2 リンクブラキエーションロボットの制御*

(目標ダイナミクス法による枝間隔の異なる枝渡りの実現)

中西 淳^{*1}, 福田 敏男^{*2}, Daniel E. KODITSCHKEK^{*3}

Study on the Control of a Two-Link Brachiating Robot

(Brachiation on a Ladder with Irregular Intervals via Target Dynamics)

Jun NAKANISHI, Toshio FUKUDA^{*4} and Daniel E. KODITSCHKEK

^{*4} Nagoya University, Center for Cooperative Research in Advanced Science and Technology
1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

We have previously developed a brachiation controller that allows a two degree of freedom robot to swing from handhold to handhold on a horizontal ladder with evenly spaced rungs as well as swing up from a suspended posture using a "target dynamics" controller. Inspired by the pendulum motion of an ape's brachiation, the task is encoded as an output of an appropriately chosen target dynamical system. In this paper, we extend this class of algorithms to handle the much more natural problem of locomotion over irregularly spaced handholds, which we term the "irregular ladder problem." Numerical simulations and laboratory experiments illustrate the effectiveness of this generalization.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Nonlinear Control, Brachiation, Under-actuated System, Irregular Ladder Problem, Target Dynamics, Swing Map

1. はじめに

本論文では, 図1に示す2リンクブラキエーションロボットを用いて, 枝間隔の異なる枝渡り運動を実現する制御手法について述べる. 重力を利用する枝渡り運動は, テナガザルの非常にダイナミックな移動形態である. このような枝渡り運動を行うブラキエーションロボットの研究は, 系の位置エネルギーと運動エネルギーをうまく制御することによってタスクを実現する跳躍ロボットの制御^{(1)~(4)}, ジャグリングなどの対象物の動的な操り^{(5)~(7)}, また, 非駆動関節を有するアンダアクチュエーティッドな系の制御問題⁽⁸⁾⁽⁹⁾などと密接な関連がある. 非駆動関節を有する系の制御に関する理論は依然として確立されていないため, その比較的簡単な構造にもかかわらず, 枝渡りを実現する制御系の設計は容易ではない.

これまで, 著者らはこのような観点から, タスクの力学的特性をうまく利用して生物や人間の動的に巧

みな運動をロボットで実現する制御手法に関して, 2リンクブラキエーションロボットの研究を行ってきた. 著者らは, 枝渡り運動を実現する一手法として, ダイナミクスによるタスク記述に基づく目標ダイナミクス法を提案している⁽¹⁰⁾. この手法ではテナガザルの枝渡り運動が振り子運動に近いことに着目し, ロボットの関節座標系から極座標系への座標変換によって得られる仮想的な振り子の運動が調和振動を行うようにロボットを制御することにより, 枝渡り運動を実現するものである. 文献⁽¹⁰⁾では, 等間隔の枝間移動問題(Uniform Ladder Problem), 振り上げ問題(Swing up Problem), 移動速度制御問題(Rope Problem)を考え, 数値シミュレーションによりその有効性を示した. さらに, 実ロボットを用いた等間隔の枝間移動実

Fig. 1 A two-link brachiating robot

* 原稿受付 1998年12月21日.

^{*1} 名古屋大学大学院 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1).

^{*2} 正員, 名古屋大学先端技術共同研究センター.

^{*3} ミシガン大学工学部 (1101 Beal Ave., Ann Arbor, MI 48109-2110, USA).

E-mail: fukuda@mei.nagoya-u.ac.jp

Table 1 The dynamical parameters of the robot

Description		i=1	i=2
Mass	m_i kg	3.499	1.232
Moment of inertia	I_i kgm ²	0.090	0.033
Link length	l_i m	0.50	0.50
Location of CG	l_{ci} m	0.414	0.333
Viscous friction	b_i Nm/s	0.02	0.14
Coulomb friction	c_i Nm	0.02	0.45
Torque constant	K Nm/V	1.752	

表1にロボットの物理パラメータを示す⁽¹¹⁾。

3. 枝間隔の異なる枝渡り問題

本章では、間隔の異なるはしご軸における枝渡りを実現する制御手法について述べる。まずはじめに、文献⁽¹⁰⁾で述べた、目標ダイナミクス法の等間隔の枝渡り問題と移動速度制御問題への適用について簡単に説明する。次に、これらの結果をもとに、本手法の枝間隔の異なる枝渡り問題への拡張を考える。等間隔の枝渡り問題では、与えられた枝間隔である1変数 d^* から目標ダイナミクスの仮想振動数 ω を決定する写像 $\omega = \lambda(d^*)$ を求めたが、間隔の異なる場合は移動前後の枝間隔である2変数 $d[k]$ と $d[k+1]$ から ω を決定する写像 $\omega = \tilde{\lambda}(d[k], d[k+1])$ を求めることに帰着される。

3・1 目標ダイナミクスによるタスク記述と等間隔の枝渡り問題⁽¹⁰⁾ 目標ダイナミクス法の考え方と、その等間隔の枝間移動問題への適用について簡単に説明する(詳細については文献⁽¹⁰⁾参照)。テナガザルのブラキエーションが振り子運動に近いことに着目して⁽¹⁹⁾、枝渡り運動を目標ダイナミクス $\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{y})$ として

$$\mathbf{y} = T\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, f_{\omega}(T\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} T\mathbf{x} \cdots \cdots (2)$$

で表される調和振動で記述する。ここで、関節座標系から手先位置を表す極座標系への座標変換

$$\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} l\sqrt{2(1+\cos\theta_2)} \\ \theta_1 + \frac{1}{2}\theta_2 \end{bmatrix} \cdots \cdots (3)$$

を考え、式(2)の x として極座標系の角度成分 θ を選ぶ。ここでは、 $l = l_1 = l_2$ とする。

$$x = h(\mathbf{q}) \triangleq \theta = \theta_1 + \frac{1}{2}\theta_2 \in \mathbf{R} \cdots \cdots (4)$$

摩擦を考慮しないモデル ($\mathbf{B}, \mathbf{C} \rightarrow 0$) を用いた場合、目標ダイナミクス(2)を実現するトルク入力フィードバック入出力線形化則により、

$$\tau = \tau_{\omega}$$

Fig. 4 A ceiling configuration. The ceiling is parametrized by the distance between the grippers d . A left branch $c_-(d)$ and right branch $c_+(d)$ are defined in this manner

$$\begin{aligned} & \triangleq \left(D_{\mathbf{q}} h \begin{bmatrix} n_{12} \\ n_{22} \end{bmatrix} \right)^{-1} [-\omega^2 \theta - (D_{\mathbf{q}} h) \dot{\mathbf{q}} \\ & + D_{\mathbf{q}} h \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{V} + \mathbf{k})] \\ & = \frac{1}{n_{12} + \frac{1}{2}n_{22} + V_2 + k_2} \\ & \times \left[-\omega^2 \left(\theta_1 + \frac{1}{2}\theta_2 \right) + \left(n_{11} + \frac{1}{2}n_{21} \right) (V_1 + k_1) \right] \\ & \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

と求められる。ここで、 $D_{\mathbf{q}} h$ は h の $\mathbf{q}$ に関する微分を表し、 n_{ij} は $\mathbf{M}^{-1}$ の各成分であり、モータ駆動回路への電圧指令値は $v_r = \frac{1}{K}\tau$ である。このときロボットの運動は式(2)の制御パラメータである仮想振動数 ω によって決定される。以下、数値シミュレーションと実験では摩擦を考慮したモデルを用い、制御則にこれらを打ち消す摩擦項を加える。

著者らは、文献⁽¹⁰⁾で系の閉ループダイナミクスが、対称性をもつ運動(Neutral Orbit⁽²⁾⁽³⁾⁽¹⁰⁾)をするように、 ω を決定することによって、同じ高さに配置された等間隔の枝渡り運動が実現できることを示した。

ここで図4に示すように、ロボットの手先が高さ $y = 0$ に到達している状態を“Ceilling”と呼び、

$$\mathcal{C} = \{\mathbf{q} \in \mathcal{Q} \mid \cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2) = 0\} \cdots \cdots (6)$$

のように定義する。 $\mathcal{C}$ は、写像

$$c_{\pm}(d) = \begin{bmatrix} \pm \arcsin\left(\frac{d}{2l}\right) \\ \pm \left[\pi - 2 \arcsin\left(\frac{d}{2l}\right) \right] \end{bmatrix} \cdots \cdots (7)$$

の二つの分岐

$$\mathcal{C} = \text{Im } c_- \cup \text{Im } c_+ \cdots \cdots (8)$$

で表される。以下、ロボットの初期状態として、両手の間隔が d で枝を把握して静止している条件

$$T\mathcal{C}_{0\pm} = \{[c_{\pm}(d)^T, 0, 0]^T \in T\mathcal{C} \mid d \in [0, 2l]\} \cdots \cdots (9)$$

を考える。制御則としてトルク入力を $\tau(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ とした

ときのロボットの閉ループダイナミクスを

$$T\dot{q} = \mathcal{L}_\tau(q, \dot{q}) = \mathcal{L}(Tq, \tau(q, \dot{q})) \dots\dots\dots (10)$$

と表し、この閉ループ系運動方程式のベクトル場 $\mathcal{L}_\tau$ の積分曲線を $\mathcal{L}_\tau^\nu$ で表す。ここで、系の閉ループダイナミクスが Reverse Time Symmetry⁽¹⁾⁽¹⁰⁾ を満たす適当なフィードバック則 τ を選んだとき、ロボットの軌道が Neutral Orbit となるような初期条件 $Tq_0 = [c_-(d)^T, 0, 0]^T$ を満たす d を求めることができれば、等間隔の枝渡りが実現できる。このような d を求めるには、系のダイナミクスの積分を含む以下の方程式

$$\Phi(d, t_N) = [I_{2 \times 2}, 0_{2 \times 2}] \mathcal{L}_\tau^\nu \left(\begin{bmatrix} c_-(d) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

を2変数 d と t_N (ただし、 $\nu = t_N/4$) について同時に解かなければならず、非常に困難である。

そこで、 τ として、式(2)の調和振動で表される目標ダイナミクスを実現する制御則(5)を選ぶことにより、時間 t_N が調和振動の周期

$$t_N(\tau_\omega) = \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots (12)$$

によって与えられるので、方程式の次元を一つ減らすことができる。したがって、式(11)を d についてのみ解けばよいということになり、 $\Phi(\lambda^{-1}(\omega), 2\pi/\omega) = 0$ を満たす陰関数 $d^* = \lambda^{-1}(\omega)$ を求めることに帰着される。実際の制御問題としては、与えられた枝間隔 d^* に対して、以下のように ω を決定する。

$$\omega = \lambda(d^*) \dots\dots\dots (13)$$

図5にロボットのパラメータが表1の値を用いた場合の λ の数値解を示す**2。

3.2 枝渡りの移動速度制御⁽¹⁰⁾ 本節では、間隔

Fig. 5 Numerical approximation of $\omega = \lambda(d^*)$. Target dynamics controller, τ_ω , is tuned according to this mapping, λ , that is designed to locate neutral orbits originating in the ceiling

**2 この根は一般的な非線形方程式の数値解法であるはさみうち法やセカント法⁽²⁰⁾によって計算することができる。

の異なる枝渡り運動を実現する写像の導出のもととなる、文献⁽¹⁰⁾で述べた1本の長い枝やロープに沿った方向へのブラキエーションにおける移動速度制御(Rope Problem)について簡単に説明する。このとき、ロボットは枝の任意の位置を把握することができると考え、その自由度を移動速度制御に用いる。

目標ダイナミクスを用いた制御系を適用した場合、ロボットが Ceiling において静止した状態からブラキエーションを始めれば、 θ は目標ダイナミクス $\ddot{\theta} + \omega^2 \theta = 0$ に従うので、時間 $t_N/2 = \pi/\omega$ にロボットの手先は同じ高さ $y=0$ に到達する。このとき d と ω が $\omega = \lambda(d)$ の関係を満たしていれば、Neutral Orbit のもつ対称性により、運動が対称になるので、手先は再び高さ $y=0$ に速度零で到達する。

ここで、ロボットは1回の枝渡り運動において、時間 π/ω で d^* 進行する。ロボットが瞬間的に次の枝へのつかみ換え動作を行い、移動を繰り返すとすると、ロボットの平均移動速度は

$$\bar{V}_{hor} = \frac{d^* \omega}{\pi} = \frac{d^* \lambda(d^*)}{\pi} \triangleq \bar{V}(d^*) \dots\dots\dots (14)$$

となる。そこで望ましい移動速度 $\bar{V}_{hor}^*$ を実現するためには、目標ダイナミクスの制御パラメータ ω を

$$\omega = \lambda \circ \bar{V}^{-1}(\bar{V}_{hor}^*) \dots\dots\dots (15)$$

のように決定すればよい。ここで、 λ は式(13)で定義される写像である。

しかしながら、 d と ω が $\omega = \lambda(d)$ の関係を満たさない場合、ロボットの軌道は Ceiling, $Tq \in T\mathcal{C}_+$ に $\dot{\theta} = 0$ の条件のもとで到達するが、 $r \neq d, \dot{r} \neq 0$ となり、その対称性は満たされない。そこで文献⁽¹⁰⁾では、このように運動が非対称である場合のロボットの移動前後における両手先の間隔 $d[k], d[k+1]$ の関係を以下のように“Swing Map”として表すことを考えた。

まず、ロボットの手先間隔 d とロボットの初期状態 Tq_0 を関係付ける写像 $C_\pm$ と、グリッパが枝をしっかりと把握するとして Ceiling における速度を零にする写像 Π を

$$C_\pm: [0, 2l] \rightarrow T\mathcal{C}_{0\pm}: d \mapsto [c_\pm(d)^T, 0, 0]^T \dots\dots\dots (16)$$

$$\Pi: T\mathcal{C}_\pm \mapsto T\mathcal{C}_{0\pm} \dots\dots\dots (17)$$

のように定義する。次に、ロボットの移動前後における両手先の間隔の関係を表す“Swing Map”, σ_ω を

$$\sigma_\omega(d) \triangleq C_\pm^{-1} \circ \Pi \circ \mathcal{L}_{\tau_\omega}^\nu \circ C_-(d) : [0, 2l] \rightarrow [0, 2l] \dots\dots\dots (18)$$

のように定義する。もし $\omega = \omega^* = \lambda(d^*)$ ならば、

$$\sigma_\omega(d^*) = d^* \dots\dots\dots (19)$$

となる。すなわち、 d^* は ω と d の関係が適切な場合

Fig. 6 The irregular ladder problem. The robot moves from the left branch to the right branch with the intervals $d[k]$ and $d[k+1]$

の Swing Map の不動点である。以上より、次のブラキエーションの初期条件を

$$Tq_0[k+1] = C_-(\sigma_\omega(d[k])) \quad (20)$$

と定めることにより、枝渡り運動の繰返しを、Swing map, σ_ω の繰返しで離散的にモデル化される。

$$d[k+1] = \sigma_\omega(d[k]) \quad (21)$$

これによって、ある ω が与えられたとき、ロボットの移動前後において、枝をつかんだ状態での両手先の間隔 $d[k], d[k+1]$ が関係付けられる。ここで、 d が d^* の近傍であれば、文献⁽¹⁰⁾ に示されるように Swing Map の繰返しダイナミクスによって d は d^* に収束し、結果的に望ましい平均移動速度が得られる。

3.3 目標ダイナミクス法による枝間隔の異なる枝渡りの実現 3.2 節で説明した等間隔の枝渡り問題、移動速度制御問題での考え方を拡張し、目標ダイナミクス法による枝間隔の異なる枝渡りの実現について述べる。ここでは、図 6 に示すような前後の枝間隔が $d[k], d[k+1]$ である場合の枝渡りについて考える。

目標ダイナミクス法を用いた場合、ある初期状態からのロボットの運動が ω によって一意に決定され、この値を適切に選ぶことによって望ましい枝渡り運動が実現される。枝間隔が同じ d^* である場合は、運動の対称条件を満たす ω を 1 変数 d^* に対して $\omega = \bar{\lambda}(d^*)$ のように選べばよい。しかしながら、前後の枝間隔が異なる枝渡りを実現するには、運動が非対称になり、与えられた前後の枝間隔である 2 変数 $d[k], d[k+1]$ に対して ω を決定しなければならない。ここで、式 (21) は、ある ω に対し、ロボットの初期条件が $Tq_0 = [c_-(d[k])^T, 0, 0]^T$ であるときの枝渡りを行う前後の手先間隔 $d[k], d[k+1]$ の関係を示している。したがって、逆に前後の枝間隔 $d[k], d[k+1]$ があらかじめ与えられたとき、この関係を ω について解けば、間隔が異なる枝渡りが実現できることがわかる。式 (21) は ω に関する陰関数であり、間隔の異なる枝渡りを実現する ω を決定するには、この陰関数を ω について解

Table 2 Intervals between the bars and ω considered in numerical simulations and experiments

Case	$d[k]$	$d[k+1]$	ω
1	0.4	0.6	3.66
2	0.5	0.6	3.47
3	0.6	0.5	3.255

Fig. 7 Numerical approximation of $\omega = \bar{\lambda}(d[k], d[k+1])$. Target dynamics controller, τ_ω , is tuned according to this mapping, $\bar{\lambda}$, that is designed to locate the desired orbit

けばよいことになる。したがって、これを解くために以下の関数 $\bar{\lambda}$ を定義する。

$$\bar{\lambda}: [0, 2l] \times [0, 2l] \rightarrow \mathbf{R} \quad (22)$$

$$\bar{\lambda}(d_1, d_2) \triangleq \text{solve}_{\omega \in \mathbf{R}} [d_2 - \sigma_\omega(d_1) = 0] \quad (23)$$

ここで、 d_1, d_2 は前後の枝間隔である。望ましい枝渡りを実現する制御パラメータは、この陰関数を解いて

$$\omega = \bar{\lambda}(d[k], d[k+1]): \mathcal{D} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbf{R}, \mathcal{D} \subseteq [0, 2l] \quad (24)$$

のように決定されるが、この陰関数は閉ループ系のダイナミクスの積分を含み、一般的には $\bar{\lambda}$ の解析的表現は求められないので、数値解法によってこの写像を計算する^{***}。図 7 にロボットの物理パラメータが表 1 を使い、 $d[k], d[k+1]$ を変化させたときの写像 $\bar{\lambda}$ の数値計算結果を示す。このとき、ロボットの特異姿勢に近くなるような両方の枝が非常に接近した場合や、前後の間隔が大きく異なり、移動前後での大きなエネルギー変化を伴うような極端な場合(特に非常に接近した間隔から腕を大きく伸ばした間隔に移るときのように、移動前後で位置エネルギーを増加させなければならないような場合)には解が存在せず、とりうる枝間隔の範囲は制限されてしまうことがわかった。この解の存在範囲はロボットの各リンクの質量などの物理パラメータに依存するが、 $\bar{\lambda}$ の解析的表現が得られな

*** ここでも、一般的な非線形方程式の数値解法であるはさみうち法やセカント法を用いて、ある前後の枝間隔 $d[k] = d_1, d[k+1] = d_2$ に対して、 $d_2 - \sigma_\omega(d_1) = 0$ の根 ω の数値解を計算することができる。

Fig. 8 Movement of the robot (simulation), where $d[k]=0.4, d[k+1]=0.6$

Fig. 9 The simulation results, where $d[k]=0.4, d[k+1]=0.6$. Left: Joint trajectories (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

Fig. 10 Movement of the robot (simulation), where $d[k]=0.5, d[k+1]=0.6$

Fig. 11 The simulation results, where $d[k]=0.5, d[k+1]=0.6$. Left: Joint trajectories, (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

いため、ここではその解析は困難である。 $d[k]=d[k+1]=d^*$ とすると、等間隔な場合の解 $\omega=\bar{\lambda}(d^*, d^*)$ が得られ、式(13)の写像 $\omega=\bar{\lambda}(d^*)$ は、曲面 $\omega-\bar{\lambda}(d[k], d[k+1])=0$ と平面 $d[k]-d[k+1]=0$ の交線で与えられることになる。

4. 数値シミュレーション

ここでは表2に示した3とおりの枝間隔の場合について考える。図7に示した写像(24)より、 ω はそれぞれの枝間隔に対して表2のようになる。以下の数値シミュレーションでは、ロボットのモデルとして表1の物理パラメータを用いる。

Fig. 12 Movement of the robot (simulation), where $d[k]=0.6, d[k+1]=0.5$

Fig. 13 The simulation results, where $d[k]=0.6, d[k+1]=0.5$. Left: Joint trajectories, (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

Fig. 14 Movement of the robot (experiment), where $d[k]=0.4, d[k+1]=0.6$

Case 1: $d[k]=0.4, d[k+1]=0.6$ の場合 このとき、 $\omega=\bar{\lambda}(0.4, 0.6)=3.66$ となる。図8にロボットの枝渡りのようすを示す。図9は各関節の軌道とモータ駆動回路への指令値である。ロボットは $t=\pi/\omega=0.854$ sで枝を把握する。

Case 2: $d[k]=0.5, d[k+1]=0.6$ の場合 このとき、 $\omega=\bar{\lambda}(0.5, 0.6)=3.47$ となる。図10にロボットの枝渡りのようすを示す。図11は各関節の軌道とモータ駆動回路への指令値である。ロボットは $t=\pi/\omega=0.905$ sで枝を把握する。

Case 3: $d[k]=0.6, d[k+1]=0.5$ の場合 このとき、 $\omega=\bar{\lambda}(0.6, 0.5)=3.255$ となる。図12にロボットの枝渡りのようすを示す。図13は各関節の軌道とモータ駆動回路への指令値である。ロボットは $t=\pi/\omega=0.965$ sで枝を把握する。

5. 実験

提案する手法を2リンクブラキエーションロボットに適用し、実験によりその有効性を確認する。ここでは4章で行った数値シミュレーションと同じ枝間隔

Fig. 15 The experimental results ($d[k]=0.4$, $d[k+1]=0.6$). Left: Joint trajectories (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

Fig. 16 Movement of the robot (experiment), where $d[k]=0.5$, $d[k+1]=0.6$

Fig. 17 The experimental results ($d[k]=0.5$, $d[k+1]=0.6$). Left: Joint trajectories (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

(表 2 参照)を考える。

実験では、ロボットを理想的な状態で動作させることは難しく、モデル化誤差、配線による外乱、動作開始時にグリッパが枝を離すときのタイミングのずれなどはある程度避けられない。そのため、著者らが以前行った等間隔の枝渡り実験にも見られたように⁽¹¹⁾、パラメータ同定で得られたロボットの物理パラメータをそのまま使用してロボットを実際に動作させた場合、望ましい枝渡り運動に近い動作が得られたが、枝を把握できないという問題があった。そこで本論文においても、同様にグリッパを開くタイミングとロボットの物理パラメータを一部修正することで、望ましい枝渡り運動を実現することを考える。

Case 1: $d[k]=0.4$, $d[k+1]=0.6$ の場合 図 14 にロボットの動作、図 15 に各関節の軌道とモータ駆動回路への電圧指令値を示す。ここでは、ロボットの

Fig. 18 Movement of the robot (experiment), where $d[k]=0.6$, $d[k+1]=0.5$

Fig. 19 The experimental results ($d[k]=0.6$, $d[k+1]=0.5$). Left: Joint trajectories (solid: θ_1 , dashed: θ_2), Right: Voltage command to the motor driver

物理パラメータを表 1 に示したもののうち $m_1=3.39$, $m_2=1.30$, $c_2=0.65$, $b_2=0.9$ のように一部修正する。10 回の試行において、次の枝の位置に手先が到達するまでの平均移動所要時間は 0.949 s であり、最大 $\pm 0.04\text{ s}$ の誤差があった。これは理論値である $t=\pi/\omega=0.854\text{ s}$ に近い値であると考えられる。

Case 2: $d[k]=0.5$, $d[k+1]=0.6$ の場合 図 16 にロボットの動作、図 17 に各関節の軌道とモータ駆動回路への電圧指令値を示す。ここでは、ロボットの物理パラメータを表 1 に示したもののうち $m_1=3.39$, $m_2=1.30$, $c_2=0.73$, $b_2=0.6$ のように一部修正する。また、制御開始より 0.01 s 前にグリッパを開く命令をロボットに与える。10 回の試行において、手先が次の枝の位置に到達するまでの平均移動時間は 0.870 s であり、最大 $\pm 0.03\text{ s}$ の誤差があった。これは理論値である $t=\pi/\omega=0.905\text{ s}$ に近い値であると考えられる。

Case 3: $d[k]=0.6$, $d[k+1]=0.5$ の場合 図 18 にロボットの動作、図 19 に各関節の軌道とモータ駆動回路への電圧指令値を示す。ここでは、ロボットの物理パラメータを表 1 に示したもののうち $m_1=3.39$, $m_2=1.30$, $c_2=0.73$, $b_2=0.33$ のように一部修正する。また、制御開始より 0.08 s 前にグリッパを開く命令をロボットに与える。10 回の試行において、手先が次の枝の位置に到達するまでの平均移動時間は 0.841 s であり、最大 $\pm 0.08\text{ s}$ の誤差があった。これは、理論値である $t=\pi/\omega=0.965\text{ s}$ に近い値であると考えられ

る。

実験により、提案する制御手法によって枝間隔の異なる枝渡り動作が実現できることが示された。実験結果はシミュレーション結果と完全には一致しないが、これは、ロボットのモデル化誤差、モデル化の困難なハーモニックドライブモータの複雑な摩擦特性やトルク飽和、配線等から受ける外乱等によるものであると考えられる。

6. ま と め

著者らが提案してきている目標ダイナミクス法を用いて、ロボットの新たな行動形態として間隔の異なる枝渡り運動を実現する手法について述べ、数値シミュレーションと実験によりその有効性を示した。

ブラキエーションロボットと跳躍ロボットの制御問題には密接な関連性があると考えられ、跳躍ロボットの機構にみられる、関節が仮想的なばね特性をもつような受動的な制御手法や系の正確なモデルをあまり必要としない制御系の設計も検討したいと考えている。さらに、次の目標枝が遠い場合にテナガザルが行うような跳躍を含む枝渡り問題(Leap Problem)も非常に興味深い制御問題であり、取組んで行きたいと考えている。今後、より一般的な動的に巧みな運動制御問題への本手法の応用を考えていきたい。なお、本論文の一部は米国 National Science Foundation (IRI-9510673)の援助を受けたものである。

文 献

- (1) Raibert, M. H., *Legged Robots that Balance*, (1986), MIT Press.
- (2) Schwind, W. J. and Koditschek, D. E., Control the forward velocity of the simplified Planner Hopping Robot, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 691-696.
- (3) Schwind, W. J. and Koditschek, D. E., Characterization of Monoped Equilibrium Gaits, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 1986-1992.
- (4) Schwind, W. J., *Spring Loaded Inverted Pendulum Running : A Plant Model*, (1998), PhD thesis, The University of Michigan, Dept. of EECS.
- (5) Andersson, R. L., *A Robot Ping-Pong Player : Experiment in Real-Time Intelligent Control*, (1988), MIT Press.
- (6) Bühler, M., ほか 2 名, Planning and Control of Robotic Juggling and Catching Tasks, *Int. J. Robotics Research*, 13-2 (1994), 101-118.
- (7) Lynch, K. M. and Mason, M. T., Dynamic Nonprehensile Manipulation: Controllability, Planning and Experiments, *Int. J. Robotics Research*, 18-1 (1999), 64-92.
- (8) Spong, M., The Swing Up Control Problem For The Acrobot, *IEEE Control Systems Magazine*, 15-1 (1995), 49-55.
- (9) 荒井裕彦・ほか 2 名, 非駆動関節を有するマニピュレータの時間軸伸縮による制御, 日本ロボット学会誌, 16-4 (1998), 561-568.
- (10) 中西淳・ほか 2 名, 解析的手法による 2 リンクブラキエーションロボットの制御, 日本ロボット学会誌, 16-3 (1998), 361-368.
- (11) 中西淳・ほか 2 名, 2 リンクブラキエーションロボットの制御—目標ダイナミクス法の実ロボットへの適用—, 日本ロボット学会誌, 17-1 (1999), 110-117.
- (12) 福田敏男・ほか 3 名, ブラキエーション形移動ロボットの研究(第 3 報, ヒューリスティックな駆動力波形の生成と制御), 機論, 57-541, C (1991), 1450-1457.
- (13) 福田敏男・ほか 2 名, ブラキエーション形移動ロボットの研究(第 4 報, 小脳モデル神経回路を用いた移動制御), 機論, 58-549, C (1992), 2930-2937.
- (14) 齋藤史倫・ほか 3 名, ブラキエーション形移動ロボットの研究(第 5 報, 2 リンクロボットによる励振と移動制御実験), 機論, 59-557, C (1993), 171-178.
- (15) 齋藤史倫・福田敏男, 強化学習による実ロボットの運動制御, 日本ロボット学会誌, 13-1 (1995), 82-88.
- (16) 齋藤史倫・ブラキエーション形移動ロボットの運動制御, 博士論文, (1995), 名古屋大学.
- (17) Abraham, R. and Marsden, J. E., *Foundations of Mechanics*, (1978), 42-50, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (18) Tuttle, T. D. and Seering, W. P., A Nonlinear Model of a Harmonic Drive Gear Transmission, *IEEE Trans. Robotics Autom.*, 12-3 (1996), 368-374.
- (19) Preuschoft, H. and Demes, B. (Preuschoft, H., ほか 3 名編), Biomechanics of Brachiation, *The Lesser Apes*, (1984), 96-118, Edinburgh University Press.
- (20) Stoer, J. and Bulirsch, R., *Introduction to Numerical Analysis*, (1980), 290-296, Springer-Verlag.