マルチロコモーションロボットによるブラキエーション運動制御 —エネルギーに基づく Swing-back 制御—

梶 間 日出輝^{*1} 長谷川 泰 久^{*2} 福 田 敏 男^{*1}

Study on Brachiation Controller for the Multi-locomotion Robot —Energy-based Swing-back Control—

Hideki Kajima^{*1}, Yasuhisa Hasegawa^{*2} and Toshio Fukuda^{*1}

We propose an energy-based control method in order to improve the stability of continuous brachiation. The target continuous brachiation basically consists of two actions: a swing-back action and a locomotion action. Our strategy is to control the swing-back action so that the robot can pump up the required energy to grasp a target bar depending on the bar interval and design the locomotion action based on the symmetric motion of a pendulum in order to conserve the energy. In this paper, continuous brachiation on various uniform ladders is reported. The proposed controller is implemented on Gorilla Robot III developed as the multi-locomotion robot. The experimental results illustrate the validity of our control strategy.

Key Words: Multi-locomotion Robot, Continuous Brachiation, Energy-based Control, Uniform Ladder

1. は じ め に

近年、人間や生物が行う動的で巧みな運動を工学的に実現しようと試みた研究が盛んに行われ、これまでに様々な運動が実現されてきている[1]~[8]. しかし、それらの研究の多くは、ある特定のタスクに特化して設計されたロボットによる運動の実現を目的としているため、想定された外部環境は静的かつ限定的なものであり、残念ながら人間の住環境における実用化までには多くの問題が残されている. 一方、地球上で暮らす高度な生物は、環境の変化に応じて様々な機能を使い分けることで、その活動範囲を広げていると考えられる. したがって、将来人間の住空間での活躍が期待されるロボットにおいても、1台のロボットが多機能性を有し、それらを自ら環境に応じて選択することでこれまでにない優れた環境適応能力を発揮することが期待できる. このような観点から、我々はロボットに求められる代表的かつ重要な機能として移動機能に着目し、まったく新しい生物規範型ロボットとして Fig. 1 に示すような様々な移動形態を有するマルチロコモーションロボットという概念を提案して

きた[21]. 生物は様々なタイプの移動機能を持つが、主なものとして、通路などの幅が狭い空間での2足歩行運動、不整地での安定した4足歩行運動、さらに足場のない所では頭上の枝や柱にぶら下がり両腕で移動する枝渡り運動(ブラキエーション)を取りあげ、プロトタイプとして開発したゴリラロボットによりハードウェア・ソフトウェア両面でのシステム開発を目指した研究に取り組んできている[22][24]. 本論文ではこれらの移動形態の内、テナガザルやオランウータンなどが行う、重力を利用しながら両腕で枝から枝へと空中を移動するブラキエーション[12]の実現について述べる.

ブラキエーションのダイナミクスは振子運動によって表さ

Fig. 1 Concept of the multi-locomotion robot

原稿受付 2004 年 11 月 16 日

^{*1}名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻

^{*2}筑波大学大学院システム情報工学研究科

^{*1}Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University

^{*2}Department of Intelligent Interaction Technologies Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

れ[13], 枝周りの角度を直接駆動できないことから, ブラキエーションロボットは系の自由度より入力が少ない劣駆動系(Underactuated System)となる. ブラキエーションが枝を両腕で掴み替えながら移動する運動であり, 枝と手首間の(静止)摩擦力や枝把持周りの駆動トルクに必ず限界が存在するため, 完全可制御であるという仮定は一般的ではなく, 仮に完全可制御であるという仮定が成り立つ環境において有効な制御系を構築できたとしても完全可制御ではない環境(例えば摩擦係数が未知な環境)においてまったく意味をなさないコントローラになってしまう. そこで我々は, 完全可制御でない環境を含む様々な環境において環境との接点が劣駆動である(完全可制御ではない)という前提条件の下, 自由に移動できるマルチロコモーションロボットの制御系構築を試みる. このとき, 劣駆動系として制御系を構築するデメリットとしては目標となる運動を実現するコントローラの設計が非常に困難であることが挙げられるが, 一方で(1)モータが少なくてよいという機構的な優位性がある点, (2)外力(重力)を巧みに利用して運動を実現することによりエネルギー的な優位性がある点, (3)振子運動のダイナミクスを利用することで腕を伸ばしただけでは届かないところでの移動が可能となる点等のメリットが挙げられる. 特に劣駆動系としてシステムを表現することにより, 振子運動のダイナミクスが支配的となるため実現されたブラキエーション運動は生物による運動のように巧みで自然なものになることが期待できるという点は制御系設計問題を考える上で重要であると考えられる.

このような運動の制御問題を取り扱った研究として, 齋藤らはヒューリスティック法による学習を用いた制御アルゴリズムを提案し, 2リンクブラキエーションロボットによって励振制御, 移動制御を実現した[14]~[16]. また中西らは, 調和振動のダイナミクスによるタスク記述を行う目標ダイナミクス法を提案し, 2リンクブラキエーションロボットでの等間隔の枝間移動制御および励振制御を解析的手法により実現した[18]. ブラキエーション運動制御に関連した研究としては, Acrobotと呼ばれるロボットによる振り上げ・倒立制御, ホッピング制御などがある[2][9][10]. これらのロボットが比較的簡単な構造をしているにもかかわらず, 非駆動関節を有する劣駆動系であることから制御理論はいまだに確立されていない.

一方, 生物が行うような動的で巧みな運動の実現を目的として, 齋藤らは多関節を有するブラキエーションロボットとしてテナガザルの骨格標本を元にBrachiator IIIを開発した[17]. このような多リンクから構成されたブラキエーションロボットは, そのモデル化および解析的な制御系設計が困難である. そこで長谷川らは, いくつかの基本行動をあらかじめ設計しそれらの重みを学習により調整することでタスク実現を図る, 階層型行動制御を用いた運動学習手法を提案し, Brachiator IIIによるブラキエーションを実現した[19]. また, 筆者らは各基本行動の開始タイミングを調整パラメータに加えることで, オーバーハンドとサイドハンドの2種類のブラキエーションを実現した[21]. しかしこれらの制御手法では, タスクに応じて基本行動があらかじめ設計されているため, 多リンクロボットによるより複雑な運動, 例えば連続ブラキエーションや枝の間隔が変化する環

境での運動を実現する制御系構築が困難であるという問題が残されていた. 特に連続ブラキエーションの実現に関しては中西らによって2リンクロボットですでに実現されているが, 構造上ロボットは枝をつかんだ瞬間に静止し, 単純に同じ運動を繰り返すだけで連続移動を実現できる. テナガザルが行うブラキエーションにおいても肘曲げ動作の重要性が確認されている[20]ように, 生物が行うような巧みな連続ブラキエーションを実現するためには, 体全体を使って枝を把持した瞬間に枝-手先間で生じる衝撃力を軽減し, 運動全体としてエネルギー的・時間的ロスが少ない運動を実現することが重要である. そこで筆者らは多リンクロボットが持つ系の冗長性に着目し, 冗長自由度を利用した動作として肘曲げ動作を導入することで枝把持時の衝撃によるエネルギーロスの軽減に成功し, 効率的な連続移動を実現した[23].

しかし, 従来は枝の間隔は0.4[m]と固定であったことに加え, 実験的に動作設計が行われていたため, より安定した連続運動を実現するためには環境条件(枝間隔)に応じたエネルギーに基づく運動制御手法が課題として残されていた. そこで本論文では, 様々な間隔に並べられた梯子の環境において安定した連続ブラキエーション運動実現を目的とした新たな制御手法としてエネルギーに基づくSwing-back制御手法を提案する. 本手法は, 前方の枝までの距離に応じて移動に必要なエネルギーを算出し, そのエネルギーを獲得するように両腕把持期における励振動作(Swing-back)を制御することで, 環境条件に応じたエネルギーコントロールを行って運動の安定化を図るものである. 多リンクロボットの連続ブラキエーションに関して, エネルギーに基づく制御指針を明確に述べた従来研究はない.

本論文は以下のように構成されている. 2章では, 両腕把持期における励振動作(Swing-back動作)と片腕支持期における移動動作(Locomotion動作)で構成された目標運動となる連続ブラキエーションについて述べた後, おおのこの動作のコントローラ設計手法について説明する. 3章では, 実機による実験を行い, 提案する手法の有効性を示す. 最後に, 4章で本論文のまとめおよび今後の課題について述べる.

2. 連続ブラキエーションコントローラの設計

ブラキエーションには環境条件や移動速度によって様々な移動形態が考えられるが[11], ここではFig. 2に示すような多リンクロボットによる連続ブラキエーションを考える. ロボットは初期状態において, 両腕で前後の枝にぶら下がり静止した状態から進行方向に対して体全体を振り上げることで適当なエ

Fig. 2 Target continuous brachiation

エネルギーを系に注入し (Preliminary Swing), その後, 体全体を後ろに振り直す (Swing-back 動作). 次に, 後方の枝から手を離して振子運動のように獲得したエネルギー利用しながら前方に移動して目標枝を把持する (Locomotion 動作). 以降は Swing-back 動作と Locomotion 動作を周期的に交互に繰り返すことで, 静止することなく次々と前方に移動する. また, 環境条件として, 同じ高さにある等間隔に枝が並んだ梯子を仮定する.

両腕支持期の Swing-back 動作中は姿勢およびエネルギー制御が容易であるのに対し, Locomotion 動作中は片腕把持であることに加え, 枝周りの角度を直接制御できない劣駆動系となるため, 任意の瞬間の姿勢とエネルギーを同時に制御することが困難である.

そこでここでは, 制御戦略として振子運動の対称性に着目した手法を考える. それは, 制御が比較的容易な Swing-back 動作によって, 移動に必要なエネルギーを系に注入し, 劣駆動系となる Locomotion 動作では移動の前後で姿勢変化を対称とすることで系のエネルギーを一定に保ちながら前方の枝にアプローチする振子運動の対称性を利用した戦略である. 高さが変化しない等間隔に並んだ枝での移動を仮定しているのので, このように問題を簡略化し, Swing-back 動作を利用して運動全体のエネルギー制御が可能となる.

以下では, Swing-back と Locomotion の制御手法について述べる.

2.1 Swing-back コントローラ

ここでは Swing-back コントローラについて, まず 4 リンクモデルについて述べた後, 提案するエネルギーに基づく制御手法について述べる.

2.1.1 目標運動記述モデル

Swing-back 動作中における両腕把持期のロボットを Fig. 3 のようなリンクでモデル化する. リンク 1 は真直ぐ伸ばした腕 (Straight Arm), リンク 2 は肘を曲げた腕 (Bending Arm), リンク 3 は胴体および両脚 (Trunk) を表す. m_1, m_2, m_3 は各リンクの質量 ([kg]), l_1, l_{bend}, l_3 はリンク長 ([m]) を表す. ここでは簡略化のため質量中心はリンク長の 1/2 の位置にあるものとする. また, θ_1 は枝周角度, θ_2, θ_3 はそれぞれリンク 2, 3 がリンク 1 と成す角度を, θ_p は系を単振子とみなした場合の重心角度を表し, D_{bar} は枝間隔を表す.

多リンクロボットの肘曲げ動作を直動関節でモデル化しており l_{bend} は可変である. 両腕支持期においてロボットは前後の枝 (O, Q) を掴みながら運動するため幾何学的拘束条件から

Fig. 3 4-link model during the swing-back phase

θ_2 は l_{bend} によって自動的に決定される. したがって, $l_{bend}(t), \theta_3(t)$ の 2 変数が制御パラメータとなる.

2.1.2 制御手法

まず Swing-back 動作中におけるロボットの運動を三つの状態 ($S1, S2, S3$) に分けて考える (Fig. 4 参照).

両腕把持期にロボットは, リンク 3 を前方に振り上げた状態で枝をつかんだ状態 ($S1$) から, リンク 3 を後方に振り下ろすと同時にリンク 2 を伸ばし始め, 両腕が伸びきった ($l_{bend} = l_1$) 状態 ($S2$) を経由した後, 後方の腕を曲げながら静かに後方の枝を離す ($S3$).

このとき, 両腕が真直ぐ伸びきった $S2$ 時の状態において, 前後の枝で回転中心が不連続に遷移するため, $S2$ の状態がその後の運動に大きく影響する. したがってここでは, $S2$ でのロボットの状態に着目して目標状態を決定する. ロボットが系のエネルギーをコントロールするのは, $S1(t = t_{S1})$ から $S2(t = t_{S2})$ までの間である.

$S2$ の瞬間におけるロボットのパラメータを Fig. 5 に示す. この瞬間に系の振子運動の回転中心が前後の枝で不連続に切り替わり, 以降は Q を回転中心とする振子運動を行う. ここで重心の速度ベクトル $\mathbf{V}_G$ と重心の位置ベクトル $\mathbf{G}_Q$ の成す角を δ_G とすると, $\delta_G = \pm 90^\circ$ となる姿勢ならば $S2$ の前後で角運動量のロスが生じない最もエネルギー効率がよい運動となることが分かる. そこで $S2$ 時のリンク 3 の目標角度 θ_{3S2}^d は, 次式を満たすように決定する.

$$\mathbf{G}_Q \cdot \mathbf{V}_G = 0 \quad (1)$$

ただし

$$\mathbf{G}_Q = \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3} \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)x_1 + m_3x_3 \\ (m_1 + m_2)y_1 + m_3y_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x_1 := -\frac{D_{bar}}{2} \quad (3)$$

$$y_1 := -\frac{l_0 \cos \theta_0}{2} \quad (4)$$

$$x_3 := \frac{l_3 \sin(\theta_0 + \theta_3)}{2} - \frac{D_{bar}}{2} \quad (5)$$

Fig. 4 Swing-back phase

Fig. 5 Parameter setting at $S2$

Fig. 6 Desired trajectory of l_{bend} Fig. 7 Desired trajectory of θ_3

$$y_3 := -l_0 \cos \theta_0 - \frac{l_3 \cos(\theta_0 + \theta_3)}{2} \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_G = \frac{m_3 l_3 \dot{\theta}_3}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 + \theta_3) \\ \sin(\theta_0 + \theta_3) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

なお、このとき $l_{bend} = l_1$, $\theta_1 = \theta_0$, $\theta_2 = \pi - 2\theta_0$ である。

次に $S1$ から $S2$ までの目標軌道 $l_{bend}^d(t)$, $\theta_3^d(t)$ を以下のよう

に与える。
 $l_{bend}(t)$ は両端において $\dot{l}_{bend} = 0$ となるように、 $t_{S1} - t_{S2}$ 間の運動を Fig. 6 に示すような 3 次スプライン曲線 $F_{spl}(t)$ で与える。ここで、 $t_{S1} - t_{S2}$ 間の時間を $T_c/4 (\equiv t_{S2} - t_{S1})$ と置き、 $l_{bend}(t)$ の運動を $\theta_3(t)$ の運動（後述）と同期させる。回転中心が不連続に切り替わる瞬間 $t = t_{S2}$ において $\dot{l}_{bend} = 0$ とすることにより前後の腕で Bending Arm と Straighten Arm を滑らかに切り替えることができる。また $S2$ において両腕は静止していると思なすことができるので、運動エネルギーはリンク 3 (Trunk) の分だけを考慮すればよい。

$t_{S1} - t_{S2}$ 間での $\theta_3(t)$ は式 (9) のように、振幅 A_c 、周期 T_c の cosine 関数の区間 $[0, T_c/4]$ を用いて与える (Fig. 7 参照)。振幅 A_c の値は $t = t_{S1}$ における $\theta_3(t) = \theta_{3S1}$ は既知であることから、式 (1) により決定した θ_{3S2} により一意に決まる (式 (10))。したがって、 $S2$ におけるリンク 3 の角速度 $\dot{\theta}_{3S2}$ は式 (11) で表され、周期 T_c によって決定される。

$$f_{lb} := l_{bend}^d(t) = F_{spl}(t) \quad (8)$$

$$f_{\theta_3} := \theta_3^d(t) = A_c \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_c}(t - t_{S1})\right) - \theta_{3S2} \quad (9)$$

$$A_c = \theta_{3S1} - \theta_{3S2} \quad (10)$$

$$\dot{\theta}_{3S2} = -A_c \cdot \frac{2\pi}{T_c} \quad (11)$$

次に周期 T_c は、Locomotion 動作終了時（後述 L3）における系のエネルギーを E_{need} とすると、この E_{need} の値は枝間隔

や Locomotion 動作によって異なるが、ここでは Locomotion 動作の前後でエネルギーが変化しないという仮定を用いている、移動を実現する（前方の枝を掴む）ために必要な $S2$ における目標エネルギー E_{S2}^d はこの E_{need} に等しい。

$$E_{S2}^d = E_{need} \quad (12)$$

また、 $S2$ におけるエネルギーに関して、リンク 1 の腕、リンク 2 およびリンク 4 の腕、リンク 3 の胴体および両脚の位置エネルギーをそれぞれ P_1 , P_2 , P_3 とすると、以下の式 (13) ~ (18) が成り立つ。

$$E_{S2} = P_{S2} + K_{S2} \quad (13)$$

$$P_{S2} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (14)$$

$$P_1 = -m_1 g \frac{l_0}{2} \cos \theta_0 \quad (15)$$

$$P_2 = P_1 \quad (16)$$

$$P_3 = -m_3 g \left(l_0 \cos \theta_0 + \frac{l_3}{2} \cos(\theta_0 + \theta_{3S2}) \right) \quad (17)$$

$$K_{S2} = \frac{1}{2} m_3 \left(\frac{l_3}{2} \dot{\theta}_{3S2} \right)^2 \quad (18)$$

$S2$ において、 $l_{bend} = l_1$ であることから $P_2 = P_1$ となり、また $\dot{l}_{bend} = 0$ であることから、 $S2$ の運動エネルギー K_{S2} はリンク 3 の項のみで表される。ただし、

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{D_{bar}}{2l_0} \right) \quad (19)$$

である。

式 (13) ~ (18) より E_{S2}^d を満たすための $S2$ におけるリンク 3 の目標角速度 $\dot{\theta}_3^d$ は次のようになる。

$$K_{S2}^d = E_{S2}^d - P_{S2}^d \quad (20)$$

$$\dot{\theta}_3^d = -\frac{2}{l_3} \sqrt{\frac{2}{m_3} (E_{S2}^d - P_{S2}^d)} \quad (21)$$

以上より周期 T_c は次式のようにになる。

$$T_c = l_3 (\theta_{3S1} - \theta_{3S2}) \pi \sqrt{\frac{m_3}{2 (E_{S2}^d - P_{S2}^d)}} \quad (22)$$

なお $t = t_{S2}$ 以降は、後方の腕が肘を曲げながら静かに後方の枝を離すように、 θ_3 はその値が θ_{3S2} から θ_{3S3} に滑らかに変化するよう

に 3 次スプライン関数で表し、 $S3$ において滑らかに静止させる。この場合、 $S2 \rightarrow S3$ における Fig. 3 のモデルは後方の腕が仮想的に無視された支持腕と胴体および両脚から構成された 2 重振子となり、点 Q が非駆動関節であることから後方の腕と胴体および両脚が急激な加減速運動を行わなければ系全体のエネルギー変化が発生しないとみなすことができる。

以上の手法により Swing-back 動作 ($S1 \rightarrow S2 \rightarrow S3$) の内、 $S1 \rightarrow S2$ の動作によって移動に必要なエネルギーを系に注入する。

2.2 Locomotion コントローラ

ここでは Locomotion コントローラについて、先程と同様、4 リンクモデルと制御手法について述べる。

Fig. 8 Locomotion phase

Fig. 9 Free arm trajectory during the locomotion phase

2.2.1 目標運動記述モデル

Locomotion 動作中のロボットを先程と同様の 4 リンクモデルでモデル化する。ただしこの場合、片腕把持期であるため、 $l_{bend}(t)$, $\theta_2(t)$, $\theta_3(t)$ の 3 変数が制御パラメータである。

2.2.2 制御手法

片腕把持期の運動および状態 (L1, L2, L3) を Fig. 8 に示す。この時、L1 は S3 で後方の枝を離した直後の移動開始の瞬間を、L2 は重心が最下点を通過する瞬間を、L3 は系全体の振子運動がほぼ静止して目標とする枝を把持する直前の瞬間をそれぞれ表す。前述のように、ここでは Locomotion 動作として対称性を利用した運動を考え、Swing-back コントローラにより獲得したエネルギーを散逸することなく前方の枝にアプローチすることを戦略とする。したがって次のような移動の前後で姿勢変化が対称となるように運動を与える。対称性を利用することで L1 → L2 間での重力による系への影響と L2 → L3 での重力による系への影響が完全に相殺し合うため、L1 → L3 で系の力学的エネルギー変化が生じない。

まず、手先 (点 Q) の軌道 (x_q, y_q) を次式のように楕円軌道で与える (Fig. 9 参照)。ただし、 d_c は L2 における枝 O と手先 Q の距離であり、この値を変更することにより Locomotion 中における遊腕の運動の様子をオーバーハンドやアンダーハンドのように変化させる。

$$\left(\frac{x_q}{D_{bar}}\right)^2 + \left(\frac{y_q}{d_c}\right)^2 = 1 \quad (23)$$

また、移動の前後で姿勢変化が対称となるように θ_2^d , l_{bend}^d , θ_3^d を次式のように与える。ただし θ_{1s} , θ_{3s} はそれぞれ運動開始時 (L1) の θ_1 , θ_3 の値である。

$$x_p = l_0 \sin \theta_1, y_p = -l_0 \cos \theta_1 \quad (24)$$

$$x_q = D_{bar} \frac{\theta_1}{|\theta_{1s}|}, y_q = -d_c \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_1}{\theta_{1s}}\right)^2} \quad (25)$$

$$f_{ib} := l_{bend}^d = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2} \quad (26)$$

Fig. 10 Block diagram

$$\begin{aligned} f_{q2} &:= \theta_2^d = \cos^{-1} \left(\frac{x_q - x_p}{l_{bend}} \right) - \theta_1 + \frac{\pi}{2} \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{D_{bar} \frac{\theta_1}{|\theta_{1s}|} - l_0 \sin \theta_1}{l_{bend}} \right) - \theta_1 + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$f_{q3} := \theta_3^d = \frac{\theta_{3s}}{\theta_{1s}} (\theta_1 - \theta_{1s}) - \theta_{3s} \quad (28)$$

これらは支持腕の角度 θ_1 により決定されるため、必ず移動の前後で姿勢は対称性となる。以上の手法により、ロボットは把持目標となる次の枝までの距離に応じて移動に必要なエネルギー E_{S2}^d を算出し、そのエネルギーを S2 時において満たすようにリンク 3 の角速度 $\dot{\theta}_3$ を制御する。

以上の Swing-back コントローラと Locomotion コントローラをまとめると、連続ブラキエーションのブロック線図は Fig. 10 のようになる。S はロボットの状態を表すベクトルであり、 $X = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, l_{bend}]^T$ とすると $S = [X, \dot{X}, \ddot{X}]^T$ で表される。D はコントローラ、U は条件を満たす空間を表す。ただし、下添字 s は Swing-back を、l は Locomotion を表し、上添字 s は start, e は end を意味する。

まず Preliminary Swing を行ったら後、ロボットは上側の Swing-back コントローラにより、両腕支持期において系のエネルギーを制御する。十分なエネルギーを獲得できた場合に条件 U_s が満たされたところで ($S_s^{real} \in U_s$)、後方の枝を開放する Release イベントが起きる。そして、Release 直後のロボットの状態を S_l^s として Controller Designer により式 (26) ~ (28) で表される Locomotion コントローラ D_l が更新され、 $D_l = F_l(f_{ib}, f_{q2}, f_{q3})$ が決定されると同時に、制御ループは下側の Locomotion コントローラに切り替わる。

次に Locomotion コントローラにより片腕支持期のロボットが制御され、前方の枝にアプローチする。十分手先が把持目標枝に近づいたところで手首-枝間で生じる反力を検出し、把持成功の条件 U_l が満たされると ($S_l^{real} \in U_l$) Grappling が起こる。その直後の状態を S_s^s として、今度は Controller Designer により式 (8), (9) で表される Swing-back コントローラ D_s が更

新され、 $D_s = F_s(f_{lb}, f_{q3})$ が決定された後、両腕支持期における系のエネルギー制御が開始される。以降は、上記のようなコントローラの切り替えを交互に繰り返すことで、周期的な連続移動が実現される。

3. 実 験

本章では提案する制御手法を実システムに適用し、実験によりその有効性を確認する。以下では実験に使用した実機システムと実験条件について述べた後、実験で得られた結果を示し、考察を行う。

3.1 実験システム

実験にはマルチロコモーションロボットとして開発した、Gorilla Robot III (Fig. 11 参照) を用いる。このロボットは2足歩行運動、4足歩行運動およびブラキエーション運動を行うことが可能となるように設計されており、高さが約1.0[m]、本体重量が約22.0[kg]、24個のモータ（枝をつかむためのグリップを含める）により駆動されている。制御用OSはリアルタイムOSであるVxWorks（Wind River Systems Inc.）を用い、制御コンピュータ、ボード等は外部に置かれ、ロボットとはケーブルを介して接続されている。

各関節角はモータに取り付けられているエンコーダにより計測し、把持した枝周りの回転角速度および回転角度はジャイロスコープ（Silicon Sensing Systems Japan Ltd. 製 CRS03-04）を用いて計測する。後述のように本実験では把持した枝周りの回転角を評価に用いるため、ドリフトに対する対策として、実験中S1になった瞬間に枝間隔や両腕の長さから決定される幾何学的拘束条件から積分値の補正を行うものとした。また、6軸力覚センサ（NITTA CORPORATION 製 IFS-67M25A）を用いて枝を把持したときに枝からの反力を計測し、把持動作（L3 → S1）における把持成功の判断を行う。

枝は同じ高さで等間隔になるように並べられており、その間隔を適宜調整できるようになっている（Fig. 12 参照）。本実験では Preliminary Swing をロボットの固有振動周期に近い1[s]で行って系に初期エネルギーを注入した後、提案する手法により前方の枝までの距離（ D_{bar} ）に応じて Swing-back 動作（S1 → S2 → S3）中の S1 → S2 により系のエネルギーを制御し、獲得したエネルギーを利用して Locomotion 動作（L1 → L2 → L3）により前方の枝にアプローチする。また、2

章で述べた4リンクロボットモデルの質量分布は Table 1 のようになる。

3.2 実験条件

本実験では枝の間隔を0.30[m]から0.45[m]まで0.05[m]ずつ変更しながら実験を行った。すべての実験において、Locomotion 動作の終了直前（L3）における支持腕（リンク1）の目標角度 θ_1^d [deg] を次式として E_{need} を算出した。

$$\theta_1^d = \theta_0 + 5.0 \quad (29)$$

つまり、L3の目標状態として、枝の間隔に応じて式(19)より決まる枝を把持するのに必要な最小角度 θ_0 に5.0[deg]分の角度余裕を持たせた状態を想定した。枝を把持する直前（L3）の目標状態として支持腕の振幅に余裕を持たせることで、運動中に予測不可能な外乱が生じて系の振子運動の振幅が減衰してしまった場合でも $\theta_1 \geq \theta_0$ を満たしていれば枝をつかむことができる。

それぞれの枝間隔の場合における目標エネルギー E_{need} および周期 T_c を算出したところ、Table 2 のようになった。ただし、位置エネルギーの基準は枝の位置とした。

3.3 結果および考察

以上の実験条件で連続ブラキエーション実験を行った結果、すべての枝間隔においてロボットは枝間隔に応じて安定した連続移動を実現できた。それぞれの実験で15[s]間に得られたリンク3の角度（ θ_3 ）および系の重心角度（ θ_p ）の時間変化波形を Fig. 13～16 に示す。これらの結果から、それぞれの実験においてロボットが安定した周期的な振子運動を実現できていることが分かる。ただし、グラフ中の○はS1およびS2を、●はS3（下側）およびL3（上側）をそれぞれ表す。また、前述の

Fig. 12 Experimental setting

Table 1 Parameters of 4-link robot

Parameter	value
$m_1 + m_2$	7.0 [kg]
m_3	15.0 [kg]
l_0	0.64 [m]
l_3	0.85 [m]

Table 2 E_{need} and T_c

D_{bar} [m]	E_{need} [Nm]	$T_c/4$ [s]
0.30	-147.7	0.455
0.35	-144.9	0.451
0.40	-141.9	0.449
0.45	-138.8	0.447

Fig. 11 Gorilla Robot III

Fig. 13 Experimental results ($D_{bar} = 0.30$ [m]). Solid: θ_3 , dashed: θ_p

Fig. 14 Experimental results ($D_{bar} = 0.35$ [m]). Solid: θ_3 , dashed: θ_p

Fig. 15 Experimental results ($D_{bar} = 0.40$ [m]). Solid: θ_3 , dashed: θ_p

ように、式 (1) により S2 時においてエネルギーロスが生じないように姿勢制御しているが、振り運動の回転中心が不連続に切り替わるため、グラフ中の θ_p の値が不連続となっている点に注意されたい。

提案する手法により系のエネルギー制御が実現できているかどうかを評価するための指標として、ここでは S3 と L3 時における振幅 (θ_p) を取り上げ、それぞれの実験にて計測した S3 および L3 における θ_p 値を Table 3~6 にまとめた。

Table 3~6 から、どの枝間隔で行った実験でも目標枝をつかむ直前 L3 の振幅 θ_p の値に ± 1 [deg] 程度の制御誤差が生じていることが分かる。これは Locomotion 動作中は片腕把持とな

Fig. 16 Experimental results ($D_{bar} = 0.45$ [m]). Solid: θ_3 , dashed: θ_p

Table 3 Pendulum angle θ_p at S3 and L3 on $D_{bar} = 0.30$ [m]

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
$\theta_p(L3)$ [deg]	31.5	32.0	33.8	33.8	35.0	35.5	36.5
$\theta_p(S3)$ [deg]	-28.0	-27.8	-28.0	-27.5	-28.5	-27.8	-27.5

Table 4 Pendulum angle θ_p at S3 and L3 on $D_{bar} = 0.35$ [m]

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
$\theta_p(L3)$ [deg]	32.0	31.5	30.0	32.0	32.0	33.0	32.5
$\theta_p(S3)$ [deg]	-30.5	-30.0	-30.5	-29.5	-29.5	-30.5	-30.0

Table 5 Pendulum angle θ_p at S3 and L3 on $D_{bar} = 0.40$ [m]

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
$\theta_p(L3)$ [deg]	33.0	32.0	31.5	31.8	31.5	33.0	32.0
$\theta_p(S3)$ [deg]	-30.5	-31.0	-31.5	-30.5	-30.0	-30.5	-31.8

Table 6 Pendulum angle θ_p at S3 and L3 on $D_{bar} = 0.45$ [m]

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
$\theta_p(L3)$ [deg]	33.5	34.0	34.3	34.0	33.5	32.5	33.0
$\theta_p(S3)$ [deg]	-32.0	-31.8	-32.0	-31.0	-31.5	-30.0	-31.0

ることで系の運動が不安定であること、把持枝周りの摩擦等によりエネルギーを消費してしまうこと、遊腕の運動による影響等がその原因として考えられるが、L3 時の目標振幅として式 (29) のようにあらかじめ振幅余裕を考慮してコントローラを設計することにより、これらの制御誤差を吸収できていることが分かる。

一方、おのおの実験において S3 ではほぼ同じ振幅値が得られており、枝間隔に応じてエネルギーを制御する Swing-back 動作が実現できていることが分かる。このことから、提案する手法により Locomotion 開始時のエネルギーコントロールができたことで、ロボットは様々な枝間隔でも安定した連続移動を獲得することに成功したと言える。

以上の実験結果から本論文で提案する Swing-back 制御手法の有効性が確かめられた。枝間隔 $D_{bar} = 0.40$ [m] においてロボットが獲得した連続ブラキエーションの様子を Fig. 17 に示す。

4. ま と め

本論文では、エネルギーに基づく Swing-back 制御を行うこと

Fig. 17 Snapshots of continuous brachiation ($D_{bar} = 0.40$ [m])

で枝が同じ高さで等間隔に並んだ梯子における連続ブラキエーションを実機により実現する手法について述べた。

まず獲得目標となる Swing-back 動作と Locomotion 動作により構成された連続ブラキエーションについて述べた後、全体の制御戦略として、対称性を利用した最もシンプルな戦略について述べた。次に Swing-back 動作と Locomotion 動作についてそれぞれモデル化を行った後、提案するエネルギーに基づく制御手法について述べた。これは、Swing-back 動作中における胴体リンクの角速度を制御することで、前方の枝までの距離に応じた移動に必要なエネルギーを系に注入した後、Locomotion 動作中は移動の前後で姿勢変化が対称となるように制御することでエネルギーを一定に保つ手法である。最後に、ロボットによる検証を行った結果、提案する手法により様々な枝間隔での安定した連続ブラキエーションを実現できることを示した。

今後の課題は、不規則な間隔で枝が並んだ環境や枝の高さが変化する環境、さらには前方までの枝間隔が未知である環境における連続ブラキエーションの実現などが考えられる。このような動的に条件が変化する環境では Swing-back 動作だけでは移動に必要なエネルギーを完全に系に注入できない場合が考えられる。したがって、エネルギーを一定に保つ Locomotion 動作に代わり、必要に応じて片腕支持期においても動的にエネルギーを制御しながら前方の枝を把持できるコントローラを構築することが必要であり、今後取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- [1] M.H. Raibert: Legged Robots that Balance. MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [2] M. Spong: "The swing up control problem for the acrobot," IEEE Control Syst. Mag., vol.15, no.1, pp.49-55, 1995.
- [3] T. McGeer: "Passive dynamic walking," The Int. Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [4] Q. Li, A. Takanishi and I. Kato: "Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on ZMP," In Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.597-603, 1992.
- [5] S. Kajita, T. Yamaura and A. Kobayashi: "Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit," In IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.8, no.4, pp.431-438, 1992.
- [6] 山藤和男, 小林剛, 河村隆: "猫ひねり動作の解明とロボットによる猫ひねりの実現", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.648-655, 1992.
- [7] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男: "節体型移動ロボットの操舵とマニピュレーション制御の統合", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1112-1121, 2000.
- [8] 広瀬茂男, 米田完: "4 足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.3, pp.267-275, 1991.
- [9] M.D. Berkemeier and R.S. Fearing: "Sliding and Hopping Gaits for the Underactuated Acrobot," In IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.14, no.4, pp.629-634, 1998.
- [10] 南澤 謹, 美多 勉, Ioannis Pantelidis, 山北昌毅: "アクロボットの振り上げ倒立制御と特異点問題", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.85-88, 2002.
- [11] S. Eimerl and I. DeVore: The Primates. TIME-LIFE BOOKS,

- 1966.
- [12] J. Fleagle: "Dynamics of a brachiating siamang (Hylobates (Symphalangus) syndactylus)," *Nature*, vol.248, no.445, pp.259-260, 1974.
  - [13] J.E.A. Bertram, A. Ruina, C.E. Cannon, Y.H. Chang and M.J. Coleman: "A POINT-MASS MODEL OF GIBBON LOCOMOTION," *The Journal of Experimental Biology* 202, pp.2609-2617, 1999.
  - [14] T. Fukuda, F. Saito and F. Arai: "A study on the brachiation type of mobile robot (heuristic creation of driving input and control using CMAC)," In *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.478-483, 1991.
  - [15] F. Saito, T. Fukuda and F. Arai: "Swing and locomotion control for two-link brachiation robot," In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.719-724, 1993.
  - [16] F. Saito, T. Fukuda and F. Arai: "Swing and locomotion control for a two-link brachiation robot," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol.14, no.1, pp.5-12, 1994.
  - [17] F. Saito and T. Fukuda: 'A First Result of The Brachiator II I—A New Brachiation Robot Modeled on a Siamang,' *Artificial Life V*, pp.354-361, MIT Press, 1997.
  - [18] J. Nakanishi, T. Fukuda and D.E. Koditschek: "A brachiating robot controller," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.16, no.2, pp.109-123, 2000.
  - [19] 長谷川泰久, 伊藤芳邦, 福田敏男: "ブラキエーション形移動ロボットの研究 (第7報, 階層形行動制御における行動学習)", *日本機械学会論文集 (C編)*, vol.67, no.662, pp.3204-3211, 2001.
  - [20] J.R. Usherwood and J.E.A. Bertram: "Understanding brachiation: insight from a collisional perspective," *The Journal of Experimental Biology*, vol.206, pp.1631-1642, 2003.
  - [21] H. Kajima, Y. Hasegawa and T. Fukuda: "Study on brachiation controller—adjustment method of strength and timing parameters—," In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2497-2502, 2002.
  - [22] H. Kajima, M. Doi, Y. Hasegawa and T. Fukuda: "Study on Brachiation Controller for the Multi-locomotion Robot—Redesigning Behavior Controllers—," In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1388-1393, 2003.
  - [23] H. Kajima, M. Doi, Y. Hasegawa and T. Fukuda: "A Study on a brachiation controller for the a multi-locomotion robot—realization of smooth, continuous brachiation—," *Advanced Robotics*, vol.18, no.10, pp.1025-1038, 2004.
  - [24] M. Doi, Y. Hasegawa and T. Fukuda: "Passive Trajectory Control of the Lateral Motion in Bipedal Walking," In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3049-3054, 2004.

梶間日出輝 (Hideki Kajima)

1977年5月1日生。2000年名古屋大学工学部機械・航空工学科退学。2002年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻博士前期課程修了。2005年3月同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻博士後期課程修了。同年4月よりトヨタ自動車株式会社に勤務。博士(工学)。非ホロノミック系の制御, 多リンクロボットの運動制御に関心を持つ。

(日本ロボット学会学生会員)

長谷川泰久 (Yasuhisa Hasegawa)

1972年1月26日生。1996年名古屋大学大学院博士課程前期課程修了。同年, 三菱重工株式会社勤務。1998年名古屋大学大学院工学研究科助手, 2003年岐阜大学工学部講師, 2004年より筑波大学大学院システム情報工学研究科講師, 現在に至る。博士(工学)。主な研究領域は, 学習型運動制御, 歩行支援, ロボットハンド等の研究に従事。現在, 日本知能情報ファジィ学会監事。

(日本ロボット学会正会員)

福田敏男 (Toshio Fukuda)

1948年12月12日生。1977年東京大学大学院博士課程修了, 工学博士。1977年通産省工業技術院機械技術研究所研究員, 主任研究官を経て, 1982年より東京理科大学工学部機械工学科講師, 1983年同大学助教授, 1979-1981年西ドイツシュツットガルト大学客員研究員, 1986年アメリカエール大学客員助教授, 1989年4月名古屋大学工学部機械工学第2学科教授。1992年4月同大学機械情報システム工学科教授。1994年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授, 現在に至る。自己組織化ロボット, マイクロロボット, マイクロ・ナノマニピュレーション, インテリジェント制御, ロボットハンドやマニピュレータの制御, 特殊環境下のロボットの研究等に従事。現在, IEEE Nanotechnology Council President, 日本知能情報ファジィ学会会長。

(日本ロボット学会正会員)