

Title	弾性効果を利用した歩幅が等間隔でないリムレスホイールのステルス歩容生成と運動解析
Author(s)	川添, 雅史
Citation	
Issue Date	2020-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/16390">http://hdl.handle.net/10119/16390</a>
Rights	
Description	Supervisor: 浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

修士論文

弾性効果を利用した歩幅が等間隔でないリムレスホイールの  
ステルス歩容生成と運動解析

川添 雅史

主指導教員 浅野 文彦  
審査委員主査 浅野 文彦  
審査委員 Ho Anh-Van  
審査委員 平石 邦彦  
審査委員 上原 隆平

北陸先端科学技術大学院大学  
先端科学技術研究科  
(情報科学)

令和2年3月

## Abstract

本論文では、水平面上において歩幅が等間隔でないリムレスホイールの効率的な歩行の実現を試みる。リムレスホイールとリアクションホイールとを弾性要素を介して接続することや、歩行速度を最大限まで引き上げることにより効率化を求める。はじめに、水平面上における歩幅が等間隔でないリムレスホイールの効率的な歩行をコンピュータによる数値シミュレーションにて検証する。そして、本理論を実機実験にて検証するための実機開発を行う。その後、実験環境の構築を行い、実証実験を行う。最後に、これらの結果踏まえて水平面上において歩幅が等間隔でないリムレスホイールの効率的な歩行に関する考察を行うとともに、得られた課題についての検討を行う。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	水平面上における劣駆動リムレスホイールの非対称ステルス歩容生成	3
2.1	数学モデルの導出	3
2.1.1	運動方程式	4
2.1.2	制御系設計	5
2.2	線形化モデルによる数値シミュレーション	6
2.2.1	線形化による初期状態の導出	6
2.2.2	シミュレーション結果	7
2.2.3	弾性係数の変更によるSRの変化	11
2.3	非線形モデルによる数値シミュレーション	13
2.3.1	非線形モデルによる初期状態の探索	13
2.3.2	シミュレーション結果	14
2.3.3	両脚支持期を考慮したシミュレーション結果	15
第3章	ロボットの実験機開発	18
3.1	実験機開発	18
第4章	実験機を用いた実験的検証	22
第5章	結論	25
5.1	結論	25
5.2	今後の課題	25
	謝辞	27
	付録	29

# 目 次

2.1	水平面上における非対称な劣駆動リムレスホイール . . . . .	4
2.2	水平面上における線形モデルの位相平面図 . . . . .	8
2.3	水平面上における線形モデルの角度の変遷 . . . . .	9
2.4	水平面上における線形モデルの角速度の変遷 . . . . .	9
2.5	水平面上における線形モデルの制御入力 . . . . .	10
2.6	水平面上におけるロボットの垂直床反力 . . . . .	10
2.7	弾性係数を変化させた際の SR の変化 . . . . .	12
2.8	股角度 $\alpha_1$ を変化させた際の SR の変化 . . . . .	13
2.9	非線形モデルの位相平面図 . . . . .	14
2.10	図 2.9 の拡大図 . . . . .	15
2.11	両脚支持期を考慮した非線形モデルの位相平面図 . . . . .	16
2.12	両脚支持期を考慮した非線形モデルの角度の変遷 . . . . .	17
2.13	両脚支持期を考慮した非線形モデルの角速度の変遷 . . . . .	17
3.1	CAD による実験機のイメージ . . . . .	19
3.2	実験機 . . . . .	20
3.3	実験機に備わるゼンマイばね . . . . .	21
4.1	モータへの入力（角度） . . . . .	23
4.2	モータへの入力（角速度） . . . . .	23
4.3	実験機によるステルス歩行の実験 . . . . .	24

# 表 目 次

2.1 物理パラメータ . . . . .	8
4.1 実験機の物理パラメータ . . . . .	22

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

歩行ロボットにおいて、舗装路面や非舗装路面に関わらず様々な路面状況に対応し安定した歩行を行うことは、必要不可欠な能力である。特に岩場や、破片などが散乱している災害現場のような足の着地点が等間隔でない路面における安定した歩容生成については、理論的な複雑さと難しさから十分な検討がなされていない。更にそのような路面に対し、歩行ロボットを対応させるためには歩幅が等間隔でない歩行の実現が必要となる。

これまでの研究により、歩幅が等間隔でないリムレスホイールの受動歩行は行われているが [1]，ステルス歩行については行われていない。さらに、弾性要素を用いることにより高効率なステルス歩行が可能であることが示されている [2]。そこで本研究では高効率を追求した弾性要素を利用した歩幅が等間隔でないリムレスホイールのステルス歩容生成の制御理論を明らかにする。

## 1.2 研究の目的

本研究では水平面上において、リアクションホイールを有する歩幅が等間隔でないリムレスホイールの移動効率の向上を目的とする。

移動の高効率化にあたり、ステルス歩行という歩行形態を採用する。これは、遊脚接地の際に衝突が発生しないという特徴を持つ careful な歩行形態である [3][4][5]。遊脚と地面との間に衝突が発生しないことから、エネルギーのロスがなく非常に効率的といえる。更に、歩行速度をステルス歩行が実現される最大速度とすることや、リアクションホイールとリムレスホイール間に弾性要素を介して接続することで移動の効率化に貢献する。

片足が不自由な人の歩行は歩幅の異なる2周期での歩行とみなすことができる。そのため本研究で取り組む、歩幅が等間隔でないモデルによる歩行は、片足が不自由な人の歩行を簡略化したものとみなすことができる。そこで、片足が不自由な人が装着するだけで歩行することが可能となるリハビリテーションロボットにこのモデルとその制御手法を応用することができるのではないかと考えられる。更にステルス歩行が持つ性質より、遊脚接地の際に衝突が発生しないことから、足への負担を掛けずに歩行を行うことが可能な、ユーザに対して優しいリハビリテー

ションロボットとなると考えられる。また弾性要素の効果から消費エネルギーが少なく、ランニングコストの安価な機器となる。このことから、本研究はリハビリテーションロボットへの応用が期待される、非常に有用性の高い研究であると考えられる。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて6章から構成される。第2章では本研究にて用いるロボットについての概要を示し、その数学モデルを導出する。そして、導出した数学モデルをロボットに適用し、そのパラメータを変更することで、その運動特性を解析する。第3章では本理論の実証実験を行うための実験機の開発を解説する。第4章では第3章にて開発した実験機を用い、第2章にて解析した結果を評価するため、実験的検証を行う。第5章では第4章にて得られた実験結果より得られた実験機の制御手法や、結果を議論する。そして、第6章では本論についての総括を行う。また、本研究から得られた課題を示す。

## 第2章 水平面上における劣駆動リムレスホイールの非対称ステルス歩容生成

本章ではリアクションホイールを有する、歩幅の異なる非対称なリムレスホイールの水平面上におけるステルス歩容生成を行う。まずは本研究にて用いるロボットの概要を紹介し、その数学モデルの導出と制御系の設計手法について述べる。次に線形化モデルを用いて目標軌道を達成するための初期状態を線形近似にて導出する。そして、非線形モデルにおいて線形近似により導出した初期状態に基づきシミュレーションを行い、効率的な運動であるか議論する。

### 2.1 数学モデルの導出

図2.1に本研究で用いるリムレスホイールのモデルを示す。このモデルはリムレスホイールとリアクションホイールに接続された1つのリアクションホイールから成る、2自由度の劣駆動リムレスホイールである。リムレスホイールは長さ  $l$  [m] の8本の脚が中心から放射状に伸びた形状をしている質量  $m_1$  [kg] のホイールであり、歩行研究において用いられる簡素なモデルの内の1つである。またこのホイールは2つの股角度を有しており、大股と小股が交互に現れる構造となっている。大股の股角度と小股の股角度はそれぞれ、 $\alpha_1$  [rad],  $\alpha_2$  [rad] であり、これらは次の関係を満たす [1]。

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 2\alpha = \frac{\pi}{2} \quad (2.1)$$

更にこのリムレスホイールの中心には、質量  $m_2$  [kg], 慣性モーメント  $I$  [kg · m<sup>2</sup>] のリアクションホイールが弾性係数  $k$  [N · m/rad] の弾性要素を介して取り付けられており、トルク  $u$  [N · m] を印加することが可能である。本モデルはこのトルクの入力によって駆動する。なお、リムレスホイールとリアクションホイールの角度は垂直方向との絶対値であり、その値はそれぞれ、 $\theta_1$  [rad],  $\theta_2$  [rad] である。また、支持脚接地点において摺動は生じないものとする。

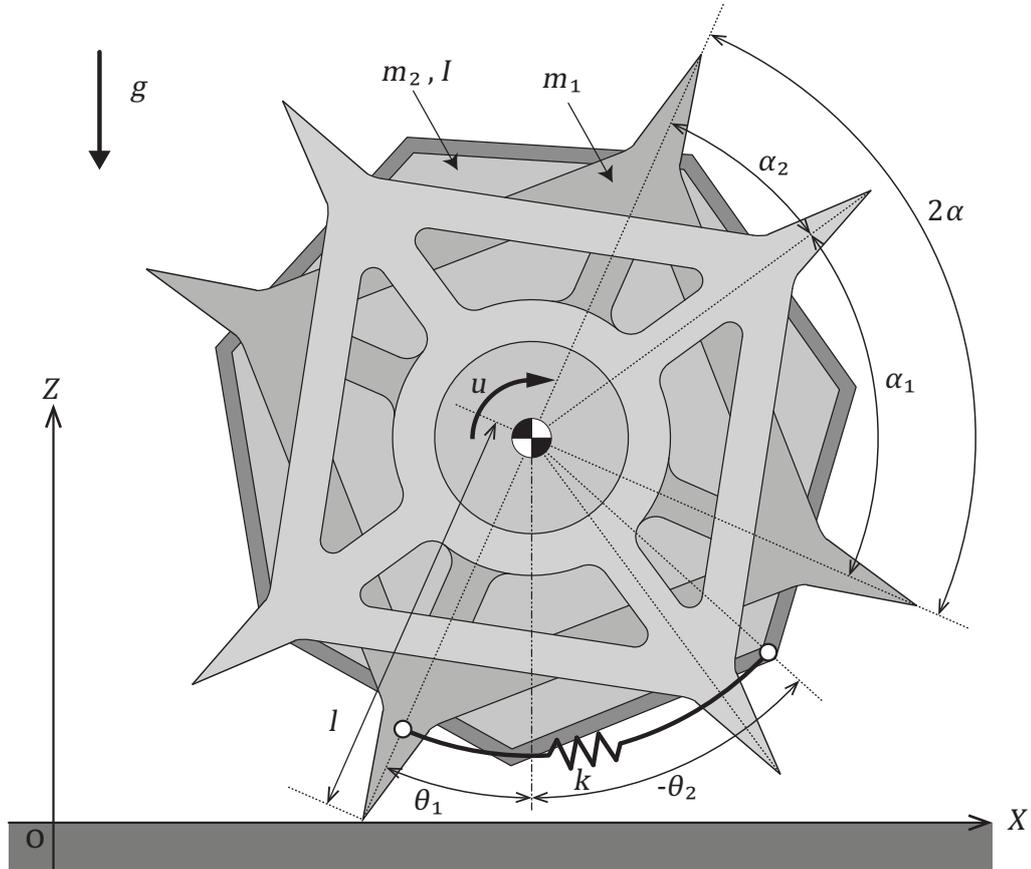


図 2.1: 水平面上における非対称な劣駆動リムレスホイール

### 2.1.1 運動方程式

まず、本モデルの一般化座標ベクトルを  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2]^T$  とすると、その運動方程式は、

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h} = \mathbf{S}u \quad (2.2)$$

となる。

ここで、左辺第1項は慣性力項、第2項は中心力・コリオリ力及び重力項であり、右辺は制御入力項、 $u$ は入力トルクである。また、慣性行列  $\mathbf{M}$ 、中心力及び重力項ベクトル  $\mathbf{h}$ 、駆動ベクトル  $\mathbf{S}$  それぞれの詳細を以下に示す。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} ml^2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} -mgl \sin \theta_1 + k(\theta_1 - \theta_2) \\ -k(\theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ここで,  $m$  はモデルの全質量である.

### 2.1.2 制御系設計

ロボットの移動効率を向上させるためには, 移動速度を高速化することが必要不可欠な条件のひとつである. そこで, 本研究では本モデルの制御に DODC (Discrete-time Output Deadbeat Control, 離散時間出力有限整定制御) を適用し, 最短時間制御を行う [7]. 有限整定制御とは, ある制御信号を有限時間で完全にゼロとする制御手法である [8].

制御出力  $y$  の 2 階微分は

$$\ddot{y} = \ddot{\theta}_1 = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}u - \mathbf{h}) \quad (2.6)$$

このとき, DODC を達成する制御入力  $u$  は

$$u = \frac{v + \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{h}}{\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}} = ml^2 (v - \omega^2 \sin \theta_1) + k(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.7)$$

であり, ここで  $\omega := \sqrt{g/l}$  [rad/s] である. そして, 制御出力の状態方程式は次のようになる.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (2.8)$$

ここで, DODC において  $y(T) = 0$  を達成するために  $v$  は

$$v = \begin{cases} \frac{4\alpha}{T^2} & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ -\frac{4\alpha}{T^2} & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \quad (2.9)$$

となる. ロボットの支持脚接地点まわりに発生する垂直方向の床反力  $F_z$  は

$$F_z = m \cos \theta_1 \left( g \cos \theta_1 - l\dot{\theta}_1^2 \right) - \frac{(u - k(\theta_1 - \theta_2)) \sin \theta_1}{l} \quad (2.10)$$

と求まる. ここで,  $F_z^-$  と  $F_z^+$  をそれぞれ,  $t = T/2$  の前および後の垂直床反力とすると

$$F_z^\pm = m \left( g - \frac{4l\alpha}{T^2} \left( \alpha \cos \left( \frac{\alpha - \alpha_1}{2} \right) \mp \sin \left( \frac{\alpha - \alpha_1}{2} \right) \right) \right) \quad (2.11)$$

となる。最短時間でのステルス歩行を実現するための歩行周期  $T$  [s] の条件,  $F_z \geq 0$  を保つ条件式は

$$T \geq \frac{2}{\omega} \sqrt{\alpha F_1} =: T_{\min} \quad (2.12)$$

であり, ここで

$$F_1 := \alpha \cos\left(\frac{\alpha - \alpha_1}{2}\right) - \sin\left(\frac{\alpha - \alpha_1}{2}\right) \quad (2.13)$$

である。

## 2.2 線形化モデルによる数値シミュレーション

続いて, 歩行の初期状態の導出について解説する。リミットサイクル型歩行のような安定な歩行とは異なり, ステルス歩行ではその遊脚接地時に衝突が発生しない特徴から, 遊脚先端位置の繊細なコントロールが要求される。従って, ステルス歩行においては初期状態の導出が重要な手段の一つである。ここでは近似線形化を用いた初期状態の導出について述べる。

### 2.2.1 線形化による初期状態の導出

始めに式 (2.2) について,  $\theta = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ ,  $\dot{\theta} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$  のまわりで近似線形化を行うことで,

$$M\ddot{\theta} + G\theta = Su \quad (2.14)$$

を得る。ここで,

$$G = \begin{bmatrix} -mgl + k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$u = \frac{v + CM^{-1}G\theta}{CM^{-1}S} = ml^2(v - \omega^2\theta_1) + k(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.16)$$

である。式 (2.16) を式 (2.14) に代入し整理することにより, 次の状態空間表現

$$\dot{x} = Ax + Bv \quad (2.17)$$

を得る。ここで,  $x = [\theta^T \ \dot{\theta}^T]^T$  であり,

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_2 \\ -M^{-1} \left( \mathbf{I}_2 - \frac{SCM^{-1}}{CM^{-1}S} \right) G & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{mgl}{I} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \frac{M^{-1}\mathbf{S}}{CM^{-1}\mathbf{S}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -\frac{ml^2}{I} \end{bmatrix}^T \quad (2.19)$$

である。このとき目標とする境界条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(2T_{\min}) &= e^{\mathbf{A}(2T_{\min})}\mathbf{x}(0) + \int_0^{2T_{\min}} e^{\mathbf{A}(2T_{\min}-\tau)}\mathbf{B}v d\tau \\ &= \begin{bmatrix} \theta_2(0) + 2\dot{\theta}_2(0)T_{\min} - \frac{\frac{\alpha_1}{2}}{ml(48\alpha l + gT_{\min}^2(18\alpha_1 + 6\alpha_2 - 19\alpha))} \\ 0 \\ \dot{\theta}_2(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ここで式(2.20)を解くことで、以下に示す初期状態を求めることができる。

$$\mathbf{x}(2T_{\min}) = \begin{bmatrix} \theta_1(2T_{\min}) \\ \theta_2(2T_{\min}) \\ \dot{\theta}_1(2T_{\min}) \\ \dot{\theta}_2(2T_{\min}) \end{bmatrix} = \mathbf{x}(0) + \begin{bmatrix} 2\alpha \\ 2\alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(0) + 2\alpha \\ \theta_2(0) + 2\alpha \\ \dot{\theta}_1(0) \\ \dot{\theta}_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ここで、 $\dot{\theta}_2(0)$ は、

$$\dot{\theta}_2(0) = \frac{\alpha\omega(12(ml^2 + I) + ml^2F_1(12\alpha_1 - 7\alpha))}{24I\sqrt{\alpha}F_1} \quad (2.22)$$

となる。従って、 $\boldsymbol{\theta}(0)$ と $\dot{\boldsymbol{\theta}}(0)$ は次のようになる。

$$\boldsymbol{\theta}(0) = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_1}{2} \\ -\frac{\alpha_1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

## 2.2.2 シミュレーション結果

近似線形化により求めた初期状態に基づき、線形化モデルを用いた数値シミュレーション結果を図2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6に示す。また、本シミュレーションにて用いた物理パラメータについて表2.1に示す。図2.2より、2周期の歩容が生成されていることが確認できる。また図2.6より、ロボットの床反力はゼロに近づいているが常にゼロ以上であり、ロボットは地面から飛び上がることなく歩行を行っていることが確認される。このことから、ロボットは床反力がゼロを下回らない限界の最高速度で歩行を行っていることがわかる。

表 2.1: 物理パラメータ

$m$	2.5	kg
$l$	1.0	m
$I$	1.0	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$\alpha_1$	$\pi/3$	rad
$\alpha_2$	$\pi/6$	rad
$T_{\min}$	0.5396	s
$\dot{\theta}_2(0)$	7.04314	rad/s

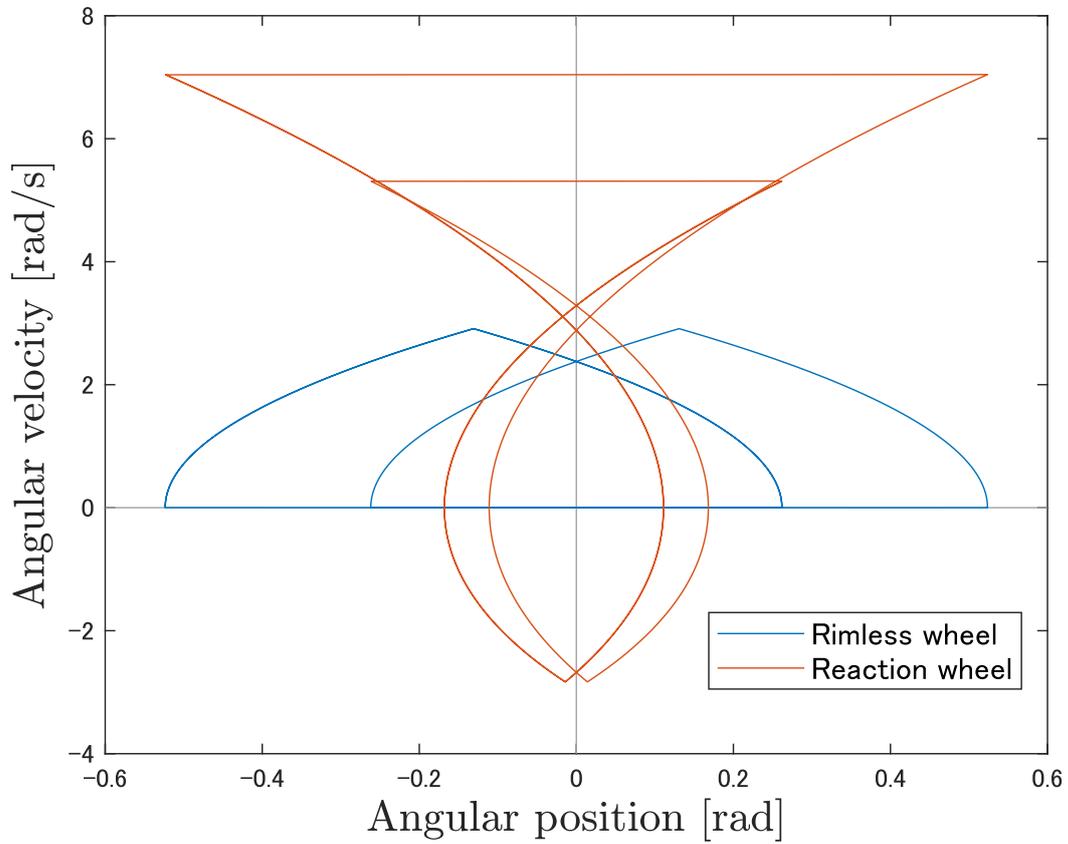


図 2.2: 水平面上における線形モデルの位相平面図

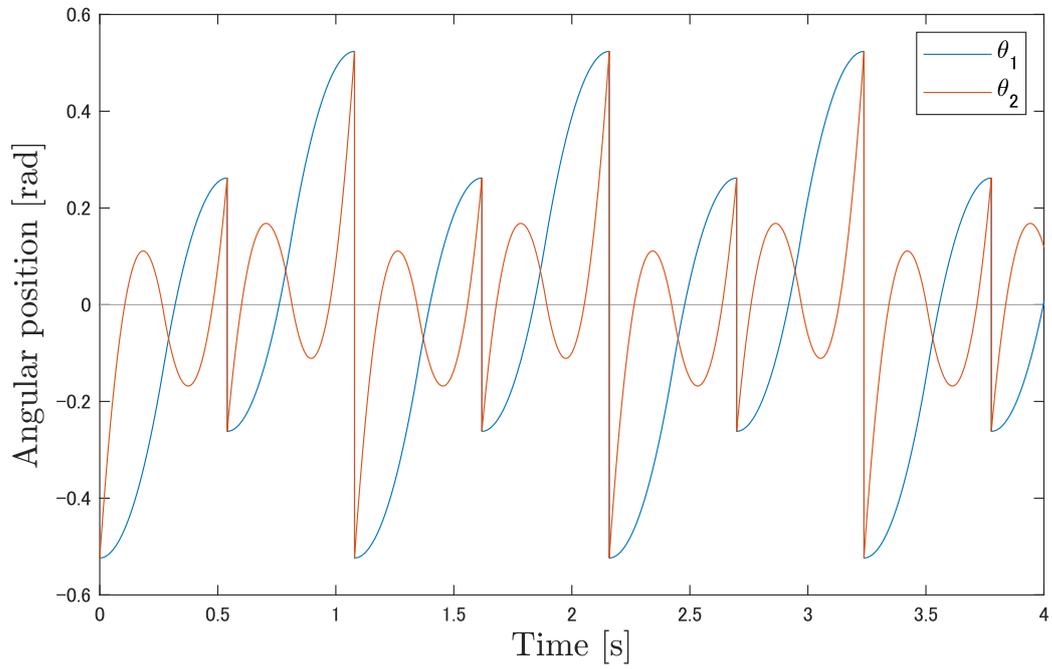


図 2.3: 水平面上における線形モデルの角度の変遷

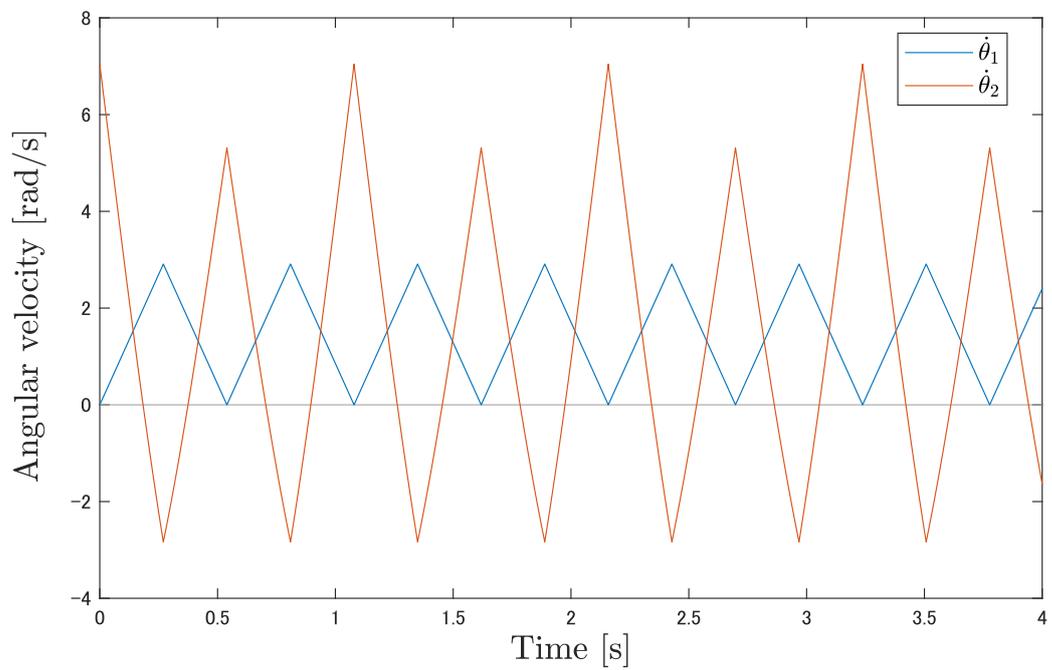


図 2.4: 水平面上における線形モデルの角速度の変遷

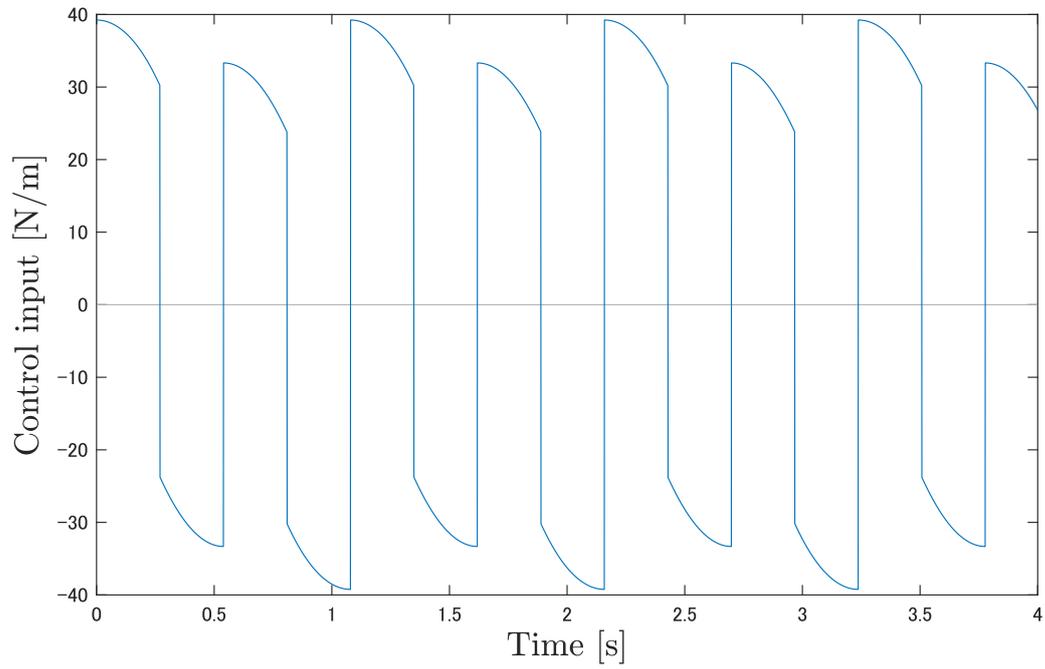


図 2.5: 水平面上における線形モデルの制御入力

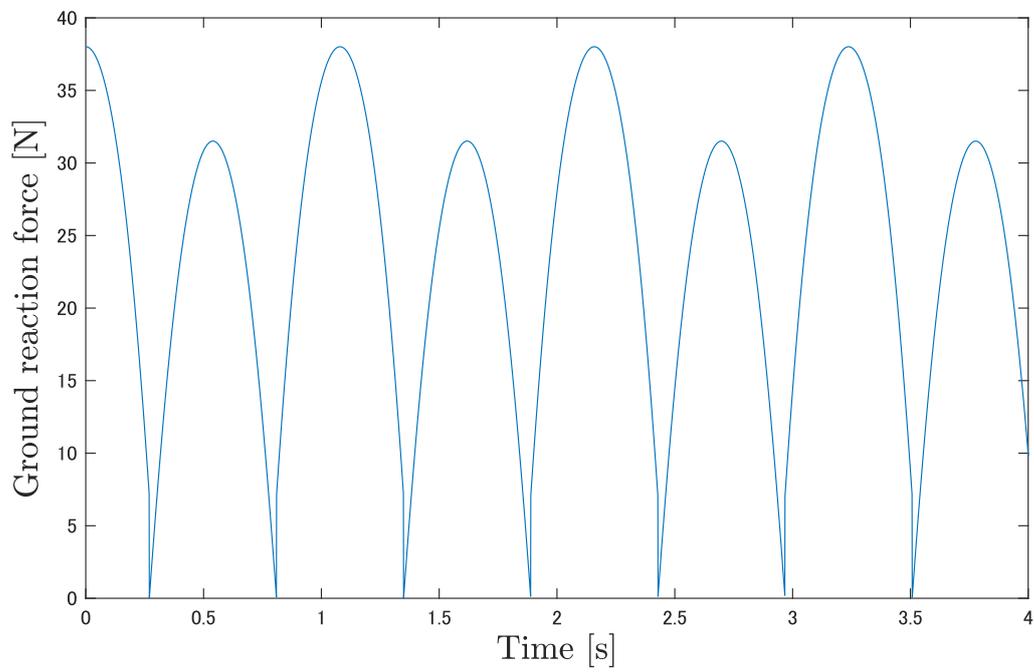


図 2.6: 水平面上におけるロボットの垂直床反力

### 2.2.3 弾性係数の変更による SR の変化

本モデルは移動効率を向上させるため、リムレスホイールとリアクションホイールとの間に弾性要素を備えている。その弾性係数を変化させ、移動効率を算出することで最も効率的な弾性係数を導出する。また、股角度  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  を変化させ、SR がどのように変化するかを確認する。移動効率を表す指標である SR (specific resistance) は運動に要したエネルギーとその運動に必要なエネルギーの比で表され、その値が小さいほど高効率である。それは以下の通りである。

$$SR := \frac{p}{mgV} \quad (2.25)$$

ここで、平均入力  $p$  [J/s] と平均移動速度  $V$  [m/s] は

$$p := \frac{1}{T} \int_{0^+}^{T^-} |(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) u| dt \quad (2.26)$$

$$V := \frac{2l}{T} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (2.27)$$

である。

弾性係数の変化による SR の値を図 2.7 に、股角度  $\alpha_1$  の変化による SR の値を図 2.8 にそれぞれ示す。図 2.7 より、弾性係数がおおよそ 110 [N·m/rad] のあたりで最も高効率であることがわかる。また図 2.8 より、 $\alpha_1$  がおおよそ  $\pi/3$  [rad] のあたりで最も高効率であることがわかる。従って  $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2$  [rad] の条件下において DODC を適用する場合は、 $\alpha_1 = \pi/3$  [rad]、 $\alpha_2 = \pi/6$  [rad] の状態にて最高の効率が実現可能であると考えられる。

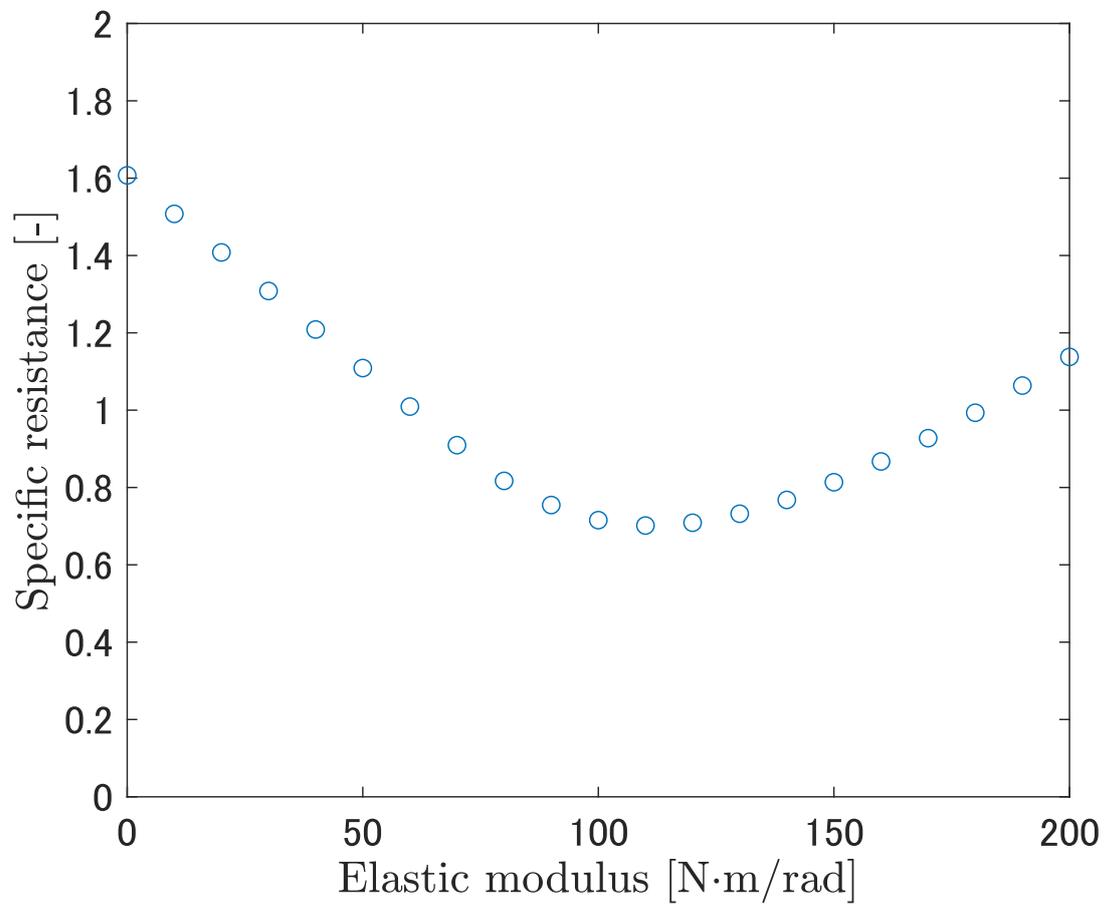


図 2.7: 弾性係数を変化させた際の SR の変化

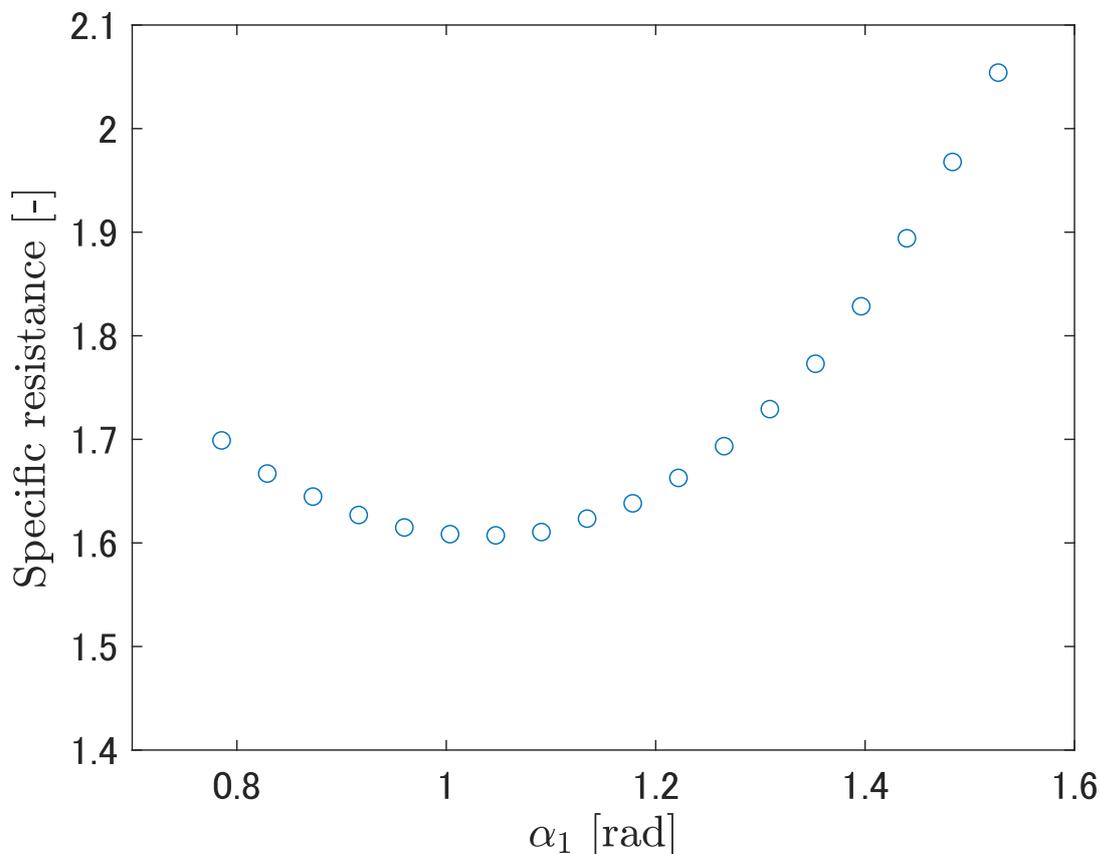


図 2.8: 股角度  $\alpha_1$  を変化させた際の SR の変化

## 2.3 非線形モデルによる数値シミュレーション

非線形モデルによる数値シミュレーションの際、線形化により導出された初期状態をそのまま適用すると、初期状態と終端状態が一致しないという問題が発生する。そのため、新たに非線形モデルに対応した初期状態の探索を行った後、数値シミュレーションを行う必要がある。

### 2.3.1 非線形モデルによる初期状態の探索

非線形モデルでは、その初期状態を求めるために数値解析による探索を行う必要がある。そこで、線形化により導出された初期状態を基に二分探索法を用い、非線形モデルにおいてステルス歩行を実現する初期状態の探索を行った。二分探索法はゼロ点探索を行う、基本的な手段の一つである。探索区間を中点で半分に分割し、ゼロ点を含む区間を次の探索区間とするものである。探索時間の長い手法である

が、探索区間の中にゼロ点を含んでいるならば必ず解に収束するという利点を持つ。線形化により導出された  $\dot{\theta}_2(0)$  を中点にとる探索区間を設定し、 $\theta_2(2T) - \theta_2(0) = 0$  となる  $\dot{\theta}_2(0)$  の探索を行った。

### 2.3.2 シミュレーション結果

ここでは、二分探索にて求めた初期状態を非線形モデルに適用した際のシミュレーション結果を示す。用いた物理パラメータは線形化モデルのものと同一であるため、省略する。図 2.9 に非線形モデルの位相平面図を示す。一見するとリアクションホイール角度・角速度の初期値と終端値とが一致しているよう見えるが、図 2.10 に示すように拡大すると無視のできないギャップが存在していることが分かる。そこで、ロボットの歩行に両脚支持期を設けることでギャップを埋め、この問題を解決することを試みる。

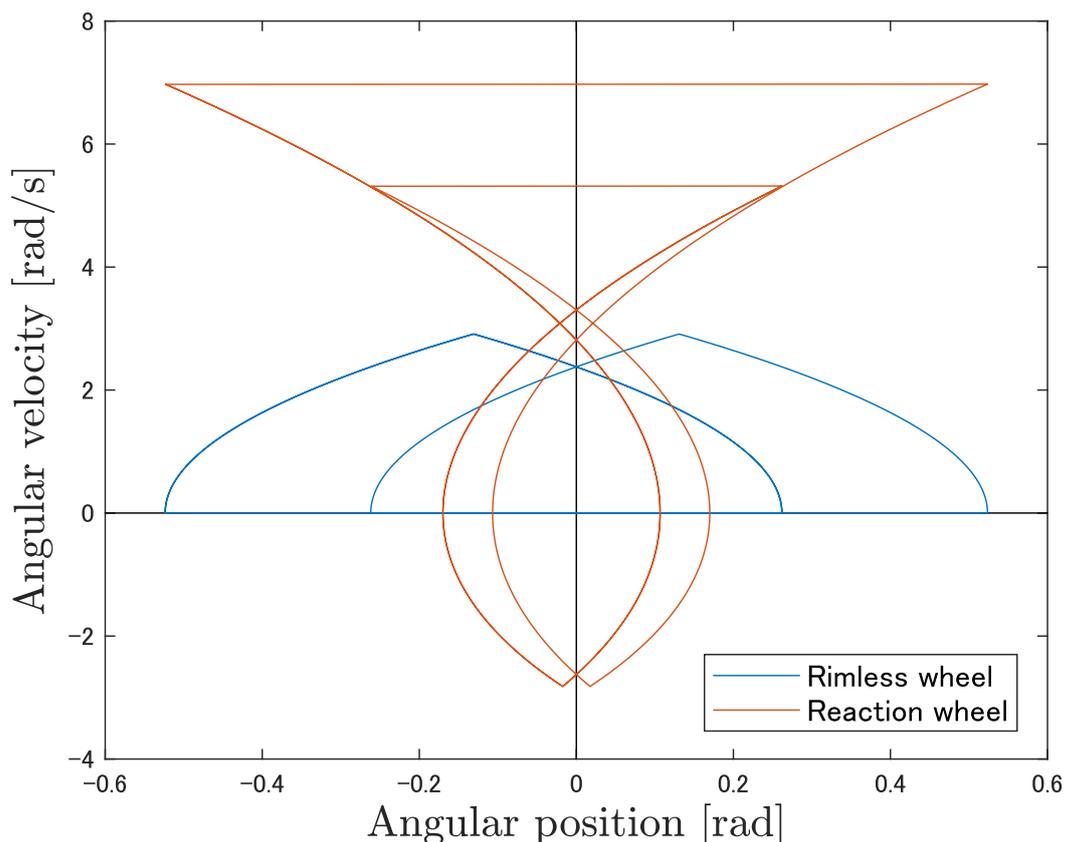


図 2.9: 非線形モデルの位相平面図

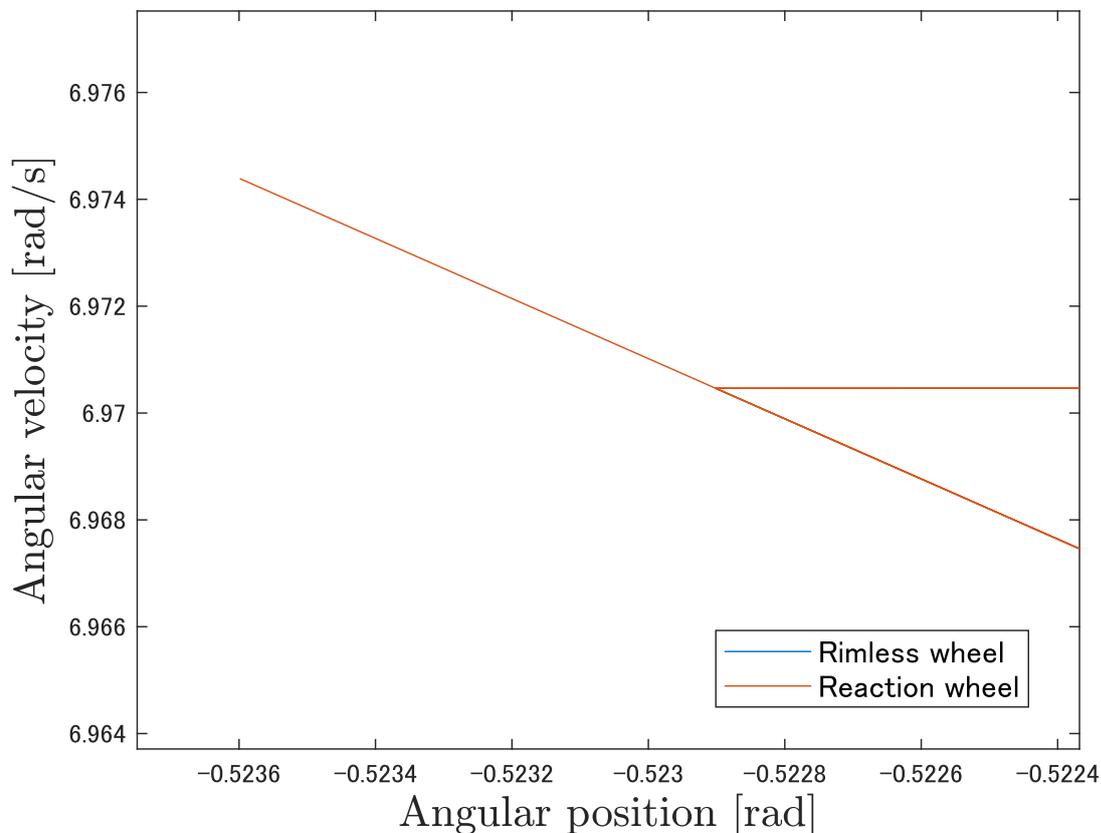


図 2.10: 図 2.9 の拡大図

### 2.3.3 両脚支持期を考慮したシミュレーション結果

本研究では、ロボットの移動効率向上を目的としているため、ロボットの歩行には単脚支持期のみ存在し両脚支持期は存在していない。ここでは、リアクションホイール角度・角速度の初期値と終端値との間に存在するギャップの問題解決のために両脚支持期を導入する。両脚支持期を設けることで移動効率は低下してしまうが、その期間は非常に短いものであることから、移動効率の低下幅は非常に小さなものとなることが考えられる。

今回は両脚支持期中にリアクションホイールの初期状態と終端状態との間のギャップを直線補間で繋げる手法を用いる。具体的には、入力を印加せずリアクションホイールを空回りさせることによりギャップを補間している。この際、物理的な制限から角度を増加させる方向にのみギャップを埋めることが可能である。つまり、終端値の角度が初期値のそれより小さな場合のみ、本手法が有効である。しかし、本モデルではリアクションホイールの終端値の角度は初期値のそれより大きく、このままでは両脚支持期を有効に活用することができない。

二分探索を行う際に、 $\dot{\theta}_2(0)$  を減少させると  $\dot{\theta}_2(2T)$  も減少する傾向を発見した。

そこで，二分探索法にて得られた値よりも敢えて小さな値を初期値とすることで終端値の角度を初期値のそれよりも小さくすることが可能となり，両脚支持期を用いて終端値と初期値とのギャップを埋めることが可能となる．両脚支持期を考慮した非線形モデルのシミュレーション結果を図 2.11，2.12，2.13 に示す．

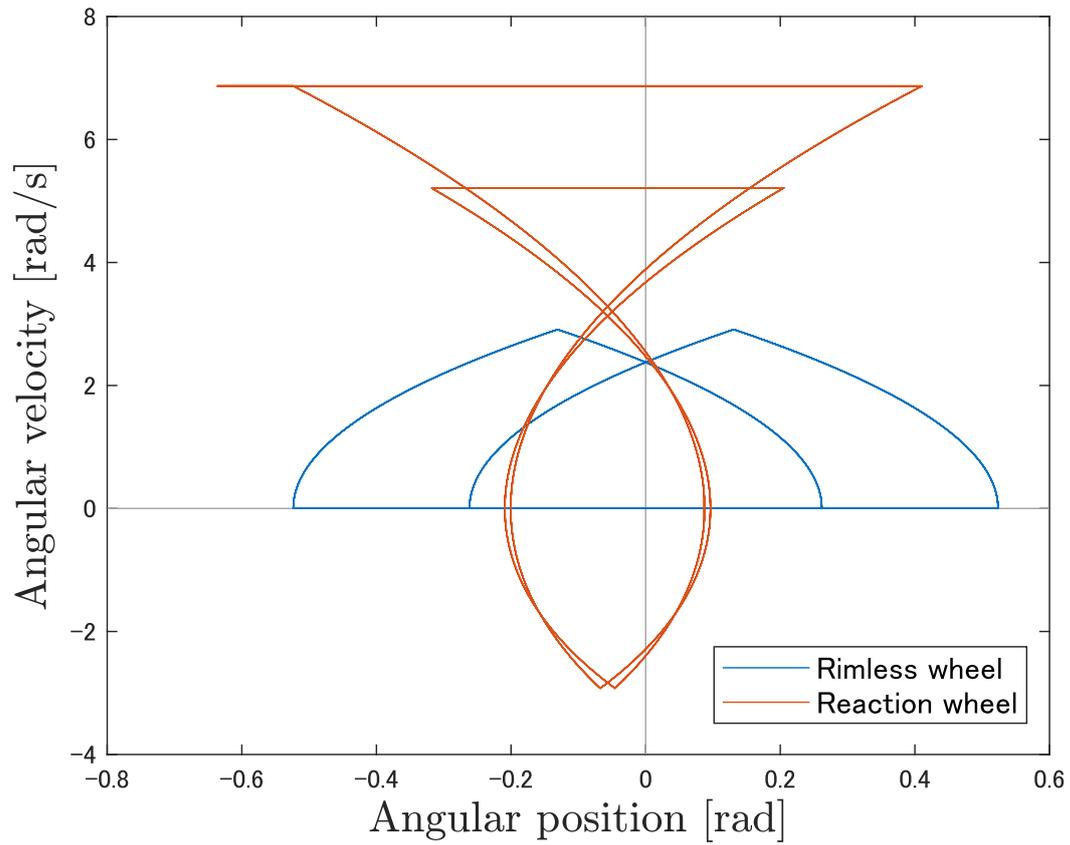


図 2.11: 両脚支持期を考慮した非線形モデルの位相平面図

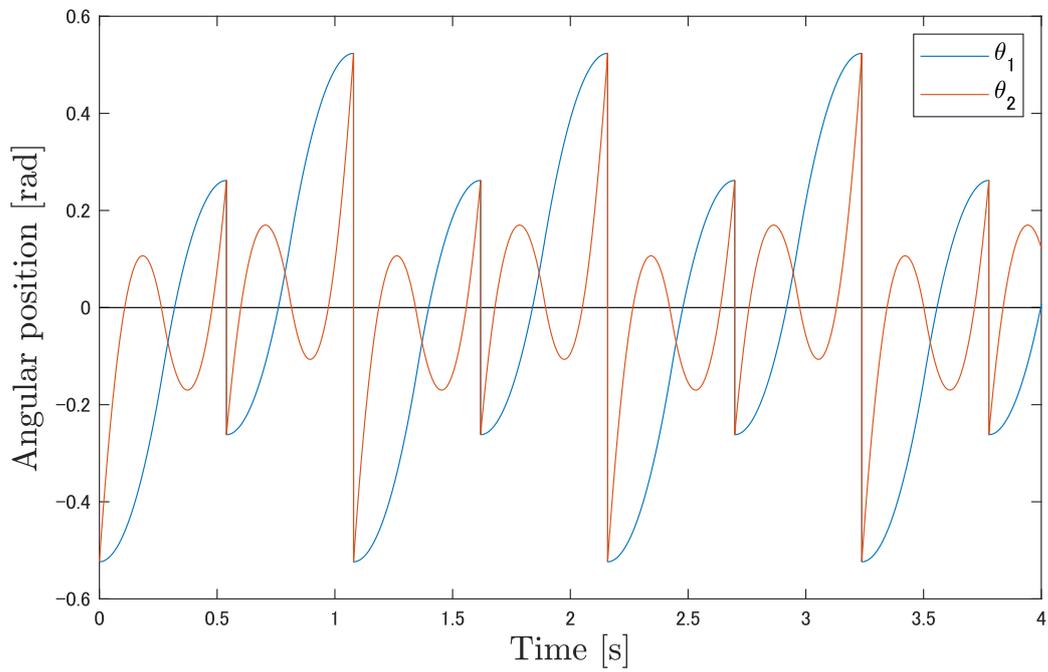


図 2.12: 両脚支持期を考慮した非線形モデルの角度の変遷

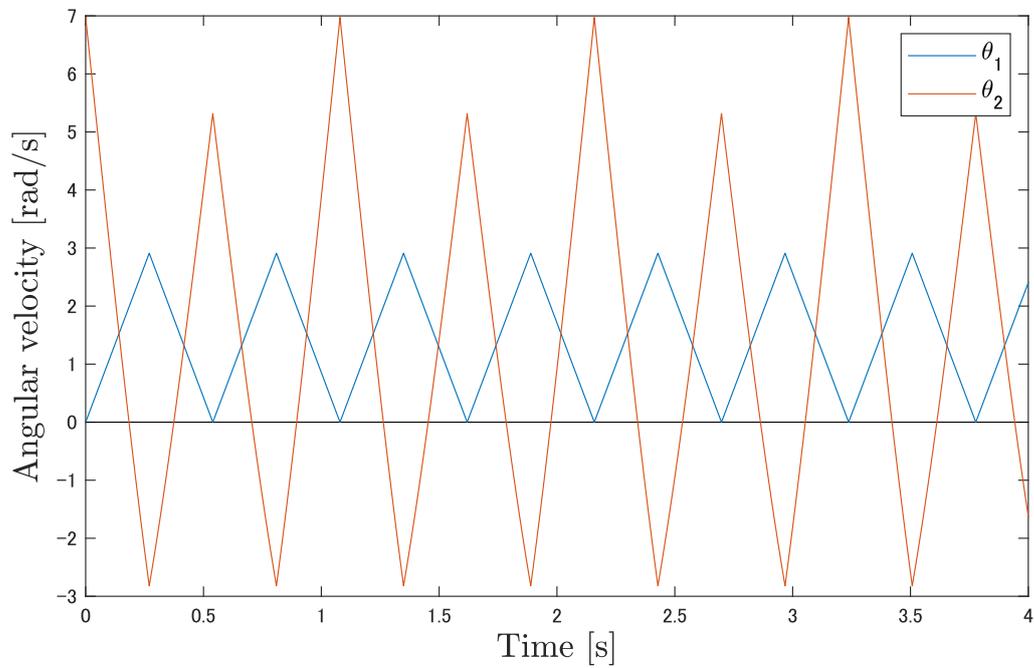


図 2.13: 両脚支持期を考慮した非線形モデルの角速度の変遷

## 第3章 ロボットの実験機開発

本章では，第2章にて解析した結果について，実験を行いその妥当性を検証する．そのため，歩幅が等間隔でないリムレスホイールのステルス歩行を実現する実験機の開発を行った．本章では実験に当たり行った実験機開発の詳細を述べる．

### 3.1 実験機開発

今回設計・開発した実験機の設計には3D CADソフトのSolid Worksを用いた．3D CAD上での実験機を図3.1に示す．そして，3D CADでの設計を元に製作した実験機を図3.2に示す．主な素材はアルミ合金である．

実験機のリムレスホイールは股角度90度のリムレスホイール二つを捻って取り付けした構造をしている．このことから， $\alpha_1$ と $\alpha_2$ に対応する股角度を任意の値に設定することが可能である．任意の股角度に設定可能である．

リアクションホイールを駆動させるモータはmaxon motorのEC(Electronically Commutated)モータを使用した．これはいわゆるブラシレスモータである．また，リアクションホイールは重りを取り付け，慣性モーメントを調整することが可能な構造としている．今回はロボットの片面にのみリアクションホイールを取り付けたが，今後新たにリアクションホイールや上体を追加することを見通し，反対面にもアクチュエーターを取り付けることが可能な構造とした．本実験機の脚長や脚間距離等の物理パラメータは，実験にて用いるトレッドミルのサイズに合わせて決定した．

そして，ロボットの弾性要素はリムレスホイールに対してリアクションホイールが回転する性質から実験機にはゼンマイばねを使用した．ゼンマイばねとは弾性係数の高い素材を渦巻き状に回転させて作ったばねであり，回転させることでエネルギーを蓄えることができるものである．我々の身の回りでは，主に玩具や時計に用いられている．ゼンマイばねとモータの回転軸を接続することにより，モータにて消費されるエネルギーを削減している．ゼンマイばねを備えている様子を図3.3に示す．

実験機の構成パーツの設計図面は本論の付録に添付する．

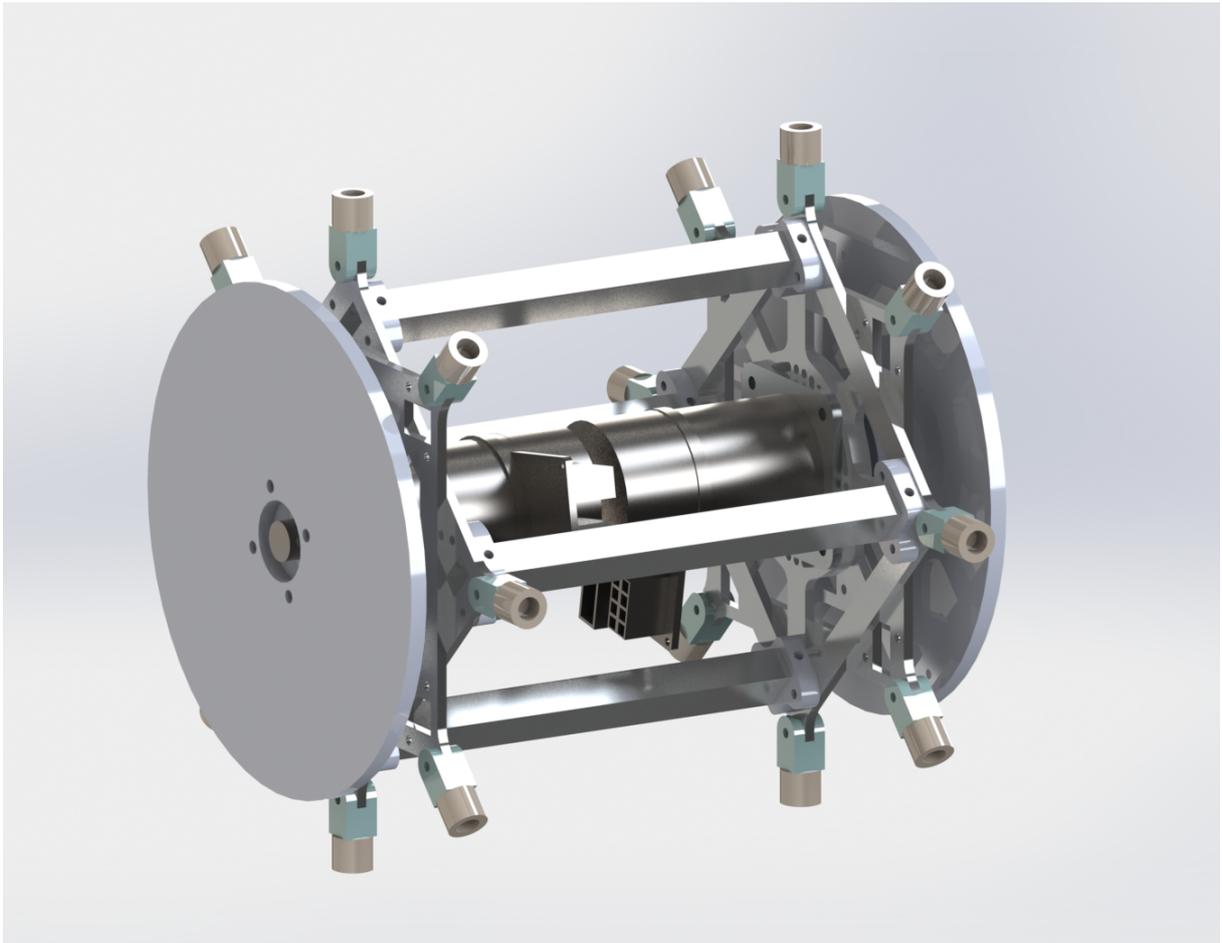


図 3.1: CAD による実験機のイメージ

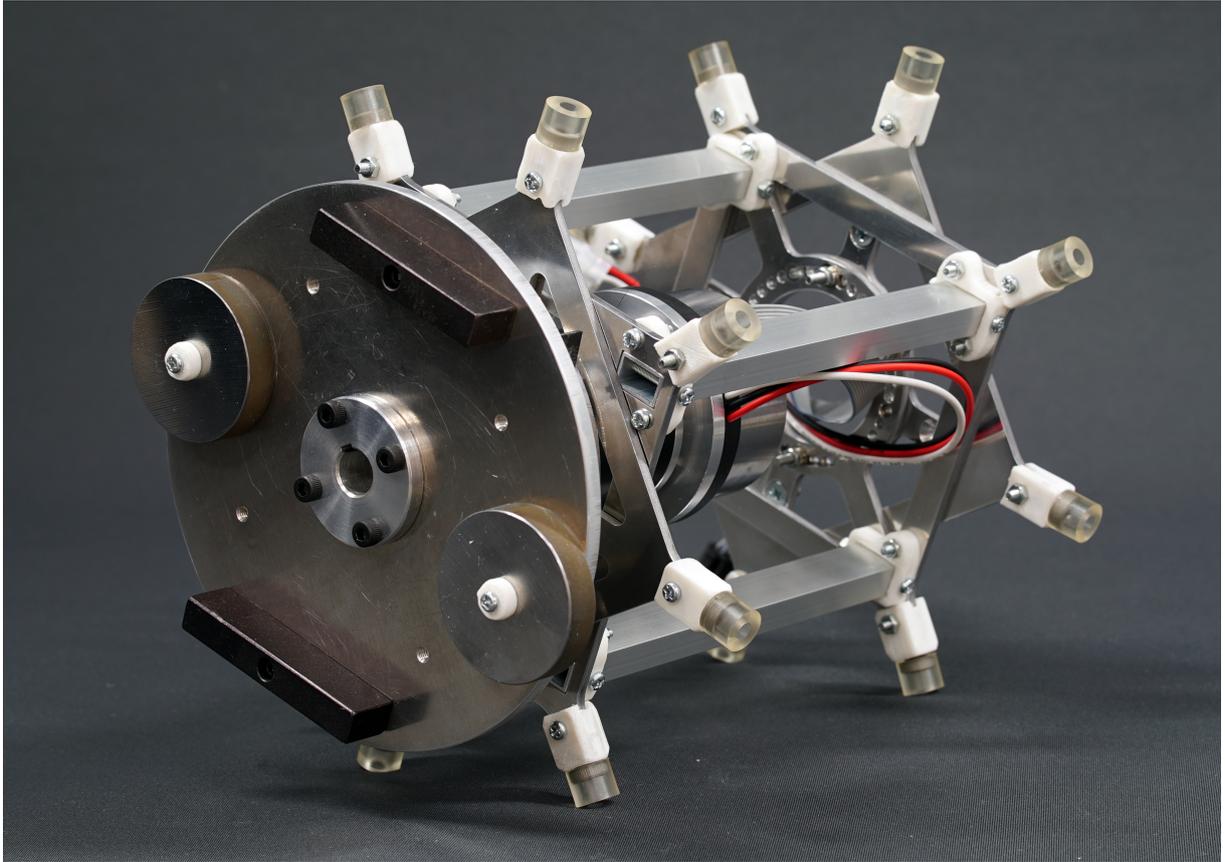


図 3.2: 実験機

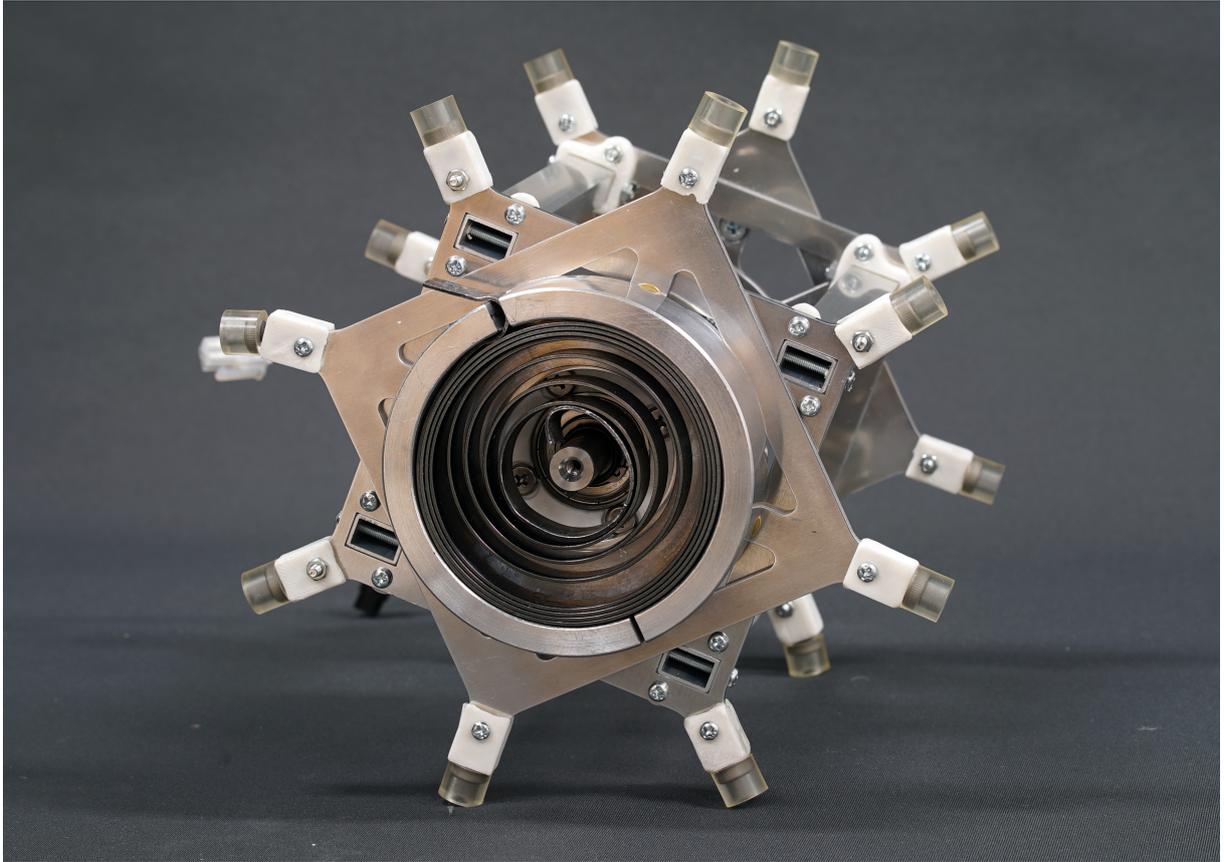


図 3.3: 実験機に備わるゼンマイばね

## 第4章 実験機を用いた実験的検証

本章では第3章にて開発した実験機を用い、解析結果の妥当性評価のために行った実機実験について述べる。

まずは、実験機の歩幅を等間隔とした状態にて実験を行った。リアクションホイールを駆動させるモータへの入力には近似的に正弦波を用いた。その正弦波の振幅、周波数を変更することにより、歩行を試みた。その際にモータへ印加した入力信号を図4.1, 4.2に示す。またその様子を図4.3に示す。図4.3において実験機は左から右へと歩行を行っている。また、実験機のパラメータを表4.1に示す。

実験の手法としては、実験機が移動できないように固定した状態でリアクションホイールを動作させたのち、適切なタイミングで実験機を開放させることで、ステルス歩容が行われているか評価した。この実験機を開放させるタイミングを変化させることで適切なタイミングを求める。ステルス歩容が行われているかの確認手法については、遊脚接地時の実験機を観察し、振動や衝突音の発生の有無から判断した。その結果、3歩のみであるがステルス歩容の傾向を確認することができた。また歩行時の実験機の色度や角速度についても計測を行ったが、モータからの電磁ノイズの影響を強く受けることによりデータを取得することができなかった。

表 4.1: 実験機の物理パラメータ

$m$	2.3	kg
$l$	0.1	m
$I$	0.01	kg · m <sup>2</sup>
$\alpha_1$	$\pi/4$	rad
$\alpha_2$	$\pi/4$	rad
$k$	9.5	N · m/rad

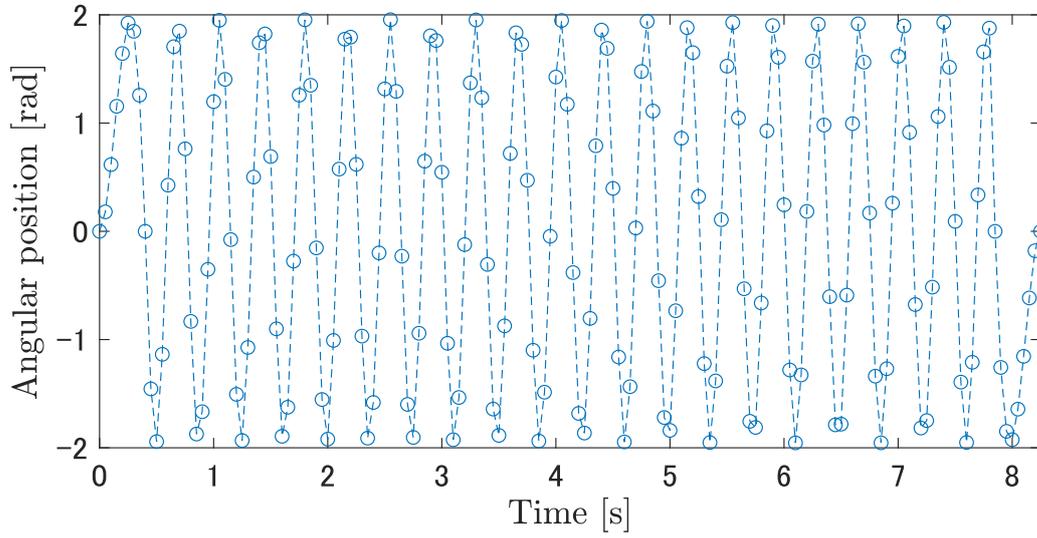


図 4.1: モータへの入力 (角度)

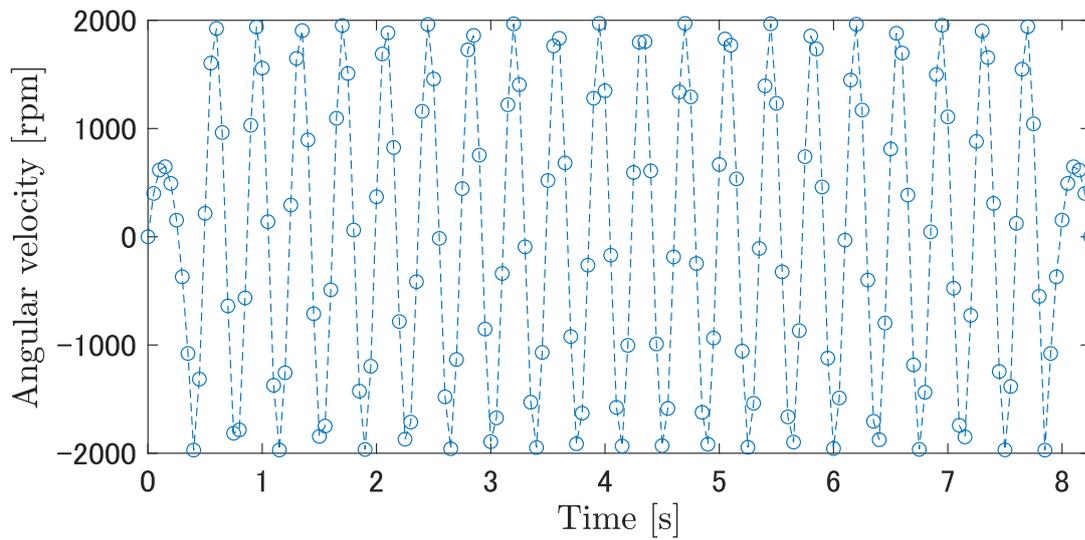


図 4.2: モータへの入力 (角速度)

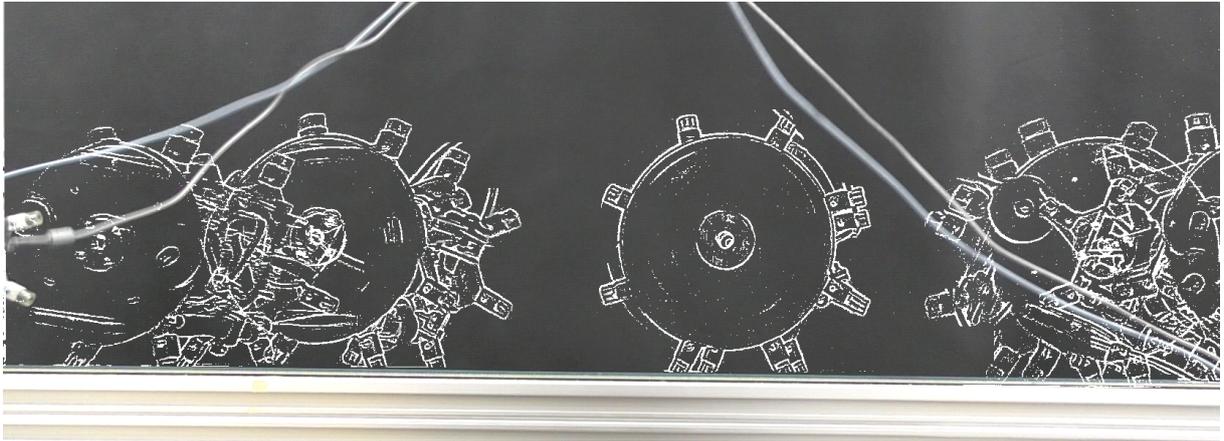


図 4.3: 実験機によるステルス歩行の実験

# 第5章 結論

## 5.1 結論

本研究では、歩行の移動効率向上を目的に弾性要素を備えた歩幅が等間隔でないリムレスホイールのステルス歩容生成を行った。また開発した実験機による実験を行い、ステルス歩行の傾向を確認した。

数値シミュレーション上での検証と開発した実験機による実証実験の結果、以下のような結果と知見を得ることができた。

- リムレスホイールとリアクションホイール間に弾性要素を備え、異なる2つの股角度を有するモデルについて数学モデルを導出した。
- 本モデルの制御にDODCを適用し、支持脚接地点まわりに発生する垂直床反力の最小値がゼロとなるよう最短時間制御を行うことにより、高効率な歩容生成法を提案した。
- 2周期の歩容であっても $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2$ の拘束条件下であるため、同一の制御入力であることを証明した。
- リムレスホイールとリアクションホイールとの間に弾性要素を追加することで歩行の移動効率を向上させることができ、最も効率的な弾性係数を確認した。
- 股角度 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ を変化させることにより移動効率を変化させ、最も効率的な股角度を確認した。
- 本モデルの仕様を満たす実験機を開発した。
- 実験機による実験を行い、ステルス歩行の傾向を確認した。

## 5.2 今後の課題

本研究では、2つの股角度を有するリムレスホイールのステルス歩容生成を行った。しかしこれは、 $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2$ の拘束の下行われたものである。今後はこの拘束のない条件下でのステルス歩容生成や、3つ以上の股角度を有するリムレスホ

イールのステルス歩容生成や，歩行時であっても常に股角度が変更可能な実験機の開発・実験に取り組みたい．また，ステルス歩行の実現に向けた更なる実機検証が必要であると考え．今後は実験機の角速度や消費電力データの収集および弾性係数の変化による消費電力の変化を測定することで，より客観的なステルス歩容生成の確認や弾性係数による移動効率の比較を行う予定である．さらに，股角度を任意の角度に変化させた状態での同様の実験も行いたい．

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導に加え様々なご支援を賜りました浅野文彦准教授に心より御礼申し上げます。研究についての的確なアドバイスや貴重なご意見を戴いた，Ho先生，上原先生，平石先生，緒方先生に心より感謝申し上げます。実機開発において部品加工をして戴いた工作室の仲林氏に厚く御礼申し上げます。更に，研究や生活において意見や協力を戴いた西原正継氏をはじめとする浅野研究室の学生，友人にも厚く感謝申し上げます。また，生活を支えて貰った家族にも感謝いたします。

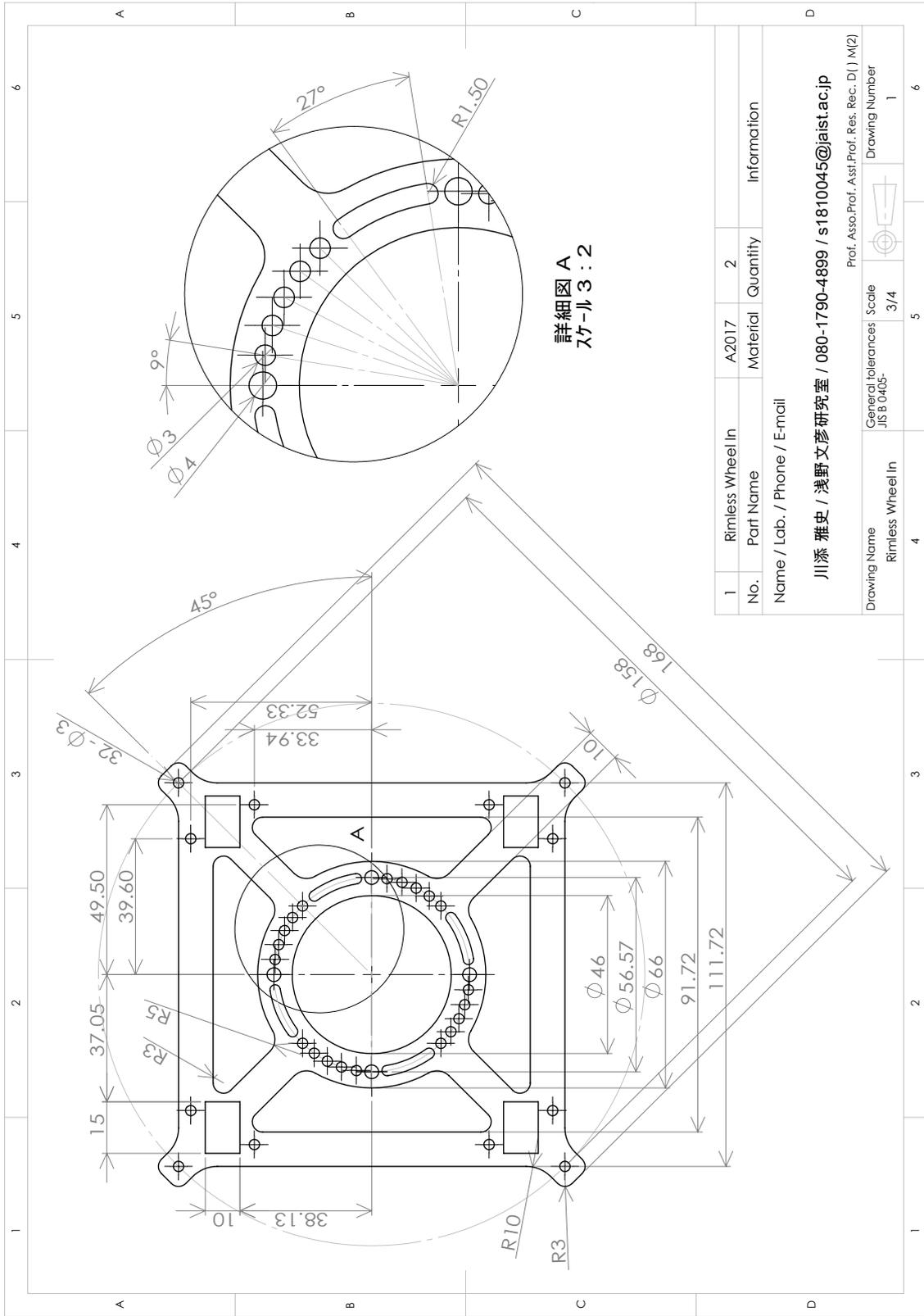
## 参考文献

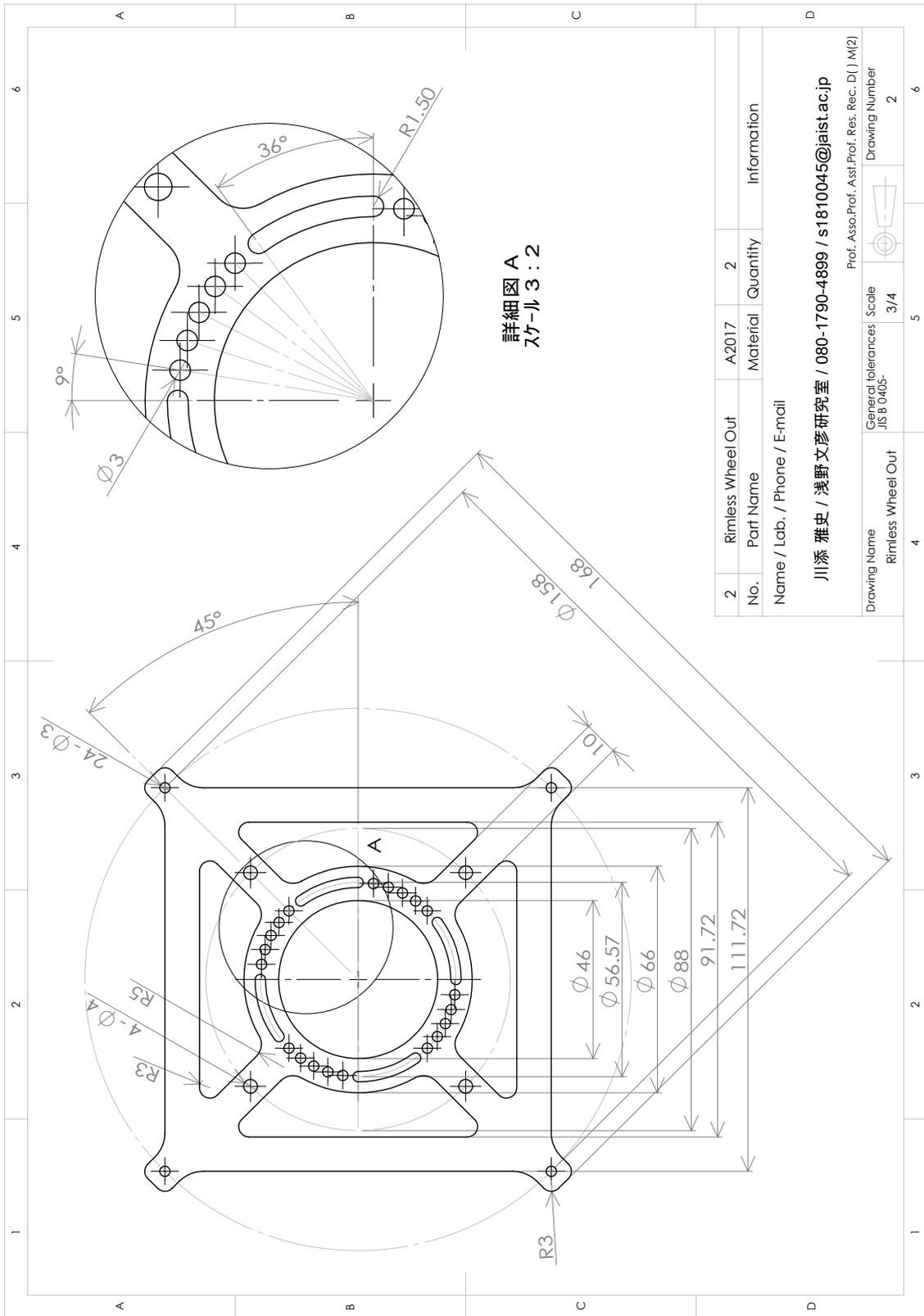
- [1] 浅野文彦, “運動エネルギーの観点から見た2周期歩容の性能と最適性”, システム制御情報学会論文誌, Vol.23, No.9, pp.197-206, (2010)
- [2] 浅野文彦, “弾性効果を利用した水平面上の受動歩行”, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 1A1-04, pp. 8-11, (2017)
- [3] F. Asano, “Stealth walking with reduced double-limb support phase and its extension to careful legged locomotion,” *Multibody System Dynamics*, Vol. 44, Issue 4, pp. 421–447, (2018)
- [4] M. Rostami and G. Bessonnet, “Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1385–1391, (1998)
- [5] W. Blajer and W. Schiehlen, “Walking without impacts as a motion/force control problem,” *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, Issue 4, pp. 660–665, (1992)
- [6] F. Asano, Y. Zheng, and X. Xiao, “Time-Scale Control Approaches to Collisionless Walking of an Underactuated Rimless Wheel,” *Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 3, (2017)
- [7] F. Asano and X. Xiao, “Output deadbeat control approaches to fast convergent gait generation of underactuated spoked walker,” *Proc. of the IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII)*, pp. 265–270, 2012.
- [8] 津村幸治, 森田洋, 齋藤義夫, “連続時間  $\mathcal{H}_\infty$  制御系の有限時間整定”, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.1, pp.13-19, (1998)

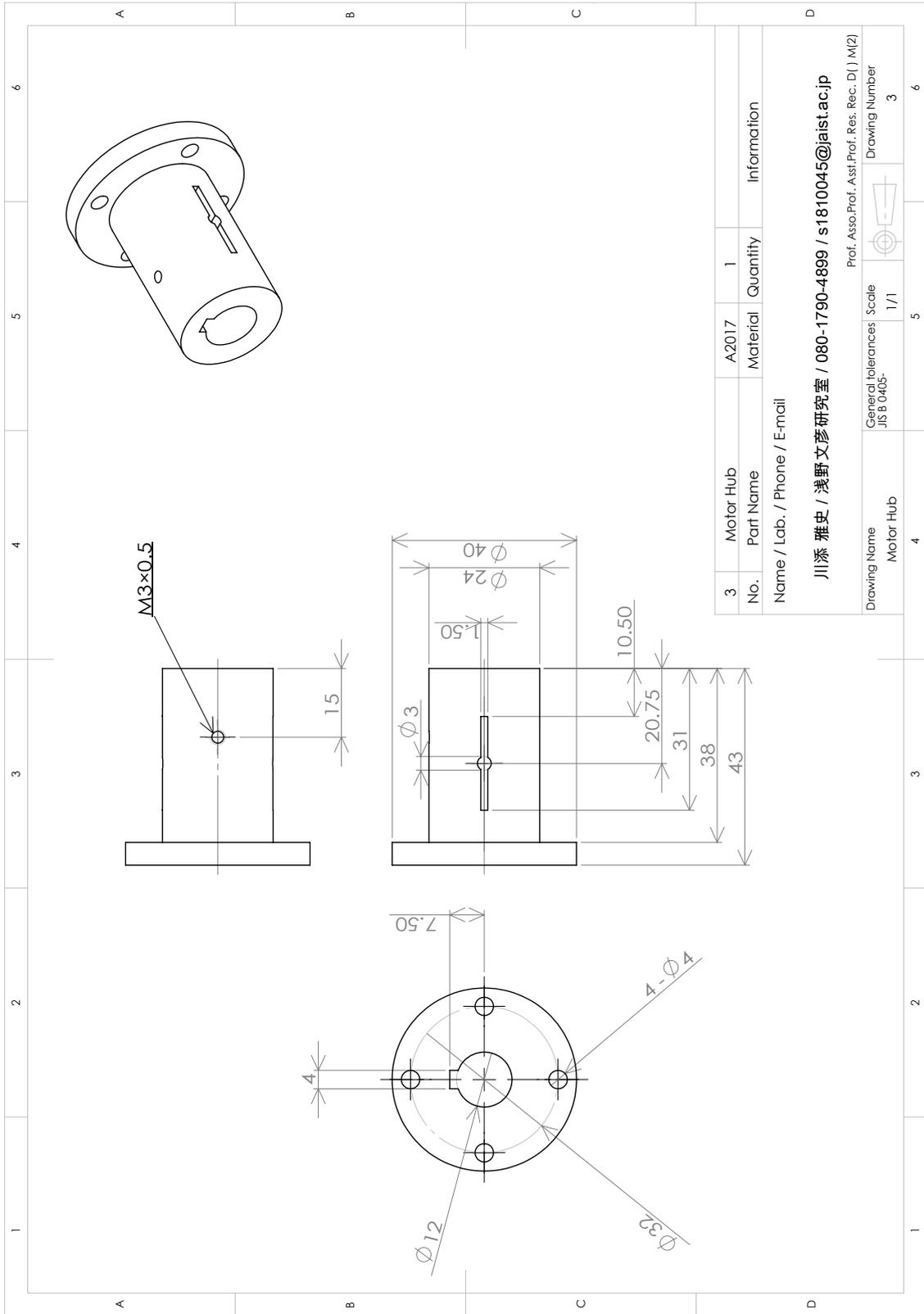
# 付録

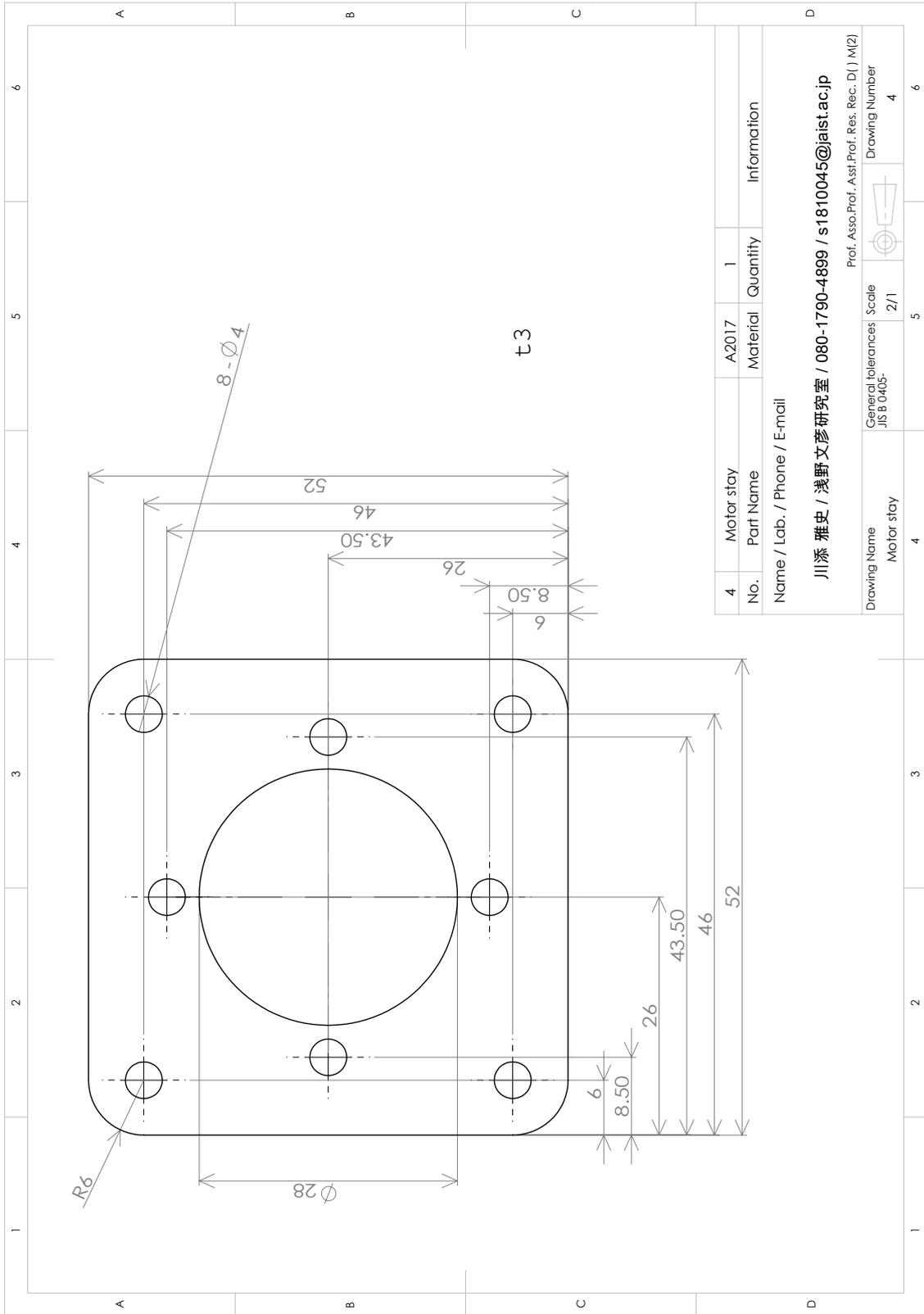
実機の図面

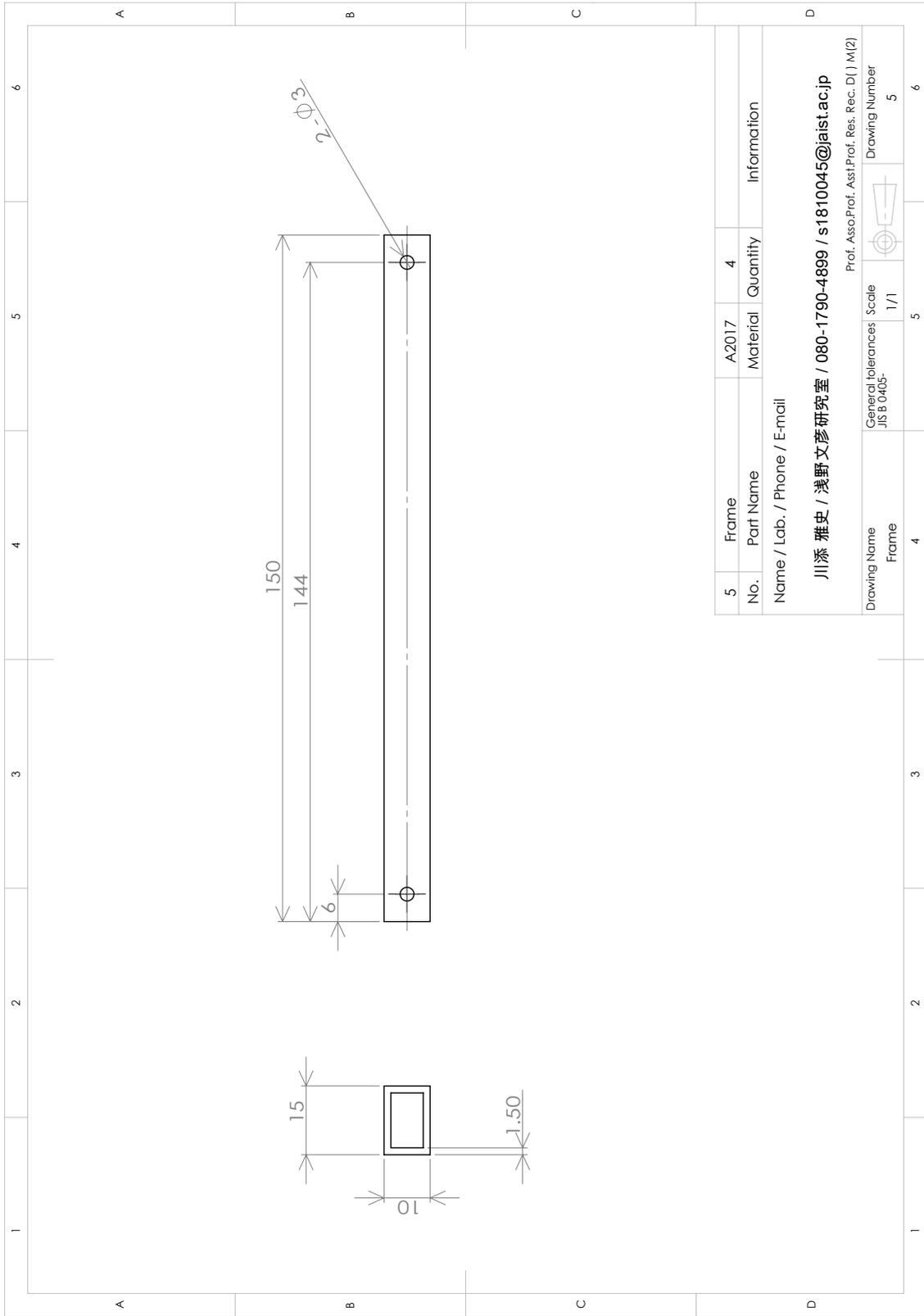
付録として、実験で用いた実機の図面を添付する。

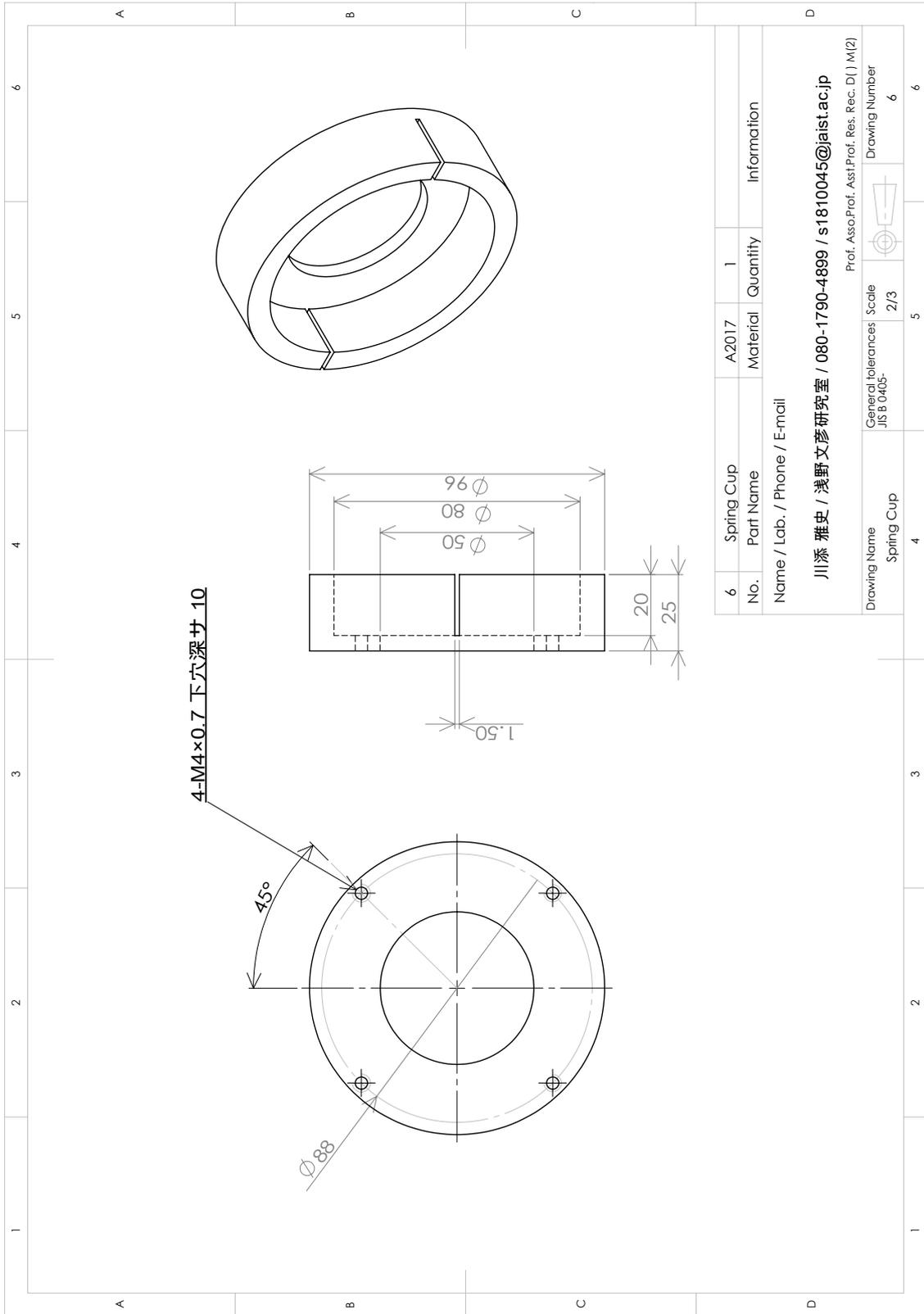












6	Spring Cup	A2017	1	Information
No.	Part Name	Material	Quantity	
Name / Lab. / Phone / E-mail				
川添 雅史 / 浅野文彦研究室 / 080-1790-4899 / s1810045@jaist.ac.jp				
Prof. Asso.Prof. Ass.Prof. Res. Rec. D   M(2)				
Drawing Name	Spring Cup	General Tolerances	Scale	Drawing Number
		JIS B 0405	2/3	6

