

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  
自在移動の実現



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



目 次	5
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	10
第 2 章 本研究におけるブラキエーション動作	11
2.1 はじめに	13
2.2 ブラキエーションの流れ	13
2.2.1 ここから何か	13
2.3 伸縮する単リンクブラキエーションロボットのシステムと実機構成	13
2.4 ブラキエーションの流れ	13
2.5 自在移動のための検討要素	13
2.5.1 ここから何か	13
第 3 章 最適なバーリリース条件の導出	15
3.1 はじめに	17
3.2 最適なバーリリース条件の導出	17
3.2.1 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	17
3.2.2 最適化のための評価関数	18
3.3 最適なバーリリース条件に基づくリリース実験	18
第 4 章 リリース条件到達のための励振制御	21
4.1 はじめに	23
4.2 伸縮による励振	23
4.3 振子過程での運動方程式	23
第 5 章 最適なバーリリース条件に基づく励振とブラキエーション動作の実験	25
5.1 はじめに	27
5.2 考察	27
第 6 章 結論および今後の展望	29
6.1 はじめに	31
6.2 考察	31

第7章 長いタイトルを改行する場合はこのようにしましょう(見出し用)	33
7.1 研究の背景と目的 . . . . .	35
7.2 従来研究 . . . . .	35
7.3 本論文の構成 . . . . .	35
第8章 図の貼り方および表, 式の書き方	39
8.1 図の貼り方 . . . . .	41
8.1.1 基本的な図の貼り方 . . . . .	41
8.1.2 fig に関連する便利コマンド . . . . .	42
8.2 表と式の書き方 . . . . .	43
8.2.1 表の書き方 . . . . .	43
8.2.2 式の書き方 . . . . .	44
謝辞	47
参考文献	50

# 第1章

## 序論





## 1.1 研究の背景と目的

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ripper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、伸縮することで

異なる高さ、位置

励振の調整は行っていなかった。

さらに伸縮

空中過程（空中相にしないように）

本研究では、バーの位置に基づいた最適なバーリリース条件を導出し、その条件による空中過程を含む移動により、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を実現することを目的とする。伸縮する機構を活かした最適なバーリリース条件の導出と励振制御を実験的に得た時刻を基に再計画は行っているが、相対速度を考慮していないためロバストではない

伸縮することでバーの位置によってリリース時の長さを変え、

時刻ではなく角度角速度にすることで、リアルタイムに計測していることにより励振プログラムが実行された後に不具合が生じてその時刻に適切な状態になくても

空中過程（跳躍 飛ぶ動作 次のバーを掴む前に支持していたグripperもバーから離す）  
跳躍ブラキエーション通常のブラキエーションよりも高速かつ遠くの目標物まで到達可能

バーとの相対速度が大きいことで、衝突により把持するタイミングがずれることや部品破損といったことが生じる可能性がある。

伸縮調整により、以前はその時間になるまで待っていたけどより速く到達できる（早くの評価はいまいちかも）

## 1.2 本論文の構成

本論文は、全 XXX 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」では
- 第 3 章「最適なバーリリース条件の導出」ではバーの位置に基づく最適なバーリリース条件を導出する。
- 第 4 章「励振制御」では XXX。
- 第 5 章「空中過程を含むブラキエーション実験」では XXX。
- 第 6 章「結論および今後の展望」では XXX。

## 第2章

### 本研究におけるブラキエーション動作



## 2.1 はじめに

本章では，目的とするブラキエーション動作と，本研究で用いる「伸縮する単リンクブラキエーションロボット」のシステムと実機構成について述べる．

## 2.2 ブラキエーションの流れ

### 2.2.1 ここから何か

## 2.3 伸縮する単リンクブラキエーションロボットのシステムと実機構成

## 2.4 ブラキエーションの流れ

## 2.5 自在移動のための検討要素

### 2.5.1 ここから何か



## 第3章

### 最適なバリリリース条件の導出





### 3.1 はじめに

空中過程を含むブ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，バー把持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．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，最適条件を基に行ったリリース実験について述べる．

### 3.2 最適なバーリリース条件の導出

#### 3.2.1 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3.1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  $(l_{bx}, l_{bz})$  とする．また，ロボットは姿勢  $\varphi$  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  $\varphi$ ，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 (3.5)，式 (3.6) 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．

$$x_c = \frac{1}{2}l_r\dot{\varphi}\cos(\varphi)t + \frac{1}{2}l_r\sin(\varphi) \quad (3.1)$$

$$z_c = \frac{1}{2}l_r\dot{\varphi}\sin(\varphi)t - \frac{1}{2}gt^2 - \frac{1}{2}l_r\cos(\varphi) \quad (3.2)$$

$$x_e = x_c + \frac{1}{2}l_r\sin(\varphi + \dot{\varphi}t) \quad (3.3)$$

$$z_e = z_c - \frac{1}{2}l_r\cos(\varphi + \dot{\varphi}t) \quad (3.4)$$

$$J_d(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = \sqrt{(l_{bx} - x_e)^2 + (l_{bz} - z_e)^2} \quad (3.5)$$

$$J_r(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = \sqrt{\dot{x}_e^2 + \dot{z}_e^2} \quad (3.6)$$

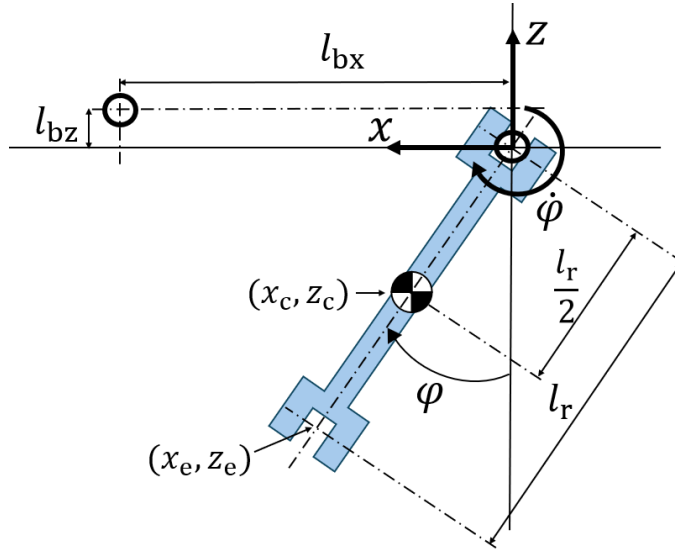


Fig. 3.1: Schematic Diagram

### 3.2.2 最適化のための評価関数

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に基づく評価関数が最小となる条件を求める。評価関数  $J$  を式 (3.5)、式 (3.6) で示した距離  $J_d$  と相対速度  $J_r$  を用いて式 (3.7) とした。ここで、 $K$  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。

$$J(\varphi, \dot{\varphi}, t, l_r) = K \times J_d + J_r \quad (3.7)$$

評価関数  $J$  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条件である。

## 3.3 最適なバーリリース条件に基づくリリース実験

3.2.2 節に基づいて最適なバーリリース条件を求め、実機を用いてリリース実験を行った。実験条件を表 3.3 に示す。

Table 3.1:

Variables	Values
$l_{\text{bx}}$ [m]	0.79
$l_{\text{bz}}$ [m]	0
$N$	1000



## 第4章

### リリース条件到達のための励振制御



## 4.1 はじめに

第 3 章において導出した最適なバーリリース条件を，振子過程において実現させる．

## 4.2 伸縮による励振

## 4.3 振子過程での運動方程式





## 第5章

### 最適なバーリリース条件に基づく 励振とブラキエーション動作の実験



## 5.1 はじめに

## 5.2 考察



## 第6章

### 結論および今後の展望



## 6.1 はじめに

## 6.2 考察





## 第7章

長いタイトルを改行する場合は  
このようにしましょう



Table 7.1: 試しに作った表

項目	数値	コメント	備考
a	10.0	こめんとしがたい	どうすべ？
b	20.0	こめんとしがたい	どうすべ？
c	-100.0	こめんとしがたい	どうすべ？

## 7.1 研究の背景と目的

研究室が散らかっている (図 8.2 参照) ので、片付けるロボットが欲しい。

この図 (図 7.2) はなんだろう？

7.1 節ではほげほげ。

こういう研究 [19] もありました。

ああいう研究 [19] もありました。

bib ファイルでは、著者名 (author=) は、「苗字 名前 and 苗字 名前 and 苗字 名前」のようにするんですよ [19]。間は全部半角スペースですよ。

## 7.2 従来研究

表 7.2 に、何かの表を示す。

## 7.3 本論文の構成



Fig. 7.1: ある日の研究室



Fig. 7.2: 何かの図



## 第8章

### 図の貼り方および 表，式の書き方





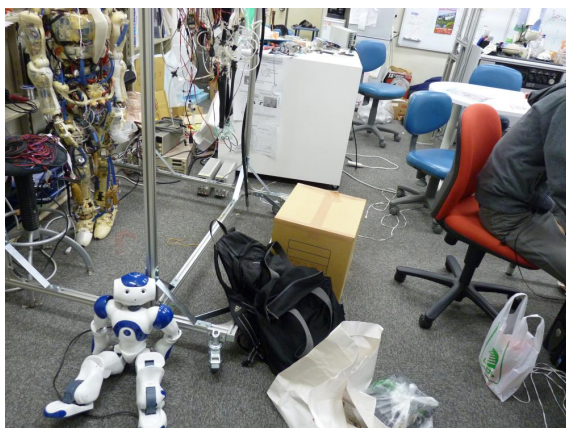


Fig. 8.1: 図の貼り方

## 8.1 図の貼り方

### 8.1.1 基本的な図の貼り方

図を貼る際には例えば以下のようにする．図 8.1 はこのようにして貼られた図である．図に対して言及するときはこのように `ref` コマンドを使う．`ref` コマンドの引数を，図を貼った時のコマンド群中の `label` コマンドの引数と対応させることで，意図した図に対して `ref` することができるのである．

さて，先ほどの図の貼り方はちょっとめんどくさい．大体，たかが図を一枚貼るためにこんな数行使った処理をいちいち書いてられないし，ソースコードのスペース的にもたくさん消費してしまってアホみたいである．そのあたりを解決するのが，`fig` コマンドである．(`fig` コマンドはいわば自作関数で，`ikuo.sty` の中に定義されている．) `fig` コマンドを使うと，下記のように図を貼ることができる．図 8.2 は `fig` コマンドを使って貼った図である．そして，今，気づいただろうか．今の `ref` はただの `ref` ではなく，`figref` コマンドを使って `ref` を行ったものである．(`figref` コマンドも `fig` コマンド同様に `ikuo.sty` の中で定義されている．) `figref` コマンドを使うと，いちいち「図」とか「fig.」とかを `ref` コマンドの前に書く必要がなくなり，便利である．更に，「図」でなく「fig.」として参照するように変更する必要がある時にも，`ikuo.sty` の中の `figref` コマンドの定義箇所にて変更をするだけで文書全体に変更が行われるのでとても有用であり，`figref` コマンドを使わないのは愚かしい行為である．



Fig. 8.2: fig コマンドを使って貼った図

### 8.1.2 fig に関連する便利コマンド

fig コマンドには残念ながら, 図の位置を指定する引数が存在しない. fig コマンドの定義を見ると, 位置指定オプションは [tbp] となっており, ページ上端, 下端, まるまる 1 ページ, という優先度で位置が指定されることがわかる. どうしてもページ下端に図を貼りたんだ, という時には figb コマンドが用意されている. 図 8.3 は figb コマンドを使って貼った図である.

どうしても位置を自分で指定したい, という場合は figpos コマンドを使う. figpos コマンドは第 4 引数が位置指定オプションに反映されるため, 下記のように使うことができる. 図 8.4 は figpos コマンドを使って貼った図である.

上記各コマンドと合わせ, 定義されている fig 関連のコマンドを以下にまとめておく.

- fig  
図を貼るときに使う一番基本的なコマンド. 位置指定は [tbp] となる.
- twofigs  
2 枚の図を立てに並べて貼るときに使うコマンド. キャプションは 1 つだけつき, ラベルは最初の図のファイル名になる. 位置指定は [tbp] となる.
- figthroug  
複数段組の文書中で, 段組をぶちぬいて図を貼るときに使うコマンド.

- `figb`  
ページ下端に図を貼るときに使うコマンド.
- `figpos`  
任意の位置を指定して図を貼るときに使うコマンド.
- `doublefig`  
2 枚の図を横に並べて貼るときに使うコマンド. キャプションは 1 つだけつき, ラベルは最初の図のファイル名になる. 位置指定は `[tb]` となる.
- `doublefigt`  
`doublefig` コマンドと同様だが, ページ上端に図を貼るとき専用のコマンド. 具体的には図の上側にスペースを入れずに貼ることができる.
- `doublefigb` `doublefig` コマンドと同様だが, ページ下端に図を貼るとき専用のコマンド.
- `doublefigthrough`  
`doublefig` コマンドと同様だが, 複数段組の文章中で段組をぶちぬいて図を貼るときに使うコマンド. 位置指定は `[t]` となる.
- `triplefig`  
3 枚の図を横に並べて貼るときに使うコマンド. キャプションは 1 つだけ表示され, ラベルは最初の図のファイル名になる. 位置指定は `[tbp]` となる.
- `triplefigthrough`  
`triplefig` コマンドと同様だが, 複数段組の文章中で段組をぶちぬいて図を貼るときに使うコマンド. 位置指定は `[tbp]` となる.

## 8.2 表と式の書き方

### 8.2.1 表の書き方

表を書くときには以下のようにする. 表 8.2.1 は最も基本的な表の書き方の例である. ソースコードを見ればわかる通り, この中では `label` コマンドが使われているのだが, より便利なコマンドとして `tablabel` が用意されている. `tablabel` コマンドは表に対するラベルである

Table 8.1: 各人データ

名前	身長 [cm]	体重 [kg]	備考
Y.M	1800	60	はげ
Y.M	170	10	
Y.M	170	60	

Table 8.2: 各人データ

名前	身長 [cm]	体重 [kg]	備考
Y.M	1800	60	はげ
Y.M	170	10	
Y.M	170	60	

という情報を自動的に付与してくれるため, これを用いることで図や式に対するラベルとごっちゃになるという問題を防ぐことができる. 同様のコマンドとして `figlabel`(図に対するラベル), `equlabel`(式に対するラベル), `chaplabe`(章に対するラベル), `seclabel`(節に対するラベル), `subseclabel`(小節に対するラベル) などが存在するので使うと良い. 8.1 節において用いた `fig` だとか `twofig` だとかいった便利コマンドにおいてはその中で `figlabel` が使用されている.

`tablabel` コマンドを用いた表は以下ようになる. 表 8.2.1 のように `tablabel` を用いて表を書くと, `tabref` コマンドを使うのが便利になる. `tabref` コマンドは `figref` コマンドのように自動で「図」とか「table」とかを付けてくれる便利コマンドである.

表に関しては特にこれ以上ローカルなコマンドとかないので, あとは研究室 wiki を見るなりネットで情報探すなりして自分の書きたい表を書けるようになってください.

### 8.2.2 式の書き方

式は例えば以下のように書く.

$$hoge = hage \tag{8.1}$$

式に関してここで述べるべきことは表に関するそれとほぼ同様であり, つまり `equlabel` および `equref` を使うべきであるという点のみである. 式 (8.1) は `equlabel` を使ってラベル付さ

れており，本文章冒頭の ref は `equiref` を用いて行われている．式の書き方に関するそれ以外の情報は研究室 wiki なりネット上で情報探すなりしてください．

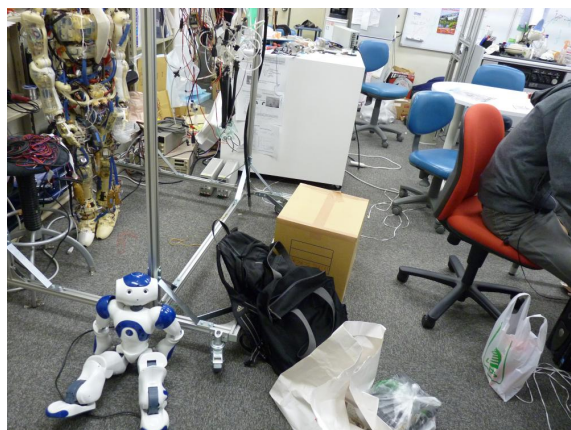


Fig. 8.3: figb コマンドを使って貼った図



Fig. 8.4: figpos コマンドを使って貼った図

## 謝辭





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 Vyhliđal，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. 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] 福田敏男, 齋藤史倫, 新井史人, 小菅一弘. 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. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 57, No. 541, pp. 2930–2937, 1991.
- [3] 福田敏男, 齋藤史倫, 新井史人. 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. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 58, No. 549, pp. 1450–1457, 1992.
- [4] 齋藤史倫, 福田敏男, 新井史人, 松浦英雄. 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. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 59, No. 557, pp. 171–178, 1993.
- [5] 齋藤史倫, 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, 齋藤史倫. 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 リンクブ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, 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 リンクブ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. ブ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] 齋藤史倫, 福田敏男. ブ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. 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.
- [13] 山川雄司, 安宅佑樹, 石川正俊. ブ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. ブ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の振舞. 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] 本堂貴敏, 水内郁夫. ばねの研究. 日本ばね学会誌, Vol. 72, No. 3, pp. 350–355, 2011.