

Brachiation is a method of moving by alternately grabbing the branches with the upper limbs, and using gravity to efficiently move at high places. This method is expected to be applied to robots working at heights. In the previous study, using an extensible single-rod brachiation robot, the experimentally determined extending conditions were used, so if the target bar positions are different, the conditions need to be determined experimentally again. In this study, we propose an amplitude adjustment method during the pendulum phase of extensible single-rod robot for brachiation based on a next bar position. And the amplitude adjustment method using robot length manipulation enables the brachiation movements to arbitrary locations with and without the aerial phase.

Key Words : Brachiation, Excitation, Swing amplitude adjustment

### 1. 緒言

ブラキエーションは、上肢で枝を掴んでぶら下がりながら移動する方法であり、重力を利用することで高所を効率的に移動できる。これをロボットに応用することで<sup>(1)</sup>、送電線の点検などの高所作業への応用が期待できる。従来のブラキエーションロボットはテナガザルを模倣した多リンク型であった。しかし、多リンク型はカオス現象のような非周期的な運動が発生するため制御が難しいという問題がある<sup>(2)</sup>。先行研究では、1本の棒状にすることにより問題を解決し、振り過程でリンクが伸縮する機構を用いてブランコを漕ぐように振動を拡大させ（これを励振と呼ぶ）、適切なタイミングでリンクを伸ばすことで、同じ高さにある目標バーへの移動を実機で実現した<sup>(3)</sup>。しかし、移動可能距離はロボットの最小長から最大長までのみであった。また、振幅調整は行っておらず、さらにリンクを伸ばすタイミングを実験的に得ているため、目標バーの位置が異なる場合・初期振幅が異なる場合は再度タイミング決定を行わなければならない。そこで、本研究では振幅調整法を提案し、目標バーの位置に基づいた空中過程無・有の両方のブラキエーション動作を可能にし、伸縮する棒状ブラキエーションロボットの自在移動を実現させた。

### 2. 本研究で目的とするブラキエーション動作

図1に目的とするブラキエーション動作を示す。ロボットの両端のグリップバーがそれぞれbar1, bar2を掴んだ状態(図1(1))から、bar1を離して振り過程(図1(2))に移る。bar3がロボットの伸縮可能最大長以下の距離にある場合、リンクを伸ばすことで空中過程を含みずに移動する(図1(3-1))。bar3が伸縮可能最大長より離れている場合、適切なタイミングでbar2を離し(図1(3-2))、空中過程を経てbar3を掴む(図1(4))。この一連の流れを繰り返すことにより、bar3以降も連続してブラキエーションをすることができるとする。

ここで、先行研究では図1(3-1)まで達成したが、リンクを伸ばすタイミングを実験的に決定していたため、バーが異なる位置にある場合や連続ブラキエーションにより初期振幅がずれた場合、ブラキエーション動作の継続が困難となる。空中過程を含まない場合は、目標バーを把持するために必要な振幅まで励振し、空中過程を含む場合は、適切なりリース条件になるための振幅まで励振することが望まれる。本研究では振り過程で振幅を調整することで、バーの位置に基づいたブラキエーション動作を目指した。

### 3. 伸縮量制御による振幅調整法

#### 3.1 振幅に基づくロボット最大長の決定

伸縮する機構を活かし、振り過程において角速度が0になるタイミングで最大長 $l_{\max}$ 、角速度が最大になるタイミングで最小長 $l_{\min}$ のように伸縮量を操作することで励振が可能であり、本研究では最小長は固定し、最大長を操作することで振幅増加率を変化させた。ここで、ロボットを長さ可変の一本の剛体棒であるとみなすと、単純な減衰振動は

ロボットの角度 $\varphi$ (図1)、長さ $l$ 、質量 $m$ 、把持しているバー周りの慣性モーメント $J$ 、重力加速度 $g$ 、減衰係数 $c$ を用いて式(1)で表される。

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + c \frac{d\varphi}{dt} + \frac{1}{2} mgl \sin(\varphi) = 0 \quad (1)$$

しかし、式(1)は非線形な項を含むため、振動の振幅が微小である( $\sin(\varphi) \approx \varphi$ )とみなした近似式(2)でのモデル化を試みた。なお、角振動数を $\omega$ とし、時刻 $t=0$ での位相は $B=0$ とした。励振を含む振動では $l_{\max}$ を変化させることにより減衰量が変化すると考え、減衰率を励振率も含めた振幅増加率とすることで、励振を含む振動を減衰振動の近似式で表せると考えた。これにより、現在振幅 $A_{\text{now}}$ から半周期後に目標振幅 $A_{\text{ref}}$ になるために必要な振幅増加率 $\lambda$ は式(3)で表せる。 $\lambda$ が負である場合は減衰し、正である場合は励振する。

$$\varphi(t) = A_{\text{now}} e^{\lambda t} \cos(\omega t + B) \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\omega}{\pi} \ln \left( \frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{now}}} \right) \quad (3)$$

ここで、微小角近似ができない振幅になると周期は振幅に依存するため、実験データより振幅 $A$  [deg]と角振動数 $\omega$  [rad/s]の関係性を $\omega = -0.0126A + 4.64$ と近似した。これらを基に、ロボット最大長 $l_{\max}$ が異なる実験データごとに振幅増加率を調整し、フィッティングした。フィッティング結果のうち $l_{\max} = 0.74, 0.68\text{m}$ の結果を図2に示す。これにより、ロボット最大長と振幅増加率の関係性は $l_{\max} = 0.99\lambda + 0.60$ と近似された。以上により、現在振幅 $A_{\text{now}}$ から半周期後に目標振幅 $A_{\text{ref}}$ にするためには次式を用いて求めることができる。

$$l_{\max} = \frac{0.99(-0.0126A_{\text{now}} + 4.64)}{\pi} \ln \left( \frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{now}}} \right) + 0.60$$

#### 3.2 振幅調整実験

目標振幅を $A_{\text{ref}} = 120$  deg(振りにおいて振幅に達する点は角度が正・負の2か所ある)とし、振幅調整実験を行った。角度変化とロボット最大長指令値を図3に示す。黒線は目標振幅、赤線は目標振幅到達時刻を表す。なお、ロボット最大長はリンク伸縮可能範囲内( $0.56\text{m} \leq l_{\max} \leq 0.74\text{m}$ )で半周期ごとに決定した。これにより伸縮量制御による振幅調整法の有用性を確認した。

#### 4. 空中過程を含まないブラキエーション動作実験

提案した振幅調整法を用いて空中過程を含まないブラキエーション動作実験を行った。目標バー把持直前の半周期は励振動作のない単純な減衰とし、ロボット長はバーまでの距離を基に決定した。最後の半周期での減衰を考慮した目標振幅を求め、振幅調整を行った。実験の様子を図4に示す。なお、実験1は同じ高さで、実験2は0.14m高い位

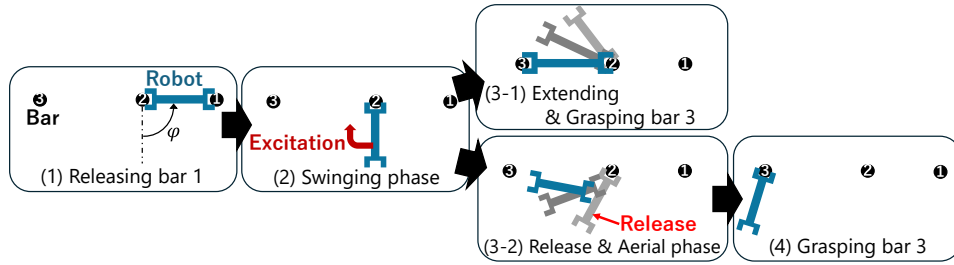


Fig.1 Brachiation motions

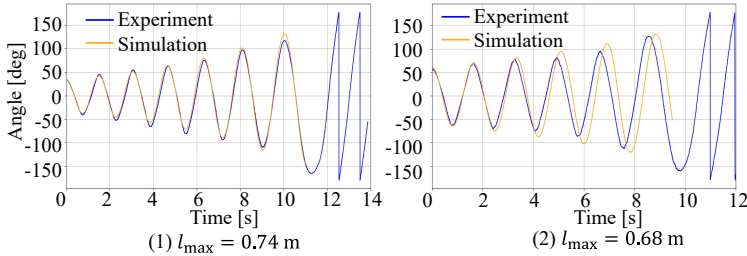


Fig.2 Fitting results of angle ( $l_{\max} = 0.74, 0.68\text{m}$ )

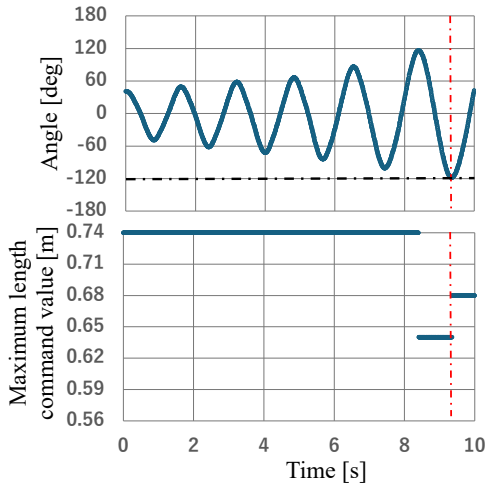


Fig.3 Amplitude adjustment experiment

置で、いずれも距離は伸縮可能最大長 0.74m の位置に目標バーを設置した。成功率はいずれの位置のバーでも 10 回試行のうち 60 % 程であった。把持直前の振幅データから標準偏差を求め、把持直前の半周期における振幅減衰量の実験ごとのばらつきが影響を無視できないほど大きかったことが分かった。このばらつきは空気抵抗やグリッパーとバーの摩擦などにより生じていると考えられる。そのため、より正確な振幅減衰量推定やグリッパーの改良などが望まれる。

##### 5. 空中過程を含むブラキエーション動作実験

提案した振幅調整法を用いて空中過程を含むブラキエーション動作を行った。なお、バーリリース後のロボット長を一定とすることで空中過程では重心は放物線軌道、グリッパーはリリース時の角速度による重心周りの一定速回転軌道となる。目標バーを、もともと把持しているバーと同じ高さでロボット伸縮可能最大長さ 0.74m から 0.05m 離れた位置に設置した。安定したバー把持を行うために、バー把持時のバーとグリッパーの距離  $J_d$ ・バーに対するグリッパーの加速度  $J_r$  を基に、距離に重み付け ( $\alpha$ ) を行った評価関数  $J = \alpha \times J_d + J_r$  を定義し、 $J$  を最小とするリリース時角度・角速度・ロボット長を最適なバーリリース条件とした。その条件になるように、単純減衰であるとして必要な目標振幅を求め、振幅調整を行った。実験の様子を図 5 に示す。成功率は 6.7 % 程とかなり低かった。原因の一つとして、バー把持時のグリッパー角度が挙げられる。グリッパーの構造上、振子の回転軸方向に振動が発生してしまうため、バーに対して垂直にリリースされない場合がある。回転軸方向に振

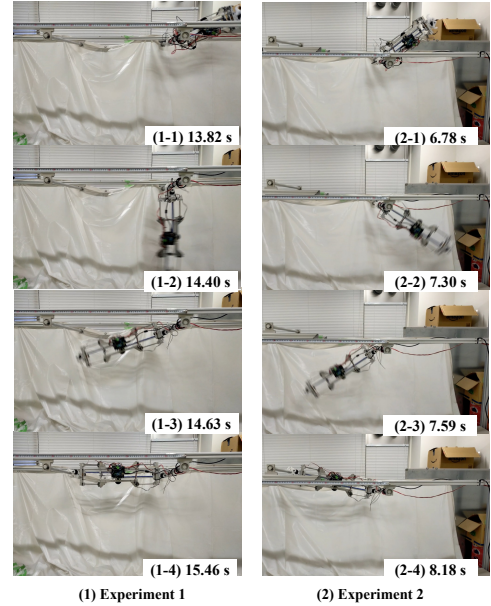


Fig.4 No aerial phase experiment

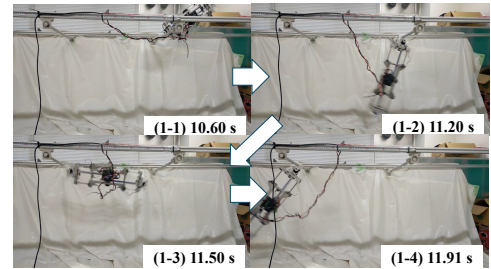


Fig.5 Aerial phase experiment

動が発生しにくい構造にすることでより安定した把持が可能となり、成功率増加が期待できる。また、空中過程における軌道のずれも考えられ、空中過程での軌道修正などによるロバスト性向上が望まれる。

##### 6. 結言と今後の展望

伸縮する棒状ブラキエーションロボットの伸縮量制御による振幅調整法を提案した。また、目標バーの位置に基づいてブラキエーション動作計画を決定し、その計画を振幅調整法によって実現させ、空中過程無・有の両方のブラキエーションに成功させ、自在移動を達成した。今後の展望として、グリッパー改良や空中過程での軌道修正などによるロバスト性向上や、3 次元方向への拡張などがある。

文 献

- (1) 福田敏男, 細貝英実, 近藤裕二. ブラキエーション形移動ロボットの研究: 第 1 報, 動特性の解析とシミュレーション. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 56, No. 527, pp. 1839-1846, 1990.
- (2) 鈴木三男, 増田健二. 二重振り子におけるカオスの振舞. 物理教育, Vol. 48, No. 1, pp. 1-5, 2000.
- (3) 赤羽聖, 水内郁夫. 伸縮する棒状ロボットのブラキエーション. *Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No. 2P1-M07, 2024.