. また, 目標軌道には $q_{d2}(t) = 0.25\pi, q_{d3}(t) = 0.5\pi, q_{d4}(t) = -0.5\pi, q_{d5}(t) = 0.25\pi, q_{d6}(t) = 0.25\pi, q_{d7}(t) = -0.5\pi, q_{d8}(t) = 0.25\pi [rad]$ を固定とし, 座標 $(x, y, z) = (1.5, 1.5, 0.4)$ を中心とした半径 $0.1[m]$ の円を手先が反時計回りに回転する円軌道を与える. 拘束条件は, $C = z = 0$ とする. また, シミュレーションは, 第4関節と第7関節が拘束されている2点肘付きの運動, 第4関節のみが拘束されている1点肘付きの運動, 肘をつかない運動の3通りを行う. シミュレーションの結果を Fig.1~ Fig.25 に示す.

Fig.1 は xy 座標平面上の2点肘付き, 1点肘付き, 肘なしの手先の軌道. 同様に Fig.2 は xz 座標平面上の2点肘付き, 1点肘付き, 肘なしの手先の軌道, Fig.3 は yz 座標平面上の2点肘付き, 1点肘付き, 肘なしの手先の軌道であり, これらは時間 $t = 0 \sim 5[s]$ 間の軌道である. また, Fig.4 は時間 t までにマニピュレータの全リンクがした仕事の合計であり, Fig.5 は時間 t までに全モータが消費した電力量の合計である.

また, Fig.4, Fig.5 を各リンク毎の仕事, 電力量に分けたグラフを Fig.6~ Fig.25 に示す.

5 結言

Fig.1~ Fig.3 より, 多く肘をついた方がつかないよりも正確に円軌道を追従できていることが分かる. 特に, 重力の働く z 軸方向には, 肘をつかない運動は肘が下がってしまう影響で手先も下がってしまい, うまく手先追従ができていない. また, Fig.4, Fig.5 より, たとえマニピュレータのする仕事と同じでも, 消費電力量で肘をつかない運動の方が大きくなってしまふ. これは Fig.6~ Fig.25 より, 肘をつく前のリンクになるほど消費電力量の差は大きくなる. 以上より, 肘をついた運動のほうが, 肘をつかない運動よりも少ない力, 少ない消費エネルギーで正確に作業が行えることが分かる.

参考文献

- [1] 池田毅, 見浪護: “代数方程式に着目した力センサを用いないグライディングロボットの研究”, 日本機械学会論文集中 (C 編), vol.71, no.702, pp.624-631, 2005
- [2] 神崎一男: “基礎メカトロニクス”, 共立出版株式会社, pp.70-75, 1994.
- [3] 美多勉, 大須賀一: “ロボット制御工学入門”, コロナ社, pp.62-69, pp73-76, 1989.
- [4] M.W.Walker and D.E.orin: “Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms, ASME J.of DSMC,104, pp,468-474, 1982

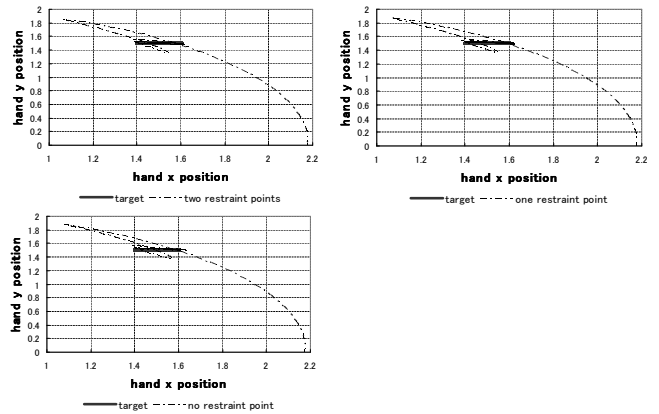


Fig. 1: Trajectory tracking of circle on x-y plane

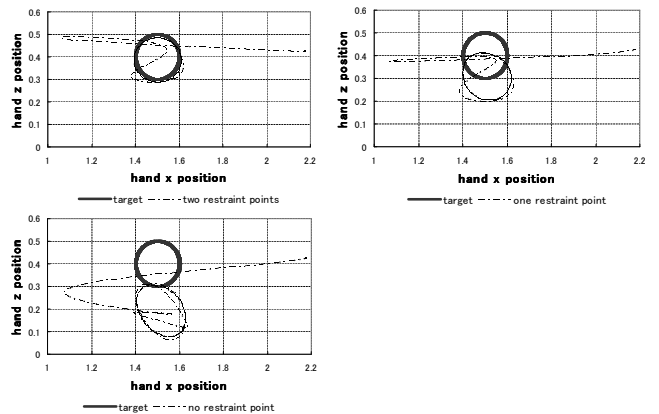


Fig. 2: Trajectory tracking of circle on x-z plane

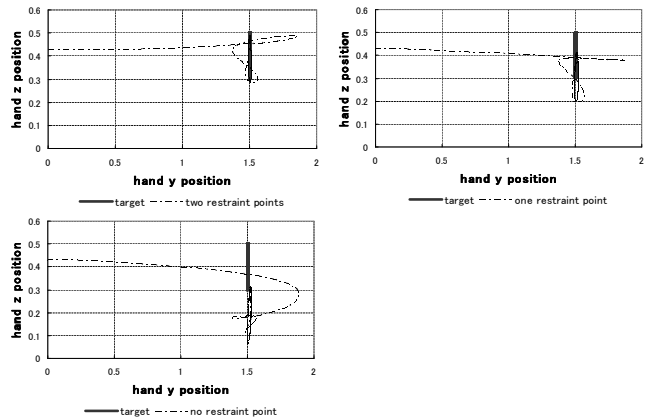


Fig. 3: Trajectory tracking of circle on y-z plane

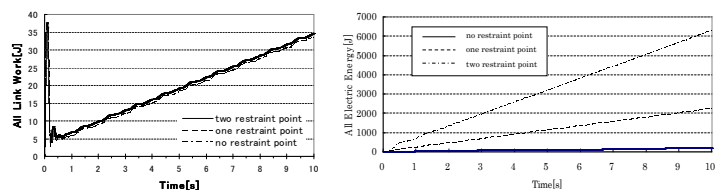


Fig. 4: All link work Fig. 5: All electric energy
 $(\int \tau \cdot \dot{q} dt)$ $(\int i \cdot v dt)$

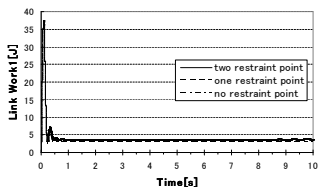


Fig. 6: Link work of the first link

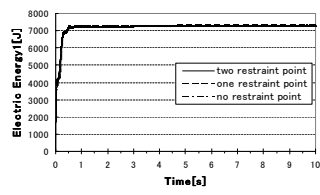


Fig. 7: Electric energy of the first link

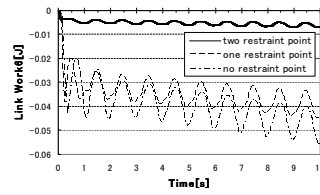


Fig. 16: Link work of the sixth link

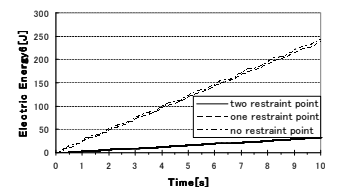


Fig. 17: Electric energy of the sixth link

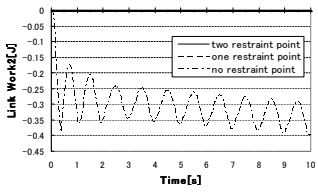


Fig. 8: Link work of the second link

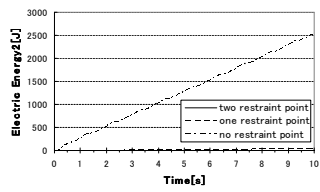


Fig. 9: Electric energy of the second link

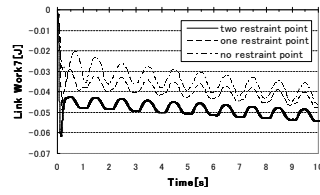


Fig. 18: Link work of the seventh link

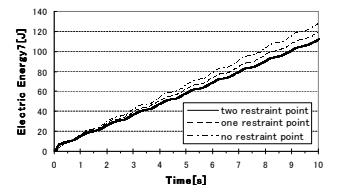


Fig. 19: Electric energy of the seventh link

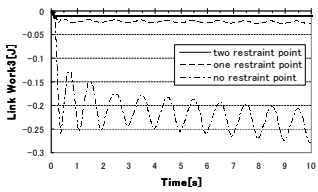


Fig. 10: Link work of the third link

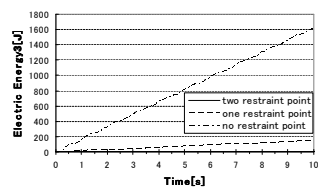


Fig. 11: Electric energy of the third link

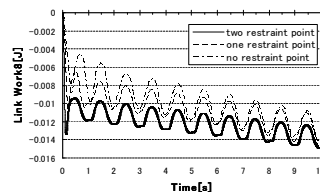


Fig. 20: Link work of the eighth link

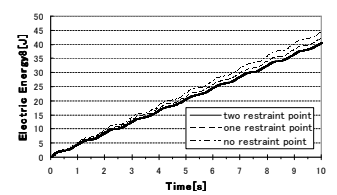


Fig. 21: Electric energy of the eighth link

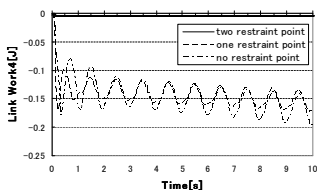


Fig. 12: Link work of the fourth link

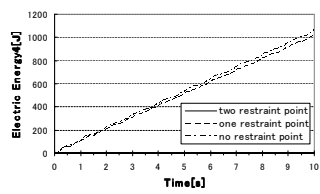


Fig. 13: Electric energy of the fourth link

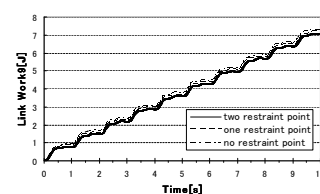


Fig. 22: Link work of the ninth link

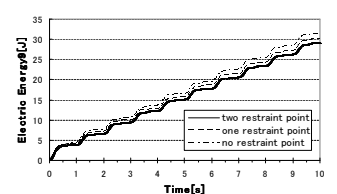


Fig. 23: Electric energy of the ninth link

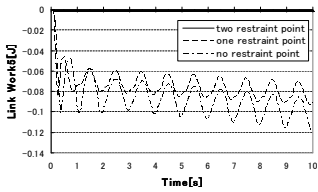


Fig. 14: Link work of the fifth link

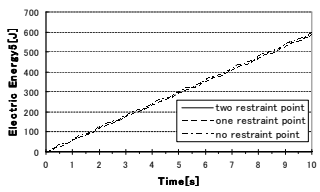


Fig. 15: Electric energy of the fifth link

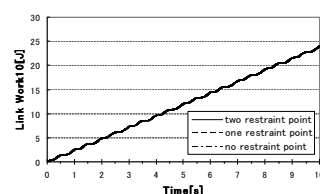


Fig. 24: Link work of the tenth link

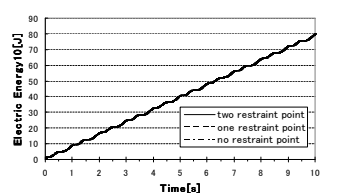


Fig. 25: Electric energy of the tenth link