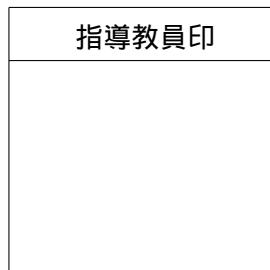


令和6年度卒業論文

伸縮する単リンクブラキエーションロボットの 自在移動のための振幅調整法



指導教員 水内 郁夫 教授

東京農工大学
工学部 機械システム工学科

令和3年度入学
21265014
大澤 蒼人

目 次

第1章 序論	7
1.1 研究の背景と目的	9
1.2 本論文の構成	9
第2章 本研究におけるプラキエーション動作と実機構成	11
2.1 はじめに	13
2.2 プラキエーションの流れ	13
2.3 伸縮による励振	13
2.4 伸縮する単リンクプラキエーションロボットの実機構成	14
第3章 伸縮量制御による振幅調整	15
3.1 はじめに	17
3.2 伸縮による励振のメカニズム	17
3.2.1 伸縮する単リンクプラキエーションロボットのモデル化	17
3.2.2 励振シミュレーション	19
3.3 振幅調整の流れ	23
3.4 伸縮量制御	23
3.4.1 近似モデルの励振データへのフィッティング	23
3.4.2 振幅調整実験	29
第4章 バーの位置に基づく空中過程を含まないプラキエーション動作	33
4.1 はじめに	35
4.2 伸縮タイミングの検討	35
4.3 空中過程を含まないプラキエーション実験	36
4.3.1 目標振幅の決定	36
4.3.2 プラキエーション実験	39
第5章 バーの位置に基づく空中過程を含むプラキエーション動作	43
5.1 はじめに	45
5.2 最適なバーリリース条件の導出	45
5.2.1 空中過程における目標バーとグリッパーの距離と相対速度	45
5.2.2 最適化のための評価関数	46

5.3 空中過程を含むプラキエーション実験	47
5.3.1 目標振幅の導出	47
5.3.2 リリース実験	47
5.3.3 プラキエーション実験	50
第 6 章 結論および今後の展望	53
6.1 結論	55
6.2 今後の展望	55
謝辞	56
参考文献	60

第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

プラキエーションは、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。この移動方法をロボットに応用することで[1]、送電線の点検などの高所作業への適用が期待される。テナガザルを模倣した多リンク型のロボットの研究例として、福田らの2リンク型[2][3][4][5][6][7][8][9]や5リンク型[10]、6リンク型[1]、7リンク型[11]、13リンク型[12]などがある。また、把持機構に電磁石を用いた2リンク型[13][14]や、パッシブグリッパーを用いた2リンク型[15]、3リンク型[16]などがある。しかし、多リンク型は構造が複雑であるとともに、カオス現象[17]が生じることで制御が難しくなるという問題がある。赤羽らはロボットの形状を棒状、すなわち単リンク型にすることで構造を単純化し、これらの問題を解決した[18]。また、おもりを動かすことでも重心を移動させて励振する手法[19]を用いたロボットの、モデル予測制御によるプラキエーションの研究[20]や、伸縮することで励振するとともに移動可能距離を延ばす[21]などの単リンクプラキエーションロボットに関する研究がある。これらの単リンクプラキエーションロボットの研究では、振子過程において励振量の調整を行っておらず、さらに伸縮するプラキエーションロボットにおいては実験的に伸縮タイミングを決定しており、目標のバーの位置に基づいた最適な移動までには至っていない。また、同じ高さのバーへの移動のみであり、異なる高さのバーへの移動は実現されていない。

そこで本研究では、伸縮する単リンクプラキエーションロボットの自在移動を実現することを目的とし、バーの位置が異なる場合でも適用できるシステムを提案・検証する。バーの位置に基づいて励振、伸縮、把持を行うために、振子過程において伸縮量を制御することで振幅を調整するシステムを提案する。また、振幅調整システムを用いて、空中過程を含まない場合と空中過程を含む場合の両方のプラキエーション動作の実験を行い、システムの検証を行う。

1.2 本論文の構成

本論文は、全6章から構成させる。以下に各章の概要を述べる。

- 第1章（本章）では、研究の背景と目的について述べた。
- 第2章「本研究におけるプラキエーション動作と実機構成」では、本研究で目標とす

る ブラキエーション動作と , 伸縮する単リンク ブラキエーションロボットの実機構成について述べる .

- 第 3 章「伸縮量制御による振幅調整」では伸縮量を調整することで振子過程での振幅調整を行うことによる , 任意の振幅への到達システムについて述べる .
- 第 4 章「バーの位置に基づく空中過程を含まない ブラキエーション動作」では , バーの位置に基づいて空中過程を含まない ブラキエーション動作を行うための動作計画と実機実験について述べる .
- 第 5 章「バーの位置に基づく空中過程を含む ブラキエーション動作」では , 空中過程を含む ブラキエーションにおけるバーの位置に基づく最適なバーリリース条件の導出とリリース実験について述べる .
- 第 6 章「結論および今後の展望」では , 本研究で得られた結論および今後の展望について述べる .

第2章

本研究におけるブラキエーション動作と 実機構成

2.1 はじめに

本章では、目的とするブランコエーキューション動作と伸縮による励振、そして本研究で用いるロボットの実機構成について述べる。

2.2 ブランコエーキューションの流れ

図2.1に本研究で目的とする空中過程を含んだブランコエーキューション動作を示す。ロボットの両端のグリッパーがバーを掴んだ状態(図2.1(1))から、片方のバーを離して振子過程(図2.1(2))に移る。目標のバーまでの距離がロボットの最大長以下である場合、バーの距離に合わせてロボットを伸縮させることで空中過程を含まないブランコエーキューション(図2.1(3-1))を行う。一方、目標のバーまでの距離がロボットの最大長以上である場合、適切なタイミングでもう一方のバーも離し(図2.1(3-2))、空中過程を経て、最後に目標のバーを掴む(図2.1(4))。これらの動きを繰り返すことで連続したブランコエーキューションを行う。

2.3 伸縮による励振

目標とするバーの位置が、把持していたバー(図2.1におけるbar1)と同じ、もしくはそれよりも高い場合、振子過程においてロボットの振幅を大きくしなければ空気抵抗や摩擦などの影響により目標のバーへ到達することができない。そのため、振子過程において外部からのエネルギー投入による振動の拡大が望まれる。本研究ではロボットを伸縮することにより、ブランコのように重心位置をロボットの長手方向に変化させることで励振を行う。この励振方法は先行研究があり、実機で実現されている[21]。

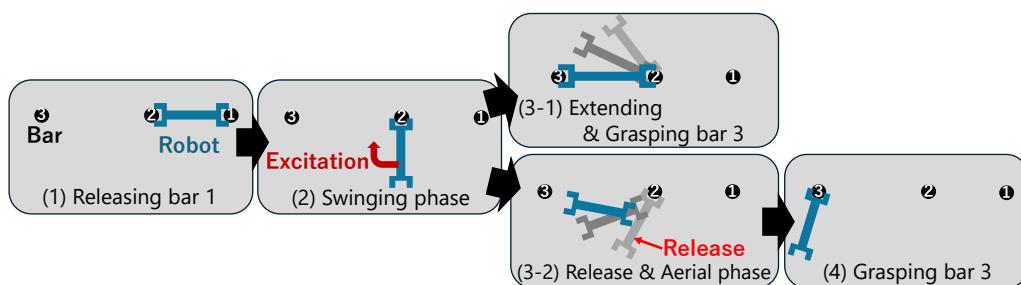


Fig. 2.1: Brachiation motions

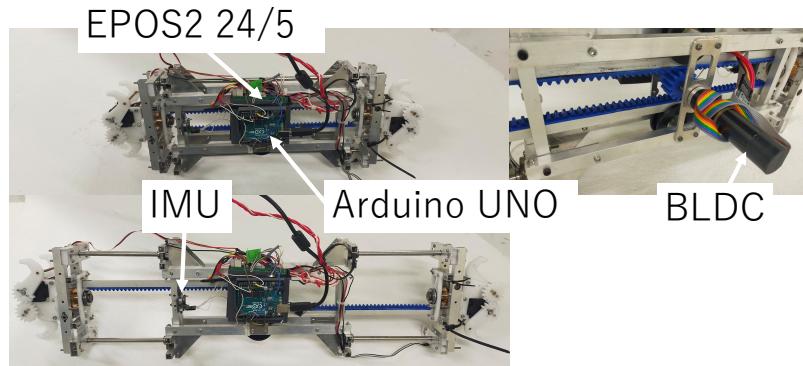


Fig. 2.2: Overall view of extensible brachiation robot

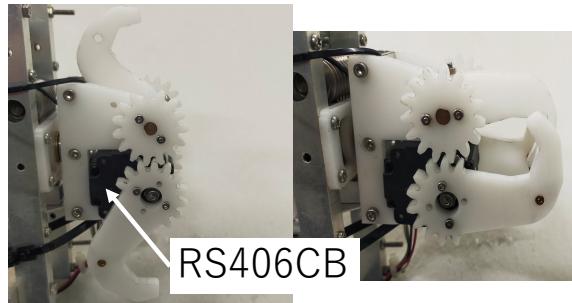


Fig. 2.3: Gripper configuration

2.4 伸縮する単リンクプラキエーションロボットの実機構成

本研究では [21] で使用していた実機を用いた。図 2.2 に全体図を示す。重さは 3.0 kg であり、幅・奥行・高さは最も縮めた場合は $150 \times 80 \times 560$ mm, 最も伸ばした場合は $150 \times 80 \times 740$ mm である。伸縮にはラックピニオン機構が用いられており、中心部のブラシレス DC モータ (MAXON EC22 40W, ギアヘッドギア比 128) によって歯車を回転させる。ブラシレス DC モータはモータドライバ (EPOS2 24/5) を介してロボット全体の制御を行う Arduino Uno に接続されている。また、グリッパーは把持部品がサーボモジュール (双葉電子工業 RS406CB) で駆動する (図 2.3)。なお、グリッパーに用いているサーボモータの回転速度は $0.11\text{s}/60\text{deg}$ であり、グリッパー開状態は 0 deg , グリッパー閉状態は 100 deg であるためグリッパーを開く/閉じるために必要なモータ回転量 100 deg の回転に要する時間は $100/60 \times 0.11 \approx 0.183\text{s}$ である。ロボット全体の姿勢取得には IMU (Adafruit BNO055) を用いている。

第3章

伸縮量制御による振幅調整

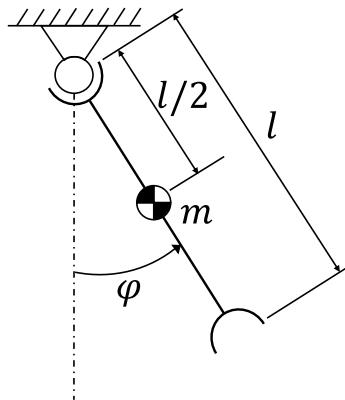


Fig. 3.1: Model of an extensible pendulum

3.1 はじめに

目標バーの位置に基づいて伸縮タイミングやリリースの条件を決定する場合，振子過程においてその条件を実現することが望まれる．本章では，伸縮量を制御することによる振幅調整システムについて述べる ..

3.2 伸縮による励振のメカニズム

本研究では，重心を移動させることにより振子過程において励振させる．Lieskovský らの重りを動かすことによる振幅増加率が最大となる重心移動の研究 [19] を，伸縮機構に応用して励振を行う．

3.2.1 伸縮する単リンクプラキエーションロボットのモデル化

図 3.1 に伸縮する単リンクプラキエーションロボットを簡略化した，伸縮する振子のモデルを示す．振子の半径方向と鉛直下向き線がなす角を φ [rad]，振子の長さを l [m]，振子の質量を m [kg]，振子の重心周りの慣性モーメントを I [kgm²]，重力加速度を g [m/s²] とする．運動方程式を以下のラグランジュの運動方程式で求める．

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = S_i \quad (3.1)$$

q_i と S_i はそれぞれ一般化座標と一般化力であり，それぞれ式 (3.2)，式 (3.3)とした．ここで，伸縮のために加える力を u [N] とする． $L = T - U$ はラグランジアンであり，系の運動

エネルギー T と位置エネルギー U で構成され、本モデルでは式(3.4)、式(3.5)となる。

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi \\ l \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$T = \frac{1}{2}m\left(\frac{l}{2}\dot{\varphi}\right)^2 + \frac{1}{2}I\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}ml^2 \quad (3.4)$$

$$U = -gm\frac{l}{2}\cos(\varphi) \quad (3.5)$$

運動方程式を行列で書き表すと式(3.6)となる。

$$\underbrace{\frac{\partial^2 L}{\partial \ddot{\mathbf{q}}^2} \ddot{\mathbf{q}}^2}_{M} + \underbrace{\frac{\partial^2 L}{\partial \dot{\mathbf{q}} \partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}}}_{c} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ここで、 $M(l)$ 、 $c(\varphi, l, \dot{\varphi}, \dot{l})$ は以下のようになる。

$$M(l) = \begin{bmatrix} M_{11}(l) & 0 \\ 0 & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$c(\varphi, l, \dot{\varphi}, \dot{l}) = \begin{bmatrix} c_1(\varphi, l, \dot{\varphi}, \dot{l}) \\ c_2(\varphi, l, \dot{\varphi}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$M_{11}(l) = \frac{1}{4}ml(t)^2 + I \quad (3.9)$$

$$M_{22} = \frac{m}{4} \quad (3.10)$$

$$c_1(\varphi, l, \dot{\varphi}, \dot{l}) = \frac{1}{2}ml(t)\dot{l}(t)\dot{\varphi}(t) + \frac{1}{2}gml(t)\sin(\varphi(t)) \quad (3.11)$$

$$c_2(\varphi, l, \dot{\varphi}) = -\frac{1}{4}ml(t)\dot{\varphi}(t)^2 - \frac{1}{2}gm\cos(\varphi(t)) \quad (3.12)$$

本モデルの力積は式(3.13)で計算され、系の運動量 $p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$ との関係は式(3.14)である。

$$\hat{S}_i = \lim_{t^+ \rightarrow t} \int_t^{t^+} S_i(\tau) d\tau \quad (3.13)$$

$$p_i(t^+) - p_i(t) = \hat{S}_i \quad (3.14)$$

本モデルにおいて、 φ 方向の運動量は保存されるため、式(3.15)が満たされる。

$$M_{11}(l^+)\dot{\varphi}^+ - M_{11}(l)\dot{\varphi} = 0 \quad (3.15)$$

また、状態変数を

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ l \\ \dot{\varphi} \\ \dot{l} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

とすると、状態モデルは

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ -M_{11}^{-1}(x_2)c_1(x_{1-4}) \\ -M_{22}^{-1}c_2(x_{1-3}) + M_{22}^{-1}u \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

となる。

3.2.2 励振シミュレーション

伸縮が時刻 t 秒から t^+ 秒の間に瞬間的に行われると仮定すると、伸縮後の状態 \mathbf{x}^+ は伸縮前の状態 \mathbf{x} と式 (3.15) を用いて式 (3.18) で表される。ここで、伸びる場合は縮む場合は $x_2^+ = l_{\min}$ 、 $x_2^+ = l_{\max}$ となり、式 (3.19) の条件に基づいて変化させる。

$$\mathbf{x}^+ = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2^+ \\ M_{11}^{-1}(x_2^+)M_{11}(x_2)x_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$l = \begin{cases} l_{\min} & \text{if } \varphi\dot{\varphi} > 0 \\ l_{\max} & \text{if } \varphi\dot{\varphi} < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

この瞬間的な伸縮により系の運動エネルギー T と位置エネルギー U は次のように変化する。

$$\Delta T_t^{t^+} = \left(\frac{M_{11}(x_2)}{M_{11}(x_2^+)} - 1 \right) \frac{1}{2} M_{11}(x_2) x_3^2 \quad (3.20)$$

$$\Delta U_t^{t^+} = gm(x_2^+ - x_2) \cos(x_1) \quad (3.21)$$

本実験で用いる実機に基づき、各パラメータと初期状態 $(\varphi_{\text{ini}}, l_{\text{ini}}, \dot{\varphi}_{\text{ini}}, \dot{l}_{\text{ini}})$ を表 3.1 としてルンゲクッタ法を用いてシミュレータを作成した。その結果を図 3.2 に示す。横軸は時間 t 、縦軸はそれぞれ角度 φ ・角速度 $\dot{\varphi}$ ・力学的エネルギー E ・運動エネルギー T ・ポテンシャルエネルギー U を示す。これにより、伸縮することによる重心移動でも励振が可能であること

Table 3.1: Simulation parameters

Variables	Values
m [kg]	3.0
l_{\min} [m]	0.56
l_{\max} [m]	0.74
g [m/s ²]	9.81
φ_{ini} [rad]	0.3
l_{ini} [m]	l_{\max}
$\dot{\varphi}_{\text{ini}}$	0.0
\dot{l}_{ini}	0.0

が確認できる。これらの内容は Lieskovsky らのおもりを動かすことによる励振の研究 [19] を伸縮機構に応用したものである。

また、伸縮時の最大長 l_{\max} を 0.59 m から 0.74 m まで 3 cm 刻みで変化させた場合の励振シミュレーションを図 3.3 に示す。横軸は時間、縦軸は力学的エネルギーと角度を示している。このシミュレーション結果から、伸縮量を大きくするほど振幅増加量が大きくなり、伸縮量を小さくするほど伸縮増加量が小さくなることが分かる。ゆえに、伸縮量調整によって励振時の振幅操作が可能であると考えられる。

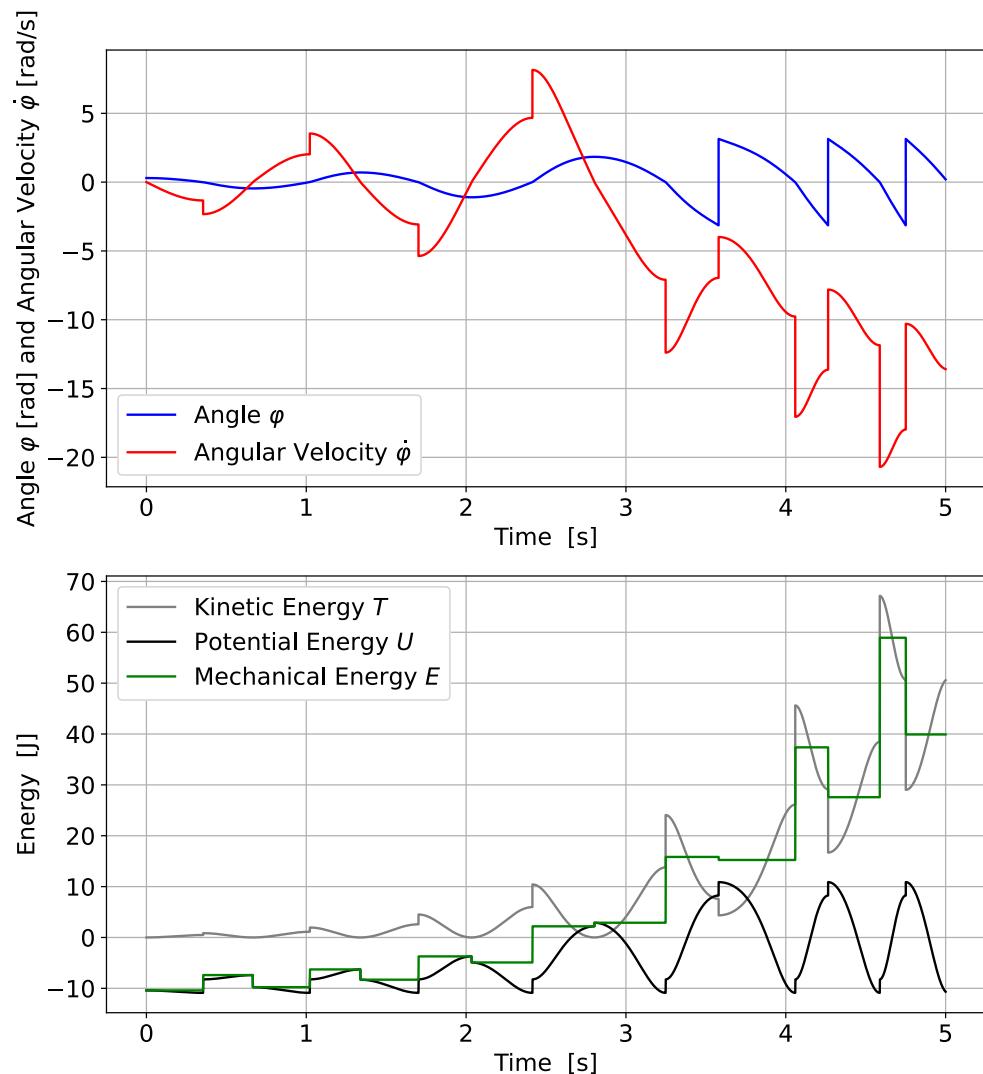


Fig. 3.2: Excitation simulation of extensible brachiation robot

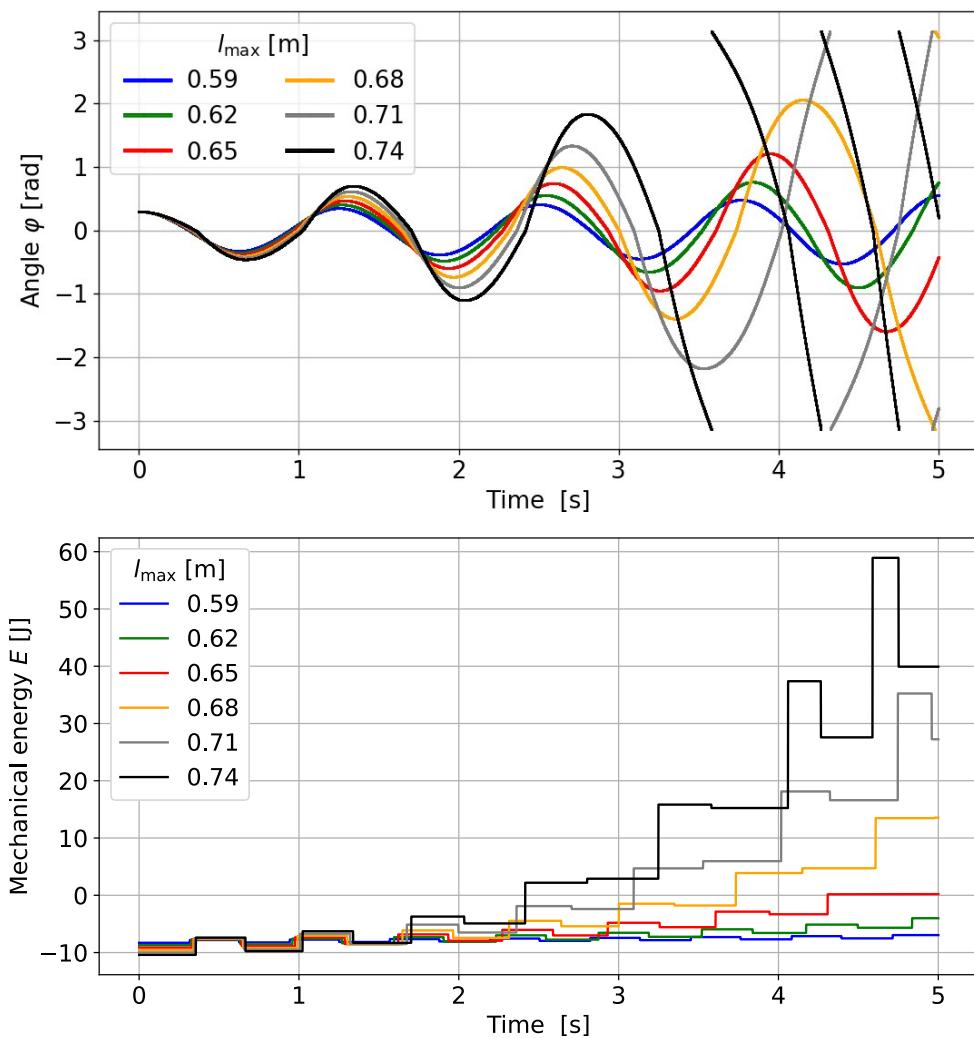


Fig. 3.3: Excitation simulation with changing the max length

3.3 振幅調整の流れ

本研究では振幅を基に伸縮量を制御し、振幅調整を行う。以下に振幅調整の流れを示す。

1. 目標振幅を決定
2. IMU を用いてロボットの角度・角速度を計測
3. 角速度の正負が入れ替わる時の角度を現在振幅とする
4. 目標振幅に到達するまで現在振幅に基づく伸縮量制御を行う
5. 目標振幅に到達したら伸縮量制御を終了

3.4 伸縮量制御

まず、半周期後の振幅の変化率と伸縮量の関係式を求める。実機の振動を、振幅が微小であるとみなした近似式である式(3.22)に示す形式での近似モデル化を試みた。ここで現在振幅、振幅増加率、角振動数をそれぞれ A_{now} , λ , ω として t 秒後の変位 $\varphi(t)$ を表す。また、半周期後の振幅を A_{next} とすると、式(3.23)となる。

$$\varphi(t) = A_{\text{now}} e^{\lambda t} \cos(\omega t) \quad (3.22)$$

$$A_{\text{next}} = \left| \varphi \left(\frac{\pi}{\omega} \right) \right| = A_{\text{now}} e^{\lambda \frac{\pi}{\omega}} \quad (3.23)$$

よって、現在振幅 A_{now} から半周期後に目標振幅 A_{ref} になるために必要な振幅増加率は式(3.24)で表される。

$$\lambda = \frac{\omega}{\pi} \ln \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{now}}} \right) \quad (3.24)$$

3.4.1 近似モデルの励振データへのフィッティング

実機の励振データの取得のために励振計測を行った。伸縮時の最小長は 0.56 m で固定し、最大長のみ 0.74 m, 0.72 m, 0.70 m, 0.68 m, 0.66 m, 0.56 m と変化させた。計測データ(角度・角速度)を図3.4に示す。なお、微小角近似ができない振幅になると周期は振幅に依存し、非線形効果が現れる。そこで、近似モデルをフィッティングさせるために振幅と角振動数の関係式を求めた。最大長 0.74 m での励振データから、半周期ごとの経過時間 t_{half}

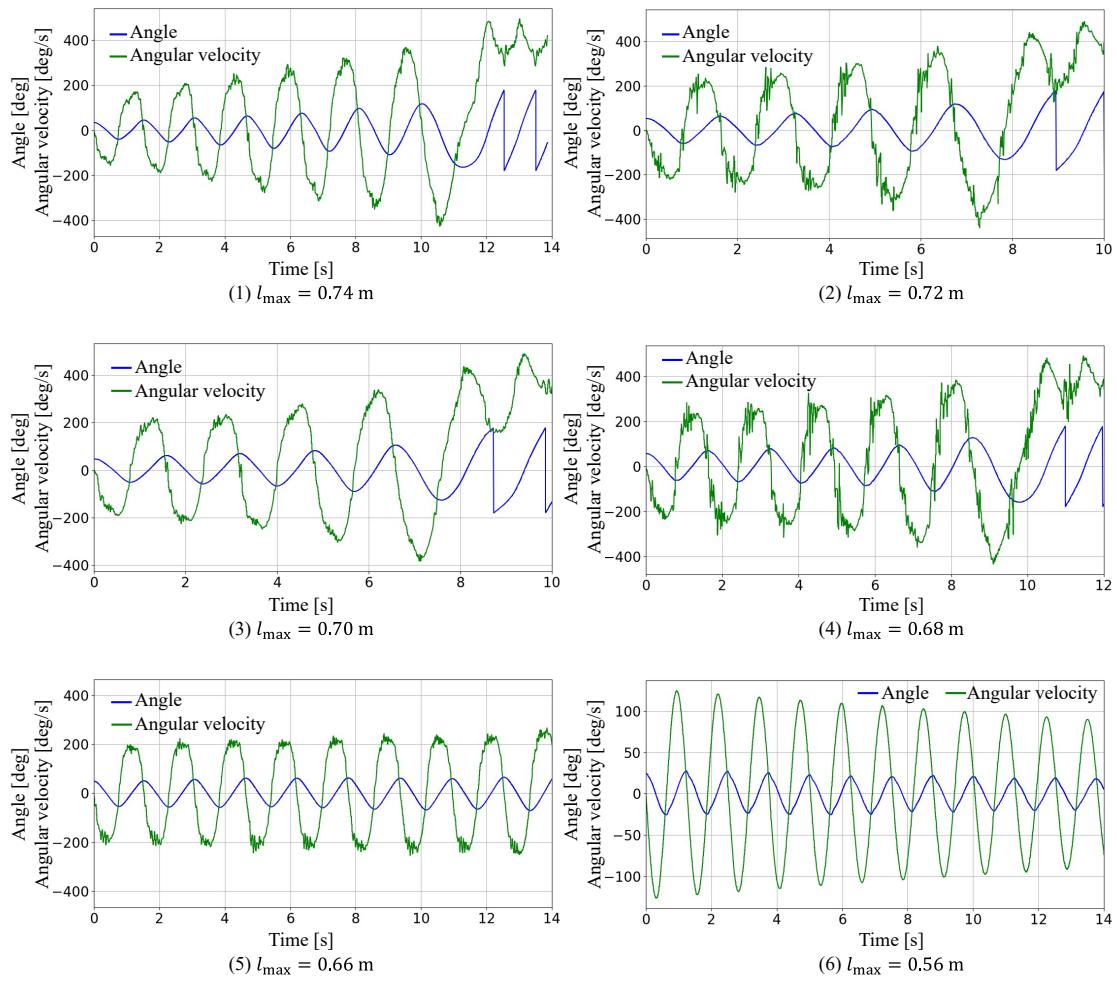


Fig. 3.4: Excitation experiment data

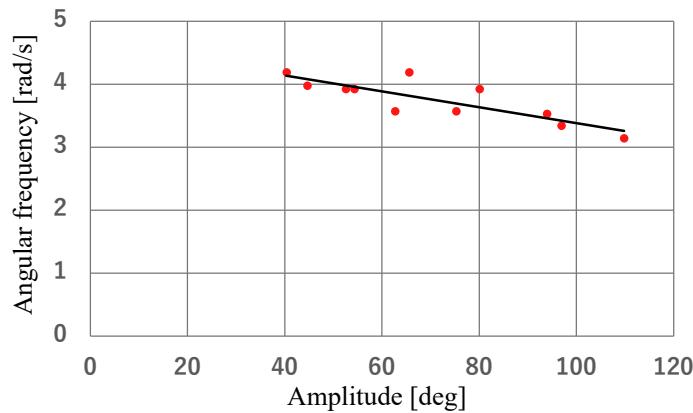


Fig. 3.5: Relationship between angular frequency and amplitude

[s] と振幅 A [deg] を求め、式 (3.25) で示すように角振動数 ω を求め、図 3.5 に示すようにプロットして線形近似を行った。

$$\omega = \frac{\pi}{t_{\text{half}}} \quad (3.25)$$

近似結果より、振幅と角振動数の関係は式 (3.26) となった。

$$\omega = -0.0126A + 4.64 \quad (3.26)$$

次に、最大長ごとに振幅増加率を調整し、計測データへの近似モデルのフィッティングを行った。振幅増加率はそれぞれ表 3.2 とした。角度へのフィッティング結果を図 3.6 に示す。また、式 (3.22) 時間微分することにより、角速度は式 (3.27) となる。角速度データへのフィッティング結果を図 3.7 に示す。

$$\dot{\varphi}(t) = A_{\text{now}} e^{\lambda t} \{ \lambda \cos(\omega t) - \omega \sin(\omega t) \} \quad (3.27)$$

Table 3.2: Amplitude increase rate

Length l_{max} [m]	λ [1/s]
0.74	0.132
0.72	0.123
0.70	0.115
0.68	0.089
0.66	0.025
0.56	-0.02

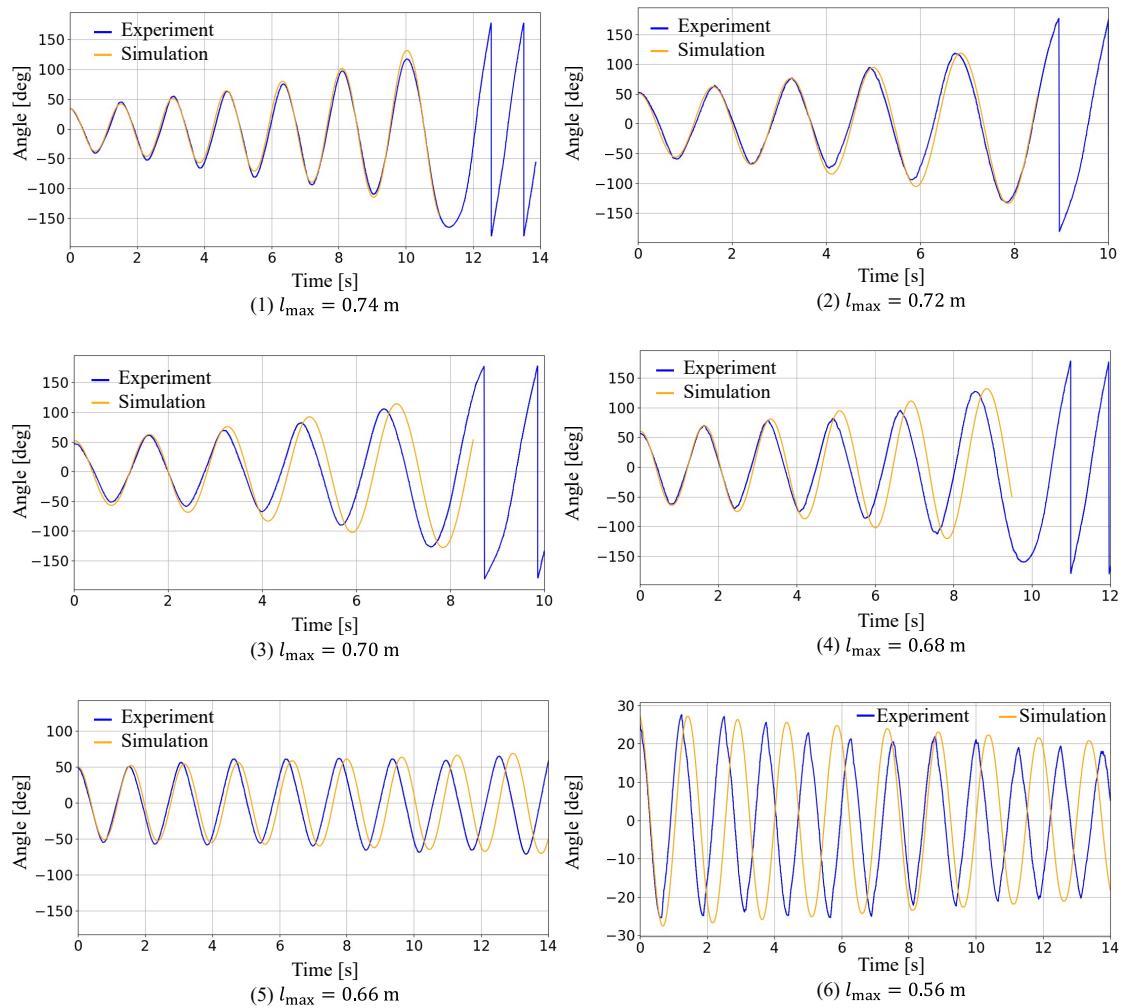


Fig. 3.6: Fitting results of angle

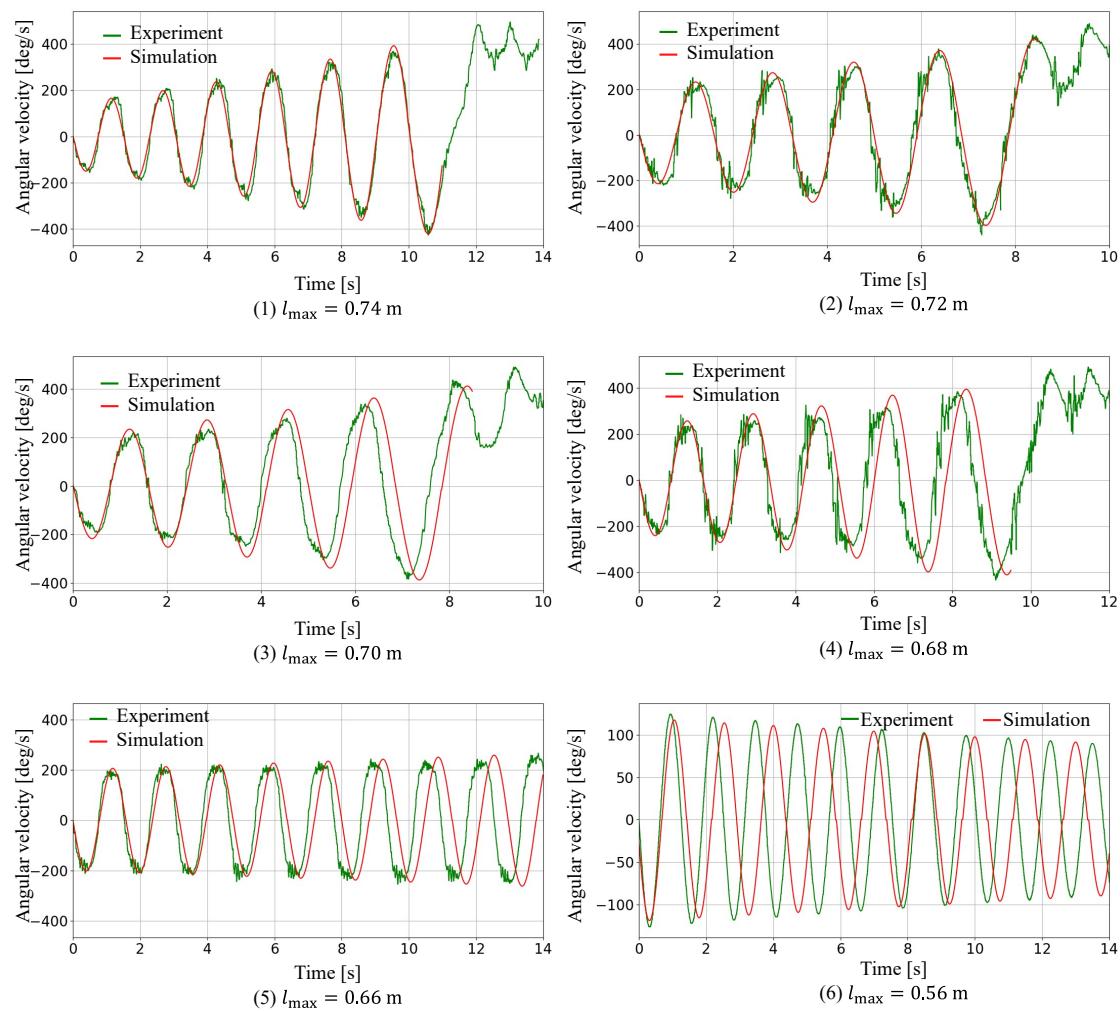


Fig. 3.7: Fitting results of angular velocity

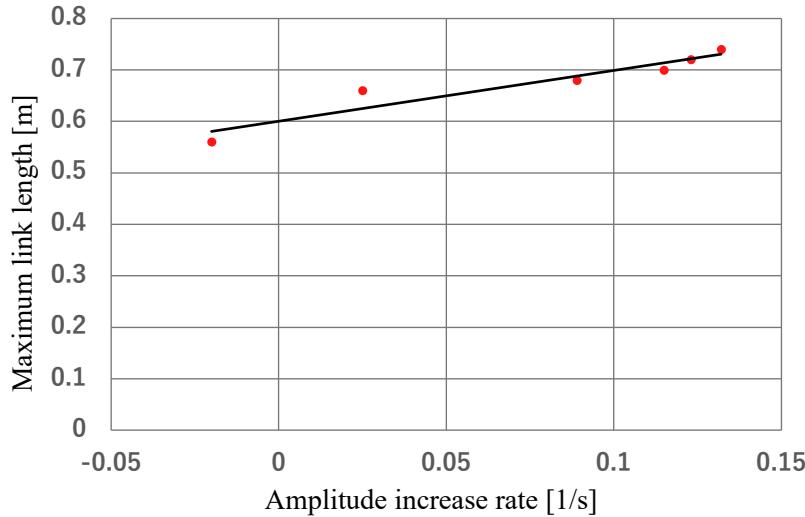


Fig. 3.8: Relationship between maximum link length and amplitude increase rate

フィッティング結果より、リンク最大長が短くなるほど計測データとの誤差が生じている。原因として、リンク最大長を 0.74 m としたときの計測データを基に角振動数と振幅の関係式を決定していることが挙げられる。リンク最大長が異なることにより伸縮に要する時間が異なり、実際は角振動数と振幅の関係式もリンク最大長によって変わると考えられる。特にリンク最大長 0.56 m におけるフィッティング結果は、時間が経つにつれて大幅なずれが見られる。しかし、本研究では振動の半周期分の値のみを振幅調整に用いるため、適用できるとみなした。

次に図 3.8 に示すように、縦軸をリンク最大長、横軸を振幅増加率として表 3.2 のデータをプロットし、線形近似した。近似式は式 (3.28) となった。

$$l_{\max} = 0.99\lambda + 0.60 \quad (3.28)$$

式 (3.24)、式 (3.26) 式 (3.28) をまとめると式 (3.29) となり、半周期後に現在振幅から目標振幅に到達するために必要なリンク最大長 l_{\max} は振幅から求めることができる。

$$l_{\max} = \frac{0.99(-0.0126A_{\text{now}} + 4.64)}{\pi} \ln \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{now}}} \right) + 0.60 \quad (3.29)$$

3.4.2 振幅調整実験

現在の振幅と目標振幅の値を基に伸縮量制御し、励振調整を行った。ここで、式(3.29)において求められたリンク最大長がロボットの伸縮可能最大長 0.74 m を超えた場合は最大長 0.74 m、伸縮可能最小長 0.56 m を下回った場合は最大長 0.56 m とし、次の半周期で目標振幅への到達を試みる。なお、リンク最大長をロボットの伸縮可能最小長 0.56 m とすることにより、励振を含まない単純な減衰となる。実験では目標角度を -120 deg、すなわち振子角度の負の範囲での目標振幅が 120 deg になるように振幅調整を行った。また、目標振幅との許容誤差を 2 deg とし、目標振幅到達後はリンク最大長を 0.68 m になるように指令し、計測した角度と最大長指令値の時間変化データを図 3.9(実験 1)、図 3.10(実験 2) に示す。なお、黒色一点鎖線は目標角度、赤色一点鎖線は目標振幅到達時刻を示す。振幅調整終了時の振幅はそれぞれ、実験 1 は 118.1 deg、実験 2 は 120.3 deg であり、誤差はそれぞれ 1.6%，0.25% であるため許容できると考えた。また、目標振幅との許容誤差をより小さくすることで、振幅調整精度を上げることができるが、目標振幅到達までの時間が長くなると考えられる。実験 1 は一回の伸縮量調整で目標振幅に到達したが、実験 2 では複数回の伸縮量調整が行われた。これは、実験 2 では計算上の振幅変化と実際の振幅変化の間のずれが大きくなつたことを示しており、その原因としてグリッパーとバーの摩擦や、ロボットの構造上のずれやケーブルなどの干渉といった可能性が考えられる。一方で、複数回の伸縮量調整によって最終的には目標振幅に到達することができているため、ロバスト性が高いことが確認できた。

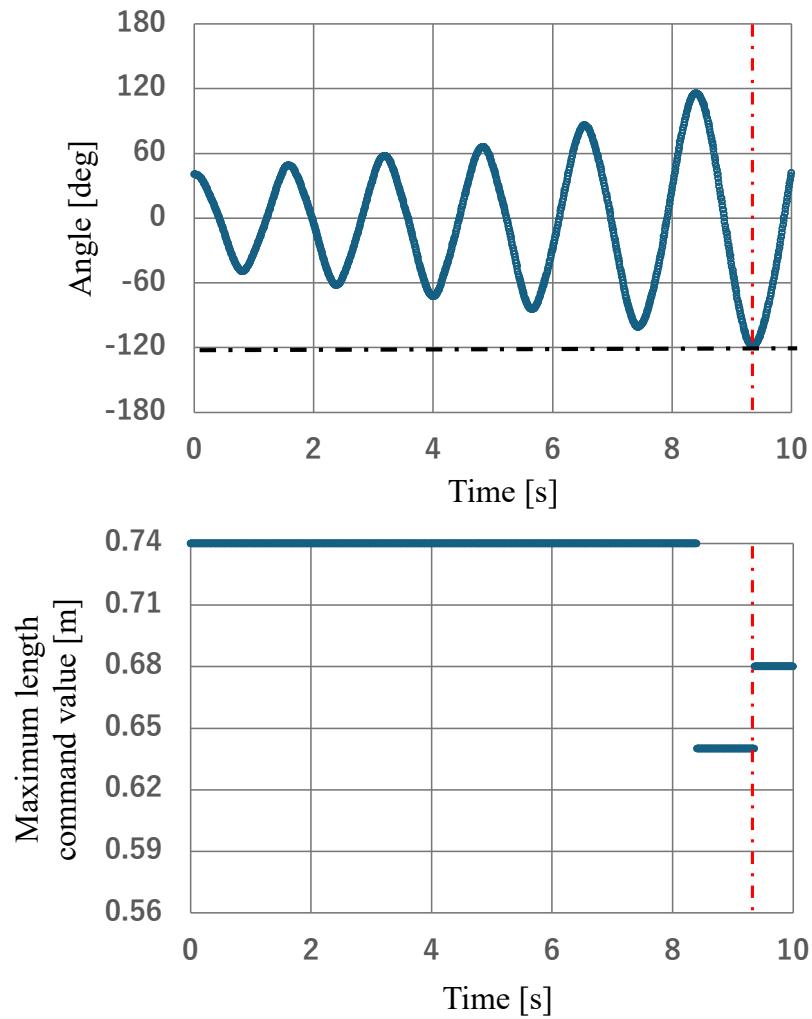


Fig. 3.9: Amplitude adjustment experiment 1

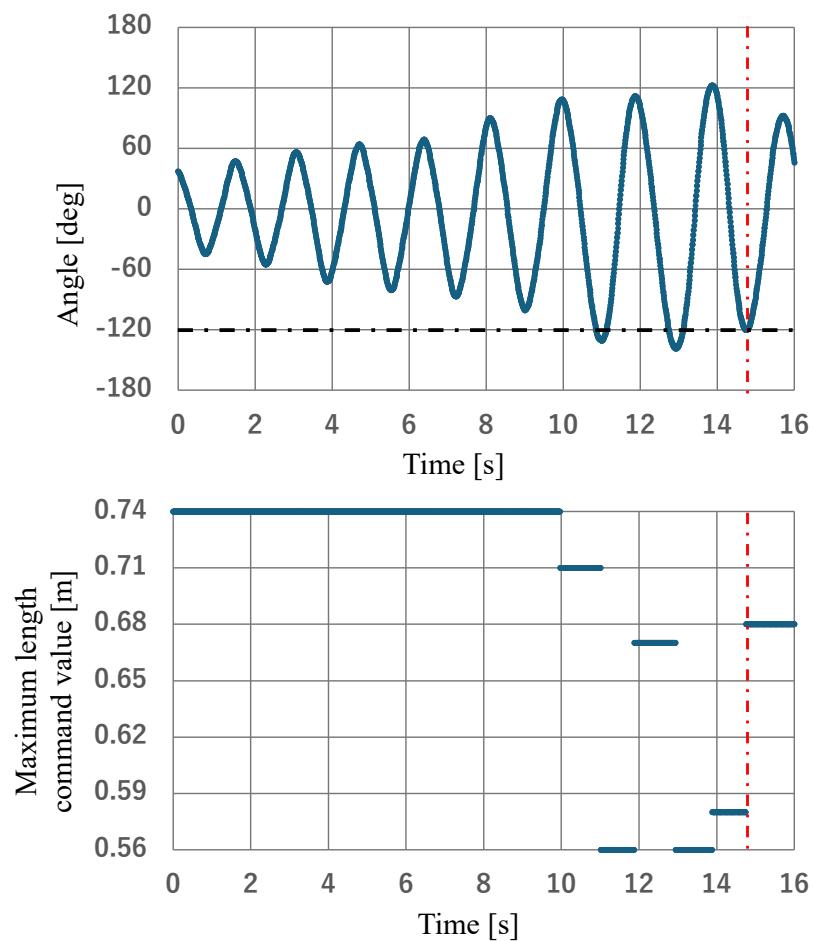


Fig. 3.10: Amplitude adjustment experiment 2

第4章

バーの位置に基づく
空中過程を含まないブラキエーション動作

4.1 はじめに

伸縮する単リンクプラキエーションロボットは、その「伸縮する」という特徴を活用することで、目標のバーまでの距離に合わせてリンクの長さを調整して移動することが可能となる。これにより、おもりを動かすことで励振するプラキエーションロボット [18] よりも自在な移動が実現できる。先行研究 [21] では実験的にリンクを伸ばすタイミングを決定していた。しかし、伸ばすタイミングや長さが適切ではない場合、バーを持てないだけでなく、バーとロボットが衝突することで不具合が生じたり、破損してしまう。また、目標バーを異なる位置にした場合、再び実験的にリンクを伸ばすタイミングを模索しなければならない。そこで、本章ではバーの位置に基づいた空中過程を含まないプラキエーション動作について述べる。

4.2 伸縮タイミングの検討

リンクを伸ばして次のバーを把持する場合、伸ばすタイミングは図 4.1 に示すように以下の 4 通りの方法が考えられる。

- 方法 1 (図 4.1(1)) :

バーに対して下側から近づき、バーに近づいたらリンクを伸ばし始める。

バー把持時のグリッパーに対する回転方向の負荷が小さいが、伸縮による角速度の変化や、伸縮時間を考慮する必要があり伸縮制御が複雑になる。

- 方法 2 (図 4.1(2)) :

バーに対して上側から近づき、バーに近づいたらリンクを伸ばし始める。

バー把持時のグリッパーに対する回転方向の負荷が小さいが、伸縮による角速度の変化や、伸縮時間を考慮する必要があり伸縮制御が複雑になる。

- 方法 3 (図 4.1(3)) :

最高点においてリンクを目標の長さまで伸ばし終えた状態で上側からバーに近づく。

振子の最高点に達したときに伸縮するため、伸縮制御が容易であるが、最高点が目標のバーから離れている場合、バー把持時のグリッパーに対する回転方向の負荷が大きくなる。

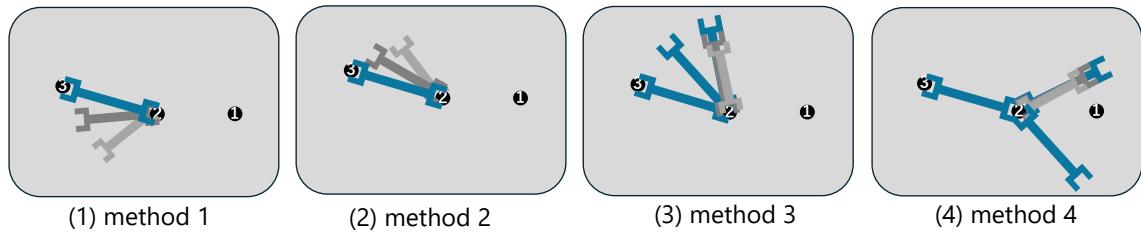


Fig. 4.1: Approach methods in brachiation movements without an aerial phase

- 方法4(図4.1(4))：

最高点においてリンクを目標の長さまで伸ばし終えた状態で下側からバーに近づく。

方法3と同様に伸縮制御が容易であるが、把持していたバー(図4.1におけるbar1)と衝突する可能性がある。

ここで、振動の最高点においてリンクを伸ばし始めた場合を考えた。ロボットが最小長0.56 mから最大長0.74 mまで伸びるためにかかる時間を計測したところ0.37 sであり、式(3.22)を用いて伸び終えるまでの減衰量を求めたところ、振幅によって少なくとも約40 deg、多い場合だと約70 degであることが分かった。すなわち、方法2・方法3では伸び終える前に目標バーを通り過ぎてしまう可能性がある。そこで、本研究では伸縮のための時間が十分あり、伸縮制御が容易である方法4を採用し、bar1を通り過ぎた後に目標長さに変えることでバーとの衝突を回避することを想定した。

4.3 空中過程を含まないプラキエーション実験

4.3.1 目標振幅の決定

図4.2に目標とするバーの位置の概略図を示す。座標軸は左向きをx軸の正方向、上向きをz軸の正方向に設定し、ロボットが把持しているバーの座標を原点(0, 0)、目標バーの座標を(l_{bx}, l_{bz})とし、原点と結んだ線分がz軸となす角度を θ とする。また、ロボットは角度 φ 、角速度 $\dot{\varphi}$ とボディの全長 l_r で表す。グリッパーが届く範囲にあるバーであれば、空中過程を含まないプラキエーションが可能である。ゆえに、ロボットの最大の長さを l_{rMax} 、最小の長さを l_{rMin} とすると目標とするバーの条件は式(4.1)となる。また、目標とするバー

の座標を用いて角度 θ は式 (4.2) で表される .

$$l_{rMin} \leq \sqrt{l_{bx}^2 + l_{bz}^2} \leq l_{rMax} \quad (4.1)$$

$$\theta = 90 + \arctan\left(\frac{l_{bz}}{l_{bx}}\right) \quad (4.2)$$

ここで , グリッパーを閉じる時間を考慮して目標バーの高さに到達する前にグリッパーを閉じ始めると , グリッパーの上側の爪 (図 4.2 における claw1) がバーに衝突してしまう . そこで , 目標バーの高さを超えてから閉じ始め , 下側の爪 (図 4.2 における claw2) が引っかからない状態で目標バーを通り過ぎ , 目標バーの高さになったタイミングでグリッパーを閉じ終えるように試みた . 図 4.3 に示す振幅を用いてバー把持の流れを以下のようにした .

1. 振幅 A_0 になるように振幅調整
2. 目標リンク長 (目標バーまでの距離) に伸縮調整
3. 角速度の正負が入れ替わるタイミング (振幅 A_1) でグリッパーを閉じ始める
4. 目標バーの位置 θ でグリッパーを閉じ終える

グリッパーを閉じる時間と式 (3.22) を基に目標振幅となる A_0 を求めた . 振幅 A_0 に到達した後は単純な減衰振動となると仮定すると , 式 (3.22) における振幅増加率 λ はリンク最大長 $l_{max} = 0.56$ として $\lambda = -0.04$ とみなせる . グリッパーを閉じるために要する時間は 0.183 s であるため , 閉じ終わりが目標バー位置 θ であるために必要な振幅 A_1 は式 (4.3) となる . また , 半周期後に振幅 A_1 であるために必要な振幅 A_0 は式 (4.4) となる . なお , $\omega_{(A)}$ は振幅 A を基に求めた角振動数を表す . これにより , 振幅 A_0 を空中過程を含まないプラキエーションのための目標振幅とした .

$$A_1 = \theta e^{(-0.04) \times 0.183} \cos(\omega_{(A_1)} \times 0.183) \quad (4.3)$$

$$A_0 = A_1 e^{(-0.04) \times \pi / \omega_{(A_0)}} \cos(\omega_{(A_0)} \times \pi / \omega_{(A_0)}) \quad (4.4)$$

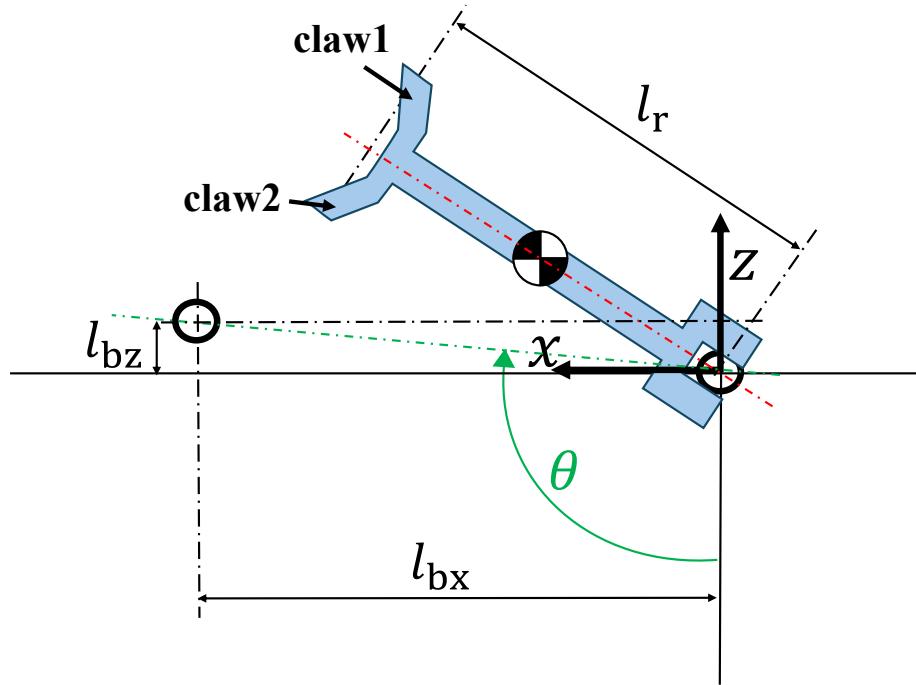


Fig. 4.2: Schematic diagram of bar position

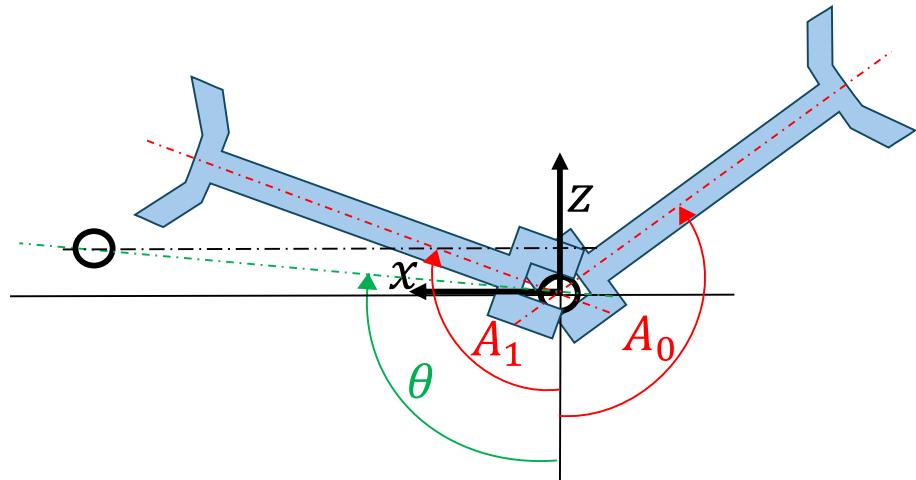


Fig. 4.3: Schematic diagram of amplitude

Table 4.1: No aerial phase experiment 1

l_{bx}	0.74 m
l_{bz}	0.00 m
θ	90 deg
A_1	108 deg
A_0	113 deg

Table 4.2: No aerial phase experiment 2

l_{bx}	0.72 m
l_{bz}	0.14 m
θ	101 deg
A_1	120 deg
A_0	126 deg

4.3.2 プラキエーション実験

空中過程を含まないプラキエーション動作の実験として，もともと把持しているバーと同じ高さ（実験1）・異なる高さ（実験2）の2種類の位置に目標バーを設置して実験を行った。目標バーの位置 (l_{bx}, l_{bz}) , θ , 振幅 A_1 , 目標振幅 A_0 をそれぞれ表4.1 表4.2 に示す。また，計測データ（角度）とリンク最大長指令値の時間変化を図4.4 と図4.5 , 実験の様子を図4.6 に示す。なお，実験の様子は図4.4 , 図4.5において赤線で示した時刻からの様子である。振幅 A_1 , 目標振幅 A_0 は実験結果では表4.3 に示すようにそれぞれ $A_{1\text{Real}}, A_{0\text{Real}}$ となった。なお，表4.1 表4.2 に示した振幅との誤差を括弧の数字で表す。目標振幅の誤差は実験1 , 実験2ともに小さく，提案した振幅調整法の有効性を確認できた。一方で，振幅 A_1 との誤差はかなり大きく，バーとの摩擦により想定よりも減衰したと考えられる。

プラキエーション実験の成功率としては実験1 , 実験2 のどちらの条件においても約60 % であった。実験1 の条件における失敗時の角度データと振幅 A_1 · 目標振幅 A_0 の実験結果をそれぞれ図4.7 , 表4.4 に示す。表4.4 より，振幅 $A_{1\text{Real}}$ が目標バーの位置 θ よりも小さく，グリッパーが閉じ始めた時には目標バーを下回っていたとみられる。その原因として，目標バーとの接触が挙げられる。図4.7において目標バーと衝突した時刻を赤線で示した。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いるため，図4.8 に示すように，グリッパーの歯車部分が目標バーと接触してしまう状態であったと考えられる。

Table 4.3: No aerial phase experiment amplitude data

	Experiment 1	Experiment 2
$A_{1\text{Real}}$	94.1 (12.9 %)	100.8 (16 %)
$A_{0\text{Real}}$	112.9 (0.0 %)	128.7 (2.1 %)

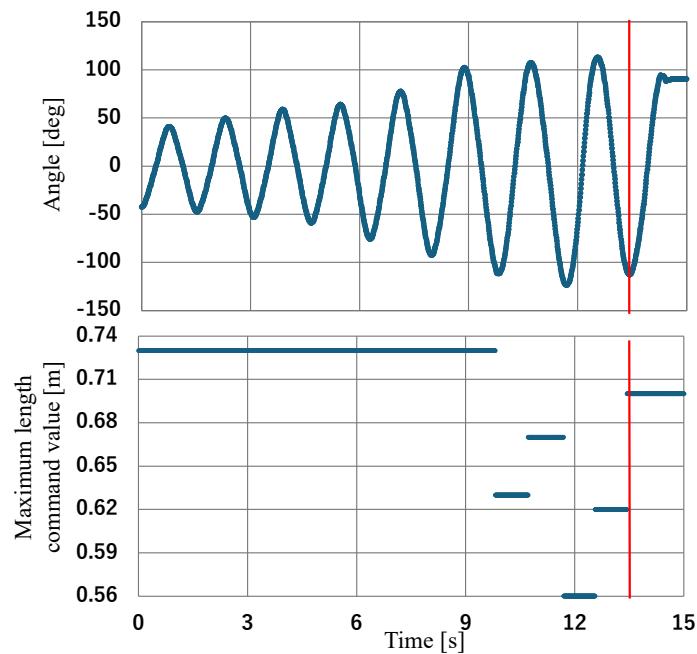


Fig. 4.4: No aerial phase experiment 1

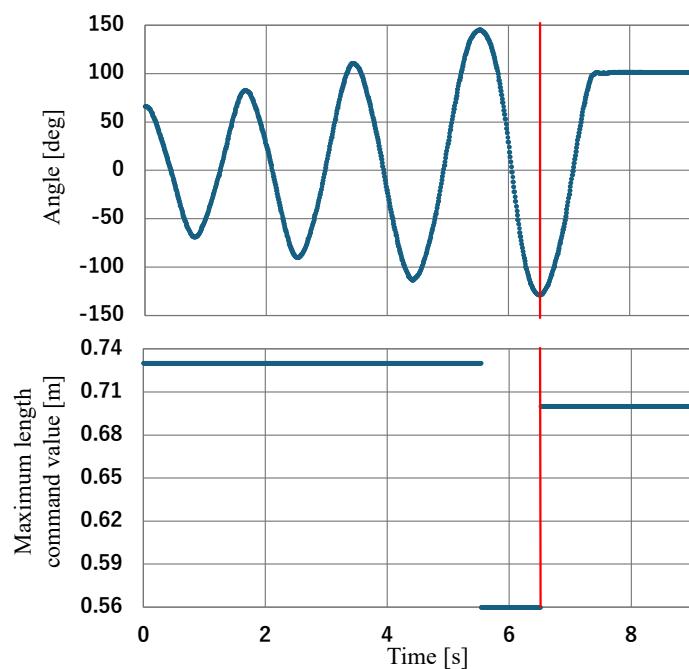


Fig. 4.5: No aerial phase experiment 2

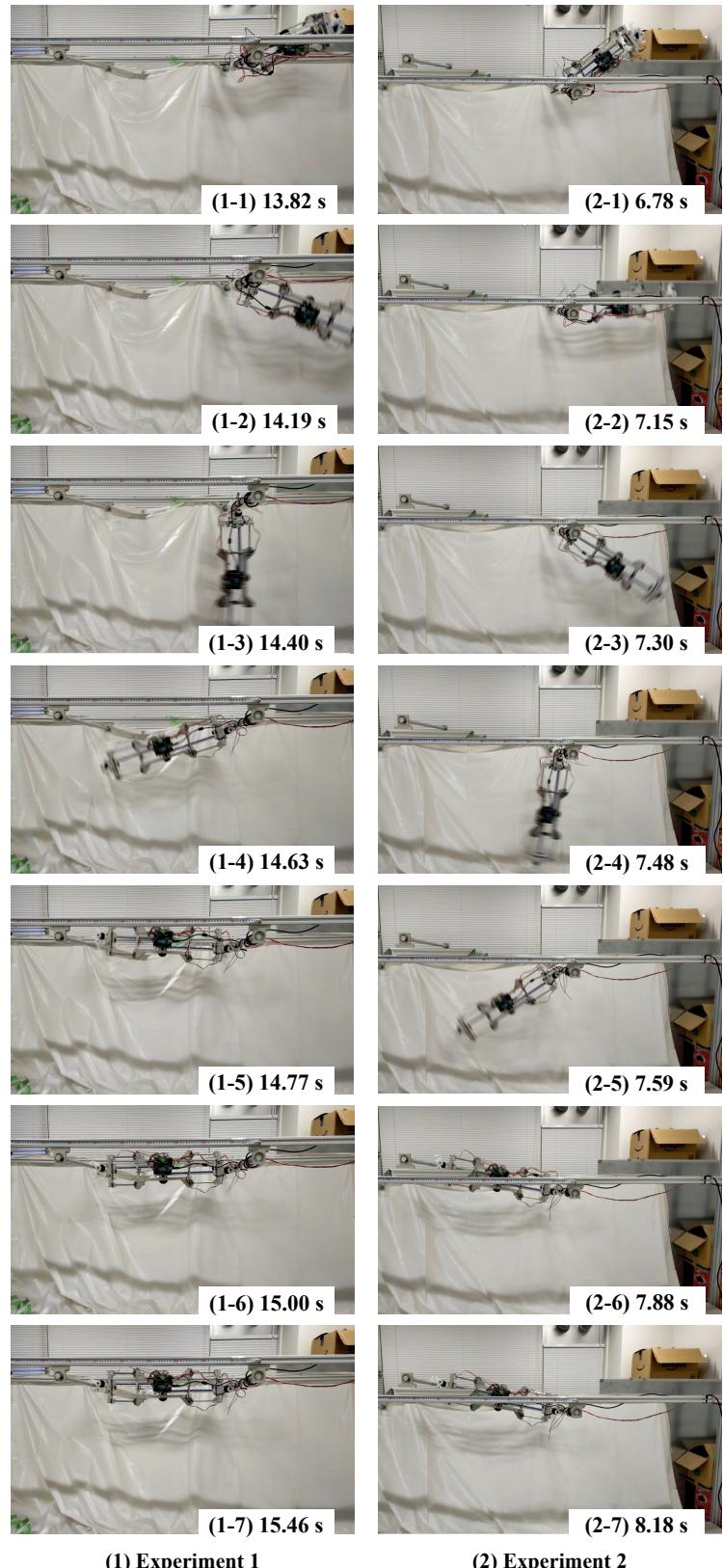


Fig. 4.6: No aerial phase experiment flow

Table 4.4: No aerial phase failed experiment amplitude data

$A_{1\text{Real}}$	87.1 (19.4 %)
$A_{0\text{Real}}$	114.6 (1.4 %)

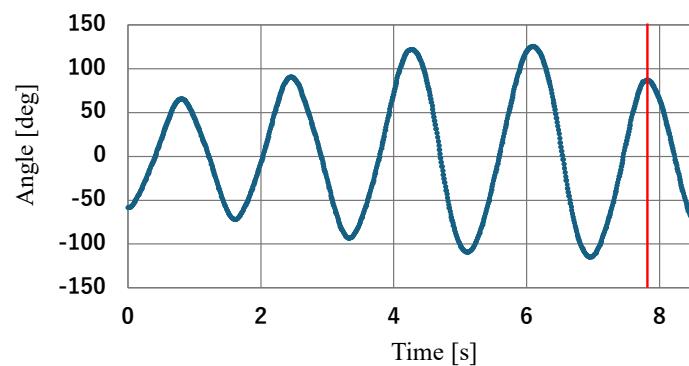


Fig. 4.7: No aerial phase failed experiment data



Fig. 4.8: Contact with the bar

第5章

バーの位置に基づく
空中過程を含むブラキエーション動作

5.1 はじめに

空中過程を含むプラキエーション動作は、目標とするバーを把持することができなかった場合に落下してしまうという危険性がある。確実なバー把持のための条件には、バーとグリッパーの距離に加え、バーとの衝突を考慮することも望まれる。そこで、本研究では目標バーとロボットのグリッパー間の距離と、バーを持った時のバーに対するグリッパーの相対速度に基づく評価関数を用いてバーリリース条件を最適化することを提案する。また、そのリリース条件を満たすように振幅調整を行い、空中過程を含むプラキエーション試行実験を行った。本章では、任意のバーの位置に基づくリリース条件最適化と、空中過程を含むプラキエーション実験の結果について述べる。

5.2 最適なバーリリース条件の導出

5.2.1 空中過程における目標バーとグリッパーの距離と相対速度

図5.1に示したロボットのバーリリース時の状態から、空中過程における目標バーとグリッパーの距離、相対速度を導出する。座標軸は左向きを x 軸の正方向、上向きを z 軸の正方向に設定し、ロボットが持っているバーの座標を原点 $(0, 0)$ 、目標バーの座標を (l_{bx}, l_{bz}) とする。また、ロボットは姿勢 φ とボディの全長 l_r の2変数を持つ。ここで、バーリリース後の空中過程におけるロボットの長さ l_r はバーリリース時から変えずに一定であるとする。ロボットの重心の軌道はバーリリース時の角度 φ 、角速度 $\dot{\varphi}$ による放物線軌道、手先の軌道はバーリリース時の角速度 $\dot{\varphi}$ による重心周りの一定速回転軌道となる。ゆえに、バーリリースから t 秒後の目標バーとグリッパーとの距離 J_d 、目標バーに対するグリッパーの相対速度 J_r はそれぞれ式(5.5)、式(5.6)で表される。ここで、 g は重力加速度、 (x_c, z_c) 、 (\dot{x}_c, \dot{z}_c) は

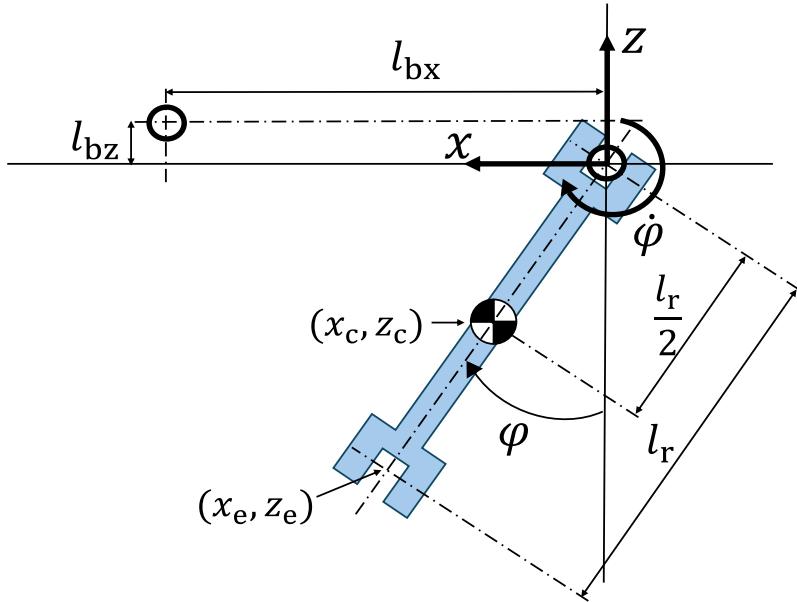


Fig. 5.1: Schematic Diagram in release

ロボットの重心の位置と速度， (x_e, z_e) ， (\dot{x}_e, \dot{z}_e) はグリッパーの手先の位置と速度を表す．

$$x_c = \frac{1}{2}l_r\dot{\varphi} \cos(\varphi)t + \frac{1}{2}l_r \sin(\varphi) \quad (5.1)$$

$$z_c = \frac{1}{2}l_r\dot{\varphi} \sin(\varphi)t - \frac{1}{2}gt^2 - \frac{1}{2}l_r \cos(\varphi) \quad (5.2)$$

$$x_e = x_c + \frac{1}{2}l_r \sin(\varphi + \dot{\varphi}t) \quad (5.3)$$

$$z_e = z_c - \frac{1}{2}l_r \cos(\varphi + \dot{\varphi}t) \quad (5.4)$$

$$J_d(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = \sqrt{(l_{bx} - x_e)^2 + (l_{bz} - z_e)^2} \quad (5.5)$$

$$J_r(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = \sqrt{\dot{x}_e^2 + \dot{z}_e^2} \quad (5.6)$$

5.2.2 最適化のための評価関数

バーを離すときの角度 φ ，角速度 $\dot{\varphi}$ ，ロボットの長さ l_r の 3 つの値をバーリリース条件とする．バーリリース条件の最適化のために，目標バーとグリッパーの距離と相対速度がともに小さくなる条件を求める．ここで，評価関数 J を式 (5.5)，式 (5.6) で示した距離 J_d と相対速度 J_r を用いて式 (5.7)とした．ここで， α は重み係数を表し，確実な把持のためにバー

とグリッパーの距離に重みづけを行う。

$$J(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = \alpha \times J_d + J_r \quad (5.7)$$

評価関数が最小になるとき、目標とするバーとグリッパーの距離と相対速度がともに小さくなる。ゆえに、評価関数を最小にする角度 φ 、角速度 $\dot{\varphi}$ 、ロボットの長さ l_r 、リリース後のバー把持までの時間 t を導出し、そのうち角度、角速度、ロボットの長さを最適なバーリリース条件とした。また、バー把持までの時間はグリッパーを閉じるタイミングの決定に用いた。評価関数の最小化にはニュートン法と共に勾配法を組み合わせた Newton-CG 法を用いた。実際の実験条件を表 5.1 に示す。ロボットの最大長 0.74 m から 5 cm 離れた位置にある同じ高さのバーの条件である。また、その実験条件を基に求めた最適なバーリリース条件と評価値を表 5.2 に示す。目標バーとグリッパーの距離の最小値 J_d が約 1 mm であるため、バー把持が可能であると考えられる。

5.3 空中過程を含むプラキエーション実験

5.3.1 目標振幅の導出

まず、5.2.2 節において導出した最適なバーリリース条件による目標振幅を決めた。式 (3.22)、式 (3.27) を用いて、式 (5.8) に示す評価関数 J_e を定義した。ここで、バーリリース条件の角度・角速度をそれぞれ φ_{ref} 、 $\dot{\varphi}_{ref}$ とする。

$$J_e = \sqrt{(\varphi_{ref} - \varphi(t))^2 + (\dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}(t))^2} \quad (5.8)$$

目標振幅からリリース条件到達までリンク長は一定であると仮定すると、伸縮を行わない単純な減衰振動となる。よって式 (3.22)、式 (3.27) における振幅増加率 λ は式 (3.28) で $l_{max} = 0.56$ m とすることで $\lambda = -0.04$ と求まる。これを基に、半周期の間に評価関数 J_e を最小にする振幅 A と時間 t を求めた。評価関数の最小化には第 5 章と同様に Newton-CG 法を用いた。これにより表 5.2 のリリース条件では振幅は 98 deg と求まった。

5.3.2 リリース実験

ここで、求めた振幅においてリリース実験を行った。角度・角速度・リンク長の時間変化を図??、実験の様子を図??に示す。また、グリッパーを開くために要する時間は 0.183 s で

Table 5.1: Experiment conditions

Variables	Values
l_{bx} [m]	0.79
l_{bz} [m]	0.00
α [-]	20
g [m/s ²]	9.81

Table 5.2: Optimized conditions values

Variables	Values
φ [deg]	56
$\dot{\varphi}$ [deg/s]	260
l_r [m]	0.68
t [s]	0.261
J [-]	0.0144
J_d [m]	0.00115
J_r [m/s]	0.00292

あり，式(3.22)，式(3.27)を用いて振幅を98 degとした時の角度0 degからリリース条件角度56 deg間の平均角速度を求めたところ300 deg/sであったため，リリース条件角度においてグリッパーを開き終わるために， $300 \times 0.183 \approx 55$ deg前にモータへ指令を行った．

実験において，求めた振幅でのリリース条件の実現を確認することができた．しかし，リリース後に高さが足りないため目標のバーには到達できなかった．原因として，リリース時のグリッパーとバーの接触や，リリース後の空気抵抗，ケーブルの干渉などにより角速度が理論値よりも減少してしまったためであると考えた．そこでリリース条件の角度は変えずに，角速度のみ実験的にバーを持てる高さに到達するように決定したところ約320 deg/sとなった．理論値と実際に必要な角速度との誤差を考慮して，式(5.9)に示すように評価関数 J_e を再定義した．これにより，目標振幅は119 degに変更された．

$$J_e = \sqrt{(\varphi_{ref} - \varphi(t))^2 + (\dot{\varphi}_{ref} + 60 - \dot{\varphi}(t))^2} \quad (5.9)$$

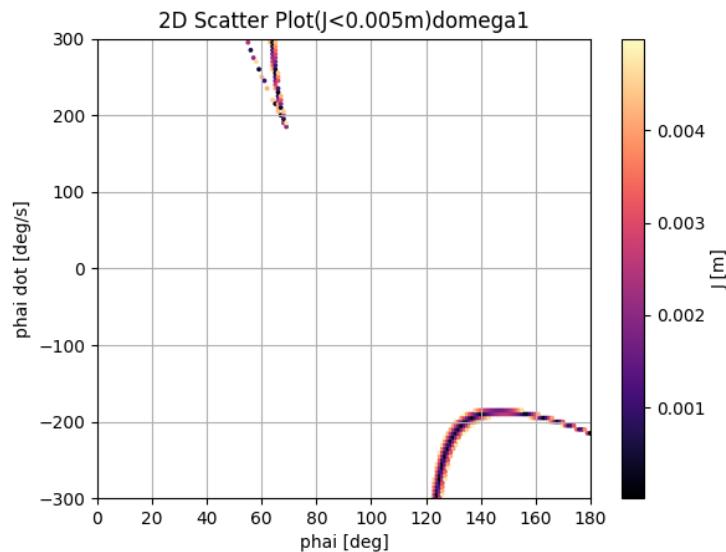


Fig. 5.2: Release experiment data

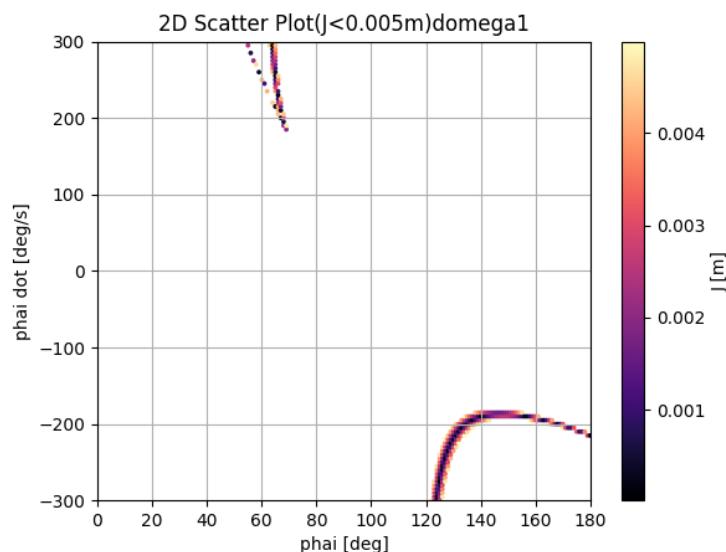


Fig. 5.3: Release experiment flow

5.3.3 プラキエーション実験

変更後の目標振幅を用いて、空中過程を含むプラキエーション実験を行った。なお、バーリリース条件の角度は正であるため、求めた目標振幅は負の角度範囲における振幅である。目標バーの把持に成功した実験の様子と計測データを図??、図??に示す。最適なバーリリース条件は、バー把持時のバーに対するグリッパーの相対速度が小さくなる条件であるため、実験においても衝撃が小さい把持であることが確認できた。しかし、30回実験を行ったところ成功したのは2回であり成功率は約6.7%であった。この原因として、振幅条件を満たしても、角速度にならない？グリッパーの引っ掛けによるリリース時刻のずれによる把持時刻の遅れ

失敗した実験の様子と計測データを図??、図??に示す。

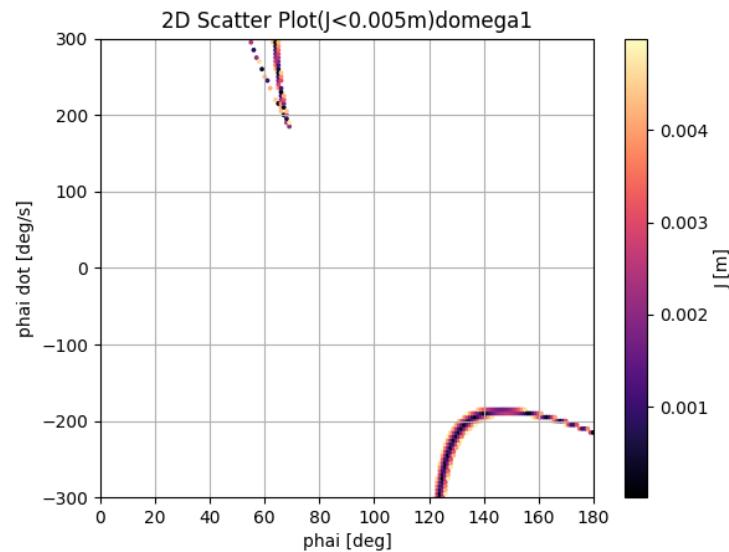


Fig. 5.4: Aerial Brachiation experiment flow(succeeded)

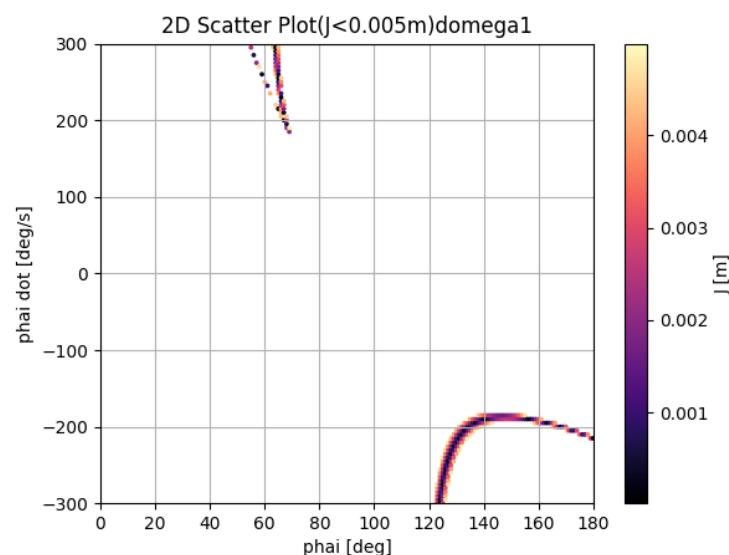


Fig. 5.5: Aerial Brachiation experiment data(succeeded)

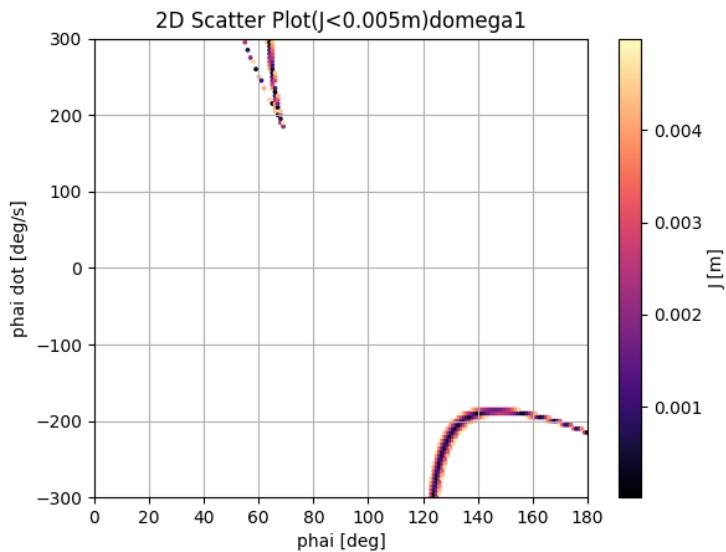


Fig. 5.6: Aerial Brachiation experiment flow(failed)

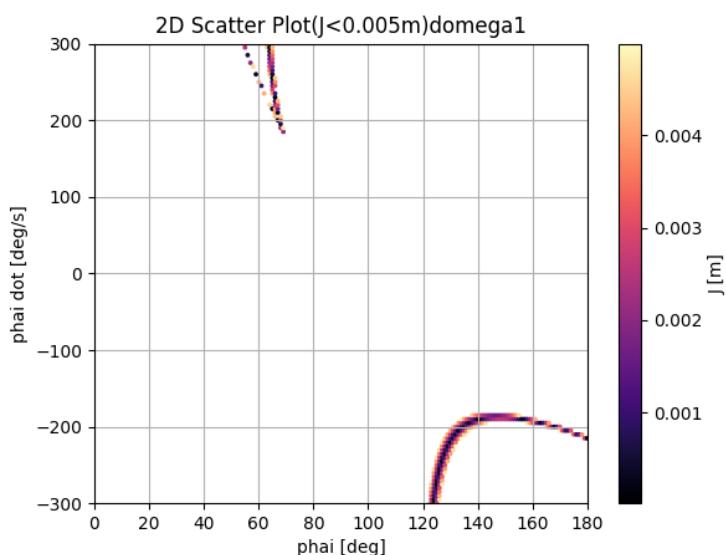


Fig. 5.7: Aerial Brachiation experiment data(failed)

第6章

結論および今後の展望

6.1 結論

本研究では、伸縮する単リンクプラキエーションロボットが2次元空間を自在に移動することを目標とし、目標バーの位置に基づいたプラキエーション動作を行うためのシステムを提案・検証・考察した。目標バーの位置に基づいて、空中過程を含まないプラキエーションでは伸縮タイミングを、空中過程を含むプラキエーションではバーリリース条件を決定し、振子過程で実現するためには振幅調整が望まれる。そこで、本研究では伸縮する機構を活かした振幅調整法を提案し、実機を用いて振幅調整実験を行い、振幅調整法の有用性を確認した。また、実機を用いて空中過程を含まないプラキエーション動作において、目標バーの位置に基づいて目標振幅を決定し、提案した振幅調整法を基に目標振幅を実現し、目標バーの把持に成功した。さらに、振幅調整法を用いて最適なバーリリースを実現し、空中過程を含む目標バーへの到達と目標バーの把持に成功した。

6.2 今後の展望

今後の展望として、移動可能範囲の拡張やロバスト性向上などがある。本研究では目標とするバーを掴むグリッパーを片方のみに限定して研究を行ったが、移動前に最初のバーを把持しているグリッパーの空中過程での軌道を考慮することで、把持可能な範囲が広がる可能性がある。また、3次元方向に移動することができる機構にすることにより、本研究で行った2次元方向の移動よりも自在な移動が可能になる。さらに、目標とするバーを認識する機構などを用いることで、より正確な把持によるロバスト性向上やバーの位置を認識して自律的に移動することも期待できる。加えて、本研究のプラキエーション実験では振子過程においてグリッパーの形状により、振り子の回転軸方向に振動が発生してしまい、それにより振幅調整の誤差や把持時のグリッパー方向のずれが生じてしまった。ゆえに、振り子回転軸方向の振動が発生しないグリッパーの形状の検討も望まれる。また、本研究で提案した最適なバーリリース条件でリリースした場合でも、理想的な軌道からずれてしまう可能性がある。そのため、空中過程でも伸縮制御を行うなどして軌道修正をすることでロバスト性を向上させられると考える。

謝辞

卒業論文を執筆するに当たり、水内郁夫教授より多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました。多くの技術、知識をこの一年間で学ばせていただきました。深く感謝申し上げます。また、森下克幸助教にも論文執筆や発表技術に関するアドバイスをいただき、Professor Tomáš Vyhlídal, Mr. Juraj Lieskovský をはじめ、Czech Technical University in Prague の皆様には留学時に多くのアドバイスをいただき、英語が不安な私をサポートしてくださいました。感謝申し上げます。さらに、研究室の先輩、同期には研究の面、そして研究以外の面でも支えていただきました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 福田敏男, 細貝英実, 近藤裕二. プ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] 福田敏男, 斎藤史倫, 新井史人, 小菅一弘. プ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. 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 541, pp. 2930–2937, 1991.
- [3] 福田敏男, 斎藤史倫, 新井史人. プ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. 日本機械学会論文集C編, Vol. 58, No. 549, pp. 1450–1457, 1992.
- [4] 斎藤史倫, 福田敏男, 新井史人, 松浦英雄. プ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. 日本機械学会論文集C編, Vol. 59, No. 557, pp. 171–178, 1993.
- [5] 斎藤史倫, 福田敏男. 学習とロボット 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, Vol. 13, No. 1, pp. 82–88, 1995.
- [6] 福田敏男, 長谷川泰久, 下島康嗣, 斎藤史倫. 強化学習法を用いたファジィコントローラの生成. 日本機械学会論文集C編, Vol. 62, No. 601, pp. 3565–3571, 1996.
- [7] 中西淳, 福田敏男. 解析的手法による2リンクプラキエーションロボットの制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 3, pp. 361–368, 1998.
- [8] 中西淳, 福田敏男. 2リンクプ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, Vol. 17, No. 1, pp. 110–117, 1999.
- [9] 中西淳, 福田敏男. ハイブリッドコントローラによる2リンクプラキエーションロボットの振幅制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 5, pp. 652–659, 2001.
- [10] 福田敏男, 細貝英実, 近藤裕二. プラキエーション形移動ロボットの研究: 第2報, 励振シミュレーションおよび実験結果. 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 537, pp. 1639–1644, 1991.

- [11] 斎藤史倫, 福田敏男. プラキエーション形移動ロボットの研究 第 6 報, 7 リンクロボットのモデル化と初期コントローラによる動作シミュレーション. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 60, No. 578, pp. 3468–3475, 1994.
- [12] 長谷川泰久, 伊藤芳邦, 福田敏男. プ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.
- [13] 山川雄司, 安宅佑樹, 石川正俊. プラキエーションロボットの開発と運動生成 (第 1 報) 把持機構に電磁石を用いた動作手法 . ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, pp. 2A2–08a4. 一般社団法人 日本機械学会, 2016.
- [14] 山川雄司, 古山佳和, 石川正俊. プラキエーションロボットの開発と運動生成 (第 2 報) 把持機構にフックを用いた動作手法 . ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, pp. 2A2–08a3. 一般社団法人 日本機械学会, 2016.
- [15] Mahdi Javadi, Daniel Harnack, Paula Stocco, Shivesh Kumar, Shubham Vyas, Daniel Pizzutilo, and Frank Kirchner. Acromonk: A minimalist underactuated brachiating robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 6, pp. 3637–3644, 2023.
- [16] Shourie S Grama, Mahdi Javadi, Shivesh Kumar, Hossein Zamani Boroujeni, and Frank Kirchner. Ricmonk: A three-link brachiation robot with passive grippers for energy-efficient brachiation. *arXiv preprint arXiv:2403.15762*, 2024.
- [17] 鈴木三男, 増田健二. 二重振り子におけるカオス的振舞. 物理教育, Vol. 48, No. 1, pp. 1–5, 2000.
- [18] Hijiri Akahane and Ikuo Mizuuchi. Single-rod brachiation robot. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 451–456. IEEE, 2022.
- [19] Juraj Lieskovský, Hijiri Akahane, Jaroslav Bušek, Ikuo Mizuuchi, and Tomáš Vyhlídal. Optimal swing motion control for single-rod brachiation robot. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 56, No. 2, pp. 6320–6325, 2023.

- [20] 赤羽聖, 水内郁夫. モデル予測制御による棒状ロボットのプラキエーション. *Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No. 2A1-N07, 2024.
- [21] 赤羽聖, 水内郁夫. 伸縮する棒状ロボットのプラキエーション. *Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No. 2P1-M07, 2024.