

公立はこだて未来大学 2025 年度 システム情報科学実習  
グループ報告書

Future University Hakodate 2025 Systems Information Science Practice  
Group Report

プロジェクト番号/Project No.

11

プロジェクト名/Project Name

Make Brain Project

グループ名

グループ C

Group Name

Group C

プロジェクトリーダー/Project Leader

角脇輝映 Akira Kadowaki

グループリーダー/Group Leader

角脇輝映 Akira Kadowaki

グループメンバー/Group Member

中村心 Kokoro Nakamura

山日滯 Rei Yamabi

指導教員

香取勇一 栗川知己 島内宏和 佐藤直行

Advisor

Yuichi Katori Tomoki Kurikawa Hirokazu Shimauchi Naoyuki Sato

提出日

2026 年 1 月 21 日

Date of Submission

Jan. 21, 2026



## 概要

本プロジェクトでは、生物にみられる複雑な行動は脳のように高度な中枢制御だけによって生成されているわけではなく、身体構造や運動器に内在する物理特性が大きく寄与していると考え、最小限の構造と制御によって自立的な運動が成立する仕組みを探求した。特に不整地における移動を想定し、跳躍運動に着目した。生物の跳躍運動では、筋肉や腱の弾性といった末端の運動器により、制御負荷の低い効率的な運動が実現されている。本プロジェクトではこれを工学的に捉え、複雑な制御に依存せず、機構の回転動作によってエネルギーの蓄積と解放を完結させる跳躍機構を設計・実装した。この機構を搭載した第2号機による実証実験では、垂直跳躍において約 20.1cm の跳躍を確認し、最小限の制御と構造によって基礎的な跳躍性能を示した。

(※文責: 山日滯)

### キーワード

跳躍, 歯車, 自立的

# Abstract

This project explored mechanisms enabling autonomous movement with minimal structure and control, based on the hypothesis that complex behaviors observed in organisms are not solely generated by highly centralized control like the brain, but significantly influenced by the physical properties inherent in body structure and locomotor systems. Focusing specifically on jumping motion, we considered movement over uneven terrain. Biological jumping achieves efficient motion with low control load through terminal kinematic elements like the elasticity of muscles and tendons. This project engineered this principle, designing and implementing a jumping mechanism that completes energy storage and release solely through rotational motion of the mechanism, without relying on complex control. Demonstration experiments using the second prototype equipped with this mechanism confirmed a vertical jump of approximately 20.1 cm, demonstrating fundamental jumping performance with minimal control and structural complexity.

(※文責:Yamabi Rei)

## Keyword

Jump, Gear, Autonomous

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	本プロジェクトに必要なスキル . . . . .	1
1.2.1	跳躍機構の設計 . . . . .	1
1.2.2	ハードウェア設計 . . . . .	2
<b>第 2 章</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	先行研究 . . . . .	3
2.2	関連性の高い専門科目 . . . . .	3
<b>第 3 章</b>	<b>目標・改良点</b>	<b>4</b>
3.1	到達目標 . . . . .	4
3.2	先行研究からの改良点 . . . . .	4
<b>第 4 章</b>	<b>設計および改良プロセス</b>	<b>5</b>
4.1	第 1 号機 . . . . .	5
4.1.1	機構設計 . . . . .	5
4.1.2	機体設計 . . . . .	6
4.1.3	制作 . . . . .	7
4.2	第 1 号機で発生した問題点と改善方針 . . . . .	8
4.3	第 2 号機 . . . . .	8
4.3.1	機構設計 . . . . .	8
4.3.2	機体設計 . . . . .	9
4.3.3	制作 . . . . .	10
<b>第 5 章</b>	<b>実験および評価</b>	<b>11</b>
5.1	実験目的 . . . . .	11
5.2	実験方法 . . . . .	11
5.2.1	実験環境 . . . . .	11
5.2.2	実験条件 . . . . .	11
5.2.3	測定方法 . . . . .	11
5.3	実験結果 . . . . .	12
<b>第 6 章</b>	<b>結果</b>	<b>13</b>
6.1	第 1 号機の開発結果 . . . . .	13
6.2	第 2 号機の開発結果 . . . . .	13
<b>第 7 章</b>	<b>考察</b>	<b>14</b>
7.1	第 1 号機での問題の要因分析 . . . . .	14

7.2	第2号機における改善の有効性 . . . . .	14
<b>第8章</b>	<b>まとめ</b>	<b>15</b>
8.1	成果 . . . . .	15
8.2	課題 . . . . .	15
<b>参考文献</b>		<b>17</b>

# 第 1 章 はじめに

## 1.1 背景

一般に、移動ロボットに跳躍機構を導入することで、段差や障害物を越える能力が向上し、複雑な地形での移動や探索が可能となる。跳躍動作は、車輪型などによる連続的な移動と比較して、凸凹や段差、接地面に隙間が存在するような環境においても移動が可能であり、地形条件に依存しにくい移動手段である。一方で、跳躍には短時間で大きな力を発生させる必要があり、空中では外力による姿勢制御が行えない。そのため、例えば、離地直前のわずかな力の偏りが空中姿勢に大きく影響するなど、制御による補償が難しい。さらに、跳躍機構の設計には、瞬発的な力の生成、エネルギーの蓄積および解放機構、空中姿勢の安定化、着地時の衝撃吸収など、複数の要素を同時に満たす必要があり、設計および実機による検証は難易度の高い課題である。これらの課題に対し、機体の軽量化や弾性要素の活用によって跳躍性能の向上を図るアプローチが報告されている。この代表例として、小型跳躍ロボット Salto は、機体質量を低減することで、高い跳躍とエネルギー効率を両立していることが示されている [1]。Salto では、安定した跳躍動作を実現するために姿勢制御が組み込まれている。しかし、本プロジェクトでは、跳躍動作が機構的にどこまで成立するかを検討するため、姿勢制御に相当する要素を導入せずに機構の設計および実装を行った。また、跳躍機構を備えた移動ロボットの一例として、二足構造に車輪機構を組み合わせた Ascento が報告されている [2]。Ascento は跳躍動作によって段差を超えることができるが、平地では車輪による移動を主体としており、本プロジェクトが対象とする移動様式とは異なる。しかし、二足構造による支持および跳躍動作の成立という観点で共通しているため、車輪機構を除いた脚構造の設計思想を参考にした。以上のことを踏まえ、本プロジェクトでは、跳躍動作が機構的にどこまで成立するかに着目し、単純な構成による跳躍機構の設計および実装を行った。

(※文責: 角脇輝映)

## 1.2 本プロジェクトに必要なスキル

本プロジェクトでは、主に 2 つのスキルが求められる。

### 1.2.1 跳躍機構の設計

跳躍機構の設計とは、ロボットが地面から離れ、高さや距離を得るための力をどのように生成するかを決定することである。バネなどを用いてエネルギーを一時的に蓄積し、それを瞬間的に開放する仕組みが必要となる。本プロジェクトでは、機械要素をどのように組み合わせることで跳躍原理を成立させるかを検討した。機構設計における最も重要な検討項目は、モータの回転運動を効率よくバネの変形に変換する方法である。これに加えて、蓄積したエネルギーを確実に開放するための機構や、機構全体を小型・軽量に保つことも設計上の重要な条件とした。

## 1.2.2 ハードウェア設計

跳躍機構として考案した仕組みを実際に動作するロボットとして実現するためには、ハードウェア設計のスキルが必要となる。ハードウェア設計では、機構を構成する各部品について、形状や寸法を具体的に決定し、実機として組み立て可能な構造を設計する必要がある。本プロジェクトでは、以下の設計観点を重視した。

- 重心バランスおよびモーターの配置
- 跳躍時に耐えうる構造強度の確保
- 軽量化および小型化
- 3D プリンタによる制作を前提とした実装上の制約

また、跳躍動作においては、バネに蓄積されたエネルギーがどの経路を通り地面へ伝達されるかを実際に確認し改良へつなげる必要がある。力の伝達が適切でない場合、エネルギー損失が生じ、跳躍動作が得られない可能性がある。このように、ハードウェア設計では、理論的に成立している機構を、現実の制作条件や物理的制約の中で動作可能な形へ落とし込む能力が重要となる。

(※文責: 角脇輝映)

## 第 2 章 関連研究

### 2.1 先行研究

跳躍ロボットに関する先行研究として、ノミの跳躍能力を模倣したロボット移動の進歩を探求している事例がある [3]. 構造として、Arduino Nano と DC モータ (ギア比 1:1000) を用い、リモコン操作によって発射機構を制御し、バネに蓄積されたエネルギーを任意のタイミングで解放させる仕組みとなっている。この研究では、設計段階で Onshape や Unity を用いたシミュレーションと、FEA (有限要素解析) による構造解析を組み合わせた手法がとられている。実験の結果、軸にカーボンファイバーロッドを採用することで構造的整合性が確保できることが示された。他にも、ロボットの体高に近い跳躍を実現した。しかし、シミュレーションでは考慮しきれないエネルギー損失や重心位置による空中姿勢の不安定さが課題として残された。一方で、Zhao らはノミのトルク反転機構を模倣したリンク機構を取り入れることで、エネルギー伝達効率を最適化し、小型ながら高い跳躍性能を実現する設計論を提示している [4]. 本プロジェクトでは、シミュレーションでは考慮されにくい物理的な摩擦損失の低減と、姿勢を安定させるための低重心化計画を行う。

(※文責: 中村心)

### 2.2 関連性の高い専門科目

本プロジェクトと関連性の高い専門科目として、「ロボットの科学技術」「物理学入門」「力学基礎」「力学応用」が挙げられる。「ロボットと科学技術」は、前半では機械・電子・情報などの各分野でロボットに広く利用されている技術の基礎を学び、後半ではそれらの技術を活用したロボットの選定や作成の知識を学ぶことができる。本プロジェクトにおいて、ロボットの基礎知識や設計に必要なソフトウェアの理解は不可欠である。加えて、「物理学入門」「力学基礎」「力学応用」といった科目では、ロボットが実際の環境の中で力や運動の影響を受けて動作することを踏まえ、その設計や制御に必要な物理法則や力学的な原理についての知識を得ることができる。これらの知識は、ロボットの構造や動作原理を理解し、適切に設計や制御するために役立つと考えられる。

(※文責: 角脇輝映)

## 第 3 章 目標・改良点

### 3.1 到達目標

繰り返し跳躍が可能な単脚ロボットの構築を目指す。跳躍に必要なエネルギーを効率よく蓄え、瞬間的に解放できる機構を実現する。人の補助なしで 2 回以上の跳躍ができれば達成とする。

### 3.2 先行研究からの改良点

先行研究で課題を解決するため、本プロジェクトでは以下の 3 つのアプローチを採用した。

- 機構の簡素化  
関節部分を歯車を使用しない構造にすることで、可動部の摩擦を最小限に抑えたことにより、バネの弾性エネルギーをより効率的に跳躍の運動エネルギーへと変換することを目指した。これにより、歯車の摩擦によるエネルギーの損失を削減が期待できる。
- 軽量化  
先行研究では、上部に配置されたバッテリーやマイコンによる高重量であった。本プロジェクトでは、マイコンおよびバッテリーを機体外部に設置する有線式を採用した。これにより跳躍距離が制約されるが、機体重量の軽量化につながった。他にも、先行研究の課題であった低重心化も期待できる。
- 自立安定性の向上  
跳躍準備時や着地時に転倒が見られた。機体の転倒を防ぐための幾何学的条件を定義し、設計指針した。機体の重心の高さを  $h$ 、接地範囲の広さ  $d$  とした。本設計では、最も転倒リスクの高い方向を基準とするため、 $d$  を重心投影点から支持基底面の境界までの最短距離と定義した。

$$\theta_{limit} = \arctan\left(\frac{d_{min}}{h}\right)$$

ここで  $d_{min}$  は接地面形状における最小の安定余裕距離を表す。これにより、跳躍前の静止状態における自立安定性を確保できる。

(※文責: 中村心)

## 第 4 章 設計および改良プロセス

本プロジェクトでは、まず第 1 号機を設計・製作し、その過程で得られた知見をもとに第 2 号機的设计へと発展させた。本章では、この時間的な流れに沿って各機体の機構設計、機体設計、および製作について記述する。なお、各機体の動作結果および評価については第 5 章、第 6 章にまとめて示す。

### 4.1 第 1 号機

第 1 号機では、跳躍機構の原理検討を主目的とし、機構設計を先行した上で機体設計および製作を行った。

#### 4.1.1 機構設計

第 1 号機では、モータの回転運動を歯車列を介して押しバネの圧縮動作へ変換し、バネに弾性エネルギーを蓄積した後、それを瞬間的に開放することで跳躍動作を実現する機構を考案した。バネに蓄積される弾性エネルギー  $E$  は、次式で表される。

$$E = \frac{1}{2}kx^2 \quad (4.1)$$

ここで、 $k$  はバネ定数、 $x$  はバネの変形量である。この式により、跳躍に必要なエネルギーはバネの変形量によって決まり、変形に要する時間には依存しない。このため本設計ではモータの出力トルクが小さい場合であっても、時間をかけてバネを圧縮することで、十分なエネルギーを蓄積できると考えた。モータの回転運動をバネの圧縮動作へ変換するために、複数の歯車からなる歯車列を採用した。歯車の歯数を  $N_1$ 、 $N_2$  とすると、回転数比およびトルク比は以下の関係で表される。

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.2)$$

この関係を利用し、小径歯車から大径歯車へ回転を伝達することで回転数を低下させる代わりに、モータの回転を押しバネの圧縮に必要な力へ変換することを意図している。歯車列は合計 5 つの歯車で構成されている (表 4.1)。第 1 歯車はモータの出力軸に接続され、モータの回転を受けて取る役割を担う。第 2 歯車では回転数を低下させつつトルクを増加させ、第 3 歯車では回転を機体の反対側に移行させた。第 4 歯車では最終の歯車との位置関係を調整するために配置し、最終段では間欠歯車を採用した。

間欠歯車とは、一定角度の範囲のみ相手歯車と噛み合い、それ以外の区間では回転の伝達が遮断される特徴を持つ歯車である (図 4.1)。本機構では、間欠歯車が噛み合っている区間において押しバネの圧縮され、歯が存在しない区間に入ると、歯による拘束が解除される。これにより、圧縮されていた押しバネが一気に開放し、弾性エネルギーが瞬間的に開放される。このエネルギー開放によって、機体に跳躍動作が生じることを意図した。以上のように第 1 号機の機構設計では、歯車列によるトルク変換と、間欠歯車によるエネルギー蓄積・開放の切り替えを組み合わせ、単一のモータでの跳躍機構の実現を試みた。

表 4.1 各歯車の役割

歯車番号	役割
第 1 歯車	モーターの回転を歯車へ変換
第 2 歯車	回転数を低下させトルクを増加
第 3 歯車	エネルギーを機体の反対側へ移行
第 4 歯車	位置関係の調整
第 5 歯車	間欠歯車



図 4.1 間欠歯車

#### 4.1.2 機体設計

跳躍機構を実装する機体の設計にあたり、3D CAD を用いて機体設計を行った。機体設計は一度で完了したものではなく、製作および組立を通じて得られた知見を反映しながら、設計の見直しと改良を繰り返し行った。初期設計では、まず歯車列および押しバネの機構が動作することだけを目標に、各部品の寸法や配置を CAD 上で決定した。しかし、製作・組立の過程において、設計段階では把握できなかった問題が複数確認された。そのため、これらの問題点を解消することを目的として、機体設計の改良を段階的に行った。具体的には、軸穴の寸法精度や歯車同士の干渉、機体全体の重量増加などが課題として明らかとなった。これらに対し、軸穴については公称寸法から余裕を持たせた設計へ変更し、歯車配置については干渉を回避するよう再設計を行った。また、重量低減を目的として、強度に大きく影響しない部位については内部を空洞化する構造を採用した。このように、本機体の設計は、製作・試作の結果を反映しながら複数回にわたって改良を重ねており、最終的な設計はこれらの試行を経て決定された。

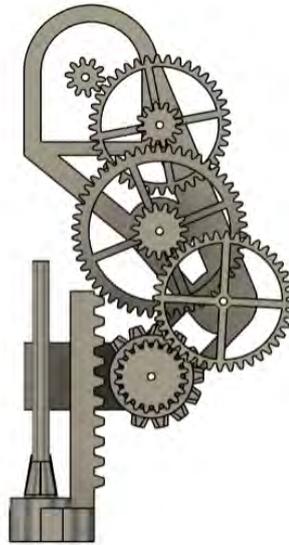


図 4.2 第 1 号機の機構

### 4.1.3 制作

機体の製作は、前章で述べた設計に基づき、主に 3D プリンタを用いて行った。製作および組み立てを進める中で、設計段階では想定していなかった問題が確認され、その都度、設計の修正および再製作を行った。まず、軸穴については、CAD 上の寸法通りに設計したにもかかわらず、実際に出力された部品では軸が通らない、あるいは回転が著しく鈍くなるといった問題が発生した。これは 3D プリンタの造形精度や収縮の影響によるものと考えられる。この問題を受けて、軸穴寸法を再検討し、設計段階で意図的に余裕を持たせることで改善を図った。また、組立作業を行う過程で、CAD 上では確認できなかった歯車同士の干渉が発生することが明らかとなった。特に、歯車の回転角度によっては接触が生じ、円滑な回転が妨げられる場合があった。これに対し、歯車配置や軸位置を見直し、再設計・再製作を行うことで干渉の解消を試みた。さらに、初期の試作機では機体全体の重量が大きく、跳躍動作に不利であることが確認された。このため、強度上問題のない部位については内部を空洞化する設計へ変更し、軽量化を図った。以上のように、機体の製作および試作を通じて複数の課題が明らかとなり、それらを設計へフィードバックすることで改良を重ねた。この反復的なプロセスにより、最終的な機体構造の妥当性を検討した。

(※文責: 角脇輝映)



図 4.3 3D プリンタで作成した第 1 号機

## 4.2 第 1 号機で発生した問題点と改善方針

第 1 号機では、押しバネを用いた跳躍機構を実装したが、跳躍動作を確認することができなかった。また、動作確認を行う過程において、機体が安定した姿勢で設置することができない問題が発生した。この自立性の問題は、機体構造が左右非対称であり、押しバネの位置や押しバネを圧縮させる歯車機構の位置が中心から大きくずれていたことが原因であると考えられた。加えて、押しバネの配置や力の伝達経路において、部品のたわみによるエネルギー損失が生じている可能性も推測された。そこで、第 2 号機では全体を見直し、まず安定した自立状態を確保して再現性のある動作実験が可能な機体の設計を目指した。その結果、左右対称な機体構造を採用する方針とした。この左右対称化により、自立性の向上だけでなく、跳躍時に作用する力を左右均等に伝達できる構造となることも期待された。さらにこの変更に伴い、バネの種類を押しバネから引きバネへ変更した。

(※文責: 角脇輝映)

## 4.3 第 2 号機

第 2 号機は、第 1 号機で明らかとなった問題点および改善方針を踏まえて設計を行った。第 1 号機では、機構を先に設計しそれを機体へ実装する方針を採用したが、第 2 号機では設計手順を見直し、先に機体構造を検討した上で、その制約条件のもとで実装可能な機構を設計する方針とした。本節は、第 1 号機との構成の統一性を考慮し、機構設計、機体設計の順序に従って説明する。ただし、実際の設計および試作の過程では、機体設計を先行し、その後に機構設計を行っている。

### 4.3.1 機構設計

第 2 号機では、機体構造の左右対称化を前提条件として、その構造に適した跳躍機構を新たに検討した。この左右対称化に変更したことで、バネの種類を押しバネから引きバネへ変更した。引きバネは、力が機体中心方向に作用するため、左右対称構造との相性が良く、重心の安定性を保ちながらエネルギーを蓄積できると考えた。そして、引きバネの伸長・開放を制御するために、本機構では遊星歯車を応用した歯車機構を採用した。一般的な遊星歯車機構は、内歯車、太陽歯車、複数の遊星歯車から構成され、遊星歯車は太陽歯車の周囲を公転しながら自転する構造をもつ。本機

構では、内歯車を用いず、太陽歯車にアームを取り付け、その先端に遊星歯車を配置する構成とした。さらに、太陽歯車とは直接噛み合わないが、遊星歯車とは噛み合う単体歯車を配置した。モータを反時計回りに回転させた場合、太陽歯車およびアームが回転し、遊星歯車も同時に回転する。この際、遊星歯車が単体歯車と噛み合うことで、遊星歯車の公転が拘束され、自転運動が単体歯車の回転として伝達される。これにより、単体歯車に取り付けたワイヤーが巻き取られ、引きバネが徐々に伸長される構造となっている。一方、モータを時計回りに回転させると、太陽歯車およびアームが逆方向に回転し、遊星歯車は単体歯車との噛み合いを失う。この結果、ワイヤーへの拘束が解除され、引きバネに蓄積されていた弾性エネルギーが瞬間的に開放される。このエネルギー開放によって、機体に跳躍動作が生じることを意図した。本機構は、考案時は実現可能性について確認が得られていなかった。しかし、先行研究を調査した結果、Elliott ら [3] によって、本プロジェクトで想定した構造と同様の遊星歯車機構を用いた跳躍ロボットが報告されていることを確認した。この先行研究の存在により、本機構が理論的および実装上成立することを確認できたため、第2号機では本構造を採用し、製作へと移行した。

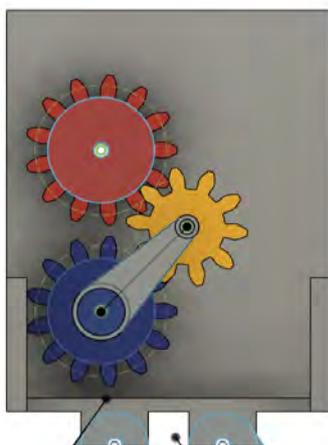


図 4.4 遊星歯車の応用機構

### 4.3.2 機体設計

第2号機の機体設計では、自立性の問題を最優先課題として取り組んだ。そのため、機体構造は左右対称とし、重心が機体中心付近に配置されるよう設計を行った。モータ、歯車機構、引きバネといった主要部品は、可能な限り左右均等に配置することで、静止状態および跳躍時における姿勢の安定性向上を図った。また、引きバネを用いた機構に合わせて、ワイヤーの取り回しや固定位置についても検討を行った。ワイヤーが機体の中心を通るよう、機体内部の空間配置を意識しながら設計や改良を進めた。また、可能な限り部品を少なくした構造により、部材の不要な変形や摩擦を抑え、エネルギー損失の低減を図った。さらに、跳躍時に発生する衝撃を考慮し、機体の一部には肉抜きを施しつつも、応力が集中すると考えられる部分には十分な厚みを持たせるなど、軽量化と強度の両立を意識した設計とした(図 4.5)。

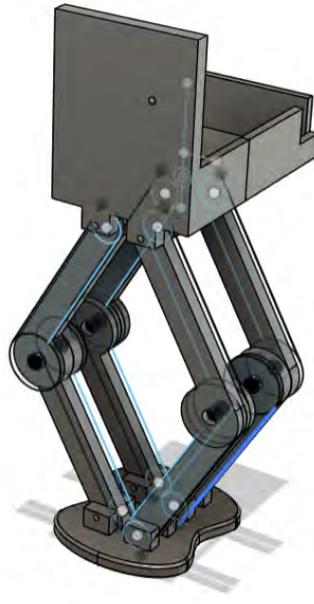


図 4.5 第 2 号機の機構

### 4.3.3 制作

第 2 号機の製作は、設計段階では把握しきれない問題が発生することを想定し、設計と製作を繰り返しながら段階的に改良を加える方針とした。実際の製作過程では、軸穴の位置誤差、部品同士の干渉など、CAD 上では確認できなかった問題が複数確認された。これらに対しては、寸法の微調整や形状の修正を行い、再度造形を行うことで対応した。また、機体重量が想定より大きくなる傾向が見られたため、強度に影響しない範囲で内部を空洞化するなどの設計変更も行った。そして、第 2 号機も第 1 号機と同様に、設計と製作を何度も往復することで、機構および機体構造の完成度を高めていった。

(※文責: 角脇輝映)



図 4.6 3D プリンタで作成した第 2 号機

## 第 5 章 実験および評価

### 5.1 実験目的

本実験では、跳躍動作が可能となった第 2 号機を対象とし、同一条件下で複数回の跳躍を行い、その跳躍の高さを測定することで跳躍性能を定量的に評価することを目的とする。

(※文責: 角脇輝映)

### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 実験環境

実験は室内で実施し、学校施設内の床面上で行った。跳躍高さ測定のため、1 cm 刻みの目盛を記した紙を作成し壁面に添付し、ロボットの跳躍動作の測定はデジタルカメラにより撮影した。

#### 5.2.2 実験条件

ロボットは各試行において同一方向に向けて配置し、跳躍動作を行わせた。初期位置の設置は手作業で行ったため、各試行間で差異が生じているが、いずれも壁面に添付した目盛紙の範囲内に収まるように調整した。ロボットへの電力供給自動で行われ、同一の動作条件下で実施した。試行回数は 5 回とし、各試行における跳躍動作を評価対象とした。

#### 5.2.3 測定方法

跳躍の高さは撮影した映像をもとに、各試行においてロボットが到達した最高位置を確認し、地面からロボット機体の最高点までの高さを測定した。なお、この実験で撮影した画像では詳細な数値が判別できなかったため、0.5 cm 刻みで跳躍距離を測定している。また、壁紙とロボットとの距離は手作業で設定したため完全には固定されていないが、本実験では跳躍の高さの相対的な傾向を把握することを目的としており、距離の差異が測定結果に与える影響は限定的であると判断した。

(※文責: 角脇輝映)

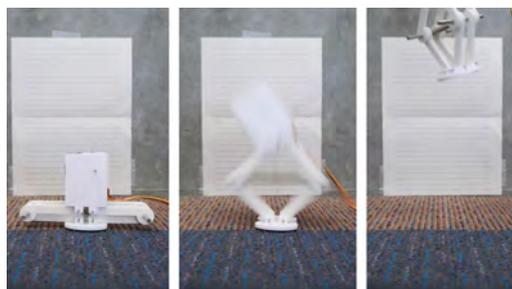


図 5.1 跳躍の過程

### 5.3 実験結果

5回計測を行った結果、平均で 20.1 cm の跳躍が見られた (表 5.1)。事前に行った計算では、損失を考慮しない予想最高高度が約 43 cm であったことから、23 cm の損失が生じた。この要因として、外部制御機器と機体を接続する配線の影響が考えられる。跳躍動作に伴い、配線の張力や剛性が機体に対して非対称な外乱として働き、モーメント  $\epsilon$  を発生させ、これが空中での姿勢を乱す要因となったと推測される。

(※文責: 中村心)

表 5.1 跳躍実験の結果

計測回数	跳躍距離
1	20.0
2	18.0
3	21.5
4	19.5
5	21.5

## 第 6 章 結果

### 6.1 第 1 号機の開発結果

第 1 号機を用いて動作確認を行った。その結果、モータの回転に伴い、機構の一部に動作は確認されたものの、機体全体として跳躍動作は実現できなかった。実験中、間欠歯車とそれに噛み合う歯車との間に隙間が生じる現象が観測された。この隙間の発生により、歯車同士の噛み合いが安定せず、回転運動が適切に伝達されなかった。その結果、押しバネを圧縮する動作に至らず、跳躍に必要なエネルギーを蓄積することができなかった。

### 6.2 第 2 号機の開発結果

第 2 号機を用いて動作確認を行った。その結果、モータの回転に伴い、太陽歯車、遊星歯車、および単体歯車から構成される歯車機構が安定して動作することが確認された。歯車機構の動作により、単体歯車に取り付けられたワイヤーが巻き取られ、引きバネが徐々に伸長する過程が確認された。さらにモータの回転方向を切り替えることで、遊星歯車と単体歯車の噛み合いが解除され、巻き取られていたワイヤーが緩み、引きバネが一気に収縮する挙動が観測された。この際、機体に上向きの力が加わることで、跳躍動作が発生することを確認した。一方で、跳躍動作の再現性は十分とは言えず、すべての試行において安定した跳躍が得られたわけではなかった。複数回の試行のうち、一部の試行では、バネが伸長した状態のまま停止する現象が確認された。また、引きバネが伸長するまでの過程において、機体の姿勢が不安定となり、左右方向への傾きが生じた。加えて、跳躍が発生した場合においても、跳躍後の着地時には姿勢が安定せず、機体が倒れることが確認された。

(※文責: 角脇輝映)

表 6.1 比較表

	第 1 号機	第 2 号機
機構	歯車列	遊星歯車の応用
バネ	押しバネ	引きバネ
機体構造	左右非対称	左右対称
自立性	不安定	安定
跳躍動作	確認できず	一部成功

## 第 7 章 考察

### 7.1 第 1 号機での問題の要因分析

第 4 章で述べた第 1 号機の問題点について、第 2 号機の結果を踏まえて要因の再検討を行う。第 1 号機では、機体を支えずに設置すると転倒してしまい、自立状態を維持することができなかった。跳躍機構における力の伝達に関して問題があった。当初は、押しバネを圧縮する部分に対して、バネと接触している部分全体に均等に力が作用すると想定していた。しかし、歯車が配置されている側だけに力が集中しており、バネに均等な圧縮力が加えられていなかったと考えられる。また、押しバネを圧縮する過程において、歯車のかみ合い部分に隙間が生じていたことも確認された。この隙間の発生により、歯が噛み合わず、力を蓄積できなかった。この要因により、エネルギーを跳躍動作へ変換することができなかった。

### 7.2 第 2 号機における改善の有効性

第 2 号機的设计では、第 1 号機で明確になった自立性の問題を踏まえ、まず安定した姿勢で設置可能な左右対称の構造を設計した。この段階で、重心を機体中心付近に配置しやすい構成にするため、バネの種類を引きバネを採用する方針とした。次に、この機体構造を前提として、どのような跳躍機構であれば実装可能かを検討した。引きバネによって蓄積したエネルギーを効率的に解放する方法について思案している中で、機構の実現性に不安があったため、既存研究の調査を行った。その結果、先行研究 [3] において、本プロジェクトで想定していた構想と類似した跳躍機構が提案されていることを確認し、本機構が実装可能であると判断した。以上の設計から製作した第 2 号機では、機体を手で支えることなく安定した姿勢で設置することが可能となり、再現性のある動作実験を行えるようになった。これは、左右対称な機体構造によって重心位置が基底面内に収まり、自立性が向上したためである。また、引きバネを用いた構成により、力が機体中心方向に作用するため、第 1 号機で見られた局所的な重量の集中が抑制された。その結果、バネに蓄えたエネルギーを効率的に跳躍動作へ変換が可能になり、第 2 号機では跳躍動作を確認することができた。以上より、第 2 号機における設計変更は、第 1 号機で発生した自立性および力の伝達に関する問題に対して有効であり、構造設計から機構設計へと段階的に検討を進め、既存研究によって実現可能性を確認するという設計プロセスが有効であったといえる。

(※文責: 角脇輝映)

## 第 8 章 まとめ

### 8.1 成果

本プロジェクトでは、単脚跳躍ロボットを設計・制作し、第 2 号機において実機による跳躍動作を確認できた。第 1 号では機構の力の伝達不足や構造剛性の不足により、十分な跳躍を実現することができなかった。しかし、第 1 号機で明らかになった問題点を踏まえ、機構および機体全体の見直しを行った結果、第 2 号機では跳躍に必要な力を地面へ伝達できる構成を実現した。また、これらを通して、アイデアの立案、設計による具体化、実機の製作、得られた結果を踏まえた改善という反復的なプロセスが、問題解決において重要であることを学んだ。特に、設計段階で十分に検討しても実際に形にすることで初めて発見する問題が多く存在することを確認した。ここでは、跳躍ロボットを対象としたが、思案と制作を往復するプロセスは、分野や課題内容が異なる場合においても有効なアプローチであると考えられる。

(※文責: 角脇輝映)

### 8.2 課題

本プロジェクトの最終的な目標は、自立かつ連続的な跳躍動作を実現することにある。現状では、跳躍準備段階におけるコアの傾きが、エネルギー解放時のバランスを乱し、連続動作を阻害する大きな要因となっている。この課題に対し、今後は物理的安定化を最優先とし、制御による姿勢復元を組み合わせる二段構えのアプローチにより、安定性向上を図る。まず、最優先課題として、離地時の姿勢を物理的に規定する機体の改良を講じる。具体的には、エネルギー蓄積用のワイヤーを機体両端に配置し、これらを同期的に巻き取る機構を導入することで、コアの傾斜を根本から抑制する。併せて、図 8.1 に示す上部関節の間隔を拡張し、機体の横剛性を高めることで、跳躍時の左右のぐらつきを構造的に解消する。これらの機構改良により、まずは垂直方向への安定した跳躍を確実なものとする。次に、着地から次動作への円滑な遷移を実現するため、ハードウェアとソフトウェアの役割分担を明確化したシステムを構築する。着地時の衝撃緩和については、単なる接地面積の拡大に留まらず、生物の足部に見られるような「浮き沈み」による受動的なクッション機構を導入し、物理的な衝撃吸収と力の分散を担わせる。一方で、着地後の姿勢制御については、センサーフィードバックに基づき、即座に次動作の初期姿勢へと補正する能動的な制御システムを開発する。以上のことから課題を改善するためには、機体による安定化を優先的に確立した上で、制御による姿勢復元を統合することにより、着地後直ちに次動作へ移行可能な連続跳躍システムの確立が求められる。

(※文責: 山日滯)

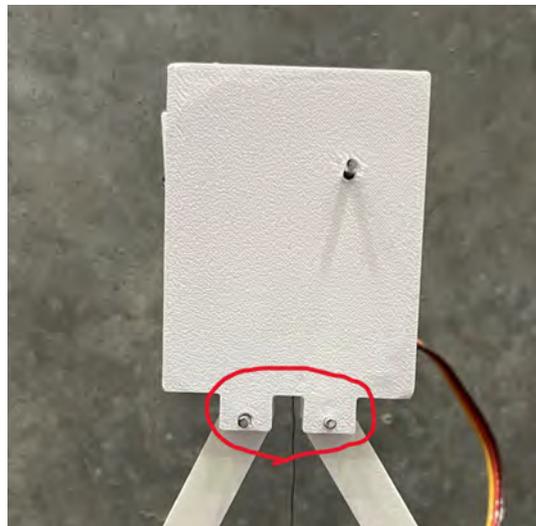


図 8.1 第 2 号機の上部和足の関節部分の画像

## 参考文献

- [1] D. W. Haldane, J. K. Yim, and R. S. Fearing, "Repetitive extreme-acceleration (14-g) spatial jumping with Salto-1P," in Proc. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sept. 2017, pp. 3345–3351.
- [2] V. Klemm, A. Morra, C. Salzmann, *et al.*, "Ascento: A Two-Wheeled Jumping Robot," in Proc. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2019, pp. 7515–7521.
- [3] Harrison Elliott, Xiangyu An, and Mingfeng Wang, "A Bio-inspired Jumping Robot: Design, Modelling and Experimental Tests," in Proc. [vol 15052. Springer], Dec. 2024, pp. 164–170.
- [4] J. Zhao, Z. Tu, L. Ren, *et al.*, "Design and analysis of a flea-inspired jumping robot with a torque-reversing mechanism," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 18, no. 6, p. 066009, Sept. 2023.