

Title	早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットの低摩擦路面上における前進運動生成と解析
Author(s)	西原, 正継
Citation	
Issue Date	2018-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/15194
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットの 低摩擦路面上における前進運動生成と解析

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科

西原 正継

2018 年 3 月

修 士 論 文

早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットの 低摩擦路面上における前進運動生成と解析

主指導教官 浅野 文彦

審査委員主査 浅野 文彦

審査委員 前園 涼

審査委員 HO Anh-Van

審査委員 平石 邦彦

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]

1610144 西原 正継

提出年月: 2018 年 2 月

概 要

本研究の目的は、円弧形状の身体表面が床面と滑り接触をするロボットの運動について解析を行うこと、およびその新しい移動形態への応用を検討することである。本論文では、半円形状をした本体フレームとその内部に取り付けた早戻りリンク機構から構成される劣駆動移動ロボットのモデルを考え、揺動質量を任意の周波数で駆動させることにより、低摩擦路面上で前方向への運動生成を試みる。また、それについての周波数特性および物理パラメータの変化に伴う移動性能の変化傾向を解析することで、その運動特性を明らかにする。加えて、考案したモデルの仕様に基づいた実験機を開発し、これを用いた実験によって解析結果の妥当性を検証する。最後にこれらを踏まえて、当該ロボットの移動制御に関して考察を行うとともに、研究を通して確認された課題について議論する。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	数学的モデル化	4
2.1	モデリングおよび運動生成	4
2.2	数学モデルの導出	6
2.2.1	運動方程式	6
2.2.2	ホロノミック拘束力項	6
2.2.3	動摩擦力項	7
2.2.4	ラグランジュの未定乗数ベクトル λ	8
2.2.5	出力追従制御系設計	9
2.2.6	全力学的エネルギー	9
第3章	運動生成と解析	11
3.1	運動生成	11
3.1.1	初期値およびパラメータ設定	11
3.1.2	早戻りリンク機構の揺動動作	12
3.1.3	摺動および回転運動	14
3.2	パラメトリック解析	18
3.2.1	ω および揺動質量の影響	18
第4章	実験機開発及び環境構築	20
4.1	試作機の概要	20
4.1.1	身体フレームおよび機構設計	20
4.1.2	制御回路	23
4.2	実験環境構築	25
4.2.1	摩擦係数調整	25
4.2.2	データ収集環境	27

第 5 章	実験的検証	29
5.1	実機実験	29
第 6 章	前進運動生成に関する考察	37
6.1	前進運動を生成する要素	37
6.2	ロボット本体の回転運動による前進運動生成に関する考察	37
6.2.1	フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットのモデリング	37
6.2.2	フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットの運動生成	40
6.3	早戻りリンク機構を用いた劣駆動移動ロボットの回転運動に関する周波数 解析	43
第 7 章	結論	46
7.1	結論	46
7.2	今後の予定	47
付録 A		51
付録 B		54

第1章 序論

1.1 研究背景

一般に、多様な環境への適応は実用的な移動ロボットには必要な能力であるが、中でも低摩擦路面は特に適応が難しい路面環境の1つであると言える[1-3]。低摩擦路面上では、路面との摩擦によって推進力を得るような直接的な駆動力の印加では移動制御が困難であることが知られている。低摩擦路面上での安定した移動制御をするために間接的な駆動力印加を行う劣駆動システムによる移動制御方法が考えられる。このような劣駆動システムに関する基礎研究として、内部揺動を利用した劣駆動移動システムに関する研究は過去に行われており、定常的な前進運動生成が可能であることが示されている[4-6]。しかし、現在までに当該システムを応用した移動機構を搭載したロボットが産業に利用されたことはほとんどなく、その研究は数値演算的、もしくは実験的な運動生成の観測に留まっている。その理由として、当該システムでは路面と移動制御機構の間に存在する非線形要素による移動制御の難しさと低エネルギー効率が挙げられる。

この問題を解決すべく、清野らは半円形状をした身体フレームとその内部の揺動質量から構成されるシンプルな劣駆動ロボットについて斜面上での運動生成に関する基礎的考察が行った[7]。当該先行研究においては、数値解析および実験的検証を通して、高摩擦条件下で斜面下方向への運動生成ならびにその運動速度の制御が可能であることが示された。この研究結果は、内部の揺動質量を利用した間接励起によって安定した運動生成が可能であること、および接触点の揺動を積極的に利用した新たな移動ロボットの実現可能性を示唆している。

これらを踏まえ本研究では、ロボットの身体表面が床面と滑り接触をする場合の低摩擦路面上での運動について理解を深めるとともに、接触点の揺動を積極的に利用した新たな移動ロボットの運用範囲の拡大を図る。提案するロボットは、半円形状をした身体フレームとその内部に取り付けられた早戻りリンク機構から構成される。これは揺動質量の揺動が生み出す力学的特性を利用して低摩擦水平面上での目標運動方向への移動を実現するものである。本研究では、当該モデルを用いて、システムパラメータに対する運動特性の基本的な変化傾向を明らかにする。

加えて、解析結果を基に、揺動質量によって発生する力、本体フレームの回転運動および接地点の揺動というダイナミクスの支配的関係についても明らかにしていく。また、実験機を用いた理論的結果の妥当性について検証を行う。さらに、数値解析および実験的検証の結果を踏まえ、移動効率の向上に有利な劣駆動制御系の設計について考察を行う。

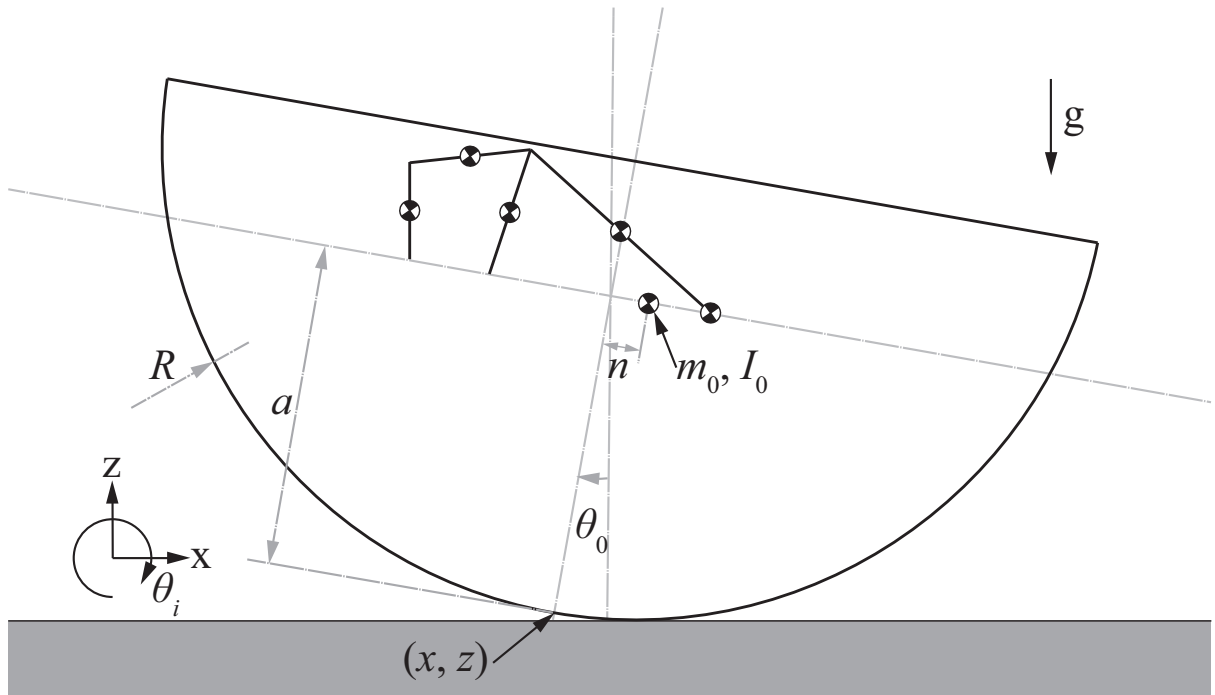


図 1.1: 早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットのモデル

1.2 研究目的

清野らの先行研究において、半円形状をした身体フレームとその内部の揺動質量から構成されるシンプルな劣駆動ロボットについて高摩擦条件下で斜面下方向への運動生成ならびにその運動速度の制御が可能であることが示された。当該研究結果は、内部の揺動質量を利用した間接励起によって安定した運動生成が可能であるところを示唆している。また、類似した先行研究の中には、内部の揺動質量を用いた目標運動生成を可能とするものがあるが、それらは移動効率が低いものや安定した移動が難しいものが多いために新たな移動形態に応用できるものではない [4-6]。

これを踏まえ本研究では、ロボットの身体表面が床面と滑り接触をする場合の低摩擦路面上での運動について理解を深めるとともに、接触点の撓動を積極的に利用した新たな移動ロボットの運用範囲の拡大を図る。提案するロボットは、半円形状をした身体フレームとその内部に取り付けられた早戻りリンク機構 [8] から構成される（図 1.1 参照）。これは揺動質量の揺動が生み出す力学的特性を利用して低摩擦水平面上での目標運動方向への移動を実現するものである。本研究では、当該モデルを用いて、システムパラメータに対する運動特性の基本的な変化傾向を明らかにする。

加えて、解析結果を基に、揺動質量によって発生する力、本体フレームの回転運動および接地点の撓動というダイナミクスの支配的関係についても明らかにしていく。また、実験機を用いた理論的結果の妥当性について検証を行う。さらに、数値解析および実験的検

証の結果を踏まえ、移動効率の向上に有利な劣駆動制御系の設計について考察を行う。

本研究により、移動時の内部揺動と摺動の役割を数学的に理解することで、低摩擦路面上における滑りと移動の関係について理解を深め、当該路面における移動のメカニズムの解明に繋げることができると期待される。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて7章から構成される。第2章では、早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットについて概要を示し、数学モデルを導出する。第3章では、第2章で導出した数学モデルを用いて、ロボットの各パラメータを変更し、その運動特性について解析する。第4章では、当該ロボットの実機開発および環境構築について説明する。第5章では、開発した実験機を使用し、理論的結果の妥当性を評価するための実機実験を行う。加えて、その結果を踏まえてロボットの移動形態について考察を行う。第6章では、数値的解析および実験の結果から得られた知見を基に、移動性能を向上させる制御方法について議論する。第7章では、本論文の内容について総括するとともに、本研究を通して明らかとなった課題を示す。

第2章 数学的モデル化

本章では、早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットのモデリングや数学モデルを導出し、その運動生成について概要を示す。

2.1 モデリングおよび運動生成

図 1.1 に本研究で扱う劣駆動移動ロボットのモデルを示す。また、本研究で扱う早戻りリンク機構のモデルについては、図 2.1 に示す。ロボットは半径 R [m] の半円形状をしたフレームから成る本体と早戻りリンク機構によって駆動される揺動質量から構成される。早戻りリンク機構が生成する運動の概要は図 2.2 に示す。揺動質量を早戻りリンク機構によって駆動させることで、動摩擦係数 μ_0 [-] の水平面上を低摩擦条件下で滑りながら前進する。なお、図 1.1 に示すように、 (x, z) は本体フレーム下側に固定された位置座標であり、早戻りリンク機構の各リンクは $link_i$ とする。また、 θ_0 [rad] は本体フレームの鉛直方向に対する絶対角度、 θ_i [rad] は各リンクの水平方向に対する絶対角度である。加えて、 (x, z) と本体の重心位置までの垂直方向の長さを a [m]、水平方向の長さを n [m]、 $link_1$ の固定節と本体の重心位置までの長さを b [m] とし、各リンクの長さを l_i [m] とする。その他のパラメータとして、本体質量を m_0 [kg]、各リンク質量を m_i [kg]、揺動質量を m_5 [kg] とし、それらの重心周りの慣性モーメントを I_i [kg·m²] とする。

当該ロボット内部に取り付けられた早戻りリンク機構の $link_1$ は一つのアクチュエータによって接続されており、アクチュエータに回転トルク u [N·m] を印加することにより動作する。当該ロボットの運動は以下の手順で生成される。

1. アクチュエータに回転トルクを印加し、早戻りリンク機構によって揺動質量を駆動させる。
2. 揺動質量の引き込み効果により、ロボット本体が Y 軸回りに回転運動、 X 軸方向に直動運動を生成する。
3. 水平面上を滑りながら前進もしくは後退する。

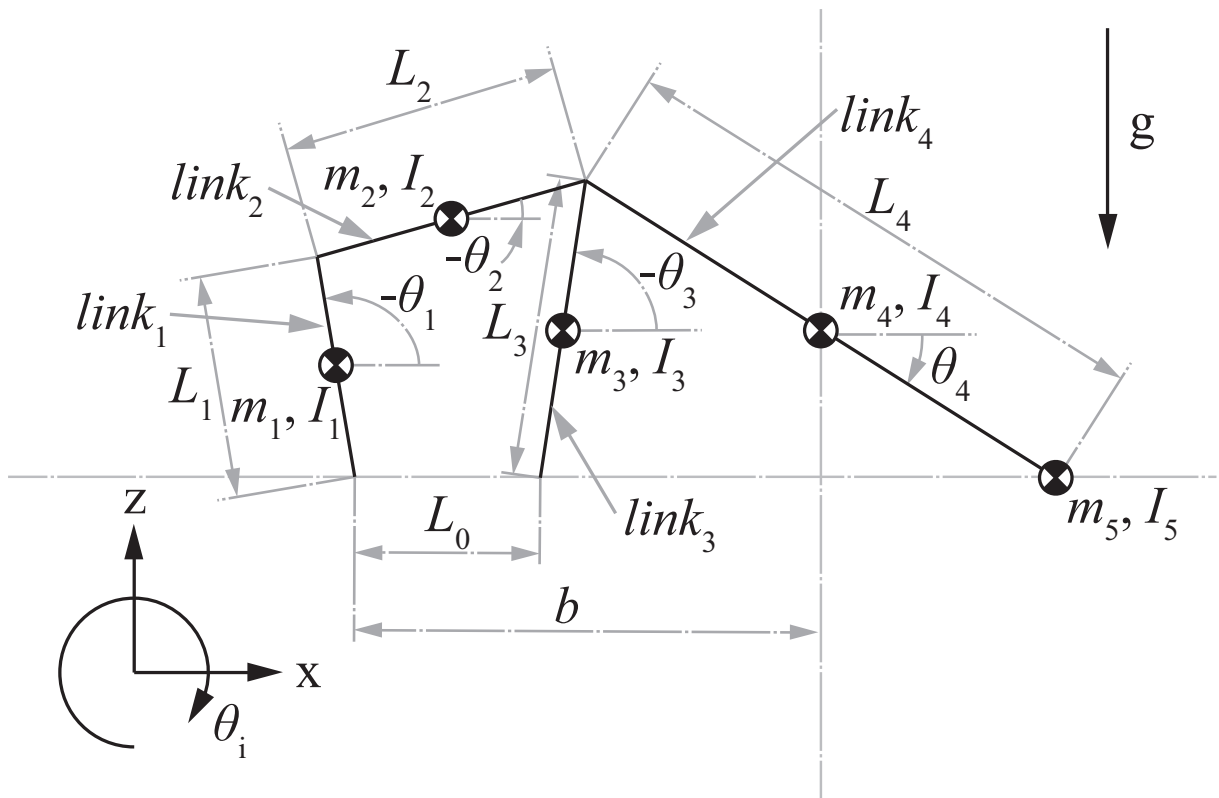


図 2.1: 早戻りリンク機構のモデル

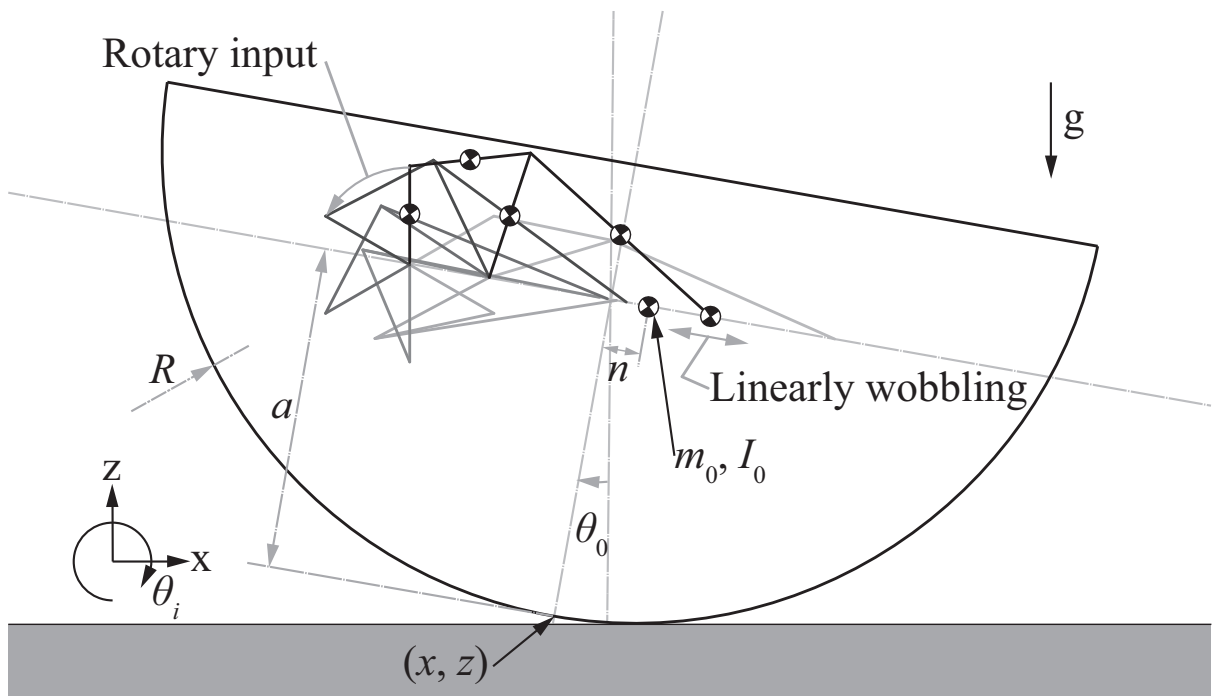


図 2.2: 早戻りリンク機構の運動の概要

2.2 数学モデルの導出

2.2.1 運動方程式

まず、ロボットの一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_0 & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{bmatrix}^T$ とするとロボットの運動方程式は、

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{S}u + \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{J}_\mu^T\boldsymbol{\lambda} \quad (2.1)$$

となる。左辺各項の詳細は付録の式 (A.1 -A.23) および式 (A.40) に示す。また、式 2.1 の右辺の第 1 項はホロノミック拘束力項、第 2 項は動摩擦力ベクトル、第 3 項は制御入力ベクトルを表す。

2.2.2 ホロノミック拘束力項

本研究では、早戻りリンク機構の全リンクを剛体とし、リンク間の接合は摩擦ゼロと仮定する。これより、当該条件のもとホロノミック拘束力項を導出する。まず、早戻りリンク機構を $link_1$ と $link_2$ から成るリンクと $link_3$ と $link_4$ から成るリンクの 2 つのリンクから構成された機構と想定する。この想定のもとで早戻りリンク機構が所望の運動を生成するためには、次の 2 つの拘束条件を満たす必要がある。

1. $link_2$ の先端と $link_3$ の先端は、 X 、 Z 軸方向共に同じ速度で運動する。
2. $link_4$ の先端（揺動質量）は本体角度 θ_0 に対して垂直を成す軸に沿って運動する。

1 の拘束条件は $link_2$ および $link_3$ の先端位置座標を 1 階微分することで、

$$L_0S_0 + L_3S_3 = L_1S_1 + L_2S_2 \quad (2.2)$$

$$L_0C_0 + L_3C_3 = L_1C_1 + L_2C_2 \quad (2.3)$$

と表すことができ、これを整理することで次の速度拘束条件を得る。

$$L_0S_0 - L_1S_1 - L_2S_2 + L_3S_3 = 0 \quad (2.4)$$

$$-L_0C_0 + L_1C_1 + L_2C_2 - L_3C_3 = 0 \quad (2.5)$$

ただし、本論文では式簡略化のため、 $\sin \theta_i$ 、 $\cos \theta_i$ 、 $\tan \theta_i$ はそれぞれ S_i 、 C_i 、 T_i とおいた。また、2 の拘束条件は揺動質量の位置座標を (x_5, z_5) と定義することで、

$$z_5 = x_5T_0 \quad (2.6)$$

と表せる。ここで定義した座標位置 (x_5, z_5) は次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b - L_0)C_0 + L_3C_3 + L_4C_4 \\ (b - L_0)S_0 - L_3S_3 - L_4S_4 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

式 (2.6) に式 (2.7) を代入し、1 階微分することで、

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_0(b - L_0)(C_0 + S_0T_0) - \dot{\theta}_0((b - L_1)C_0 - L_3C_3 - L_4C_4)\sec^2\theta_0 \\ - \dot{\theta}_3L_3(C_3 + S_3T_0) - \dot{\theta}_4L_4(C_4 + S_4T_0) = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

という速度拘束条件を得る。加えて、ロボットの身体の接地位置座標を (x_c, z_c) とおくと、ロボットの身体が床面に沿って回転しながら移動するという Z 軸方向の双方向拘束条件は次式で求まる。

$$\begin{aligned} \dot{z}_c &= 0 \\ \dot{z} - RS_0 &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

ただし、 (x_c, z_c) は次のように求まる。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + RS_0 \\ z + R & C_0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

式 (2.9), (2.4), (2.5), (2.8) をまとめることで、ホロノミック拘束項のヤコビアン $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{4 \times 7}$ が、

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -RS_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0S_0 & -L_1S_1 & -L_2S_2 & L_3S_3 & 0 \\ 0 & 0 & -L_0C_0 & L_1C_1 & L_2C_2 & -L_3C_3 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 & 0 & 0 & J_2 & J_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (2.11)$$

と定まる。ただし、

$$\begin{aligned} J_1 &:= -(b - L_0)(C_0 + S_0T_0) + ((b - L_1)C_0 - L_3C_3 - L_4C_4)\sec^2\theta_0 \\ J_2 &:= L_3(C_3 - S_3T_0) \\ J_3 &:= -L_4(C_4 + S_4T_0) \end{aligned}$$

とおいた。

2.2.3 動摩擦力項

本研究で扱うロボットの身体は半円形状をしているため、その接地点は運動生成中は常に動いている。それゆえ、本研究では常に動摩擦条件下での運動と仮定し、当該仮定のもと動摩擦力項を導出する。

式 (2.11) から、ロボットが受ける床反力は λ_{11} [N] であることがわかる。これより、 XZ 平面における動摩擦力は、動摩擦係数 μ を用いて表すと $\mu\lambda_{11}$ となる。これを三次元空間

に拡大して外積演算を行うことで、一般化座標系への等価交換が

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_c - x \\ y_c - y \\ z_c - z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mu \lambda_{11} &= \begin{bmatrix} RS_0 \\ 0 \\ R(C_0 - 1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mu \lambda_{11} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ R(C_0 - 1) \\ 0 \end{bmatrix} \mu \lambda_{11} \end{aligned} \quad (2.12)$$

となる。これらをまとめることで動摩擦力項のヤコビアン $\mathbf{J}_\mu \in \mathbb{R}^{4 \times 7}$ は以下に定まる。

$$\mathbf{J}_\mu^T \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \mu & 0 & \mu R(C_0 - 1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (2.13)$$

ただし、ここで用いた動摩擦係数 μ は位置と速度の両方を含んだ関数として次のように定義した。

$$\mu = -\mu_0 \text{sign}(\dot{x}_c - R\dot{\theta}_0) = -\mu_0 \text{sign}(\dot{x} + R\dot{\theta}_0(C_0 - 1)) \quad (2.14)$$

ここで、 $\dot{x}_c = 0$ の場合もロボット本体の回転運動が生じている場合は動摩擦力は生じるため、 $R\dot{\theta}_0$ [m/s] を差し引かなければならないことに注意されたい。また、数値演算上では $\dot{x} + R\dot{\theta}_0(C_0 - 1) = 0$ 付近でチャタリングが発生するため、この回避策としてペナルティーベースの手法として次の平滑関数を用いる。

$$\mu = -\mu_0 \tanh(c(\dot{x} + R\dot{\theta}_0(C_0 - 1))) \quad (2.15)$$

ただし、 c は平滑関数の切れ味を調整するための正定数である。

2.2.4 ラグランジュの未定乗数ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$

式 (2.11) を時間微分すると、

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (2.16)$$

となり、式 (2.1) と上式より、未定乗数ベクトル $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ は次のように求まる。

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{X}^{-1}(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (2.17)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &:= \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\hat{\mathbf{J}}^T \\ \hat{\mathbf{J}} &:= \mathbf{J} + \mathbf{J}_\mu \end{aligned}$$

とおいた。本研究では、ロボットが跳躍する現象を考慮しないため、常に $\lambda_{11} \geq 0$ を必要条件とすることに注意されたい。式 (2.17) を式 (2.1) に代入して整理することで、未定乗数ベクトル λ を消去した以下の式に置き換えられる。

$$\begin{aligned} M\ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{Y}(\mathbf{S}u - \mathbf{h}) - \hat{\mathbf{J}}\mathbf{X}^{-1}\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{Y} &:= \mathbf{I}_7 - \hat{\mathbf{J}}^T\mathbf{X}^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1} \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.2.5 出力追従制御系設計

本研究では、前進運動生成を実現する方法として、早戻りリンク機構の $link_1$ を定角速度回転させることによる揺動質量の引き込み効果を利用した運動生成を試みる。

制御出力を

$$y := \mathbf{S}^T \mathbf{q} = \theta_1 - \theta_0 \quad (2.19)$$

とすると、その時間による2階時間微分は

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \mathbf{S}^T \ddot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} \left(\mathbf{Y}(\mathbf{S}u - \mathbf{h}) - \hat{\mathbf{J}}\mathbf{X}^{-1} \right) \\ &= \mathbf{A}u - \mathbf{B} \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &:= \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S} \\ \mathbf{B} &:= \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} \left(\mathbf{Y} \mathbf{h} + \hat{\mathbf{J}}\mathbf{X}^{-1} \right) \end{aligned}$$

とおいた。本研究では、次の定角速度軌道を y の目標軌道とする。

$$y_d = \omega t \quad (2.21)$$

ここで ω [rad/s] は角周波数である。 $y \rightarrow y_d$ を実現する制御入力は次のように決定される。

$$u = \mathbf{A}^{-1}(v + \mathbf{B}) \quad (2.22)$$

$$v = \ddot{y}_d + K_D(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_P(y_d - y) \quad (2.23)$$

ここで、 K_D [s^{-1}], K_P [s^{-2}] はPDゲインであり、いずれも正定数である。

2.2.6 全力的エネルギー

ロボットの全力的エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} + P \quad (2.24)$$

で求まる。ただし、

$$\begin{aligned}
P = & g \left(\sum_{i=0}^5 m_i (z + aC_0) + \left(-m_0 n + \sum_{i=1}^5 m_i b - \sum_{i=3}^5 m_i L_0 \right) S_0 - \left(\frac{m_1}{2} + m_2 \right) L_1 S_1 \right. \\
& \left. + \frac{m_2}{2} L_2 S_2 + \left(\frac{m_3}{2} + \sum_{i=4}^5 m_i \right) L_3 S_3 + \left(\frac{m_4}{2} + m_5 \right) L_4 S_4 \right) \quad (2.25)
\end{aligned}$$

は位置エネルギーである。 E の時間微分は、

$$\dot{E} = \dot{\mathbf{q}}^T (\mathbf{S}u + \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{J}_\mu^T \boldsymbol{\lambda}) = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{S}u + \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{J}_\mu^T \boldsymbol{\lambda} = \dot{y}u + \mathbf{J}_\mu^T \dot{\mathbf{q}} \boldsymbol{\lambda} \quad (2.26)$$

となる。上式の第1項は制御入力、第2項は動摩擦による力学的エネルギーの時間変化を表す。ここで、第2項を分解すると、

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_\mu^T \dot{\mathbf{q}} \boldsymbol{\lambda} &= \mu \lambda_{11} \left(\dot{x} + R\dot{\theta}_0 (C_0 - 1) \right) \\
&= -\mu_0 \lambda_{11} \left(\dot{x} + R\dot{\theta}_0 (C_0 - 1) \right) \text{sign} \left(\dot{x} + R\dot{\theta}_0 (C_0 - 1) \right) \quad (2.27)
\end{aligned}$$

となり、任意の実数 x についての関係式

$$x \cdot \text{sign} x = |x| \quad (2.28)$$

を用い、 $\mu_0 \geq 0$, $\lambda_{11} \geq 0$ であることを考慮すると次の不等式が導かれる。

$$\mathbf{J}_\mu^T \dot{\mathbf{q}} \boldsymbol{\lambda} = -\mu_0 \lambda_{11} \left| \dot{x} + R\dot{\theta}_0 (C_0 - 1) \right| \leq 0 \quad (2.29)$$

式 (2.29) の等式成立条件は、

$$\mathbf{J}_\mu^T \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2.30)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (2.31)$$

の2つである。式 (2.30) は接地点の X 軸方向速度に関するホロノミック拘束の成立条件である。それゆえ、ロボットが床反力を受けている状況で接地点の滑りが発生する限り、全力学的エネルギーは動摩擦によって常に減少し続けなければならない、ということを意味する。

第3章 運動生成と解析

本章では、第2章で導出した数学モデルを使用したシミュレーションを行い、各パラメータがロボットの運動生成に与える影響を解析する。

3.1 運動生成

3.1.1 初期値およびパラメータ設定

最初に、ロボットの運動生成について、パラメータが運動生成に及ぼす影響とその特徴を確認するため、任意のパラメータによる運動生成を行う。本章で使用する物理および制御パラメータは表 3.1 に示す。また、当該ロボットが安定する初期状態は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\mathbf{q}(0) &= \begin{bmatrix} 0 & z(0) & \theta_0(0) & \theta_1(0) & \theta_2(0) & \theta_3(0) & \theta_4(0) \end{bmatrix}^T \\ \dot{\mathbf{q}}(0) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T\end{aligned}\tag{3.1}$$

表 3.1: 物理および制御パラメータ

m_0	3.0	kg	I_2	0.001	kg·m ²	L_4	0.060	m
m_1	0.02	kg	I_3	0.001	kg·m ²	R	0.175	m
m_2	0.02	kg	I_4	0.001	kg·m ²	a	0.120	m
m_3	0.02	kg	I_5	0.010	kg·m ²	b	0.050	m
m_4	0.03	kg	L_0	0.020	m	n	0.000	m
m_5	0.10	kg	L_1	0.024	m	c	20000	
I_0	0.300	kg·m ²	L_2	0.030	m	K_D	40	s ⁻¹
I_1	0.001	kg·m ²	L_3	0.032	m	K_P	400	s ⁻²

ここで、

$$\begin{aligned}
z(0) &= R(1 - \cos(\theta_0(0))) \\
\theta_0(0) &= \theta_1(0) = -\tan^{-1}\left(\frac{x_{\text{com}}}{R - z_{\text{com}}}\right) \\
\theta_2(0) &= \pi - \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + (L_1 - L_0)^2 - L_3^2}{2L_2(L_1 - L_0)}\right) + \theta_0(0) \\
\theta_3(0) &= \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 + (L_1 - L_0)^2 - L_2^2}{2L_3(L_1 - L_0)}\right) + \theta_0(0) \\
\theta_4(0) &= \sin^{-1}\left(\frac{L_3 \sin(-\theta_3(0))}{L_4}\right) + \theta_0(0)
\end{aligned}$$

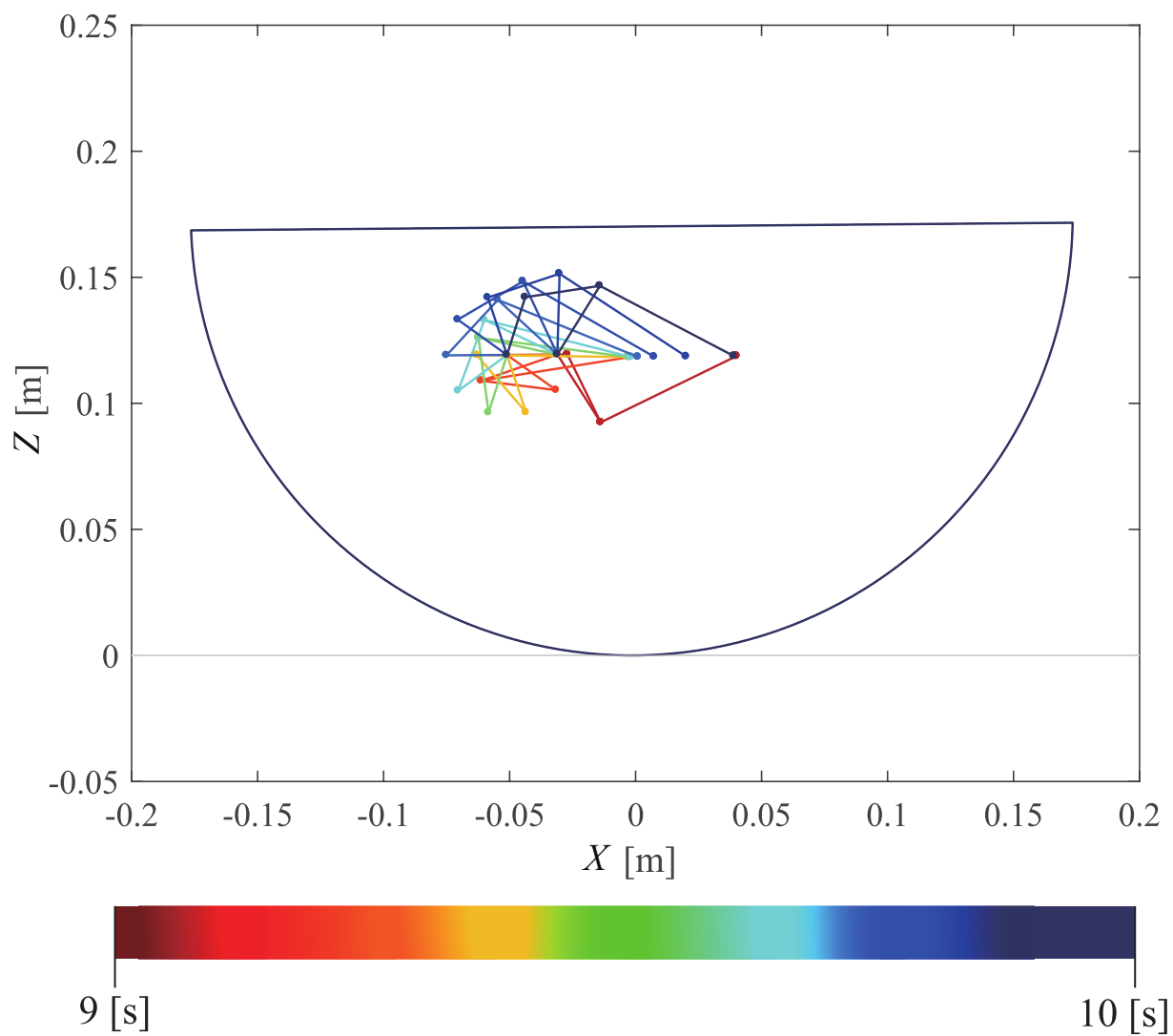
であり、 $(x_{\text{com}}, z_{\text{com}})$ は早戻りリンク機構によって移動したロボットの全重心の位置座標を表し、次式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} x_{\text{com}} \\ z_{\text{com}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=0}^5 m_i} \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^5 m_i X_i \\ \sum_{i=0}^5 m_i Z_i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

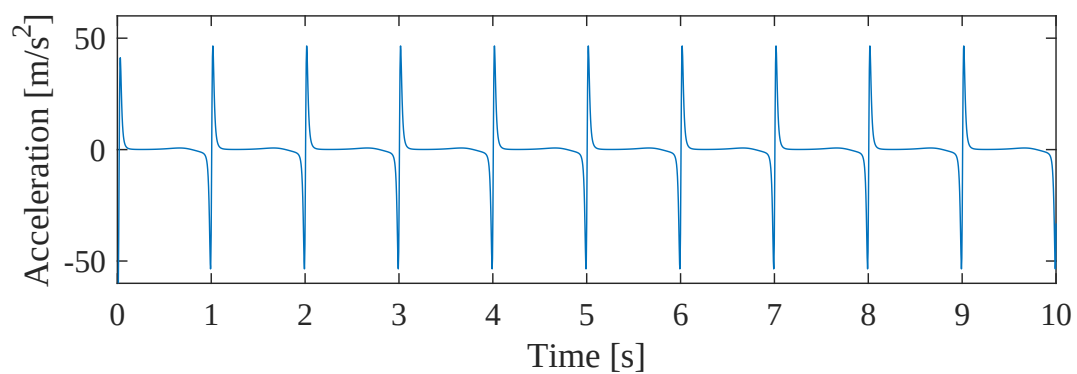
ただし、 (X_i, Z_i) は各重心の位置座標であり、それらの詳細は付録の式 (A.24 -A.35) に示す。

3.1.2 早戻りリンク機構の揺動動作

図 3.1 (a) に $\omega = 2\pi$ [rad/s]、 $9 \leq t \leq 10$ [s] とした際の早戻りリンク機構の揺動動作をスティック線図で示す。ここで、動作遷移は図下に示したカラースケールによって表す。ただし、当該線図を作る際には本体の運動を拘束するために、ホロノミック拘束項に $\dot{\theta}_0 = 0$ 、 $\dot{x} = 0$ という拘束条件を付け加えたことに注意されたい。また、当該条件で早戻りリンク機構によって生成された揺動質量の加速度の時間遷移を図 3.1 (b) に示す。早戻りリンク機構の動作は揺動質量に特徴的な加速度を生成し、当該加速度はロボットの動作に大きな影響を及ぼす。



(a) スティック線図



(b) 揺動質量の加速度の時間遷移

図 3.1: $\omega = 2\pi$ [rad/s]、 $9 \leq t \leq 10$ [s] の早戻りリンク機構の揺動動作

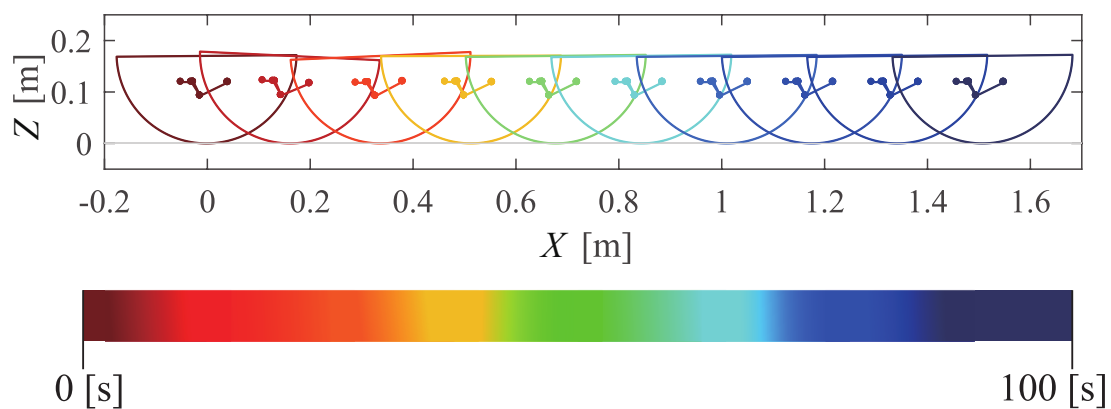
3.1.3 摺動および回転運動

図 3.2 (a)、図 3.2 (b) にそれぞれ $\omega = 6\pi$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.005$ の際の $0 \leq t \leq 100$ [s] におけるスティック線図と床反力の時間遷移を示す。ただし、動摩擦係数 μ_0 については氷上などの低摩擦路面を想定し、0.005 と設定した [9-11]。これらの結果より、早戻りリンク機構を利用した揺動質量の駆動によってロボットは安定した前進運動生成を行えることがわかる。

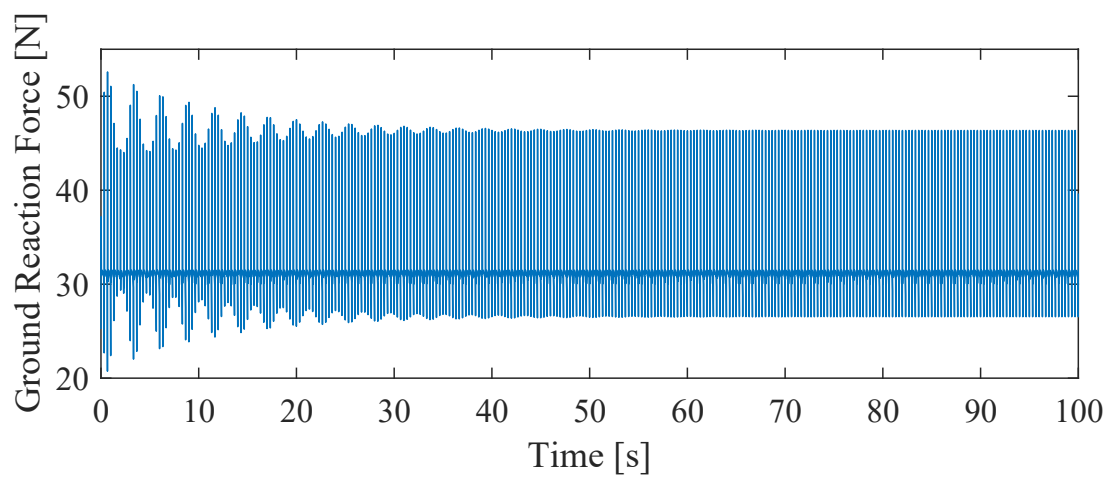
図 3.3 (a) に $\omega = \frac{2\pi}{3}$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.005$ の際の $98 \leq t \leq 99$ [s] における結果のスティック線図を示す。また、図 3.3 (b)、図 3.3 (c) にそれぞれ当該パラメータの際の $90 \leq t \leq 100$ [s] における x および θ_0 の時間遷移を示す。これらの結果より、 $\omega = \frac{2\pi}{3}$ [rad/s] 付近ではロボットの回転運動が活発になることがわかる。しかし、低周波数帯域ではロボットは前進しているが、その速度は約 0.0017 [m/s] となっておりほとんど滑りによる前進運動が生成されていないことがわかる。

次に、 $\omega = 6\pi$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.005$ の際の $98 \leq t \leq 99$ [s] における結果のスティック線図を図 3.4 (a) に、 $90 \leq t \leq 100$ [s] における x および θ_0 の時間遷移をそれぞれ図 3.4 (b)、図 3.4 (c) に示す。これらの結果より、高周波数帯域ではロボットの回転運動は減少するが、ロボットの速度は約 0.01 [m/s] と滑りによる前進運動が活発に生成されていることがわかる。

以上の結果から、早戻りリンク機構の駆動角周波数 ω [rad/s] はロボットの運動生成に大きく影響を与えることが判明した。



(a) $0 \leq t \leq 100$ [s] のスティック線図



(b) $0 \leq t \leq 100$ [s] の床反力の時間遷移

図 3.2: $\omega = 6\pi$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.05$ の摺動動作と床反力

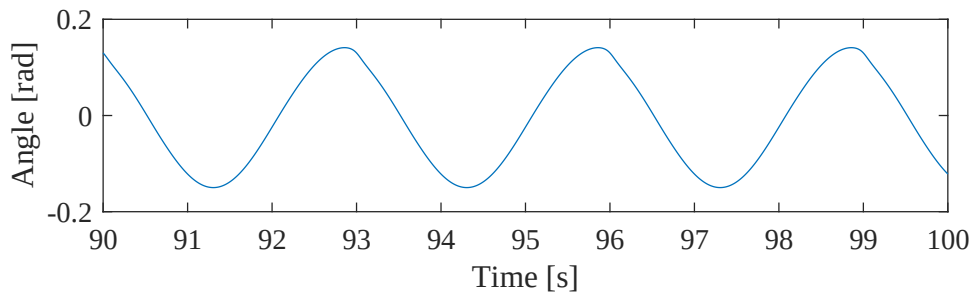
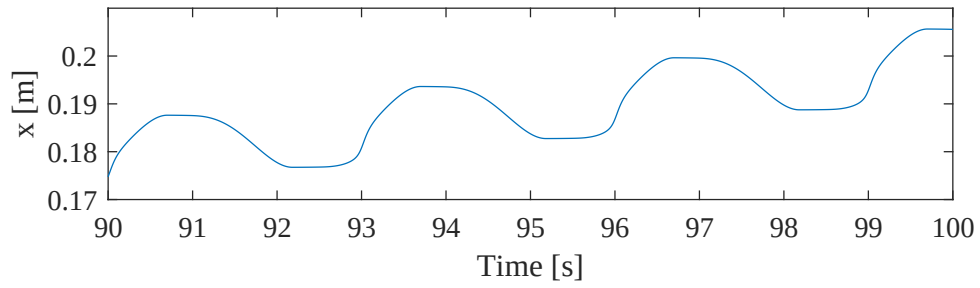
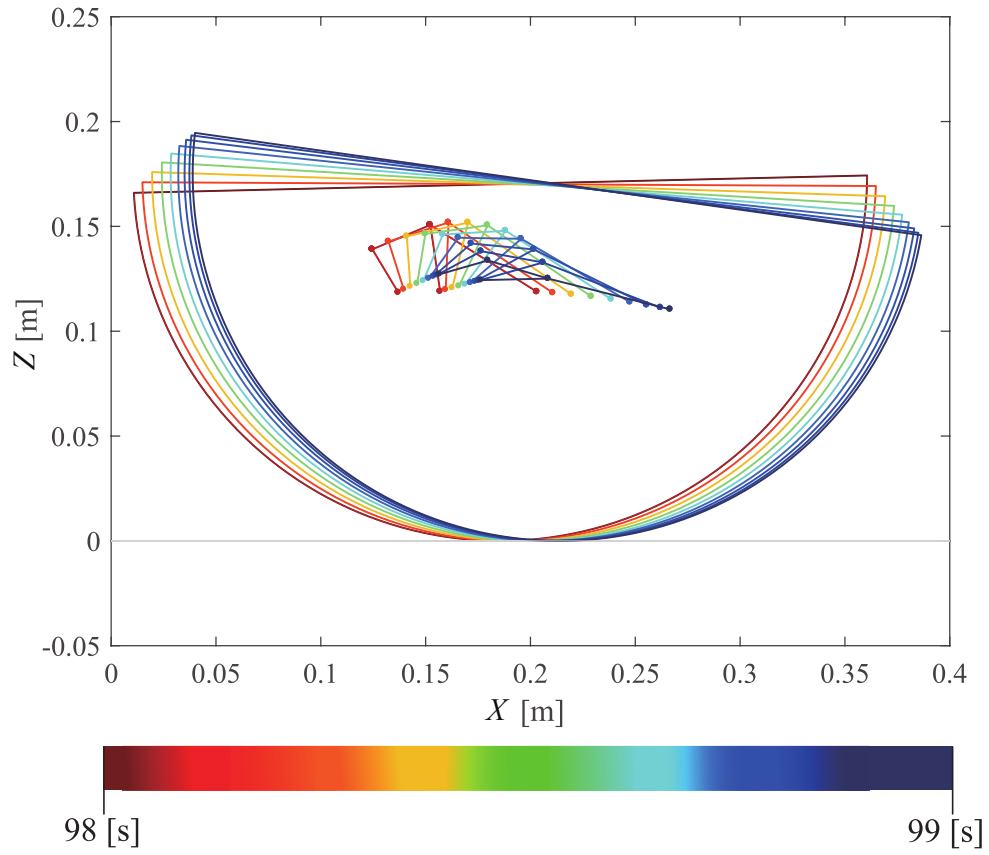


図 3.3: $\omega = 2\pi/3$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.05$ の運動生成

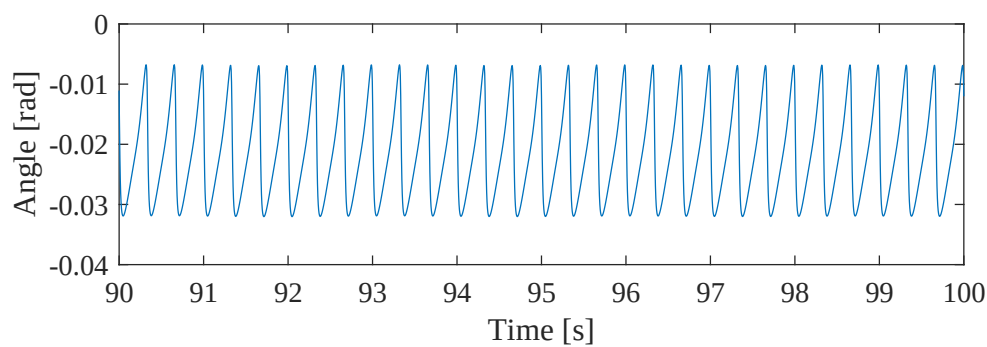
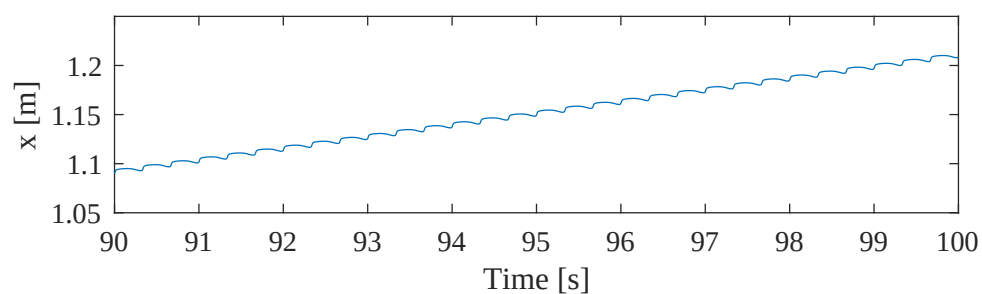
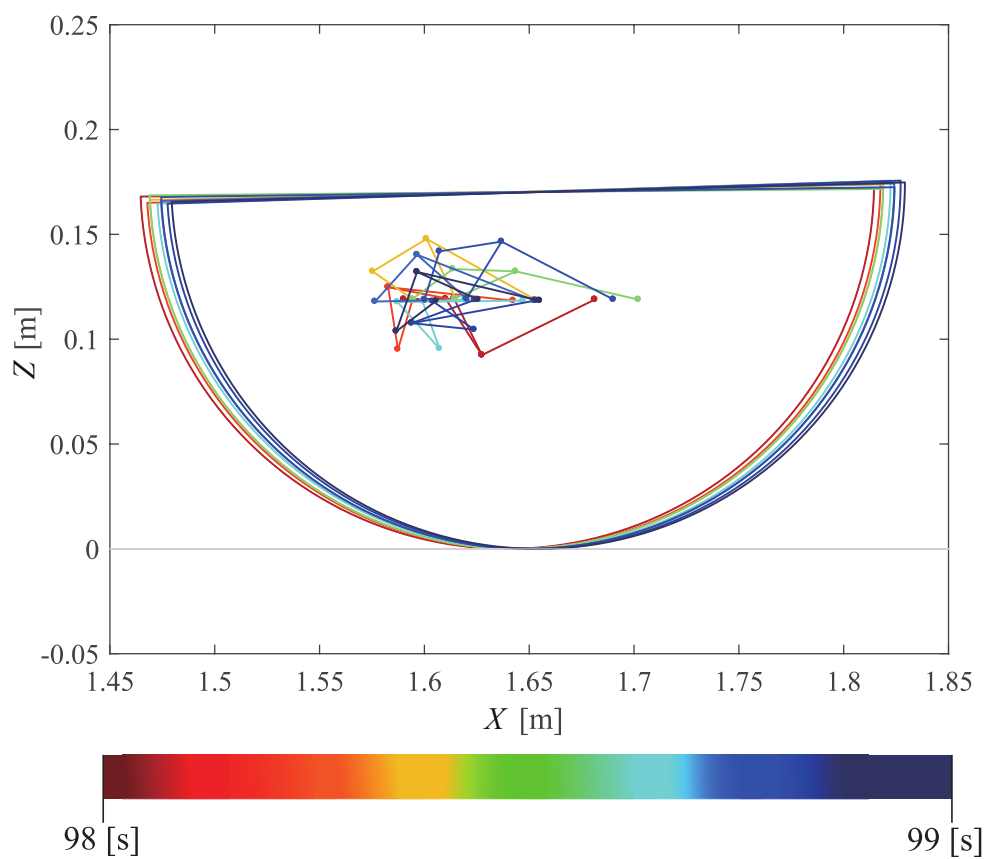


図 3.4: $\omega = 6\pi$ [rad/s]、 $\mu_0 = 0.05$ の運動生成

3.2 パラメトリック解析

3.2.1 ω および揺動質量の影響

揺動質量の駆動周波数およびその質量の運動生成への影響を調べるため、以下の手順に従い歩容パラメータを計算する。

(P1) m_5 を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 [kg]、 ω を -6π [rad/s]、 μ_0 を 0.005 に設定する。また、その他のパラメータに関しては表 3.1 に示したパラメータを設定する。

(P2) 初期状態を式 3.1 から計算し、各 m_5 の値でシミュレーションを開始する。

(P3) 100 [s] 経過後、目標時間軌道の 10 周期分の歩容パラメータを保存する。

(P4) ω を $\omega + \frac{6\pi}{100}$ に設定後、(P2) から繰り返す。

ここでは、歩容パラメータの一つとして、次式で定義される平均移動速度を用いる。

$$V := \frac{20\pi}{\omega} \int_0^{\frac{20\pi}{\omega}} \dot{x} \, dt \quad (3.3)$$

図 3.5 に平均移動速度の解析結果を示す。 ω が $\frac{2\pi}{3}$ および $-\frac{2\pi}{3}$ 近辺において、 ω の変更に対する平均移動速度の変遷が不安定になることがわかる。先の節において当該周波数帯域においてロボットの回転運動が活発になっていることから、ロボット本体の共振周波数が当該周波数付近に存在することが考えられる。また、 $m_5 = 0.5$ [kg] の場合において、平均移動速度は $\omega \approx -8$ [rad/s] および $\omega \approx 7$ [rad/s] 近辺において遷移傾向が変わることがわかる。この結果から、周波数帯域によってロボットの運動の支配的なダイナミクスが変わることが考えられる。加えて、低周波帯域において、 m_5 の値が大きいほど移動速度の上昇傾向が強くなることがわかる。

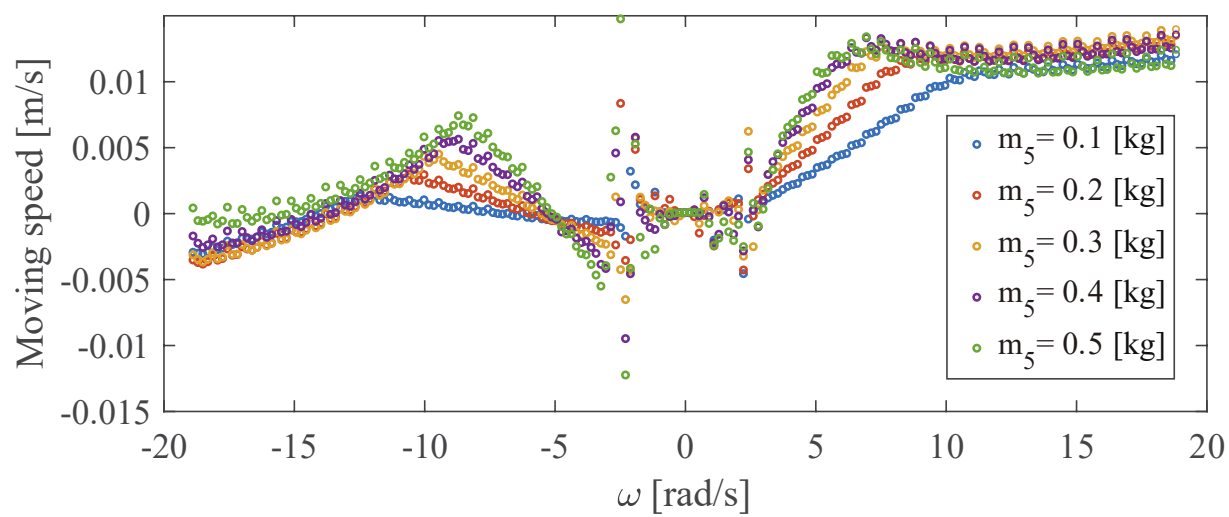


図 3.5: ω および m_5 の平均移動速度に及ぼす影響の比較

第4章 実験機開発及び環境構築

これまでに数値的に解析した結果の妥当性を検証するために検証実験を行う必要がある。そのため、設定した仕様を実現する実験機の開発が必要となる。本章では、開発した実験機について詳細を述べる。

4.1 試作機の概要

4.1.1 身体フレームおよび機構設計

図 4.1 および図 4.2 にそれぞれ開発した試作機および早戻りリンク機構の概要を示す。2 枚の同形状をした弓型フレームを複数の接続用フレームを用いて平行に結合し、その内部に当該早戻りリンク機構を搭載した。早戻りリンク機構は駆動用のモータによって駆動し、そのモータは制御回路によって制御する。早戻りリンク機構に取り付けた揺動質量を交換することで、 m_5 の質量を調整することができ、当該機構の駆動周波数 ω は駆動用モータを制御することで調整する。当該試作機の仕様は表 4.1 に示す。

表 4.1: 試作機の仕様

m_0	3.5	kg	I_1	0.001	kg·m ²	L_2	0.030	m
m_1	0.02	kg	I_2	0.001	kg·m ²	L_3	0.032	m
m_2	0.02	kg	I_3	0.001	kg·m ²	L_4	0.060	m
m_3	0.02	kg	I_4	0.001	kg·m ²	R	0.175	m
m_4	0.03	kg	I_5	0.010	kg·m ²	a	0.120	m
m_5	0.10	kg	L_0	0.020	m	b	0.050	m
I_0	0.350	kg·m ²	L_1	0.024	m	n	0.000	m

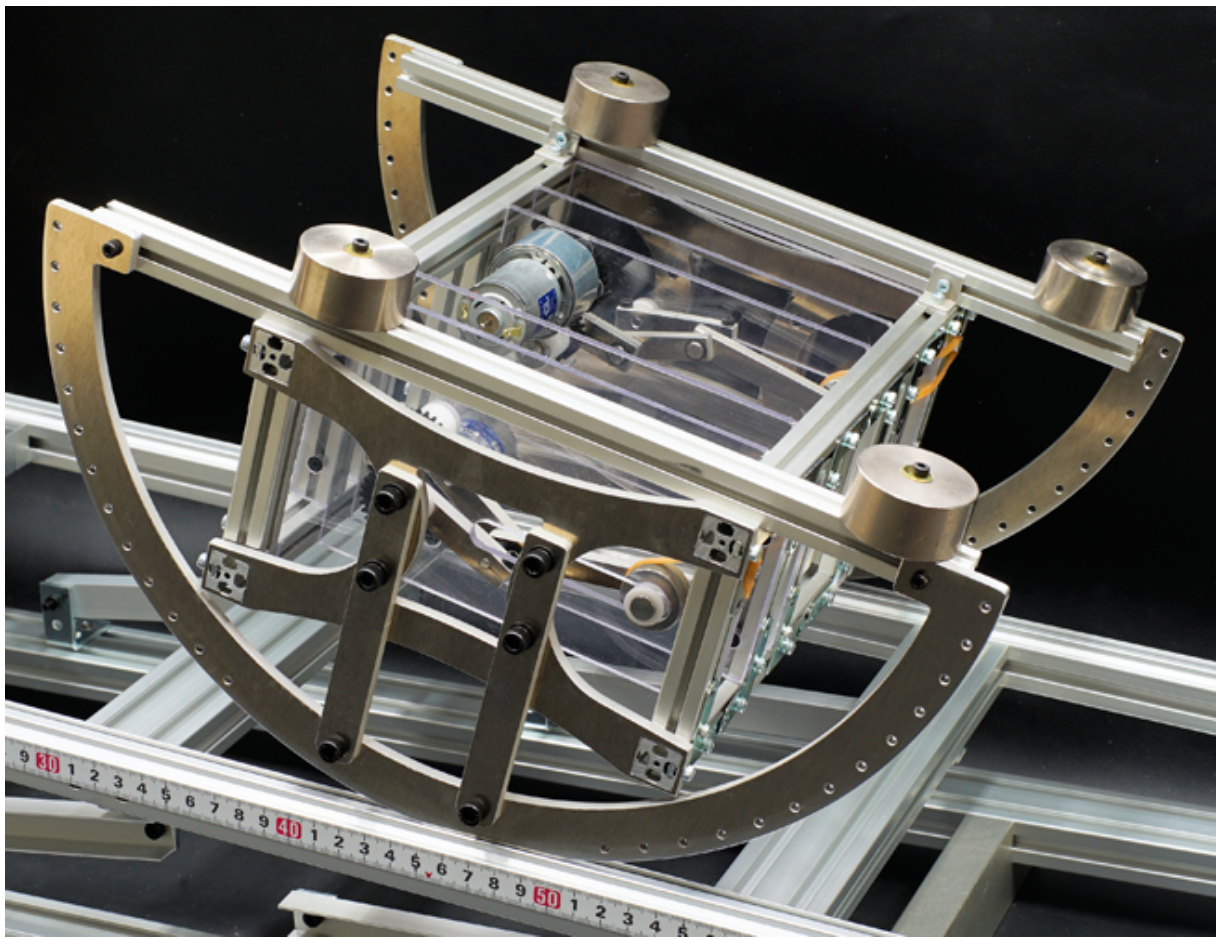


図 4.1: 実験機の外観

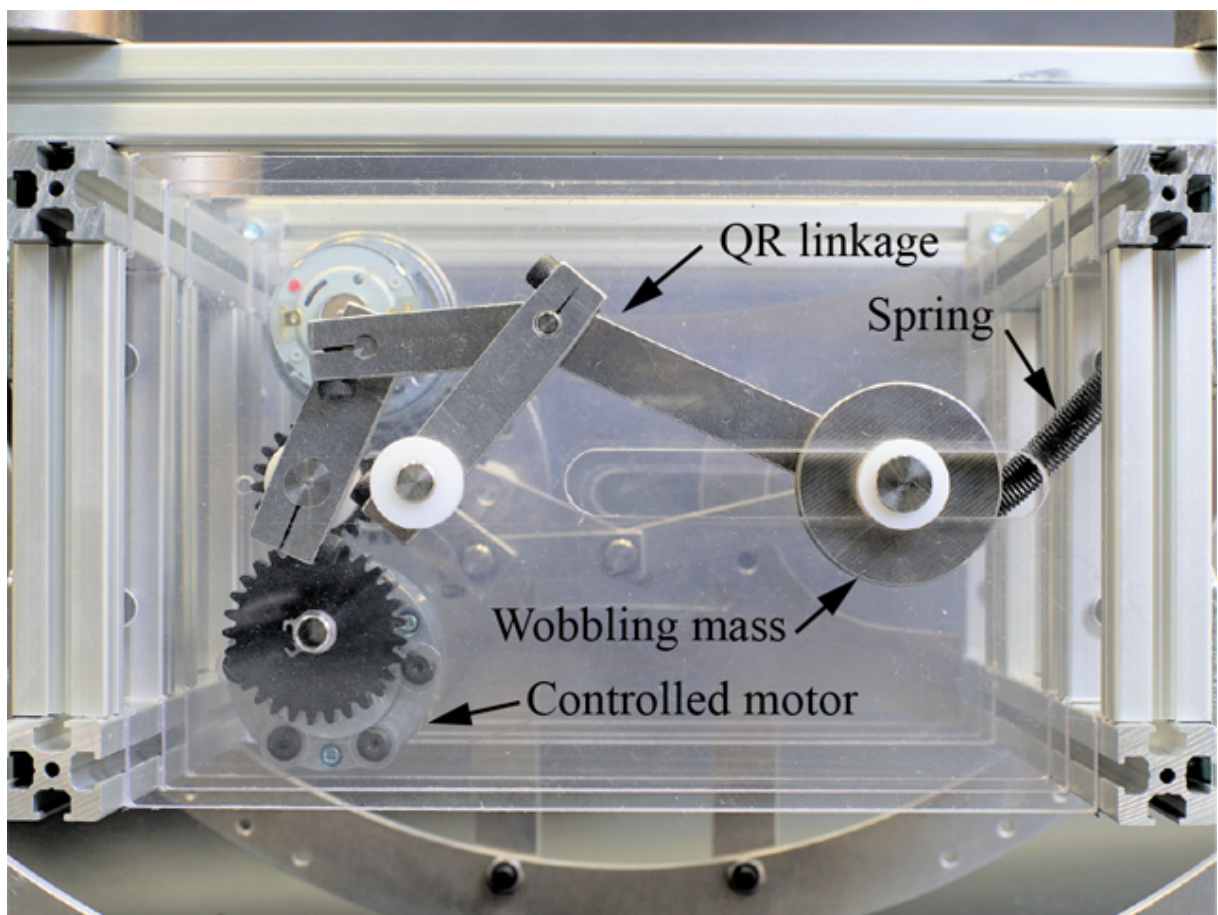


図 4.2: 開発した早戻りリンク機構の外観

4.1.2 制御回路

図 4.3、表 4.2 に開発した制御回路の概要ならびに仕様を示す。数学モデルを使用したシミュレーションでは、制御対象のモデルを考慮して制御入力を決めているが、実機検証では制御対象の正確なモデル化が難しいためにモデルフリー制御による制御入力の決定を次の手順で行った。

- (CP1) ロータリーエンコーダから出力される近似正弦波をコンパレータによって矩形波に変換
- (CP2) 矩形波の立ち下がりを検知してカウント
- (CP3) 一回転あたりのパルス数 (300 [pulse/rote]) から現在角度を計算
- (CP4) 式 (4.1) から算出したデューティ比 D [%] を使用した PWM (Pulse Width Modulation) 制御により、制御入力を決定
- (CP5) 30 [ms] 間隔で (CP1) から繰り返し

$$\begin{aligned} D &= K_P y_e + K_D \dot{y}_e + K_I \int_0^t y_e \, dt + D_0 \\ y_e &:= y(t) - y_d(t) \end{aligned} \tag{4.1}$$

ただし、 D_0 [%] は無負荷時に目標時間軌道に追従するためのデューティ比である。実機検証で使用した制御パラメータは表 4.3 に示す。

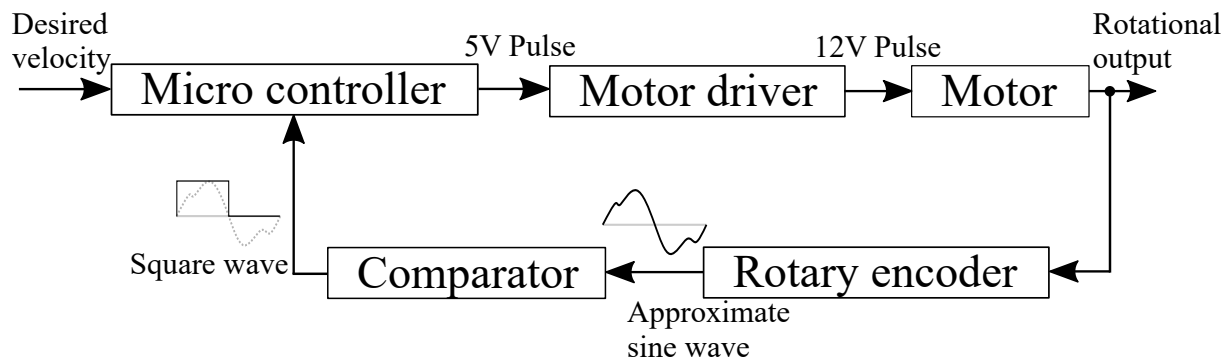


図 4.3: 制御回路の概要

表 4.2: 試作機の仕様

主演算処理装置	ATmega32u4	Atmel 社
ワンボードマイコン	Arduino Leonardo	Arduino 社
ロータリエンコーダ	RE12A-300-100-1/E	日本電産コパル電子
コンパレータ IC	RE12A-300-100-1/E	日本電産コパル電子
モーター	TG-85R-SU-23.5-KA,12V	ツカサ電工株式会社
モータードライバ	IRF7842PbF	International Rectifier

表 4.3: 実機検証で用いた制御パラメータ

K_P	0.50	%/rad
K_D	0.01	% · s/rad
K_I	0.10	%/rad · s

4.2 実験環境構築

4.2.1 摩擦係数調整

数学モデルを用いたシミュレーションでは氷上を想定して $\mu_0 = 0.005$ としたが、実機検証においては氷上環境を再現することおよび摩擦係数の維持が難しいため、自己潤滑素材である PTFE (Polytetrafluoroethylene: $(C_2F_4)_n$) テープをレールおよびロボット身体の表面に糊付した。PTFE は分子間引力が小さく、表面自由エネルギーが低いためにその摩擦係数は非常に小さい素材である。実機検証で使用した PTFE テープの動摩擦係数は公表データでは 0.04 から 0.08 となっているが、傾斜法 (JIS P 8147:2010) による動摩擦係数測定を行ったところ、その動摩擦係数は 0.08 程度であった。ただし、今回行った傾斜法による動摩擦係数測定の手順は次に示す通りであり、そのモデルは図 4.4 に示す。

(P1) PTFE テープを糊付した試料をレール上に設置

(P2) レール角度を調整し、試料が滑り出す角度を調査

(P3) 距離 $S = 0.1$ [m] とし、測定データを動画として記録

(P4) 距離 S [m] 移動した時間を動画より読み取り、式 (4.4) により動摩擦係数 μ_k を算出

$$ma = mg(\sin \phi - \mu_k \cos \phi) \quad (4.2)$$

$$S = \frac{1}{2}at^2 \quad (4.3)$$

$$\mu_k = \tan \phi - \frac{2S}{gt^2 \cos \phi} \quad (4.4)$$

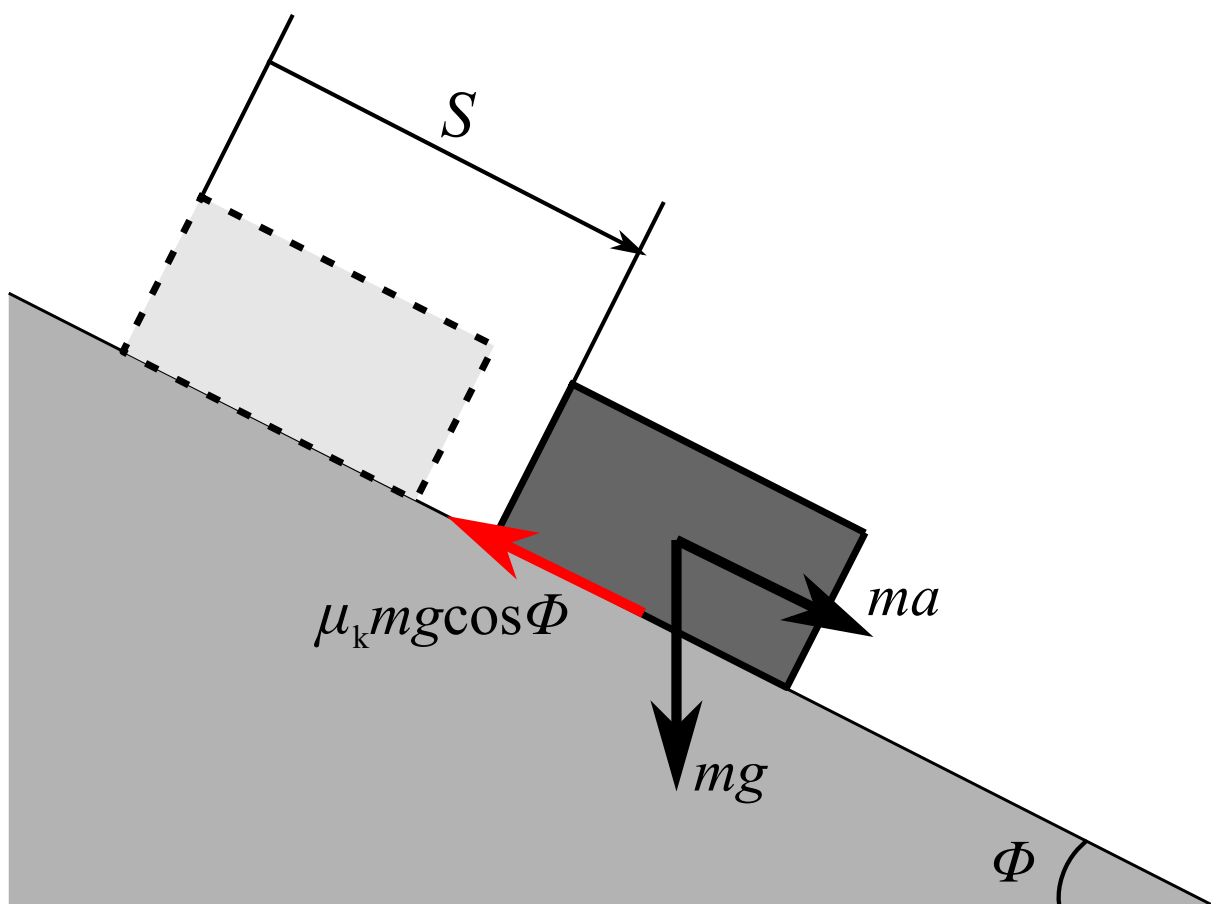


図 4.4: 傾斜法のモデル

4.2.2 データ収集環境

図 4.5、図 4.4 にデータ収集回路の概要および仕様を示す。実機検証で収集するデータは、ロボットの運動生成において重要であるロボット身体の角度 θ_0 、制御出力 $\theta_1 - \theta_0$ 、ロボット身体下部に固定した位置座標 (x, z) の 4 データとした。ロボット身体の角度は 6 軸センサによって収集したデータをもとにカルマンフィルタによって算出した値を角度データとした。また、制御出力は 4.1.2 で述べた制御回路においてロータリーエンコーダーを用いて取得した角度データを収集した。加えて、位置座標 (x, z) については次の手順でデータ収集を行った。

- (P1) ロボット身体下部にマーカーポイントを作成
- (P2) ビデオカメラによって実験の動画を撮影
- (P3) 動画編集ソフトウェア “AviUtl” によって撮影した動画の実験開始ポイントの頭出し
- (P4) 動画データを数値演算ソフトウェア “MATLAB” を用いて解析
- (P5) マーカーポイントの中心座標および動画のフレーム数を記録

ただし、ロボット身体の角度および制御出力のデータ収集についてはロボット本体からデータを収集するため、ロボット本体にマイクロコントローラと無線通信モジュールを取り付け、シリアル通信によって PC にデータを送信した。なお、PC 側でのシリアル通信およびログ取得はシリアルターミナルソフトウェア “minicom” を使用した。

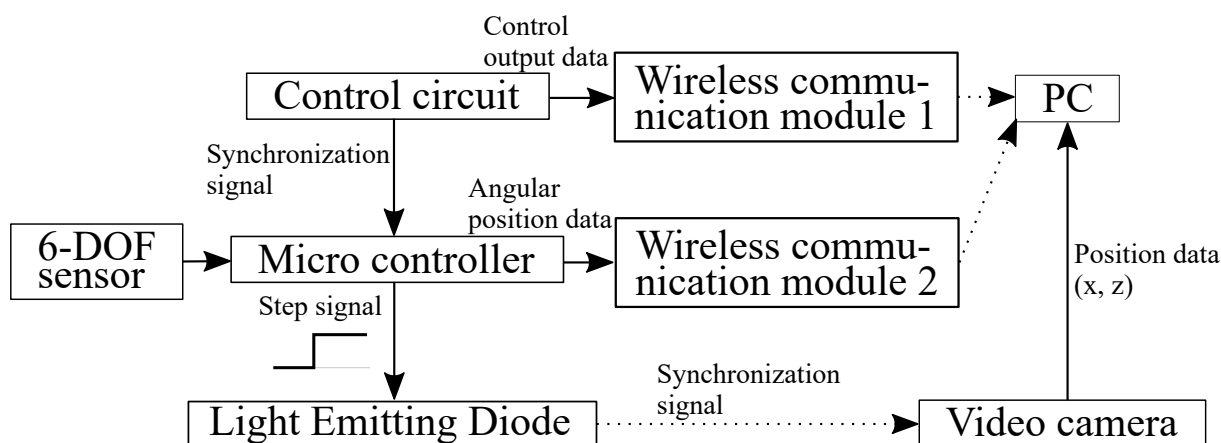


図 4.5: データ収集回路の概要

表 4.4: データ収集回路の仕様

主演算処理装置	ATmega32u4	Atmel 社
	ATmega328PU	Atmel 社
ワンボードマイコン	Arduino Leonardo	Arduino 社
	Arduino UNO R3	Arduino 社
無線通信モジュール	Xbee S2	Digi International
	Xbee S2C	Digi International
6 軸 (Gyro+Accelerometer) センサー	MPU-6050	InvenSense 社

第5章 実験的検証

本章では、第4章で開発した試作機を使用した数値解析結果の妥当性を検証するための実験的検証について述べる。

5.1 実機実験

本章で行う実機実験の手順は以下に示す通りである。

- (P1) 目標角周波数 ω を 1.5π [rad/s] に設定する。
- (P2) ロボット身体および早戻りリンク機構を初期位置および初期角度に合わせる。
- (P3) データ収集用ソフトウェアを起動し、動画の録画を開始する。
- (P4) 実験開始信号を制御回路のマイクロコントローラに送信し、ロボットの動作とデータ収集を開始する。
- (P5) 60 [s] 経過後、動作停止信号をマイクロコントローラに送信後、録画を停止して駆動用電源を切断する。
- (P6) データ収集用ソフトウェアを起動し直した後に、 ω を $\omega + 0.1\pi$ [rad/s] に設定後、(P2) から繰り返す。

なお、実験は $\omega = 4.0\pi$ [rad/s] まで行い、各パラメータについてそれぞれ5回ずつ行う。

実験の結果を基に移動速度を算出したデータを散布図でプロットしたものを図5.1に、エラーバーと平均値でプロットしたものを図5.2に示す。この結果より、 $\omega = 1.9\pi$ [rad/s] 付近において移動速が広範囲に分布すること、および目標角周波数が高いほど移動速度は速くなるが、低周波領域と高周波数帯域では移動速度の遷移傾向が変わることが確認された。概ね解析結果と同様の傾向は確認されたが、移動速度の遷移傾向が不安定になる周波数が異なることや、移動速度が大きく異なることも確認された。前述の事柄に関しては、ロボット本体の重心位置が回路やモータなどによって数学モデルとは異なることが原因であることが考えられる。左右の重心については重心位置調整用の部材で調整しているが、上下方向の位置についてはちょうせいしていないため、重心位置が上方向にずれることによって共振周波数が高くなったことが考慮される。後述の事柄に関しては、摩擦係数の違いと共に、摩擦に関するモデルの不十分要素、数学モデルと試作機の重心位置などの差異

などが原因と考えられる。これに関しては実機実験と数学モデルの改良を繰り返し行うことで改善することはできるが、その差異を完全に除去することは困難であると言える。

当該結果に加えて、特徴点における各種データについて、 $\omega = 1.9\pi$ [rad/s] におけるロボットの運動を 10 [s] 間隔の輪郭抽出によって表現したものを図 5.3、水平位置座標 x の時間遷移を図 5.4、ロボットの身体角度 θ_0 の時間遷移を図 5.5 (a)、出力誤差 y_e の時間遷移を図 5.5 (b) に示す。また、 $\omega = 4.0\pi$ [rad/s] における 10 [s] 毎のロボットの輪郭を図 5.6、 x の時間遷移を図 5.7、 θ_0 の時間遷移を図 5.8 (a)、 y_e の時間遷移を図 5.8 (b) に示す。

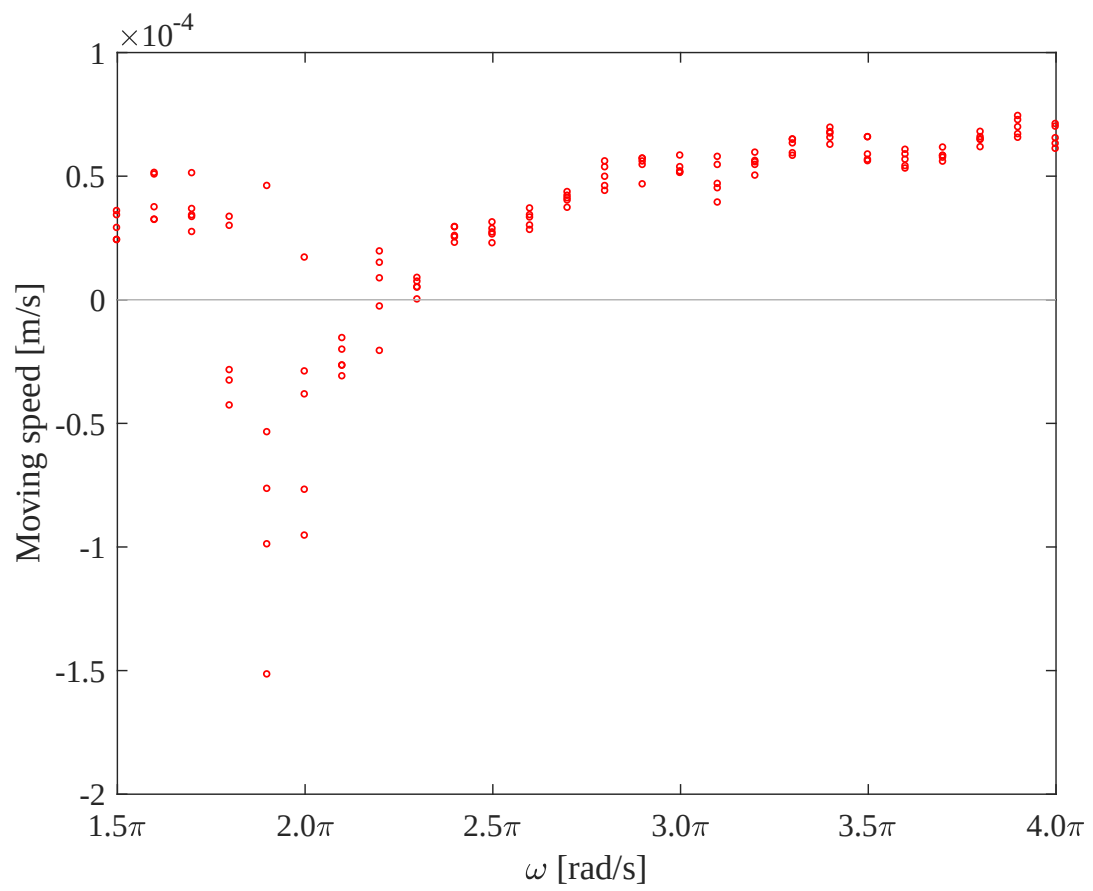


図 5.1: 実機実験による移動速度（散布図）

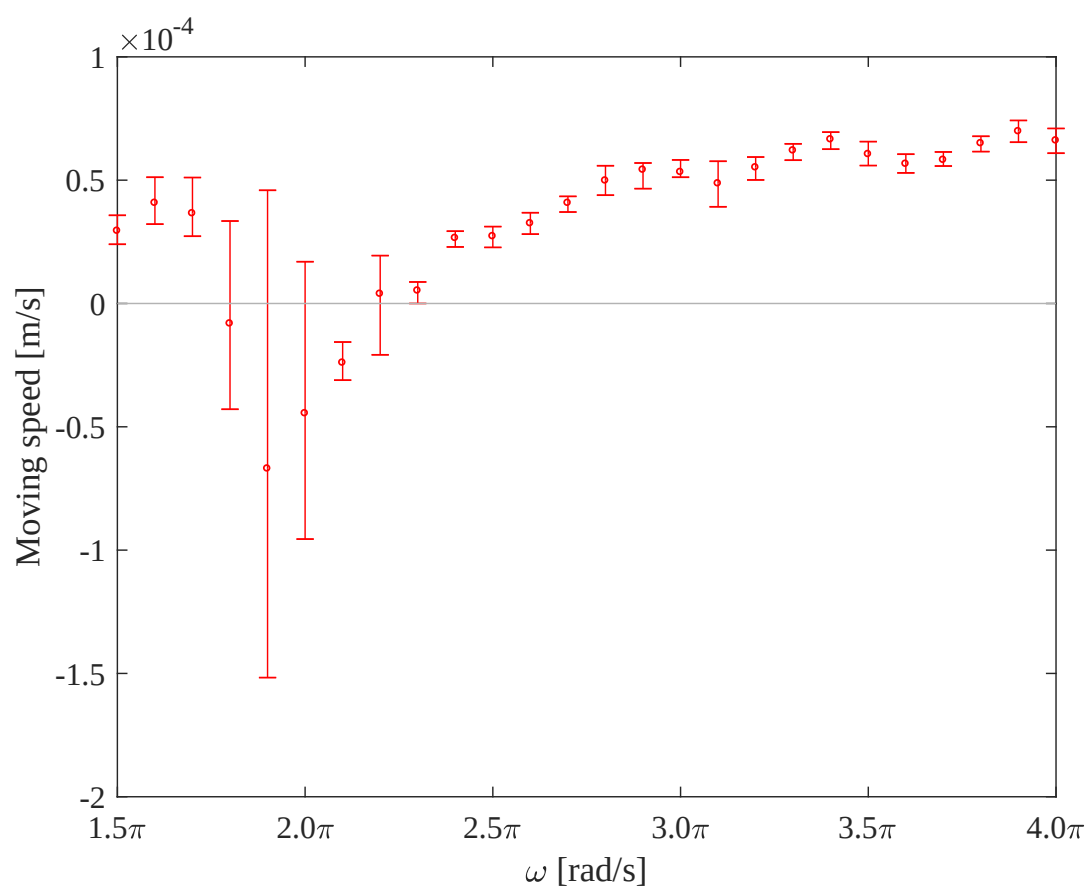


図 5.2: 実機実験による移動速度（エラーバーと平均値）

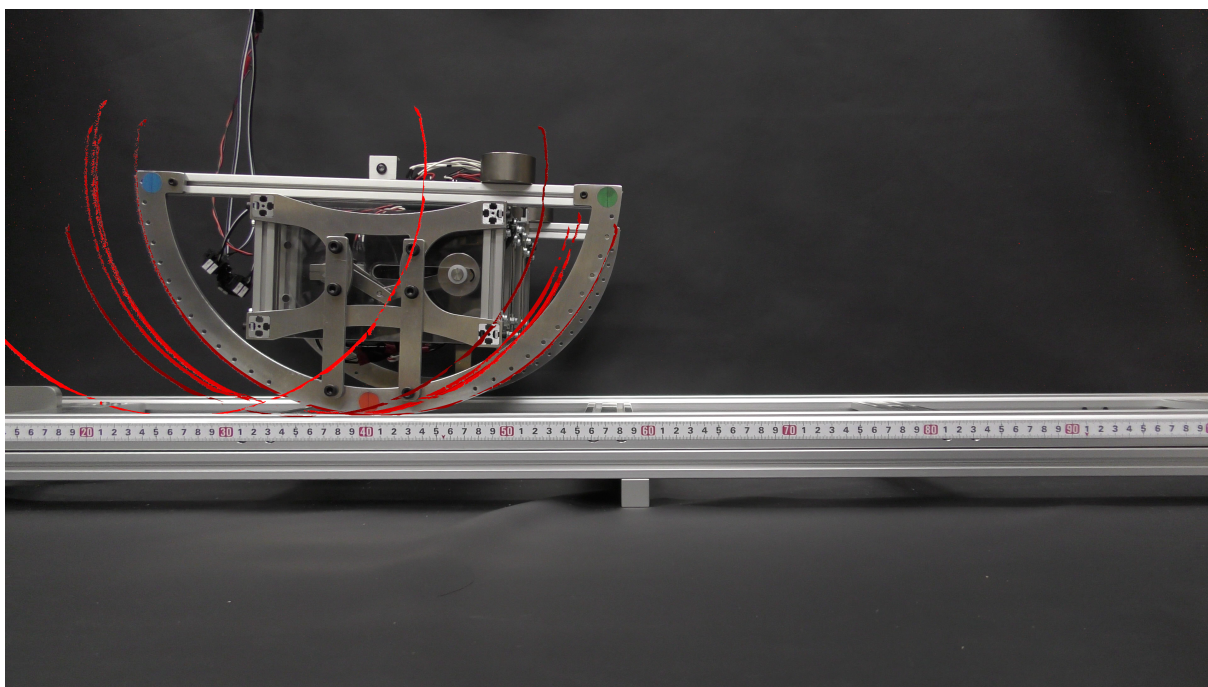


図 5.3: $\omega = 1.9\pi$ [rad/s] における 10 [s] 毎のロボットの輪郭

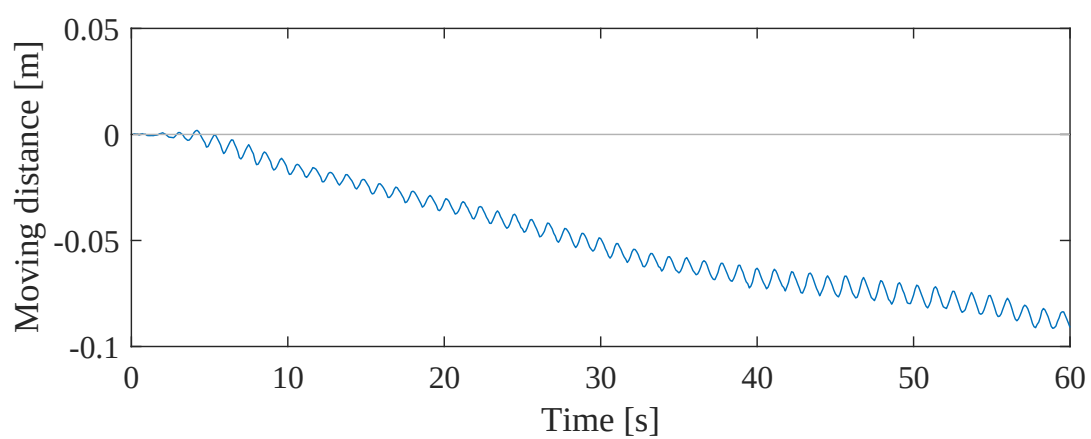


図 5.4: $\omega = 1.9\pi$ [rad/s] における x の時間遷移

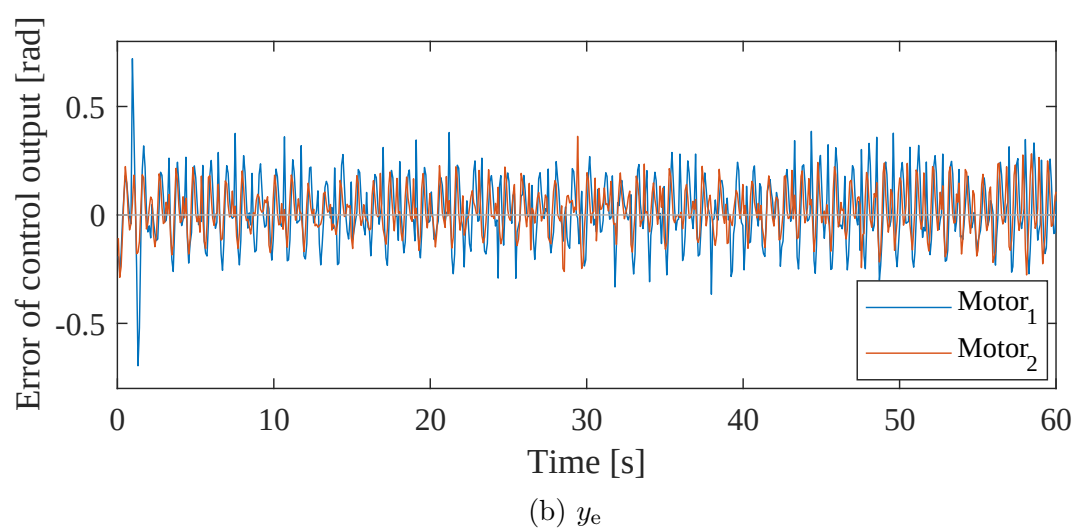
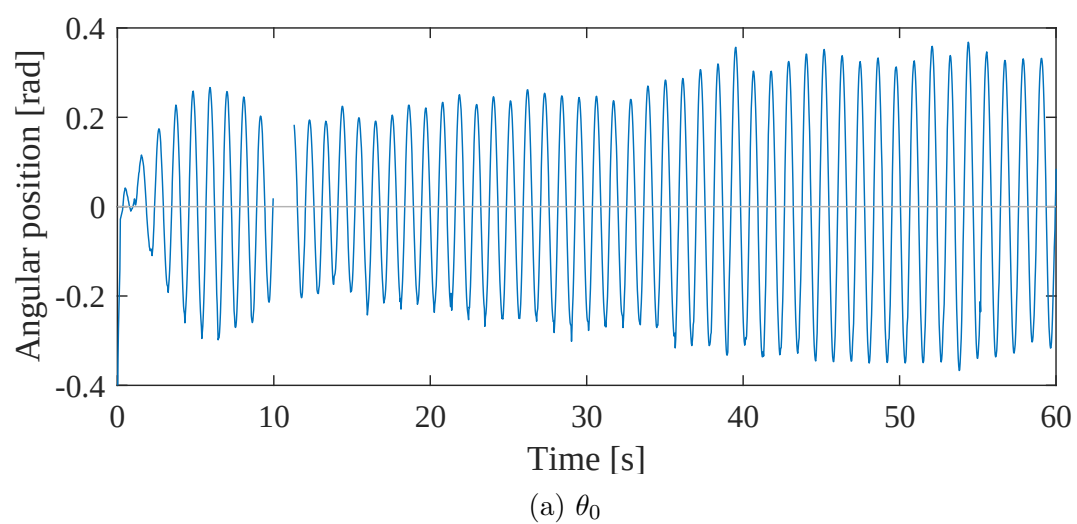


図 5.5: $\omega = 1.9\pi$ [rad/s] における本体角度および追従誤差の時間遷移

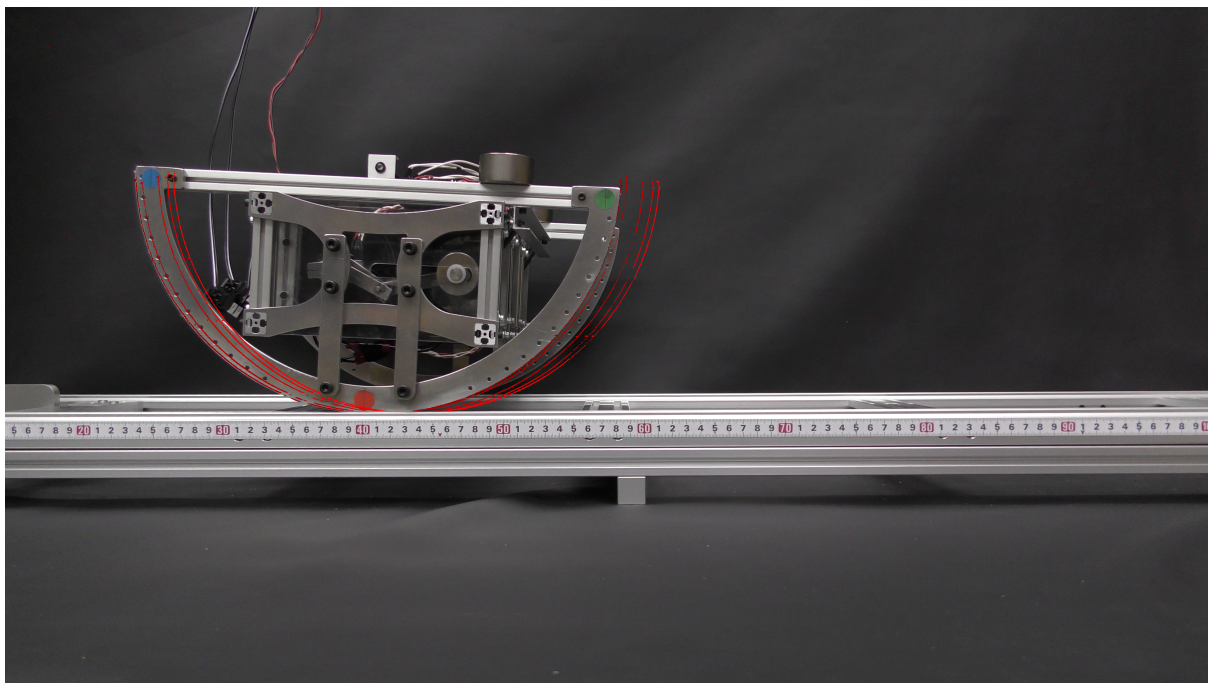


図 5.6: $\omega = 4.0\pi$ [rad/s] における 10 [s] 毎のロボットの輪郭

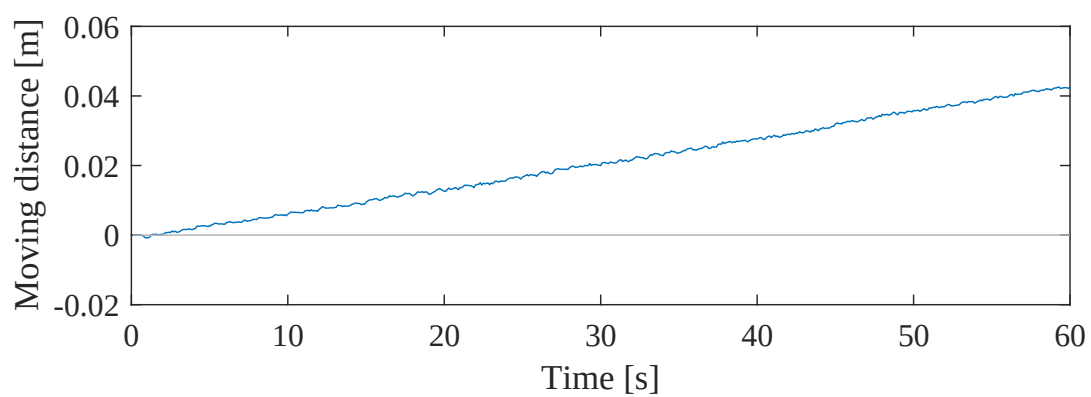
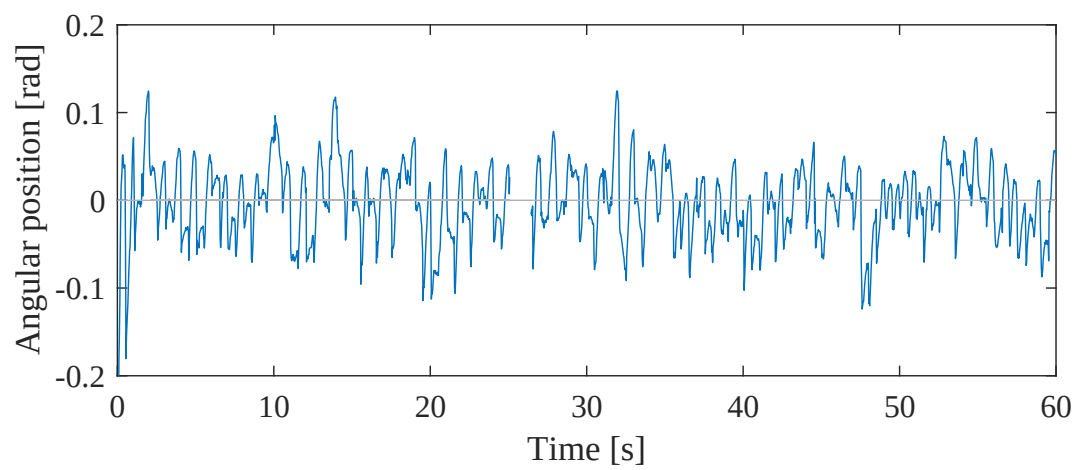
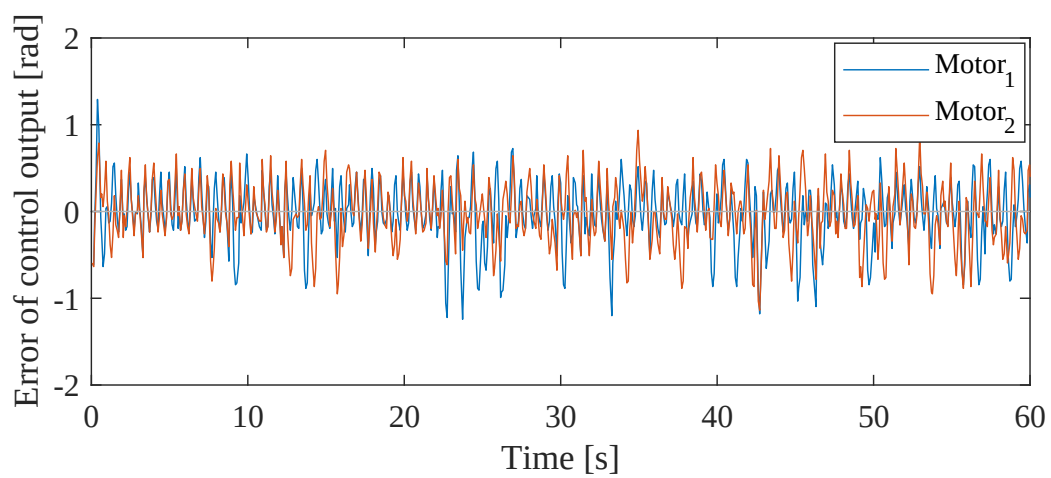


図 5.7: $\omega = 4.0\pi$ [rad/s] における x の時間遷移



(a) θ_0



(b) y_e

図 5.8: $\omega = 4.0\pi$ [rad/s] における本体角度および追従誤差の時間遷移

第6章 前進運動生成に関する考察

本章では、これまでの研究で得た知見を基にロボットの前進運動生成について考察を行う。

6.1 前進運動を生成する要素

これまでに早戻りリンク機構を有する劣駆動移動ロボットについて多くの数値解析や実験的検証を行ってきたが、前進運動生成ならびにその移動速度についての確実な制御則を発見することはできなかった。そこで、数値解析や実験的検証の結果を基に前進運動生成や移動速度を変化させる要因について考察する。

数値解析および実験的検証において共通した特徴は次に示すものが挙げられる。

1. 特定の周波数帯域において移動速度の遷移が不安定になる。
2. 高周波数帯域と低周波帯域において遷移傾向が変化する。

これらの特徴の考えられる要因としては、前者については当該周波数帯域においてロボット本体の回転運動が活発になっていることから、ロボット本体の回転運動が前進運動生成に関係していることが考慮される。また、後者については高周波帯域と低周波帯域においてロボット本体の回転運動の振幅に差があることから、駆動周波数の変化に伴ってロボットの前進運動生成に関する最も有力なダイナミクスが変化していることが考慮される。

6.2 ロボット本体の回転運動による前進運動生成に関する考察

6.2.1 フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットのモデリング

回転運動が前進運動生成に及ぼす影響を調べるために、フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットのモデリングを行う。当該ロボットのモデルを図 6.1 に示す。

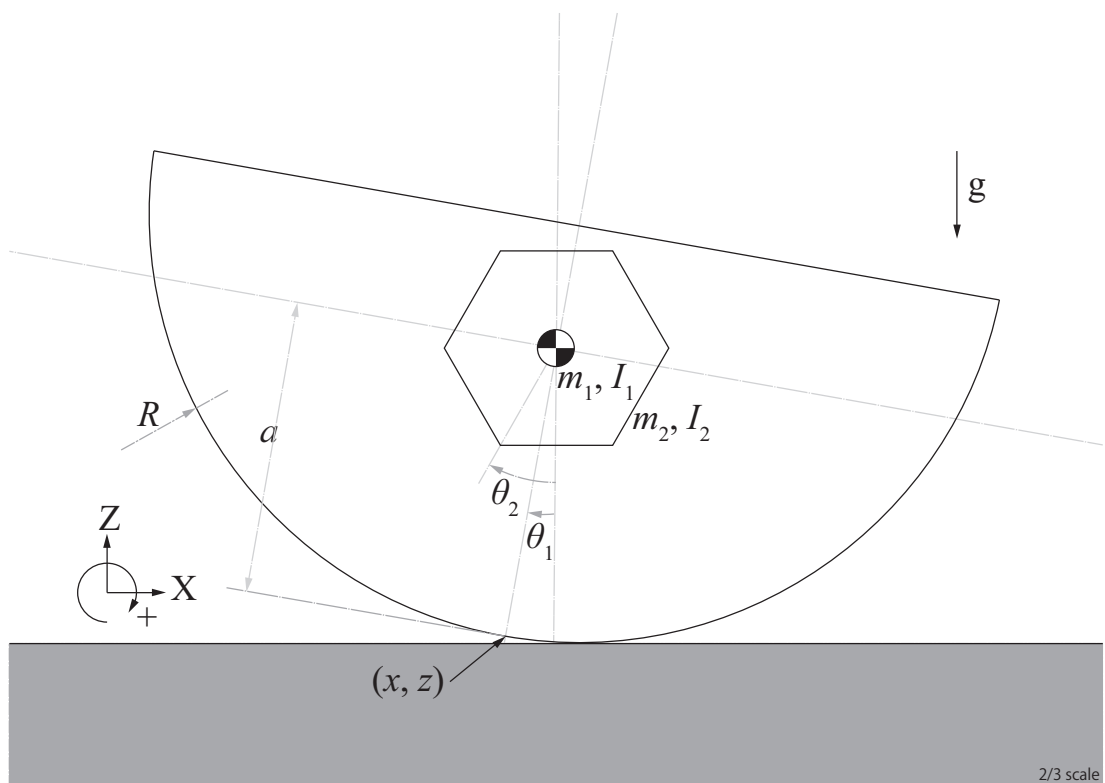


図 6.1: フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットのモデル

まず、ロボットの一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T$ とするとロボットの運動方程式は、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{S}u + \mathbf{J}^T\lambda + \mathbf{J}_\mu^T\lambda \quad (6.1)$$

となる。上式の詳細は次の通りであり、その導出については2章にて同様の過程を踏んでいるため、省略する。

$$\begin{aligned} m_t &:= m_1 + m_2 \\ \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_t & 0 & m_t a \cos \theta_1 & 0 \\ & m_t & -m_t a \sin \theta_1 & 0 \\ & & m_t a^2 + I_1 & \\ \text{Sym.} & & & I_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} -m_t a \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\ m_t (g - a \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1) \\ -m g a \sin \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -R \sin \theta_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\mathbf{J}_\mu = \begin{bmatrix} \mu & 0 & \mu R (\cos \theta_1 - 1) & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$\mu = -\mu_0 \tanh \left(c \left(\dot{x} + \dot{\theta}_1 R (\cos \theta_1 - 1) \right) \right) \quad (6.6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6.7)$$

$$\lambda = -X^{-1} \left(\mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{h}) + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \right) \quad (6.8)$$

ただし、当該ロボットの制御入力相対トルクとして本体角度 θ_1 とフライホイール角度 θ_2 に反対方向に影響を及ぼすとしているが、その制御出力は本体の回転運動の影響を確認するために $y := \mathbf{C}^T \mathbf{q} = \theta_1$ 、正弦波軌道 $y_d = A m (1 - \cos \omega t)$ [rad] を目標時間軌道とした。よって、制御入力の決定は次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \mathbf{C}^T \ddot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{C}^T \mathbf{M}^{-1} \left(\mathbf{Y} (\mathbf{S}u - \mathbf{h}) - \hat{\mathbf{J}} X^{-1} \right) \\ &= Au - B \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} A &:= \mathbf{C}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S} \\ B &:= \mathbf{C}^T \mathbf{M}^{-1} \left(\mathbf{Y} \mathbf{h} + \hat{\mathbf{J}} X^{-1} \right) \\ u &= A^{-1} (v + B) \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$v = \ddot{y} + K_D (\dot{y}_d - \dot{y}) + K_P (y_d - y) \quad (6.11)$$

当該モデルを用いたシミュレーションで使用した物理・制御パラメータは表 6.1 に示す。また、当該ロボットが安定する初期状態は次式で得られる。

$$\mathbf{q}(0) = \mathbf{0}_{4 \times 1}, \quad \dot{\mathbf{q}}(0) = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (6.12)$$

6.2.2 フライホイールを用いた劣駆動移動ロボットの運動生成

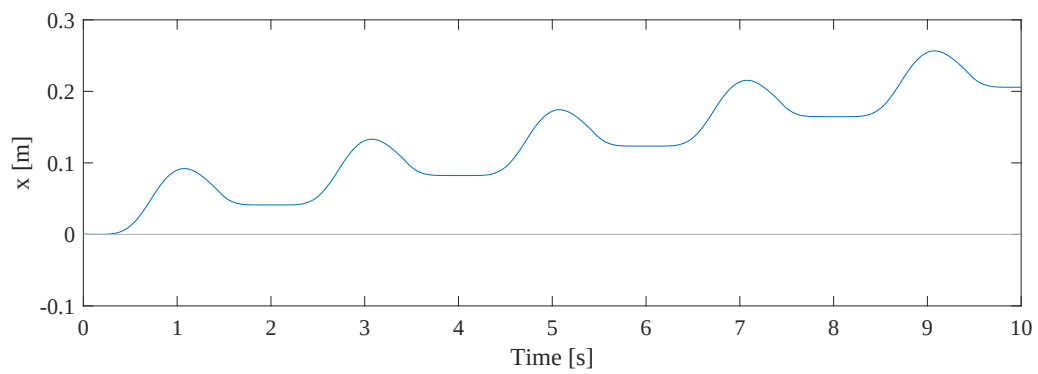
図 6.2 に $\omega = \pi$ [rad/s]、 $Am = \frac{\pi}{4}$ [rad] における位置座標および本体角度の時間遷移、図 6.3 に当該条件における床反力および摺動速度の時間遷移を示す。ただし、それぞれ図 6.2 (a) が x [m]、図 6.2 (b) が z [m]、図 6.2 (c) が θ_1 [rad]、図 6.3 (a) が床反力 λ [N]、図 6.3 (b) が摺動速度 v_s [m/s] を示す。ここで、摺動速度は本体の転がりを考慮した接地点の摺動速度であり、

$$v_s = \dot{x} + \dot{\theta}_1 R (\cos \theta_1 - 1) \quad (6.13)$$

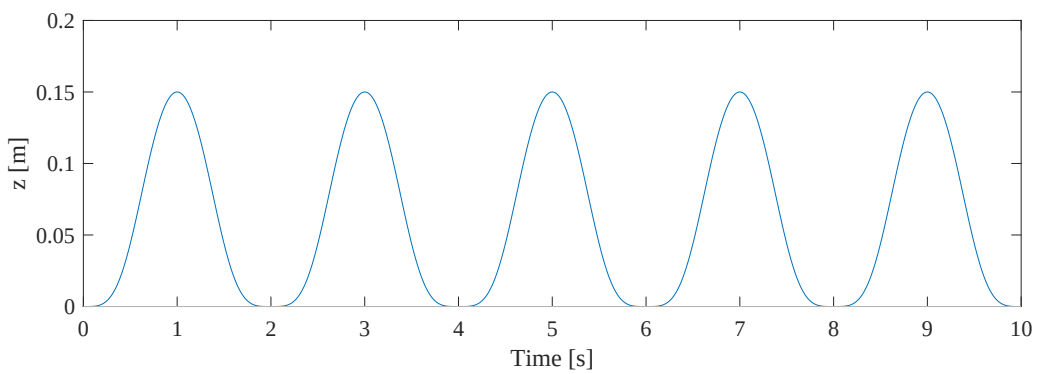
によって求めた。この結果とフライホイールが角運動量にのみ影響を与えることから、本体の回転運動によってロボットは前進運動を生成することがわかる。それゆえ、6.1 節において述べた特定の周波数帯域において移動速度の遷移が不安定になる現象については、本体の回転運動が活発になり前進もしくは後退運動が活発に生成されることが原因であると言える。

表 6.1: 物理および制御パラメータ

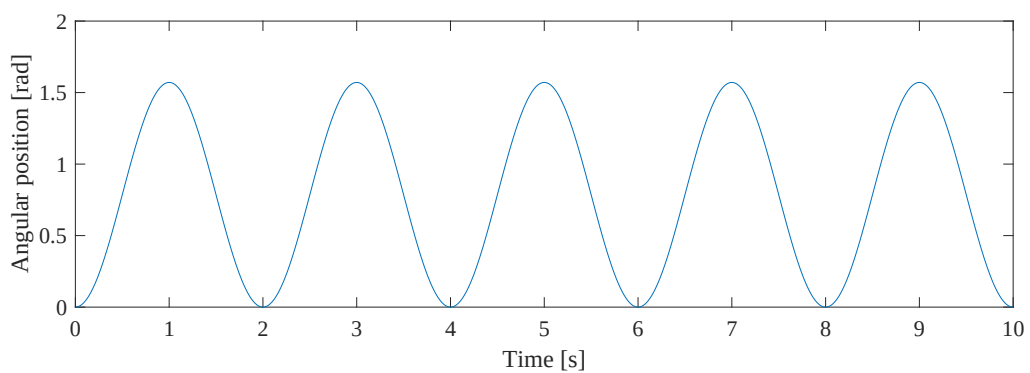
m_1	1.0	kg	a	0.1	m
m_2	1.0	kg	R	0.15	m
I_1	0.1	kg·m ²	g	9.81	m/s
I_2	0.1	kg·m ²	K_D	40	s ⁻¹
			K_P	400	s ⁻²



(a) x

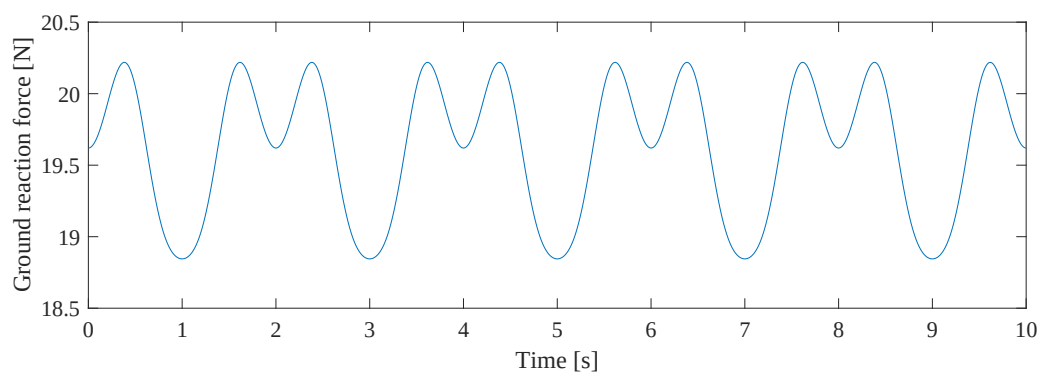


(b) z

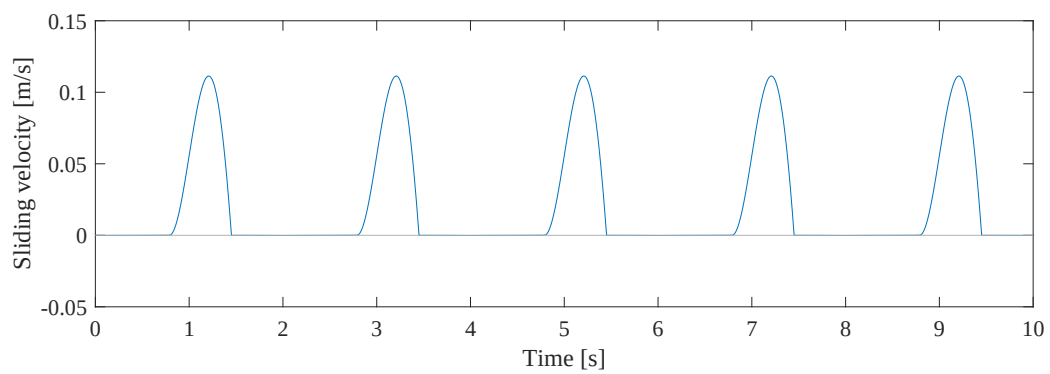


(c) θ_1

図 6.2: $\omega = \pi$ [rad/s]、 $Am = \frac{\pi}{4}$ [rad] における位置座標および本体角度の時間遷移



(a) 床反力 λ



(b) 摺動速度 v_s

図 6.3: $\omega = \pi$ [rad/s]、 $Am = \frac{\pi}{4}$ [rad] における床反力および摺動速度の時間遷移

6.3 早戻りリンク機構を用いた劣駆動移動ロボットの回転運動に関する周波数解析

本節では、駆動周波数の変化に伴うロボットの前進運動生成に関する最も有力なダイナミクスの変化に関して解析を行う。周波数領域における解析を行うため、 $m_5 = 0.1$ [kg] を解析対象とし、図 6.4 に周波数領域における移動速度の遷移を示す。

まず、揺動周波数に対する本体に回転周波数の分岐解析を行うために次に示す式を用いて本体の回転周波数を算出する。

$$f_r[n] = \frac{1}{t_{\text{peak}}[n+1] - t_{\text{peak}}[n]} \quad (6.14)$$

これについて揺動周波数に対してプロットしたものを図 6.5 に示す。また、本体の回転運動について離散フーリエ変換に利用してパワースペクトルを求め、回転運動に強い影響を及ぼしているスペクトルについて抽出したものを揺動周波数に対してプロットしたものを図 6.6 に示す。ただし、離散フーリエ変換には、

$$\Theta_0(\omega) = \sum_{n=0}^N \theta_0[n] e^{-j\omega n} \quad (6.15)$$

を用い、パワースペクトルについては、

$$S(\omega) = |\Theta_0(\omega)|^2 \quad (6.16)$$

で求めた。ここで、 N は $\theta_0[n]$ が持つデータの個数を表す。

これらの結果より、移動速度が上昇傾向を示し始める周波数付近から本体の回転周波数の分岐が発生し、回転運動が本体の固有振動数と揺動による微振動が混在していることがわかる。しかし、揺動周波数が高周波に近づくに連れて本体の固有振動数による回転運動は減少し、内部の揺動質量の振動に引き込まれていくことがわかる。また、移動速度の遷移傾向が変化している周波数帯域において、本体の固有振動数が回転運動生成に強い影響を及ぼさなくなっていることがわかる。以上のことから、低周波数帯域においては本体の固有振動数による回転に揺動質量による推進力が加わることで移動速度が大きく上昇すること、ならびに高周波帯域においては本体の回転運動が内部の揺動質量の振動に引き込まれることによって本体の回転運動による前進運動生成が成されず、揺動質量が生成する推進力が最も有力な前進運動生成力となっていることがわかった。

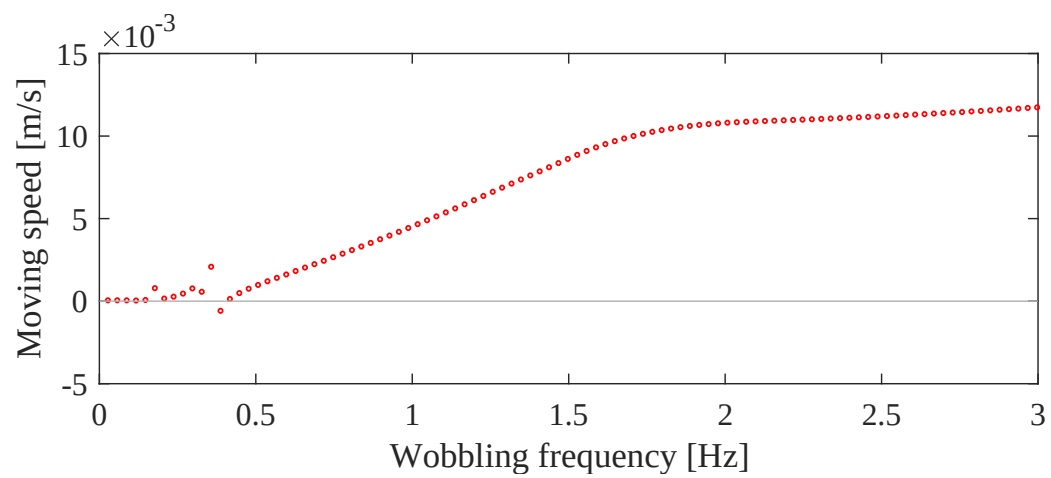


図 6.4: 周波数領域における移動速度の遷移

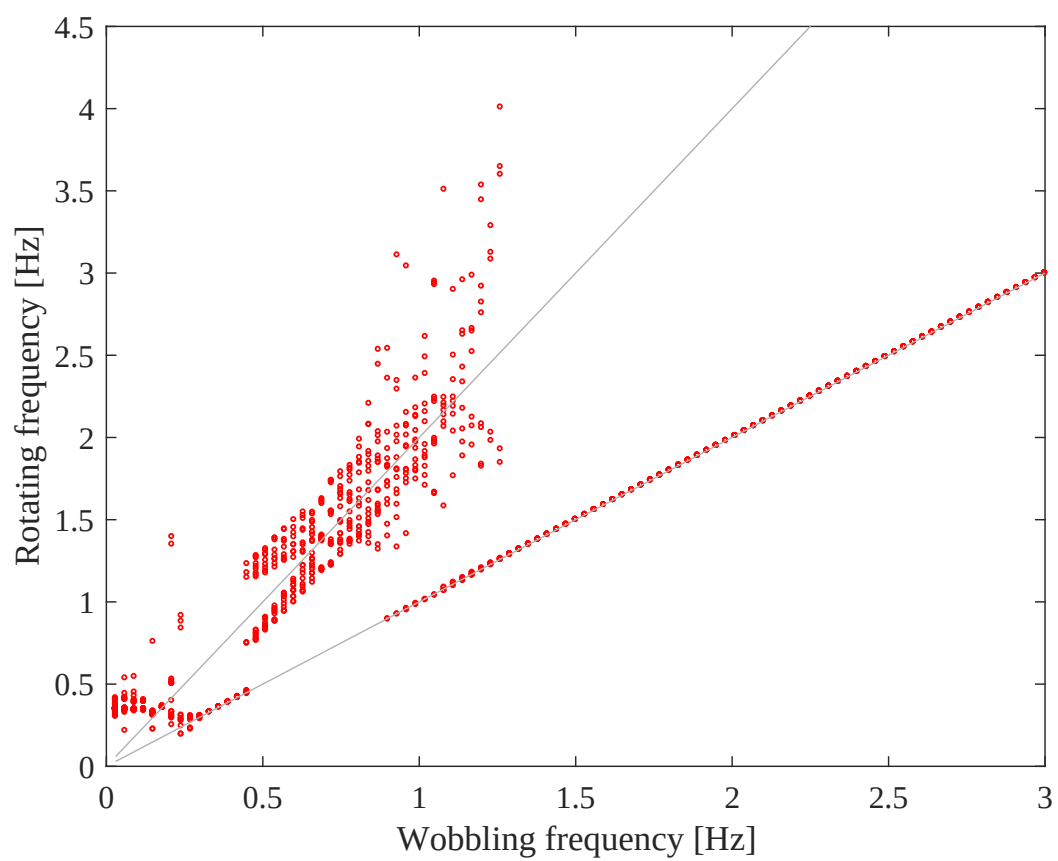


図 6.5: 回転周波数に関する分岐解析

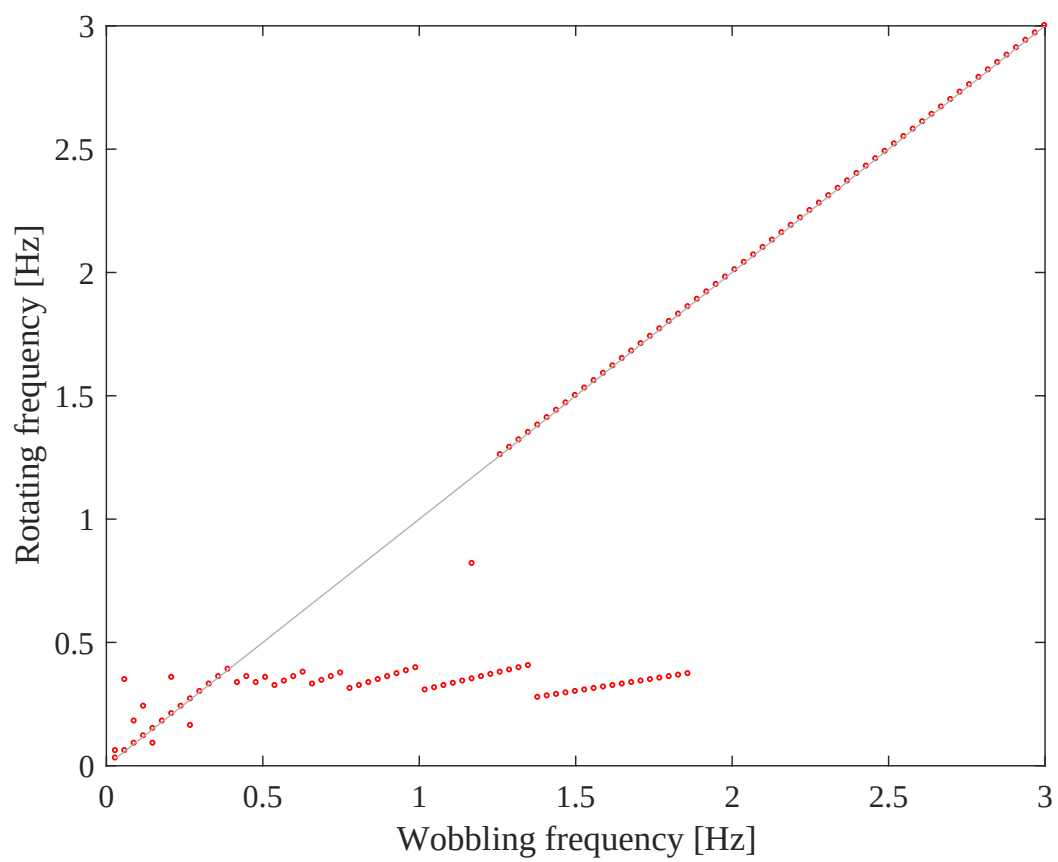


図 6.6: 回転周波数に関する高速フーリエ変換による解析

第7章 結論

7.1 結論

本論文では、数学モデルを使用した解析や実験的検証を通して早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットの運動特性と前進運動生成に関する特性を明らかにしてきた。これによって、当該ロボットの前進運動は内部の揺動質量による純粋な X 軸方向への推進力と、本体の回転運動による前進運動の2要素によって生成されていることがわかった。これによって、当該ロボットの前進運動生成を制御するためには、床反力、本体の回転運動、内部の揺動質量が生成する推進力およびそれらのタイミングを制御することが重要であることが考察された。

以下にこれまでに行った成果や明らかになった知見をまとめる。

- 早戻りリンク機構を利用した劣駆動移動ロボットについてその仕様を決定し、数学モデルを導出した。
- 当該ロボットの運動生成に関するシミュレーションを行い、各パラメータ変更における移動速度の遷移傾向について確認した。
- 当該ロボットの仕様を満足する試作機の開発、ならびに実験的検証を行う為の実験環境の構築を行った。
- 実験的検証を行い、シミュレーションと似た傾向が示されることを確認した。
- 当該ロボットの前進運動生成において、本体の回転運動が及ぼす影響について解析を行った。
- ロボット本体の回転運動が前進運動生成に対して大きな影響を及ぼしていることを確認した。
- 制御パラメータ ω を変更した際の移動速度の遷移傾向が変化することに対して、周波数解析を行った。
- 移動速度の遷移傾向の変化はロボットの前進運動生成における最も有力なダイナミクスの変化によって生じていることを確認した。

これらの知見より、当該ロボットの効率的な前進運動生成には、床反力を制御する装置もしくは制御則、本体の回転運動を励起するための共振現象を利用した内部の揺動運動、それらのタイミングに関する制御則の考案が必要であることが考えられる。

7.2 今後の予定

今後は、より効率的な前進運動生成を行うため、移動に関する効率を求めると共に、その移動効率の向上を図る。そのために、次に示す項目について考案および解析を行う。

- 前進運動生成に好適な形状および重心位置の解析
- 内部揺動の制御則の考案
- 床反力を制御する機構およびその制御則の考案

また、数学モデルにおいて摩擦のモデルに現実との相違が存在することが考えられたため、より現実に近い摩擦モデルを取り入れる必要性がある [12], [13]。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心なご指導に加えて日々の支援をして頂いた浅野文彦先生に心より深謝致します。的確なご助言や研究内容について貴重なご意見を頂いた前園涼先生、HO Anh-Van 先生、立命館大学の徳田功先生、小谷一孔先生に心より感謝致します。実機開発において部品製作をして頂いた工作室の宇野技術職員に感謝致します。中間発表会においてご助言を頂いた企業 URA およびインダストリアルアドバイザーの方々に感謝致します。研究や生活において様々な意見・助力を頂いた浅野研究室の学生に感謝致します。また、日々の生活において支えてくれた家族にも深謝致します。

参考文献

- [1] F. Asano, Y. Kikuchi and M. Shibata, “Modeling, control and analysis of limit cycle walking on slippery road surface,” *Int. J. of Dynamics and Control*, Vol. 2, Iss. 4, pp. 463-473, 2014.
- [2] F. Asano, T. Saka and T. Fujimoto, “Passive dynamic walking of compass-link biped robot on slippery downhill,” *Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4113-4118, 2015.
- [3] T. Senoo and M. Ishikawa, “Analysis of sliding behavior of a biped robot in centroid acceleration space,” *Int. J of Robotica*, Vol. 35, pp. 636-653, 2017.
- [4] N. Midori, “Underactuated crawling robot,” *Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 1684-1689, 2000.
- [5] M. Reis, “Vibration based under-actuated bounding mechanism,” *Int. J of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 82, pp. 455-466, 2016.
- [6] P. Liu, H. Yu and S. Cang, “On periodically pendulum-driven systems for underactuated locomotion: a viscoelastic jointed model,” *Proc. of Int. Conf. on Automation and Computing*, 2015.
- [7] F. Asano, T. Seino and I. Tokuda, and Y. Harata, “A novel locomotion robot that slides and rotates on slippery downhill,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.425-430, 2016.
- [8] R. P. Podhorodeski, S. B. Nokleby and J. D. Wittchen, “Quick-return mechanism design and analysis projects,” *Int. J of Mechanical Engineering Education*, Vol. 32.2, pp. 100-114, 2004.
- [9] A. Spagne, A. Berardo, D. Marchetto, E. Gualtieri, N. M. Pugno and S. Valeri, “Friction of rough surfaces on ice; Experiments and modeling,” *Int. J of Wear*, Vol. 368-369, pp. 358-266, 2016.
- [10] D. C. Evens, J. F. Nye and K. J. Cheeseman, “The kinetic friction of ice,” *Proc. of R. Soc. Lond.*, Vol. 347, 1976.

- [11] L. Makkonen and M. Tikanmänn, “Modeling the friction of ice,” *Int. J of Cold Regions Science and Technology*, Vol.102, pp. 84-93, 2014.
- [12] R. Kikuuwe and B. Brogliato, “A new representation of systems with frictional unilateral constraints and its Baumgarte-like relaxation,” *Int. J of Multibody System Dynamics*, Vol. 39, pp. 267-290, 2017.
- [13] L. Makkonen , “A thermodynamic model of sliding friction,” *Int. J of AIP Advances*, Vol. 2, 2012.

付録 A 数学モデルにおける補足事項

数学モデルで使⽤した $\mathbf{M}$ 行列および $\mathbf{h}$ ベクトルの詳細、ならびに重心位置を付録として添付する。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^5 m_i & 0 & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} \\ & \sum_{i=0}^5 m_i & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} \\ & & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} \\ & & & M_{44} & M_{45} & 0 & 0 \\ & & & & M_{55} & 0 & 0 \\ & & & & & M_{66} & M_{67} \\ \text{Sym.} & & & & & & M_{77} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$M_{13} = a \sum_{i=0}^5 m_i \cos \theta_0 + (-L_0 \sum_{i=3}^5 m_i + b \sum i = 1^5 m_i - m_0 n) \sin \theta_0 \quad (\text{A.2})$$

$$M_{14} = -\frac{1}{2} L_1 (m_1 + 2m_2) \sin \theta_1 \quad (\text{A.3})$$

$$M_{15} = -\frac{1}{2} L_2 m_2 \sin \theta_2 \quad (\text{A.4})$$

$$M_{16} = -\frac{1}{2} L_3 (m_3 + 2(m_4 + m_5)) \sin \theta_3 \quad (\text{A.5})$$

$$M_{17} = -\frac{1}{2} L_4 (m_4 + 2m_5) \sin \theta_4 \quad (\text{A.6})$$

$$M_{23} = (-L_0 \sum_{i=3}^5 m_i + b \sum_{i=1}^5 m_i - m_0 n) \cos \theta_0 - a \sum_{i=0}^5 m_i \sin \theta_0 \quad (\text{A.7})$$

$$M_{24} = -\frac{1}{2} L_1 (m_1 + 2m_2) \cos \theta_1 \quad (\text{A.8})$$

$$M_{25} = -\frac{1}{2} L_2 m_2 \cos \theta_2 \quad (\text{A.9})$$

$$M_{26} = -\frac{1}{2} L_3 (m_3 + 2(m_4 + m_5)) \cos \theta_3 \quad (\text{A.10})$$

$$M_{27} = -\frac{1}{2} L_4 (m_4 + 2m_5) \cos \theta_4 \quad (\text{A.11})$$

$$(\text{A.12})$$

$$M_{33} = I_0 + I_5 - 2bL_0 \sum_{i=3}^5 m_i + L_0^2 \sum_{i=3}^5 m_i + b^2 \sum_{i=1}^5 m_i + a^2 \sum_{i=0}^5 m_i + m_0 n^2 \quad (\text{A.13})$$

$$M_{34} = -\frac{1}{2}L_1(m_1 + 2m_2)(b \cos \theta_0 - \theta_1 - a \sin \theta_0 - \theta_1) \quad (\text{A.14})$$

$$M_{35} = \frac{1}{2}L_2m_2(-b \cos \theta_0 - \theta_2 + a \sin \theta_0 - \theta_2) \quad (\text{A.15})$$

$$M_{36} = -\frac{1}{2}L_3(m_3 + 2(m_4 + m_5))((b - L_0) \cos \theta_0 - \theta_3 - a \sin \theta_0 - \theta_3) \quad (\text{A.16})$$

$$M_{37} = \frac{1}{2}L_4(m_4 + 2m_5)((-b + L_0) \cos \theta_0 - \theta_4 + a \sin \theta_0 - \theta_4) \quad (\text{A.17})$$

$$M_{44} = I_1 + \frac{1}{4}L_1^2(m_1 + 4m_2) \quad (\text{A.18})$$

$$M_{45} = \frac{1}{2}L_1L_2m_2 \cos \theta_1 - \theta_2 \quad (\text{A.19})$$

$$M_{55} = I_2 + \frac{L_2^2m_2}{4} \quad (\text{A.20})$$

$$M_{66} = I_3 + \frac{1}{4}L_3^2(m_3 + 4(m_4 + m_5)) \quad (\text{A.21})$$

$$M_{67} = \frac{1}{2}L_3L_4(m_4 + 2m_5) \cos \theta_3 - \theta_4 \quad (\text{A.22})$$

$$M_{77} = I_4 + \frac{1}{4}L_4^2(m_4 + 4m_5) \quad (\text{A.23})$$

$$X_0 = x + a \sin \theta_0 + n \cos \theta_0 \quad (\text{A.24})$$

$$Z_0 = z + a \cos \theta_0 - n \sin \theta_0 \quad (\text{A.25})$$

$$X_1 = x + a \sin \theta_0 - b \cos \theta_0 + \frac{1}{2}L_1 \cos \theta_1 \quad (\text{A.26})$$

$$Z_1 = z + a \cos \theta_0 + b \sin \theta_0 - \frac{1}{2}L_1 \sin \theta_1 \quad (\text{A.27})$$

$$X_2 = x + a \sin \theta_0 - b \cos \theta_0 + L_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2}L_2 \cos \theta_2 \quad (\text{A.28})$$

$$Z_2 = z + a \cos \theta_0 + b \sin \theta_0 - L_1 \sin \theta_1 - \frac{1}{2}L_2 \sin \theta_2 \quad (\text{A.29})$$

$$X_3 = x + a \sin \theta_0 - (b - L_0) \cos \theta_0 + \frac{1}{2}L_3 \cos \theta_3 \quad (\text{A.30})$$

$$Z_3 = z + a \cos \theta_0 + (b - L_0) \sin \theta_0 - \frac{1}{2}L_3 \sin \theta_3 \quad (\text{A.31})$$

$$X_4 = x + a \sin \theta_0 - (b - L_0) \cos \theta_0 + L_3 \cos \theta_3 + \frac{1}{2}L_4 \cos \theta_4 \quad (\text{A.32})$$

$$Z_4 = z + a \cos \theta_0 + (b - L_0) \sin \theta_0 - L_3 \sin \theta_3 - \frac{1}{2}L_4 \sin \theta_4 \quad (\text{A.33})$$

$$X_5 = x + a \sin \theta_0 - (b - L_0) \cos \theta_0 + L_3 \cos \theta_3 + L_4 \cos \theta_4 \quad (\text{A.34})$$

$$Z_5 = z + a \cos \theta_0 + (b - L_0) \sin \theta_0 - L_3 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_4 \quad (\text{A.35})$$

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^5 \left(m_i \left(\dot{X}_i^2 + \dot{Z}_i^2 \right) + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) \quad (\text{A.36})$$

$$P = g \sum_{i=0}^5 m_i Z_i \quad (\text{A.37})$$

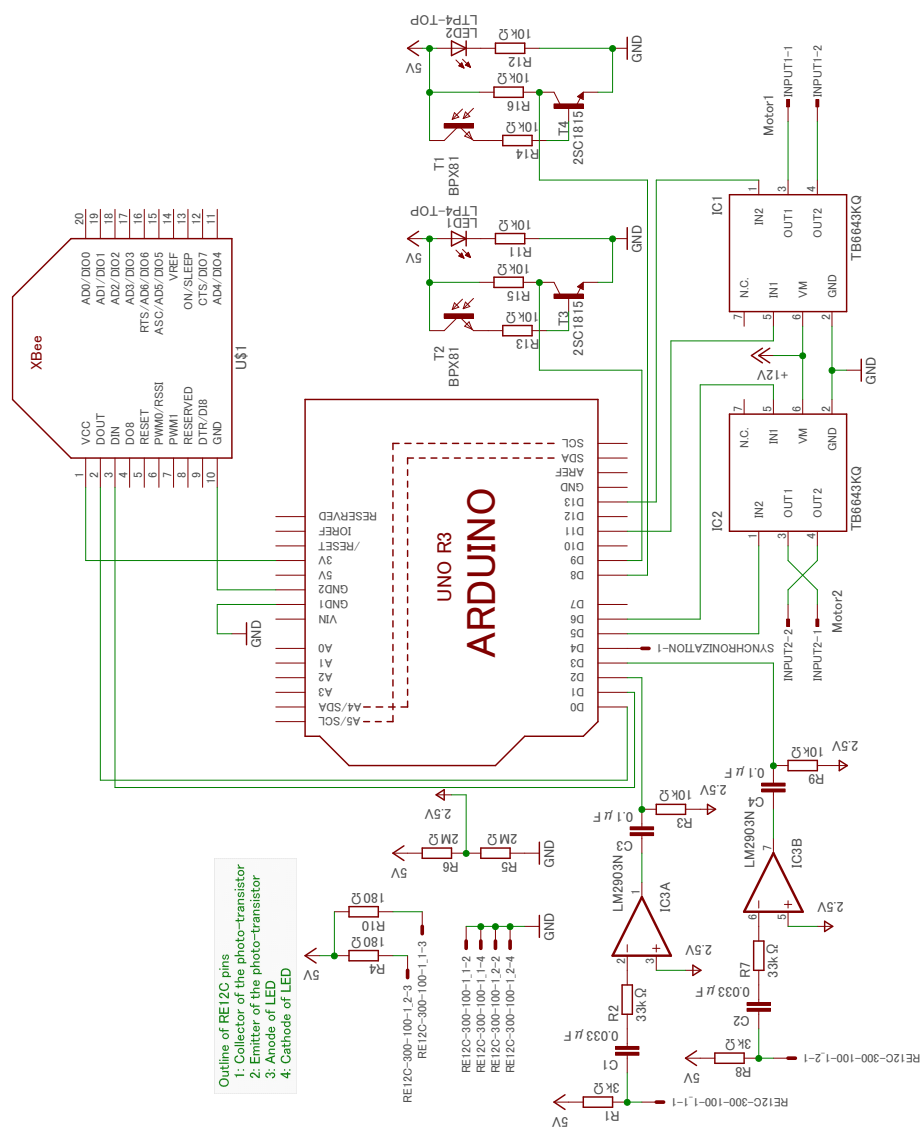
$$L = K - P \quad (\text{A.38})$$

$$\boldsymbol{\tau} = \left(\frac{\text{d}}{\text{d}t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}} \right) \right)^{\text{T}} - \left(\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}} \right)^{\text{T}} \quad (\text{A.39})$$

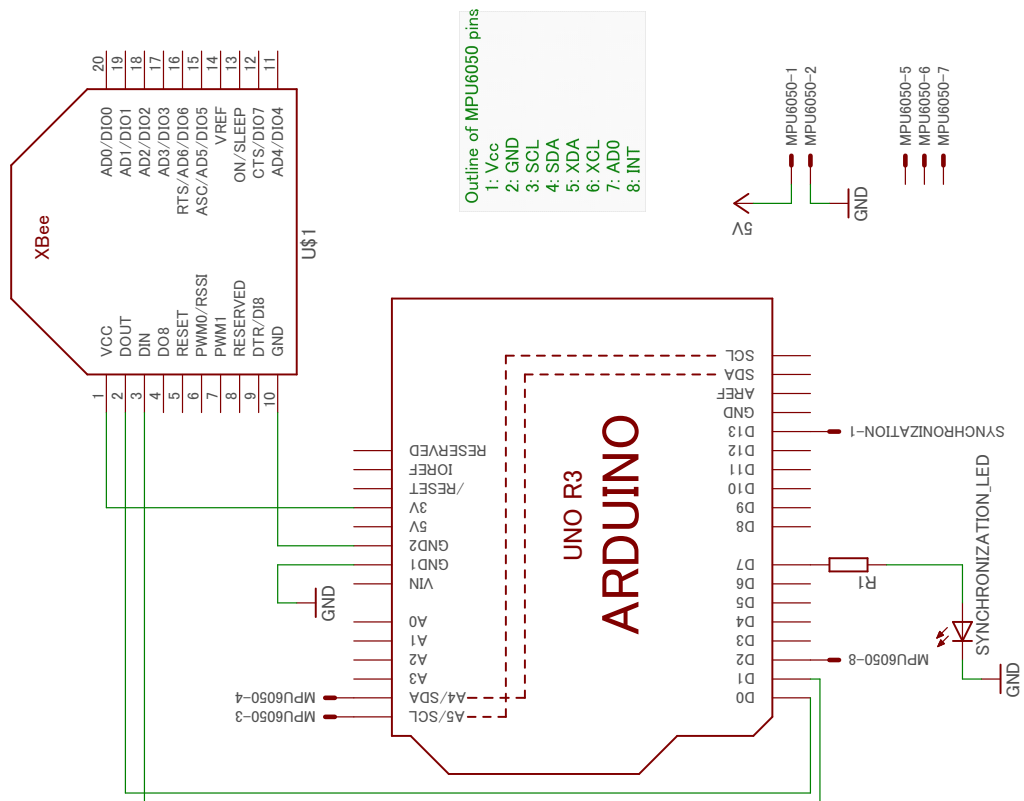
$$\boldsymbol{h} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{M} \ddot{\boldsymbol{q}} \quad (\text{A.40})$$

付録 B

実験で使用した回路および開発した試作機の部品の図面を付録として添付する。



⊠ B.1 : Motor control circuit



☒ B.2 : Data collection circuit

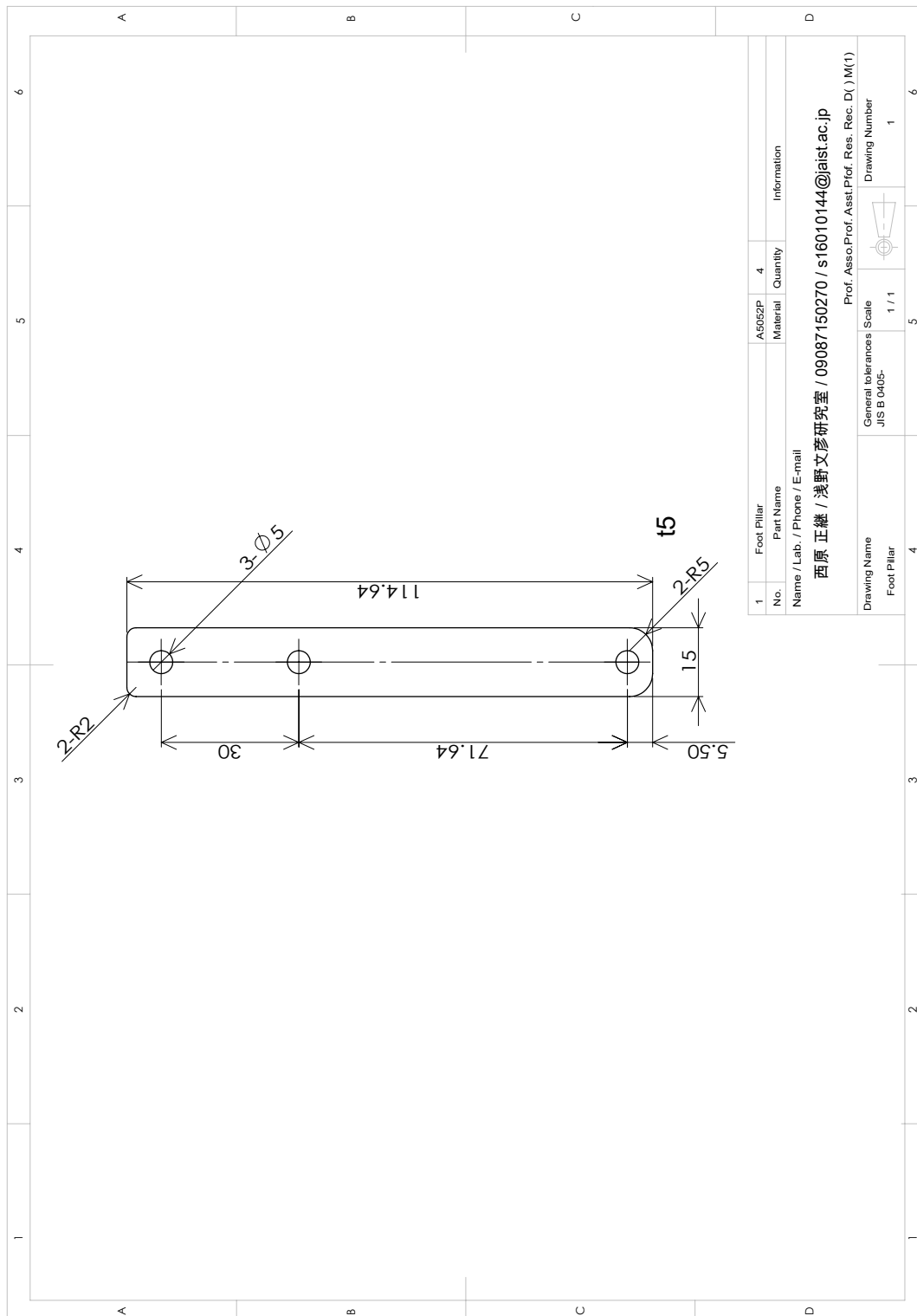


図 B.3 : Foot pillar

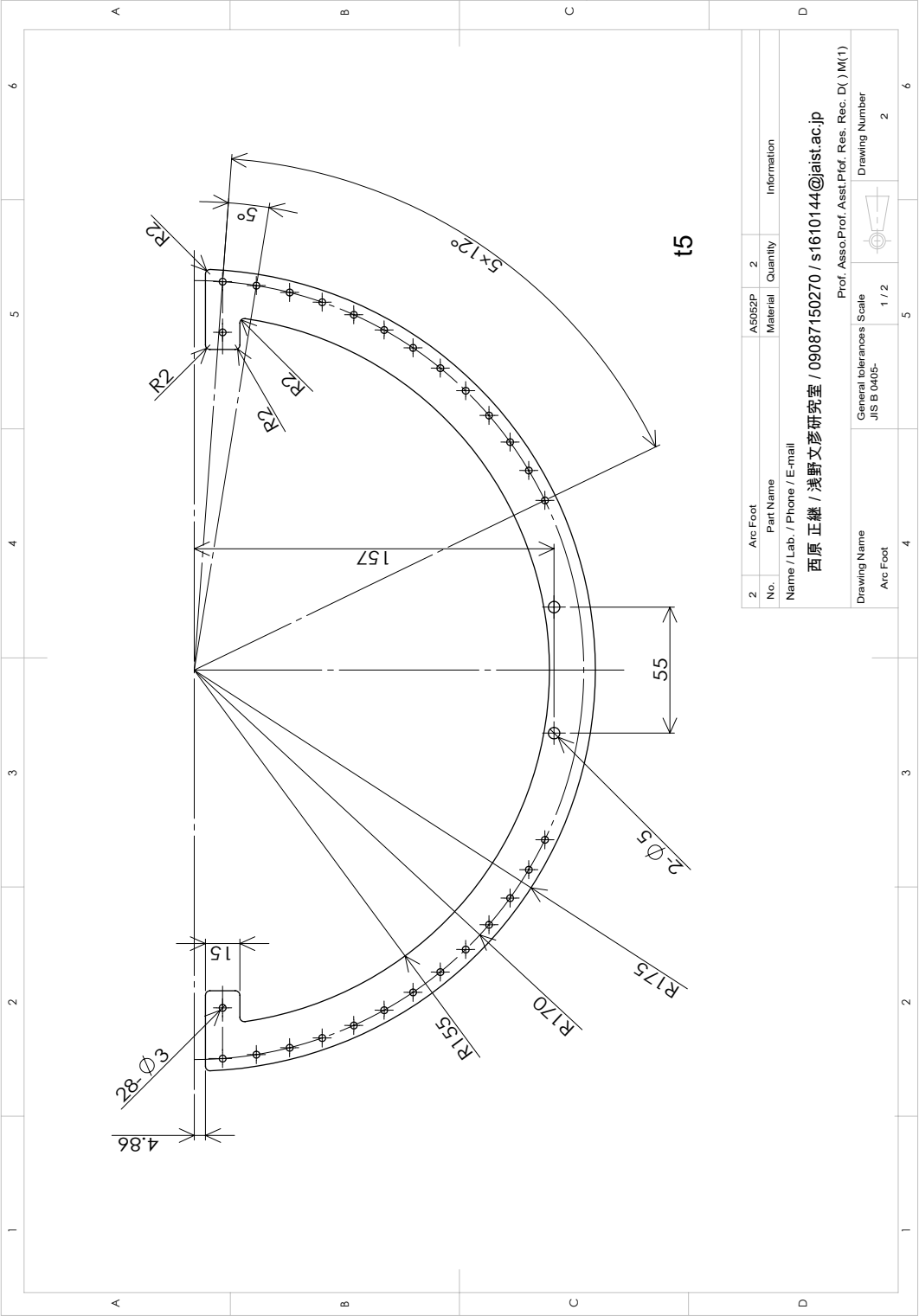


図 B.4 : Arc foot

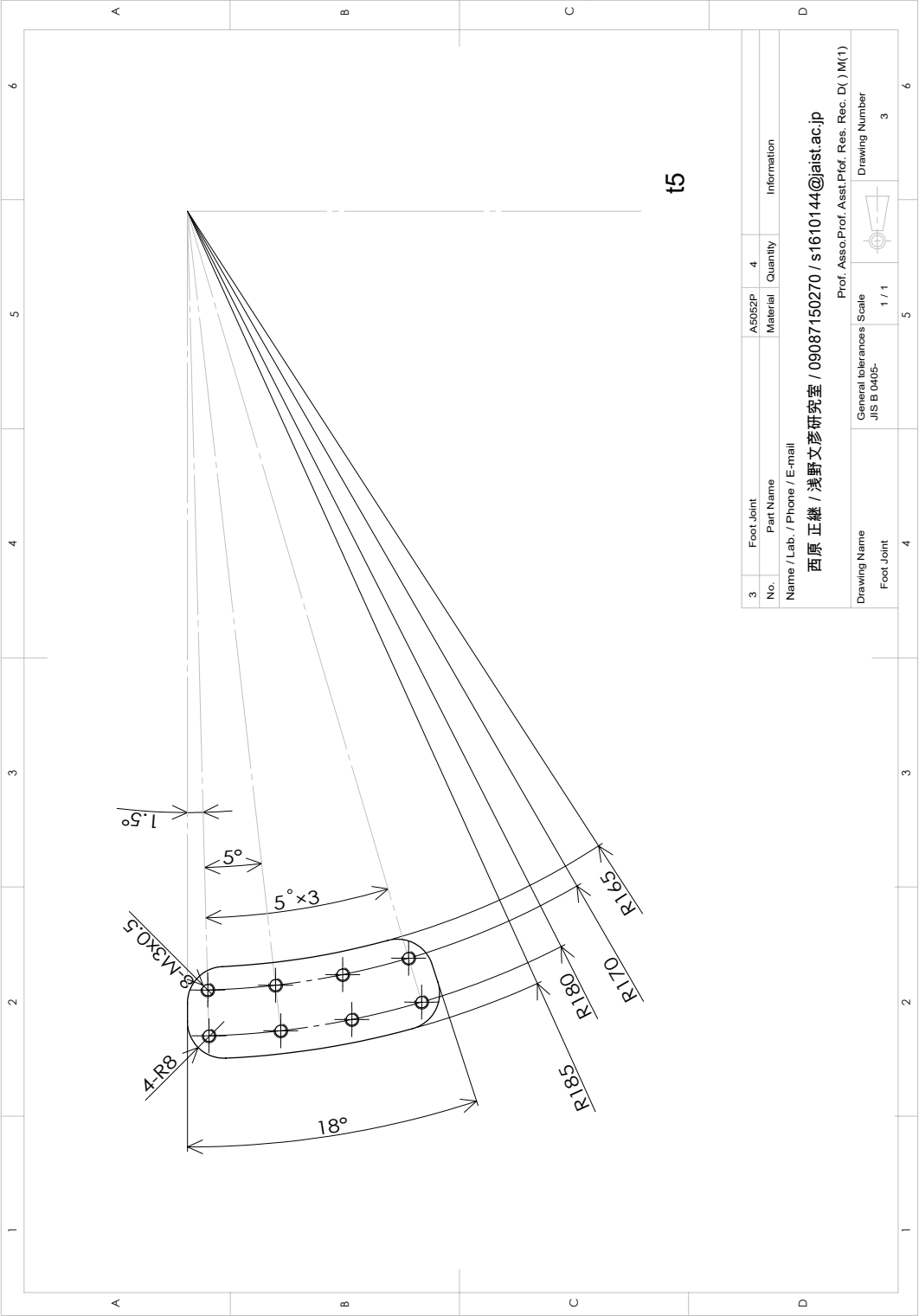


図 B.5 : Foot joint

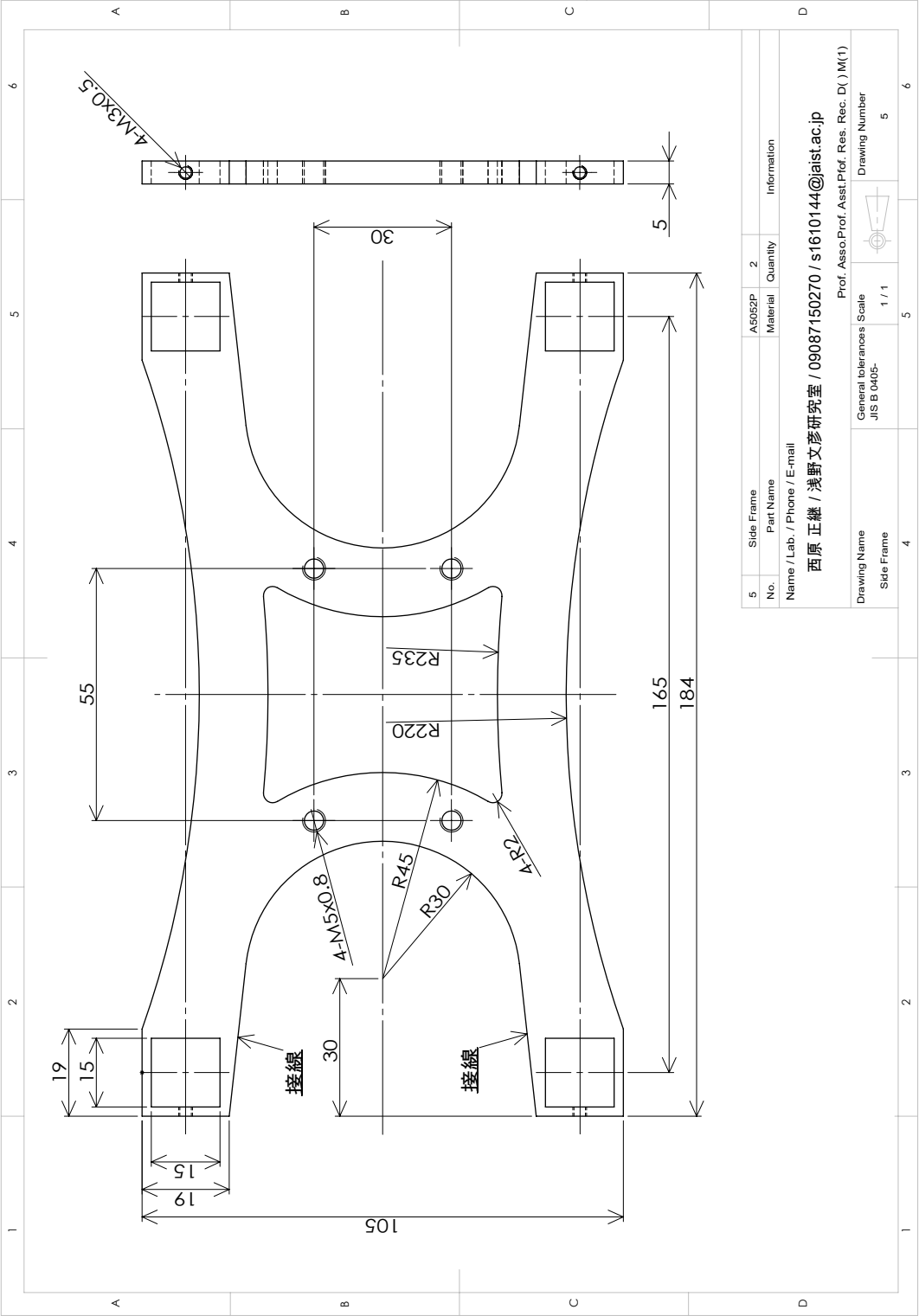


図 B.7 : Side frame

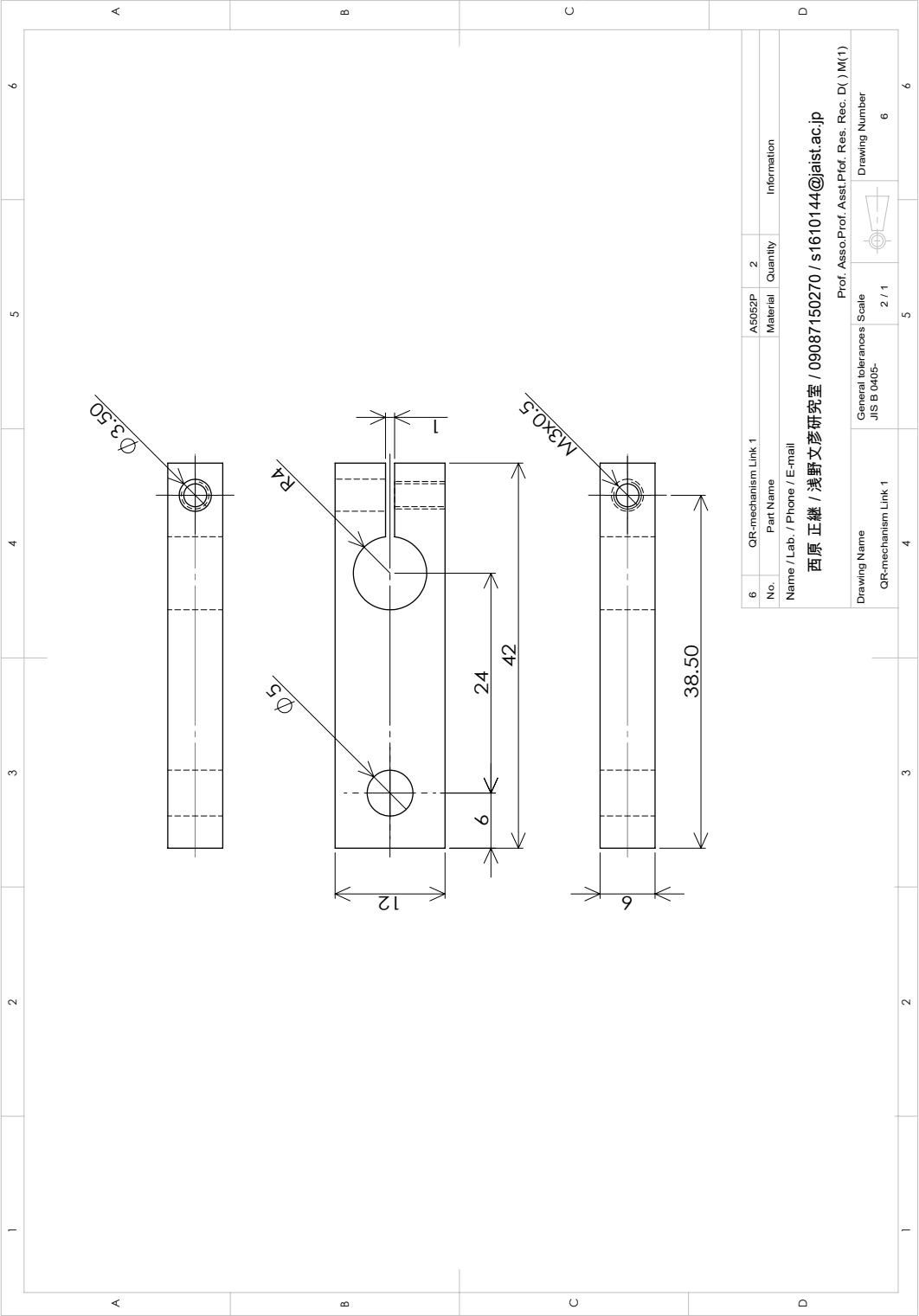


図 B.8 : QR-linkage $link_1$

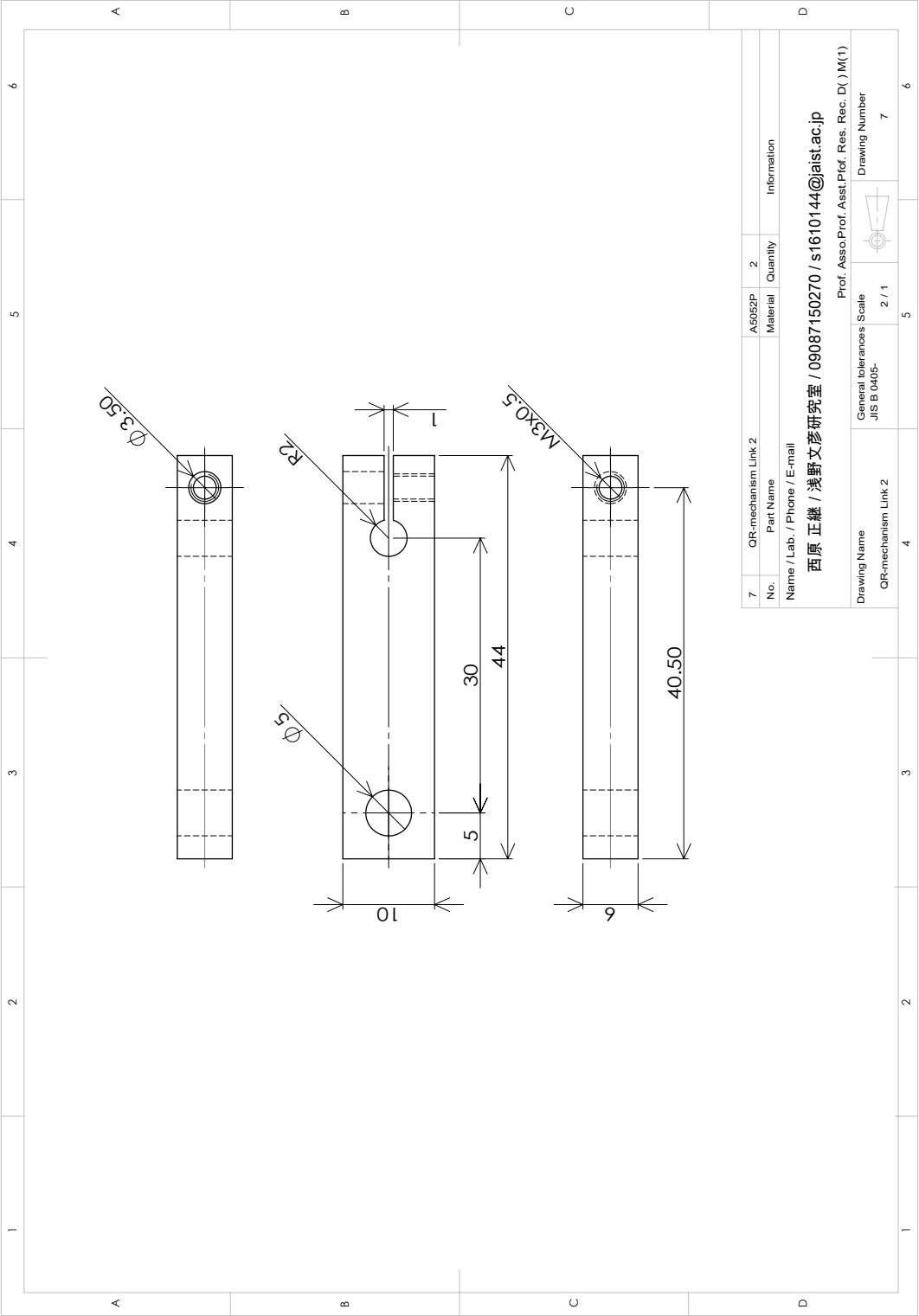


図 B.9 : QR-linkage $link_2$

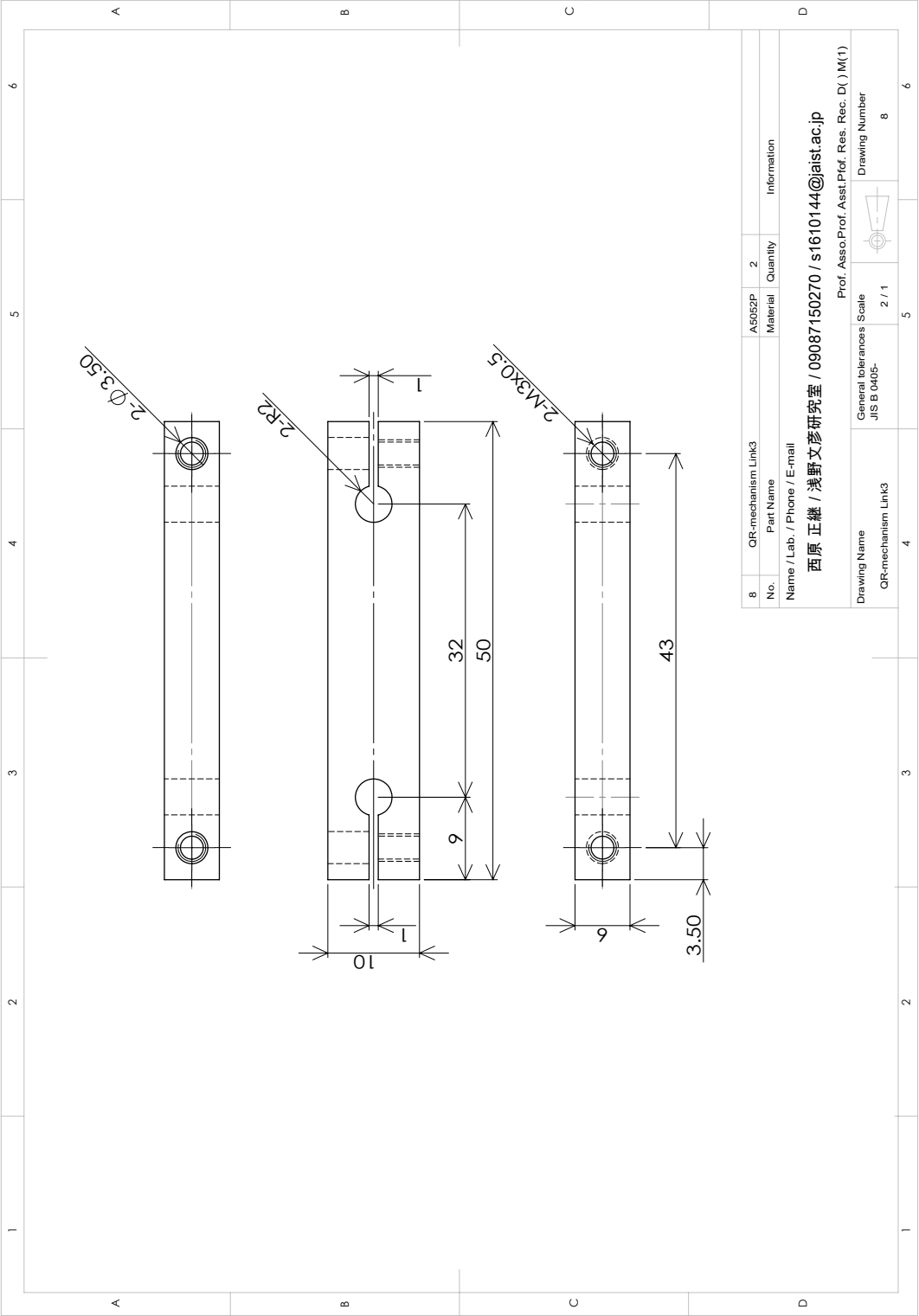


図 B.10 : QR-linkage $link_3$

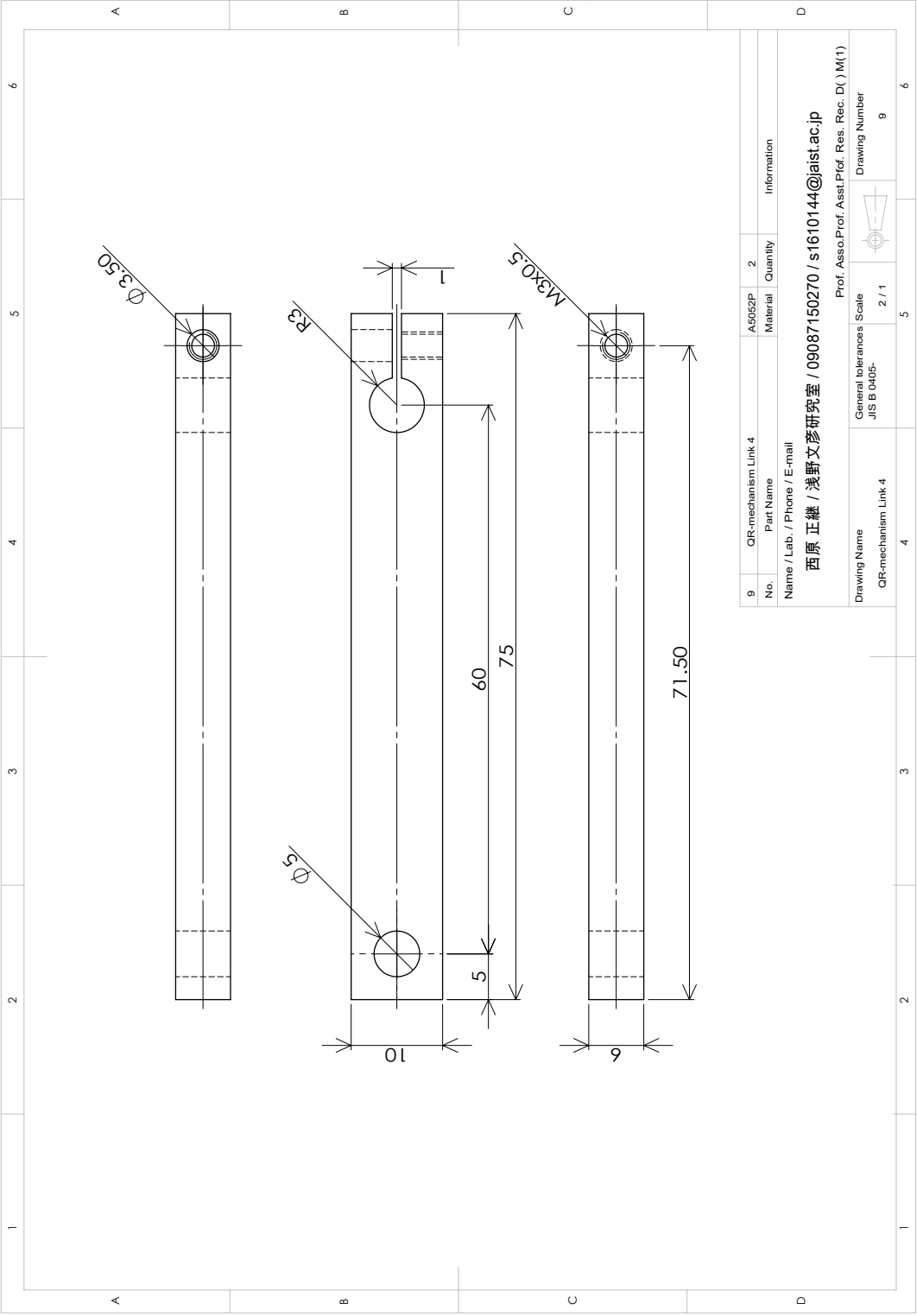


図 B.11 : QR-linkage $link_4$

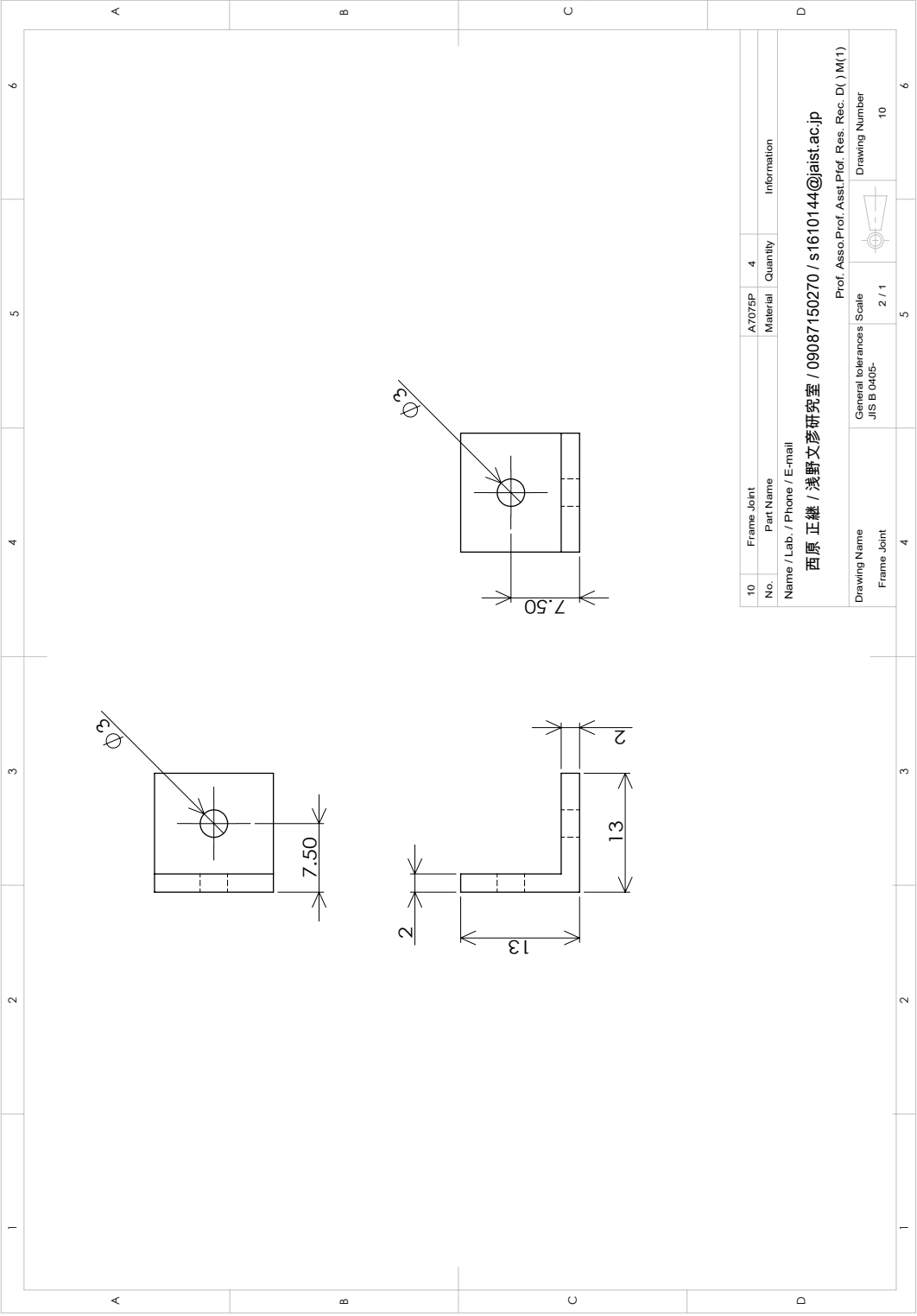


図 B.12 : Frame joint

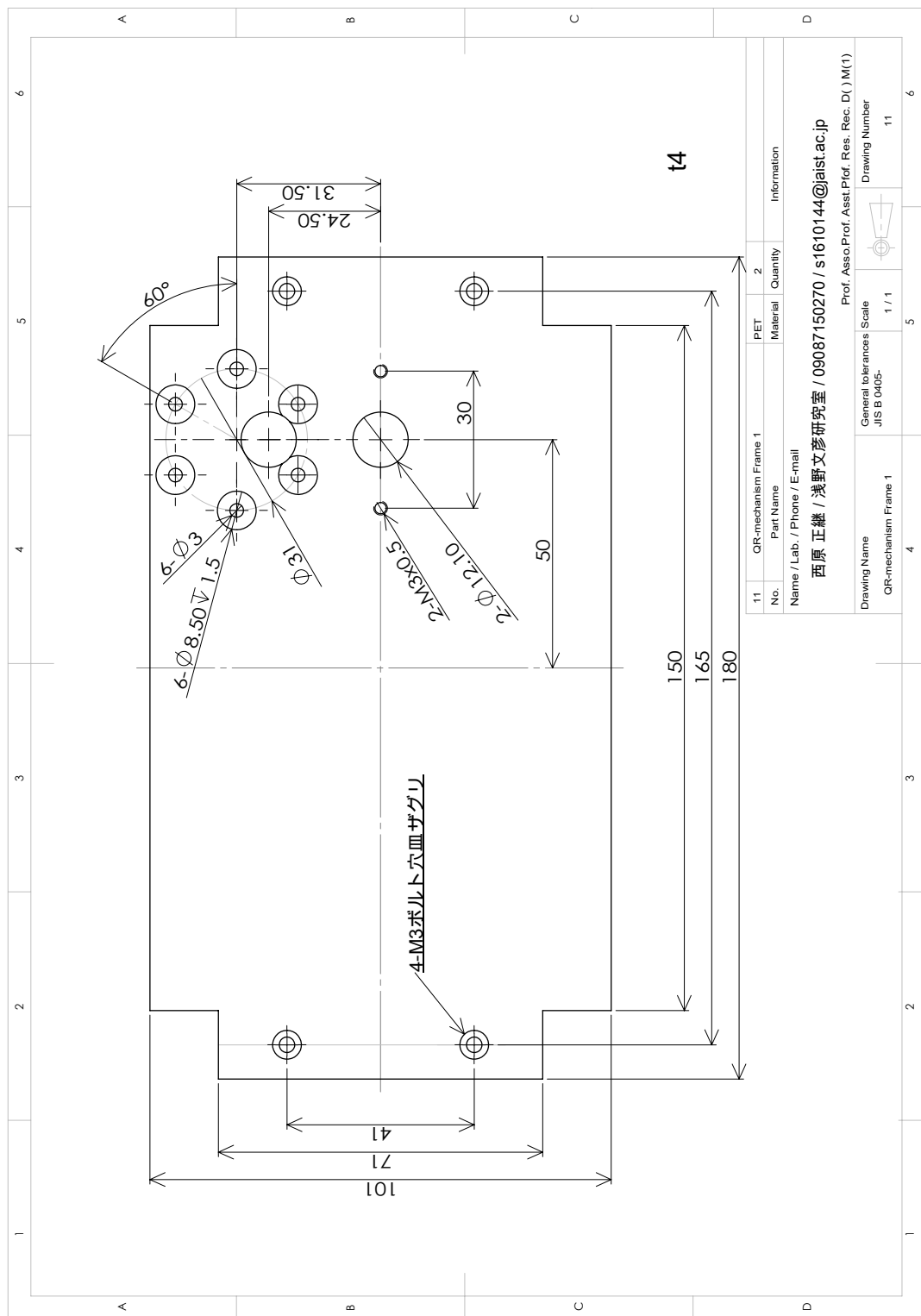


図 B.13 : QR-linkage frame 1

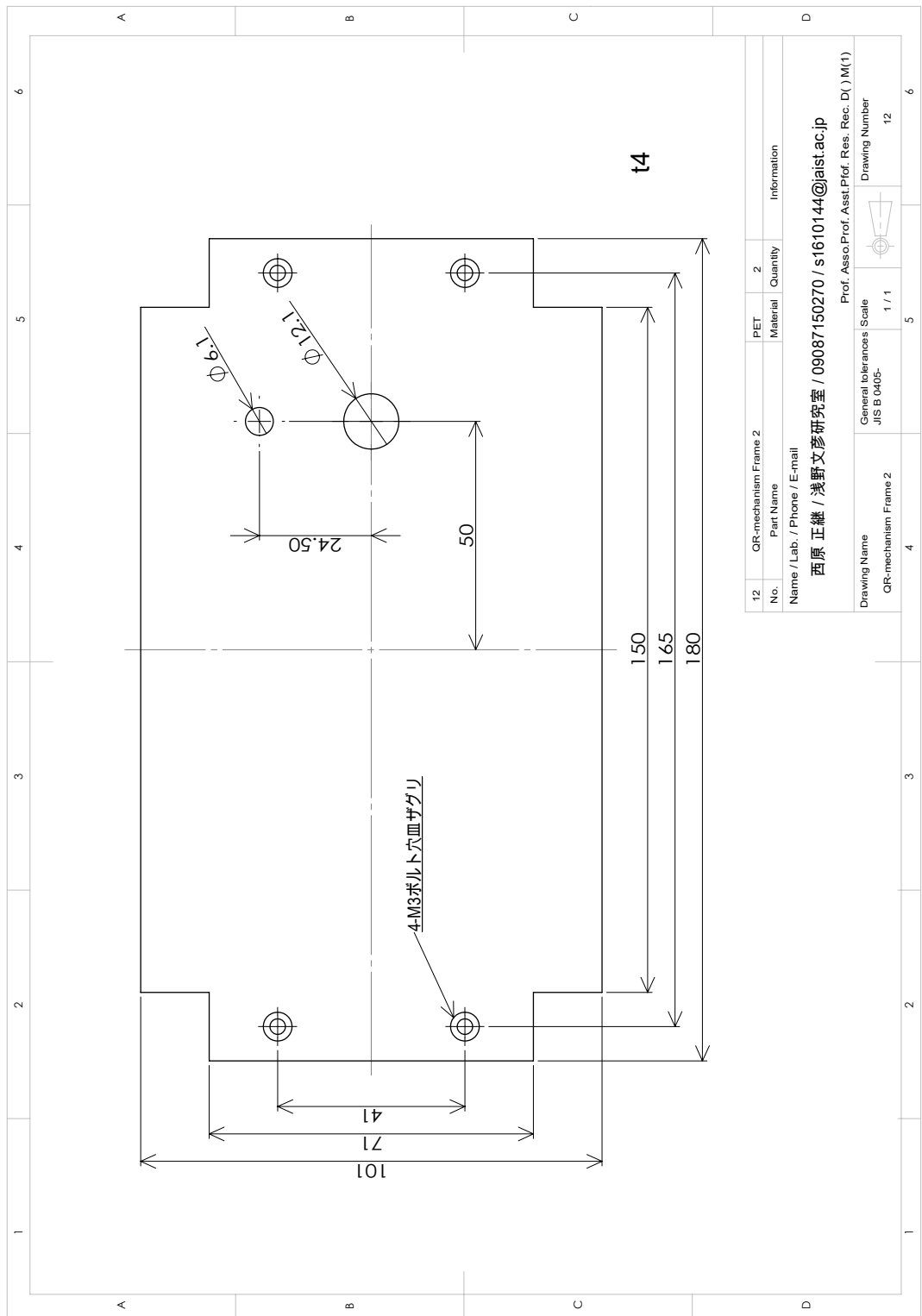


図 B.14 : QR-linkage frame 2

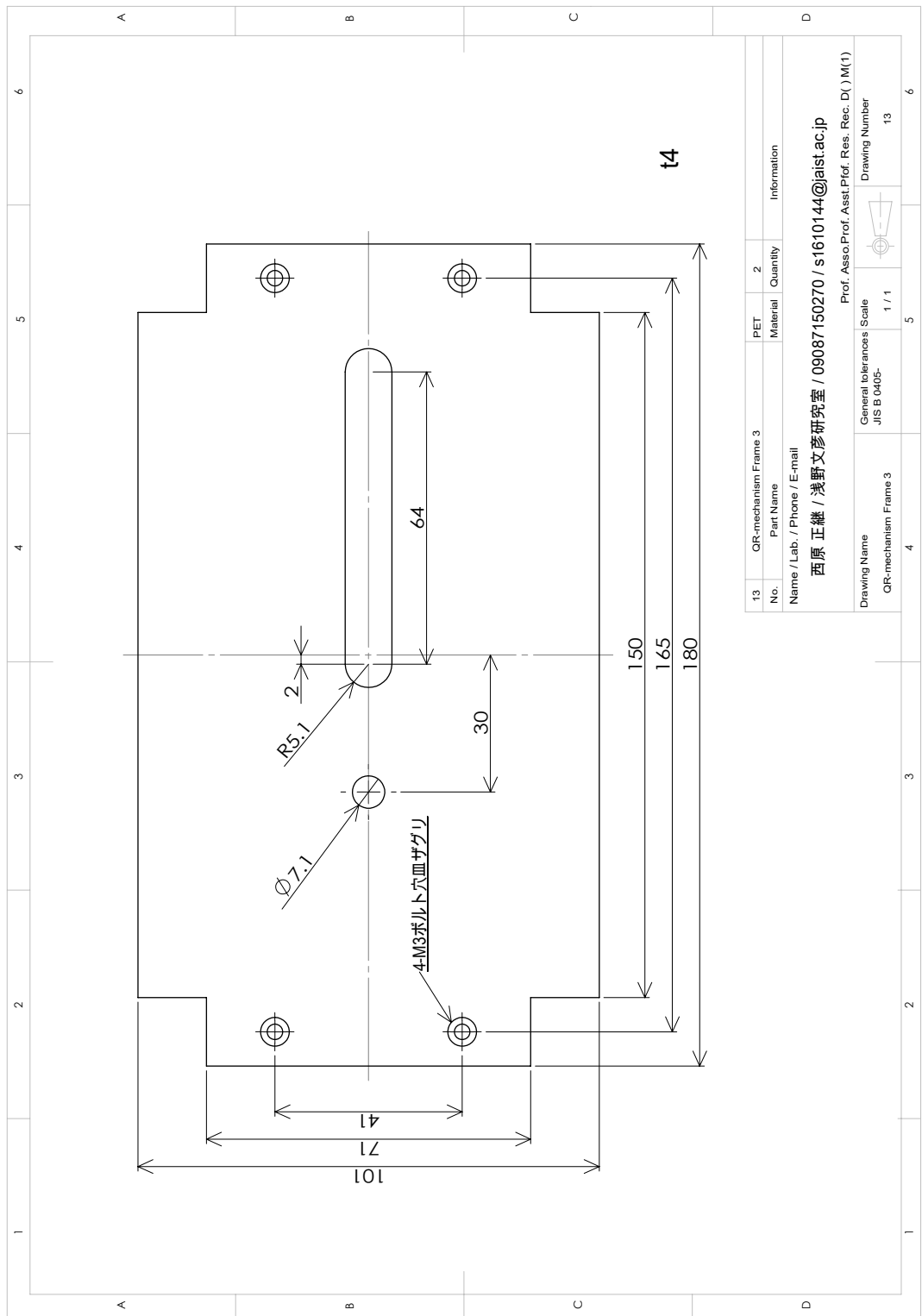


図 B.15 : QR-linkage frame 3

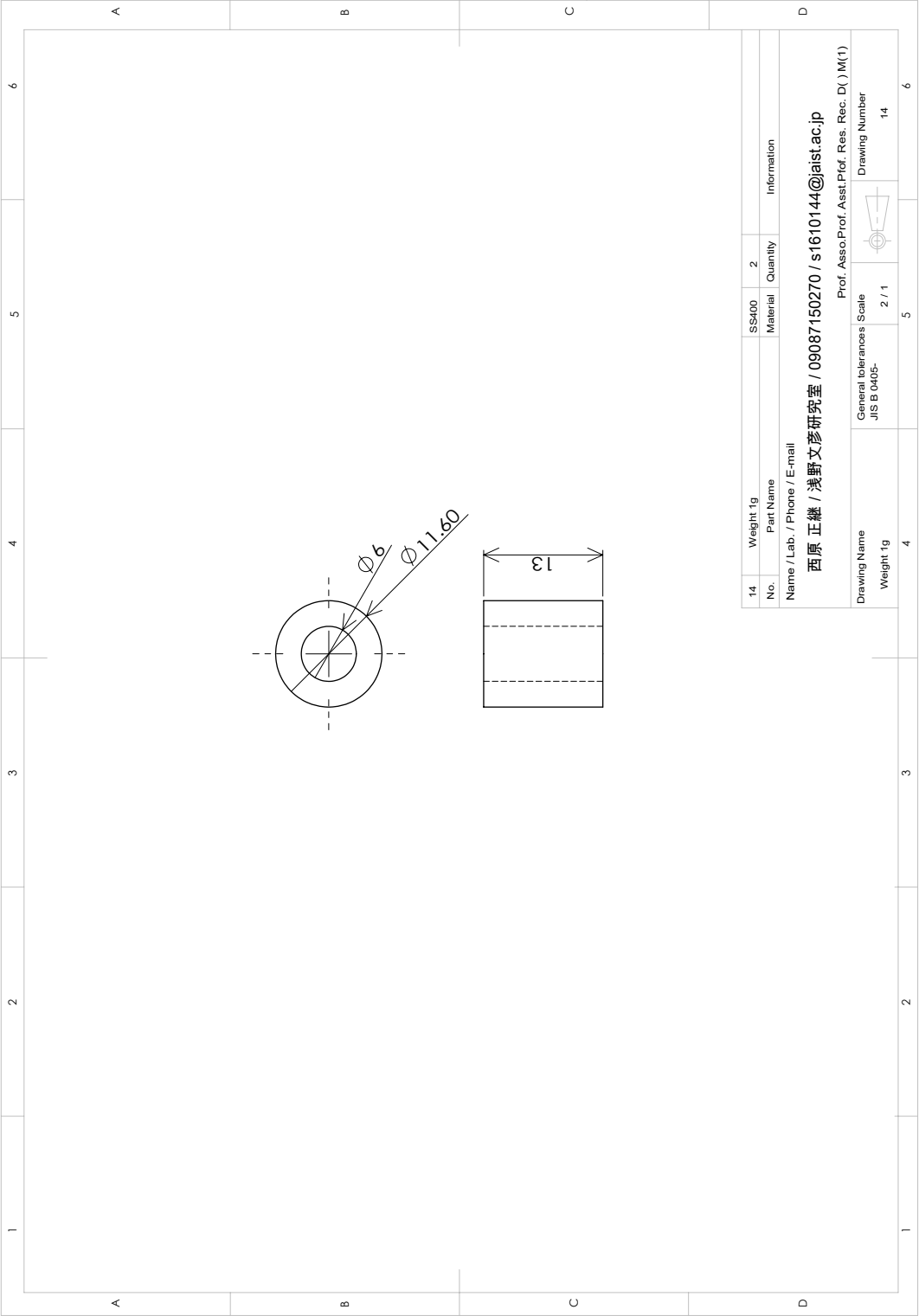


図 B.16 : Weight 1

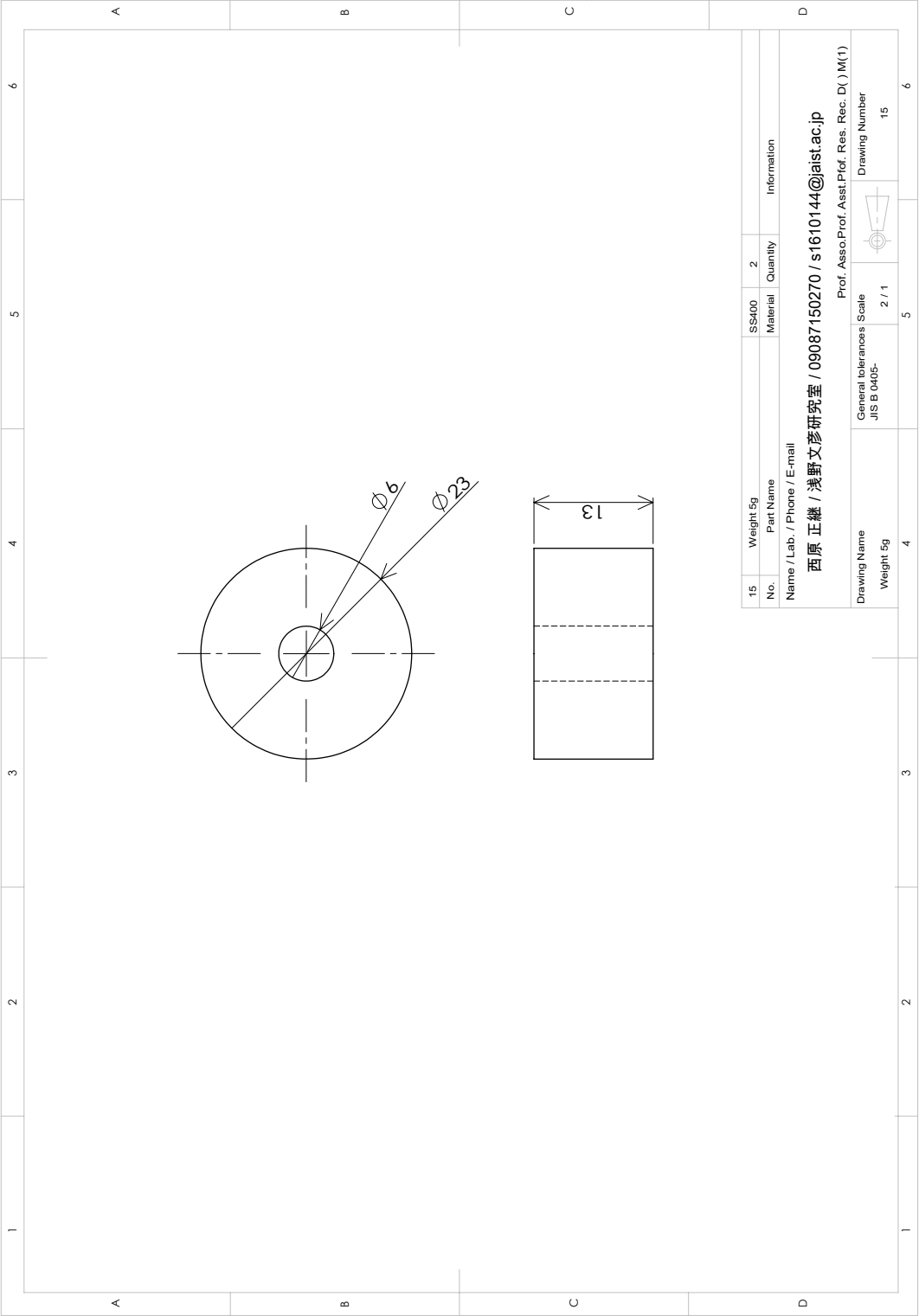


図 B.17 : Weight 2

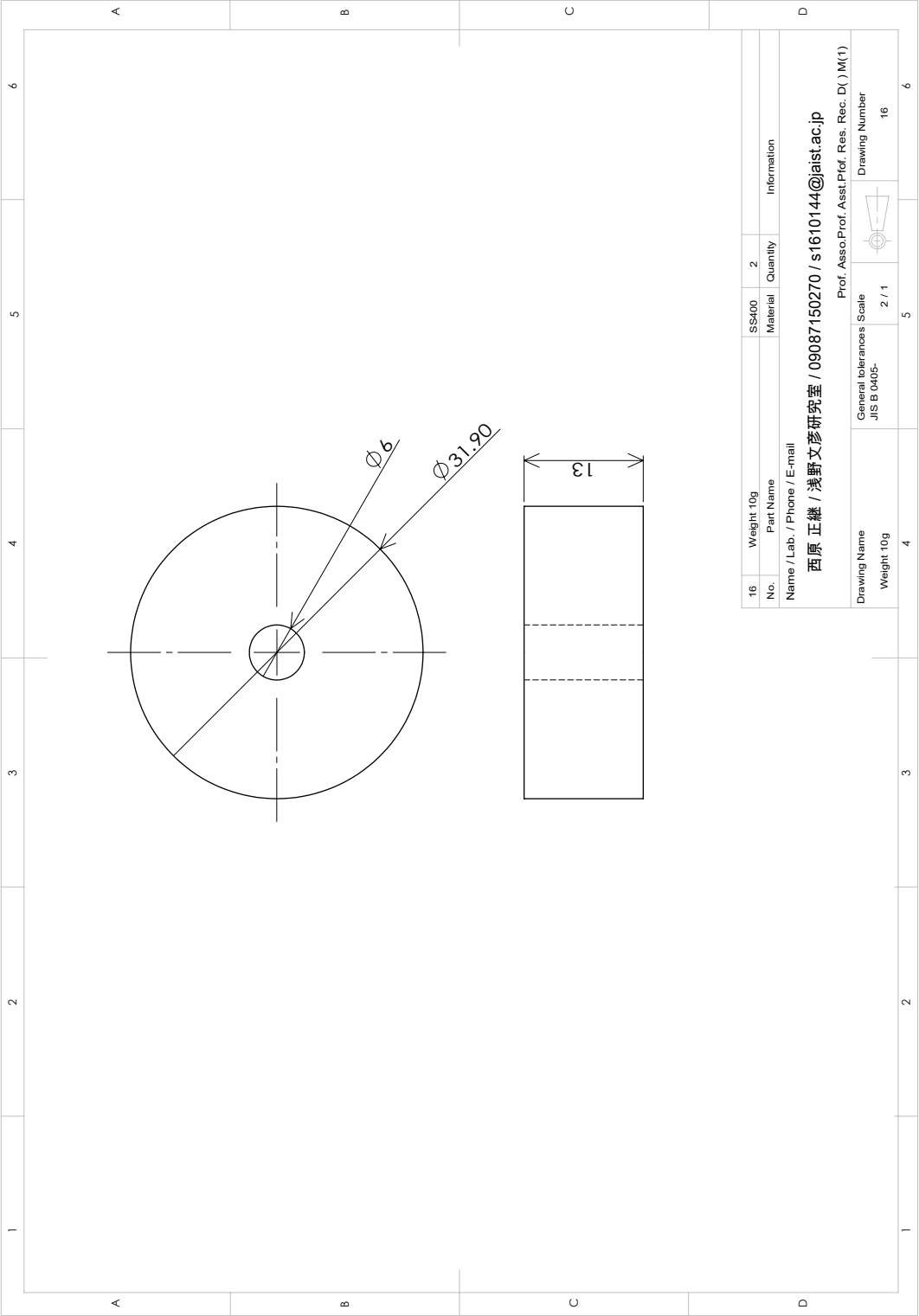


図 B.18 : Weight 3

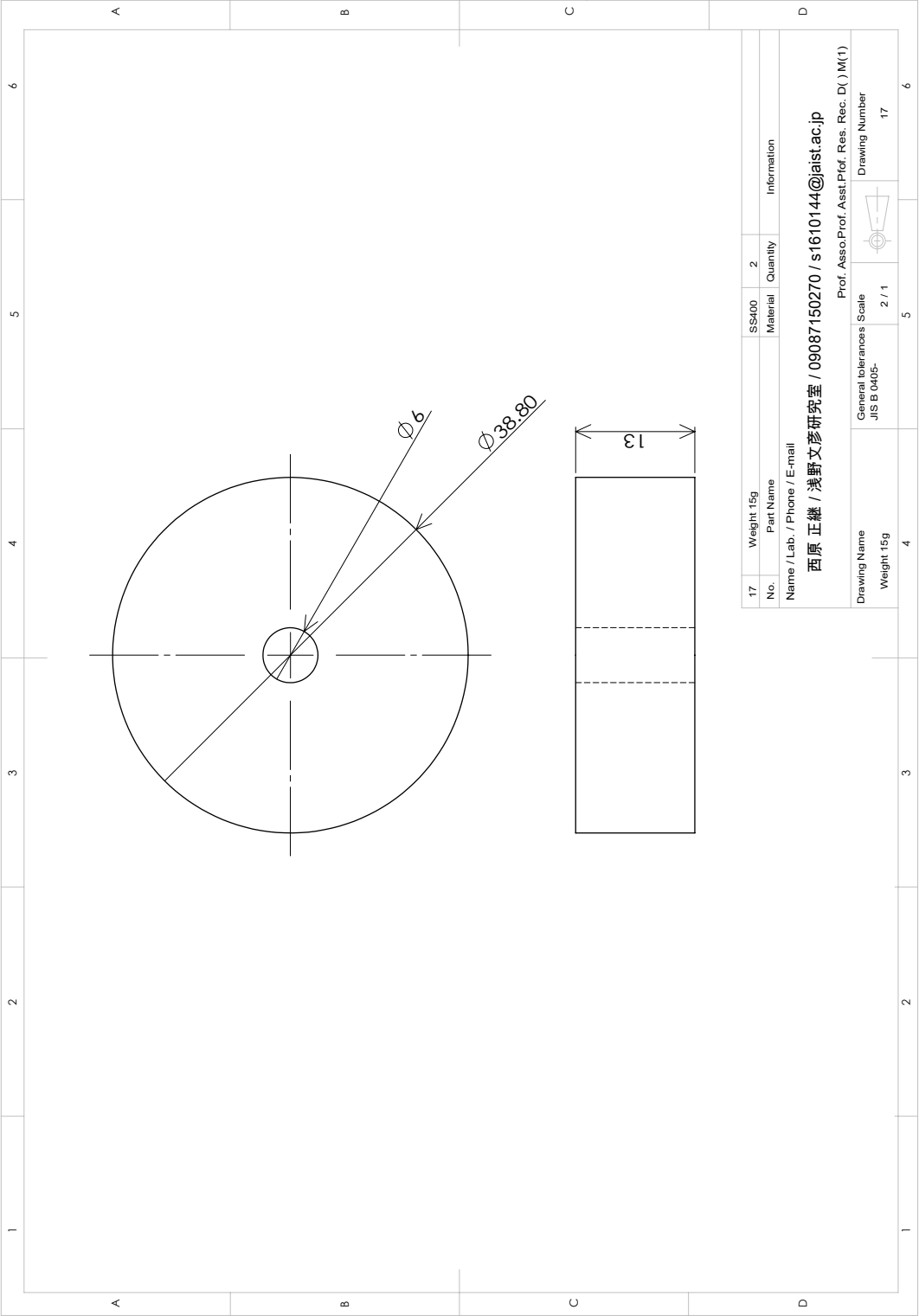


図 B.19 : Weight 4

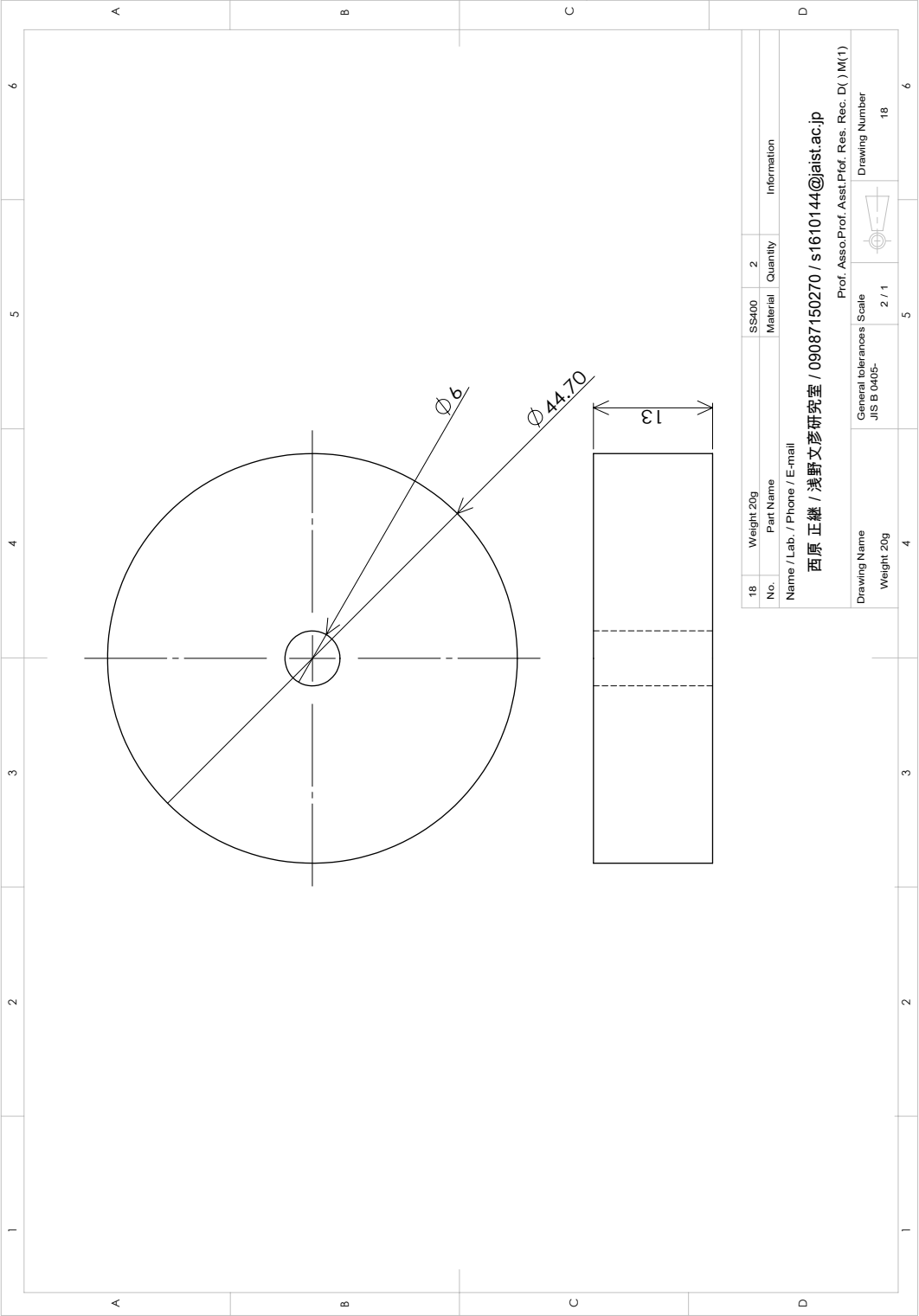


図 B.20 : Weight 5

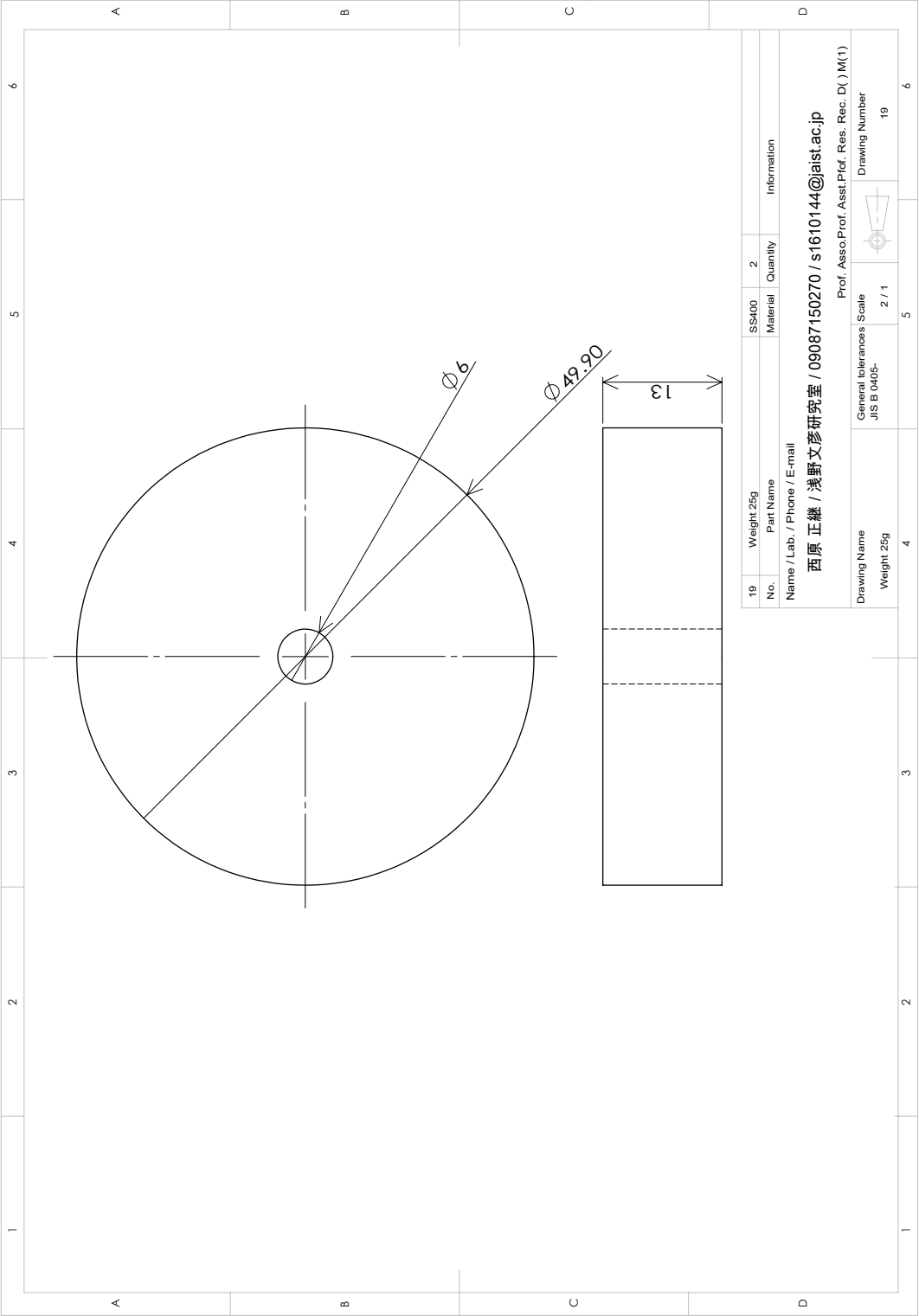


図 B.21 : Weight 6