

Title	センサノードの全方向跳躍移動機構の省エネルギー化に関する研究
Author(s)	野口, 祐喜
Citation	
Issue Date	2012-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/10429
Rights	
Description	Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

**センサノードの全方向移動用跳躍機構の
省エネルギー化に関する研究**

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

野口 祐喜

2012 年 3 月

修 士 論 文

センサノードの全方向移動用跳躍機構の 省エネルギー化に関する研究

指導教官 丁 洛榮 教授

審査委員主査 丁 洛榮 教授
審査委員 浅野 文彦 准教授
審査委員 松澤 照男 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

1010048 野口 祐喜

提出年月: 2012 年 2 月

センサノードの全方向移動用跳躍機構の 省エネルギー化に関する研究

野口 祐喜 (1010048)

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

2012年2月06日

キーワード: モバイルセンサーネットワーク, 跳躍ロボット, 移動機構, 全方向移動, 低消費エネルギー.

日本は地震大国であり, USGSによれば, 地震の規模を表すマグニチュードが3以上の地震は, 年間に平均して5,110回発生している. これは, 一日におよそ14回の地震が発生していることになる.

日本に発生した1900年以降での最大の地震は, 平成23年(2011年)に起きた東北地方太平洋沖地震である. マグニチュードは9.0で, スマトラ島沖地震(2004年)以来の規模で, 世界で4番目に大きな巨大地震である. 地震により津波, 液状化, 建造物倒壊など, 被害は大きく, この地震による死者・行方不明者の数は計約2万人に上った.

このような自然災害に対する防災・人命救助システムの確立が切望されている.

近年では, 低機能で低価格なロボットを大量に使用し, 環境情報を採取可能なセンサネットワークと呼ばれる技術が発展している. 複数のセンサ付き無線端末を空間に配置し, それらが個々で取得した環境や物理的情報を無線通信により統合することで周辺環境を採取することができる. この無線端末をセンサノードと呼び, PCと直接通信を行う端末をゲートウェイセンサノードと呼ぶ. センサノードは, 通常1個以上のセンサ, 無線チップ, マイクロプロセッサ, 電源(電池)により構成される. センサネットワー

クは、アドホック機能と、各ノードから中枢ノードへデータを送るためのルーティング機能を持つ。これより、ノード間の通信に障害がでると別の通信経路を自律的に再構築する機能がある。センサノードは、広域な範囲を外部から電力供給を受けずにできる限り長い期間観測できることが最大の目的である。したがって、省電力機能を実現する技術が重要である。センサネットワークの用途は多岐にわたるが、主に監視、追跡、そして制御に集約することができる。具体例では電力や温度などのモニタ、赤外線や慣性センサによる行動モニタ、GPS/電波/音波/慣性などによる追跡などが挙げられる。多点を同時計測できるため、物理現象の分布変化を把握でき、防災システムに有効である。

静的なセンサネットワークにおいて、通信障害に対してルーティングやクラスタリングなど、経路制御による対応策しか取れない問題があった。そこで、移動機能を持つモバイルセンサノードを用いることで、構成されたネットワークが自律性・仕様や環境の変化に対する柔軟性・センサの着脱可能性(拡張性)・耐故障性といった性質をもつことができる。しかし、モバイルセンサネットワークは移動によるエネルギー消費の低減化が重要となる。広範囲な領域の観測や耐故障性の改善が実現可能でも、短期間しか運用できなければセンサネットワークとしては使用できない。そこで、モバイルセンサノードの移動機構には低エネルギー消費の機構が求められる。

従来の跳躍移動機構では、モータとバネを組み合わせたものが多く用いられており、連続的な移動を目的としていた。しかし、センサネットワークでの活用を考えた場合、必ずしも連続移動が必要とはいえない。効果的な通信ネットワークの構築には、目的の場所へ確実に移動する機構が実用的である。先行研究では、方向と距離の制御を実現した跳躍移動機構を提案している。これは、8本のバネを用いた跳躍機構で、バネ解放の同期性を満たすことにより方向と距離の制御を可能にする。バネを等間隔に配置することで、全方向に対して移動可能な機構である。提案する機構は1回の跳躍を想定しており、瞬間的なエネルギーのみ必要とする。これより、あらかじめ蓄えられたエネルギーを解放することで省エネルギー化を目指すことが可能である。

しかし、このモデルは理想的なアクチュエータが必要であるため、現実的ではない。方向と距離の制御を行うためには、脚の同時解放機能と、脚を任意に選択して解放できる機能が必要である。本研究では、これら二つの機能を有する新しい跳躍移動機構を提案する。提案する機構は、3つの機構に分けられる。1つ目は、脚を同時解放する機構である。2つ目は、脚を任意に選択して解放する機構である。3つ目は、機構を駆動させる機構である。このように、3つの機構を組み合わせて一つの跳躍移動機構を提案する。駆動方式には、バネとSMAアクチュエータを用いている。あらかじめバネにエネルギーを蓄積した状態を初期状態とし、低トルクのSMAアクチュエータで駆動することでエネルギーを解放する。必要な駆動エネルギーを抑えるために、いくつかの要因に対して検討を行い、機構モデルの設計を行った。解析により、提案する機構の必要エネルギーが少ないことを検証した。これより、方向と距離の制御を実現可能な機構であることを示した。

Low Energy Consumption Sensor Node Leaping Mechanism

Yuki Noguchi (1010048)

School of Information Science,
Japan Advanced Institute of Science and Technology

February 06, 2012

Keywords: mobile sensor network, leaping mechanism, jumping robot, low energy consumption, omni-direction mobility.

According to USGS, we suffer from the earthquake of the scale of magnitude 3 to more, average 5,110 times for a year in Japan. It is the same as that of the earthquake has occurred about 14 times for a day. The biggest earthquake is the Tohoku earthquake occurred in May, 2011 in Japan. Its scale of magnitude was 9.0. This is a scale of the fourth largest earthquakes in the world since 2004. The earthquake caused the damage such as seismic sea wave, liquefaction phenomenon and building collapse. The number of the dead and missing person has gone up to about 20,000 people in total. So the establishment of disaster prevention and the life rescue system to such a city type disaster are very aspired.

With recent advances in electronics and communication technologies, there has been increasing interest in wireless sensor networks in a variety of applications such as environmental or habitat monitoring. One of the most important issues that can be raised in such applications is how to cover an area as large as possible while maintaining network connectivity. Since sensor nodes can be scattered in an area from an aircraft, their self-relocation strategies must accompany initial node distribution to enhance network connectivity and area coverage. Regarding the self-relocation issue, most researches done to date have focused on developing scalable distributed algorithms for computing target locations, but the nodes were

unrealistically assumed to have unlimited energy resources. In practice, energy consumption caused by node movement accounts for a significant portion of battery lifetime. Considering such practical limitations, in this work, we attempt to propose a new omni-direction mobility design that can minimize node energy consumption.

Recently, node mobility has been gaining increasing attention. To extend the lifetime of a heterogeneous mobile sensor network, a mobile relay strategy is proposed, enabling mobile sensors to help relieve static sensors with burden by high network traffic. To minimize energy consumption for surveillance and data transmission, a minimal energy path planning method is presented. Meanwhile, various prototypes have been developed for mobile sensor networks such as omni-ball, evacuation robot, jumping robot and so on. Specifically, there exist some notable leaping mechanisms inspired by spring-tail, locust, or flea to move at a low energetic cost and jump relatively large obstacles. In spite of impressive leaping performance, their complicated structure and bulky size are difficult to be used for tiny wireless sensor nodes.

The main purpose of this work is to present our design of a new instantaneous mobility mechanism well suited for tiny wireless sensor nodes. Toward enhancing coverage and connectivity from initial random distributions of sensor nodes, we propose a novel one-time-use spring-powered leaping mechanism that utilizes the ground reaction force generated when selectively releasing multiple actuators mounted underneath individual sensor nodes. One significant advantage is to minimize the amount of energy required for relocation and deployment by the proposed robotic leaper. It is the most important aspect from a practical point of view is how to control the leaping distance and direction in order to improve the capability of fixed sensor networks.

This paper presents the design, performance analysis, and preliminary implementation of a one-time-use leaping mechanism for energy-saving sensor node relocation, resulting in larger coverage and higher connectivity in wireless sensor networks. It is known to be challenging and difficult to achieve controllable mobility management for energy-constrained sensor nodes that ensures an autonomous, robust, and dependable relocation even in adverse environmental conditions. It is important to develop a

simple yet efficient omni-directional mobility system with the minimum amount of energy required. We propose a new leaping actuating system that utilizes the ground reaction force generated when releasing selectively multiple pre-compressed springs mounted underneath the sensor node. In this paper, we investigate through simulations and experiments the technical features of our working prototype whose distance and direction are finitely controllable.

概要

日本は地震大国であり、USGSによれば、地震の規模を表すマグニチュードが3以上の地震は、年間に平均して5,110回発生している。これは、一日におよそ14回の地震が発生していることになる。

日本に発生した1900年以降での最大の地震は、平成23年(2011年)に起きた東北地方太平洋沖地震である。マグニチュードは9.0で、スマトラ島沖地震(2004年)以来の規模で、世界で4番目に大きな巨大地震である。地震により津波、液状化、建造物倒壊など、被害は大きく、この地震による死者・行方不明者の数は計約2万人に上った。

このような自然災害に対する防災・人命救助システムの確立が切望されている。

近年では、低機能で低価格なロボットを大量に使用し、環境情報を採取可能なセンサネットワークと呼ばれる技術が発展している。複数のセンサ付き無線端末を空間に配置し、それらが個々で取得した環境や物理的情報を無線通信により統合することで周辺環境を採取することができる。センサネットワークの用途は多岐にわたるが、主に監視、追跡、そして制御に集約することができる。具体例では電力や温度などのモニタ、赤外線や慣性センサによる行動モニタ、GPS/電波/音波/慣性などによる追跡などが挙げられる。多点を同時計測できるため、物理現象の分布変化を把握でき、防災システムに有効である。

静的なセンサネットワークにおいて、通信障害に対してルーティングやクラスタリングなど、経路制御による対応策しか取れない問題があった。そこで、移動機能を持つモバイルセンサノードを用いることで、構成されたネットワークが自律性・仕様や環境の変化に対する柔軟性・センサの着脱可能性(拡張性)・対故障性といった性質をもつことができる。しかし、モバイルセンサネットワークは移動によるエネルギー消費の低減化が重要となる。広範囲な領域の観測や耐故障性の改善が実現可能でも、短期間しか運用できなければセンサネットワークとしては使用できない。そこで、モバイルセンサノードの移動機構には低エネルギー消費の機構が求められる。

本研究では、移動に用いるエネルギーを抑えた跳躍移動機構を開発する。8本のバネを用いた跳躍機構を実現させ、バネ解放の同期性を満たすことにより方向と距離の制御を可能にする。提案する機構は1回用の跳躍を想定しており、瞬間的なエネルギーのみ必要とする。機構のモデルを示し、動作パターンの制御により方向と距離の制御を実現する手順を説明する。解析ソフトウェアによる最大高さと必要トルク、機構の同期性を示す。実機での跳躍実験を行い、機構動作の妥当性を検証する。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 モバイルセンサネットワーク	3
1.3 本研究の目的	4
1.4 本稿の構成	4
第2章 ロボットの移動方法	6
2.1 車輪形	6
2.2 クローラ形	8
2.3 脚形	9
2.3.1 2脚	9
2.3.2 多脚	10
2.3.3 脚機構の種類	11
2.4 特殊移動形	13
第3章 跳躍機構	14
3.1 関連研究	14
3.1.1 小型跳躍移動機構	14
3.1.2 車輪形跳躍移動機構	17
3.2 関連研究への問題提起	19
3.3 先行研究	19
3.3.1 跳躍モデル	19
3.3.2 地面への力	21
3.3.3 シミュレーション	23
3.3.4 移動による通信接続性向上の検証	27
3.4 先行研究への問題提起	29
第4章 仕様	30
4.1 地形	30
4.2 無線モジュール	31
4.2.1 MICA MOTE	31
4.2.2 PFU-Node	31

4.3	アクチュエータ	35
4.4	センサ機能	37
4.5	バネの選定	37
第 5 章	脚解放の同期性を考慮した鉛直方向跳躍移動機構	39
5.1	原理	39
5.2	設計	40
5.2.1	Disk-2 と anchor の摩擦	41
5.2.2	解放パターンの生成	43
5.2.3	数式モデル	44
5.3	解析	46
5.3.1	必要トルク解析	46
5.3.2	脚解放の同期性	48
5.3.3	最大跳躍高さ解析	49
5.4	試作機	49
5.4.1	ver.1	49
5.4.2	ver.2	51
5.5	実験	52
5.5.1	跳躍実験	52
5.5.2	同期性実験	54
5.6	まとめ	56
第 6 章	方向と距離の選択が可能な跳躍移動機構	57
6.1	原理	57
6.2	機構	57
6.2.1	脚同時解放機構	60
6.2.2	脚解放選択機構	66
6.2.3	Disk 回転駆動機構	67
6.3	解析	69
6.3.1	脚同時解放機構	69
6.3.2	脚選択解放機構	71
6.3.3	Disk 回転駆動機構	73
6.3.4	鉛直方向跳躍	76
6.3.5	方向と距離を制御した跳躍	79
6.4	駆動ユニット	81
6.5	試作機	83
6.5.1	脚同時解放機構	84
6.5.2	脚解放選択機構	87
6.5.3	Disk 回転駆動機構	88

第1章 序論

1.1 背景

日本は地震大国であり，USGS ¹によれば，地震の規模を表すマグニチュードが3以上の地震は，年間に平均して5,110回発生している．これは，一日におよそ14回の地震が発生していることになる．

日本に発生した1900年以降での最大の地震は，平成23年(2011年)に起きた東北地方太平洋沖地震(図1.1)である．マグニチュードは9.0で，スマトラ島沖地震(2004年)以来の規模で，世界で4番目に大きな巨大地震である．地震により津波，液状化，建造物倒壊など，被害は大きく，この地震による死者・行方不明者の数は計約2万人に上った．

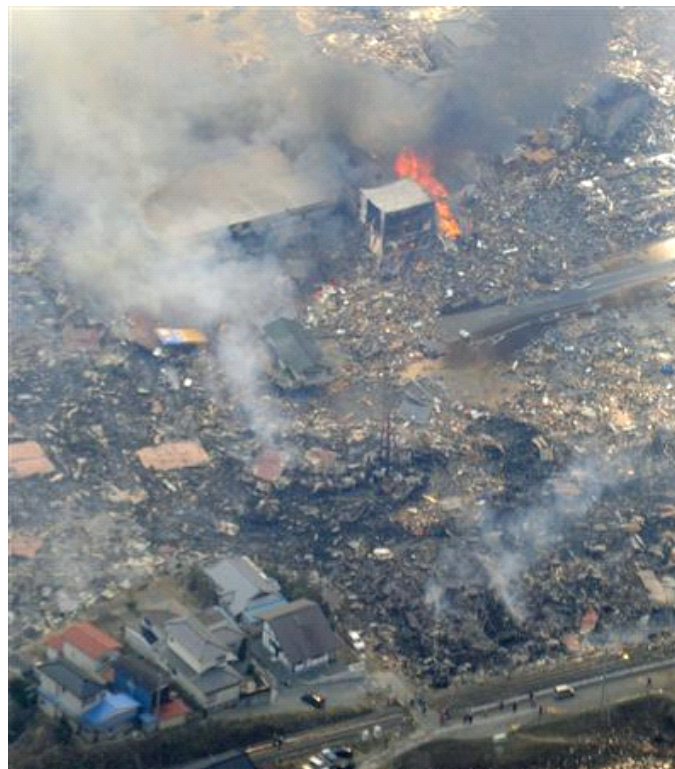


図 1.1: 東北地方太平洋沖地震

¹アメリカ地質調査所 1996年～2005年の気象庁の震源データをもとに算出

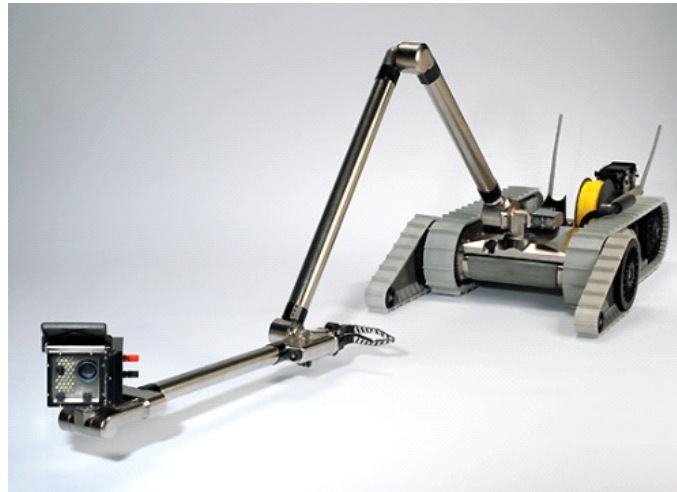


図 1.2: パックボット

このような自然災害に対する防災・人命救助システムの確立が切望されている。

津波により発生した原子力発電所の事故により、発電所内に放射能が充満し人間が入ることができない環境での探索や作業が必要となった。この状況で、投入されたのが図 1.2 に示す irobot 社のパックボットである。このロボットは、特殊な環境においての探索や作業を実行できるロボットである。このような、1 台での探索や作業を行うロボットは、高機能であり高価格である特徴をもっている。

しかし、災害や、事故を未然に防ぐ防災システムの確立のためには、現場の環境情報の変化を事前に察知する必要がある。このため、常に周辺の情報取得することが理想的であると考えられる。1 台の高性能なロボットが作業できる範囲は限られており、高価格であるため大量に使用することはコストの面で負担になる。

近年では、低機能で低価格なロボットを大量に使用し、環境情報を採取可能なセンサネットワークと呼ばれる技術が発展している [1][2]。図 1.3 にセンサネットワークの概念を示す。図の様に、複数のセンサ付き無線端末を空間に配置し、それらが個々で取得した環境や物理的情報を無線通信により統合することで周辺環境を採取することができる。この無線端末をセンサノードと呼び、PC と直接通信を行う端末をゲートウェイセンサノードと呼ぶ。センサノードは、通常 1 個以上のセンサ、無線チップ、マイクロプロセッサ、電源 (電池) により構成される。センサネットワークは、アドホック機能²と、各ノードから中枢ノードへデータを送るためのルーティング機能³を持つ。これにより、ノード間の通信に障害がでると別の通信経路を自律的に再構築する機能がある。センサノードは、広域な範囲を外部から電力供給を受けずにできる限り長い期間観測できることが最大の目的である。したがって、省電力機能を実現する技術が重要である。

²各ノードが自律的にルーティングを行い通信を行う機能

³情報を送信するため、コンピュータネットワーク上での経路を見つけ出す手法

センサネットワークの用途は多岐にわたるが、主に監視、追跡、そして制御に集約することができる。具体例では電力や温度などのモニタ、赤外線や慣性センサによる行動モニタ、GPS/電波/音波/慣性などによる追跡などが挙げられる。多点を同時計測できるため、物理現象の分布変化を把握でき、防災システムに有効である。

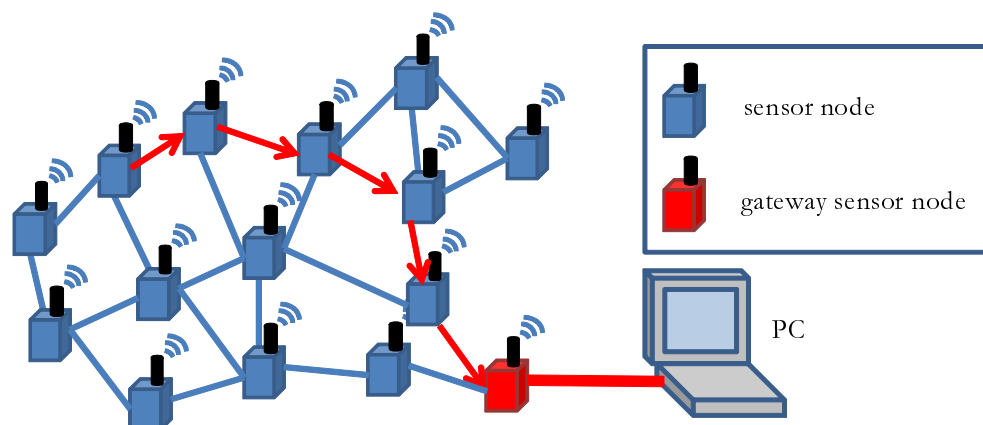


図 1.3: センサネットワーク

1.2 モバイルセンサネットワーク

センサノードが移動機能を持つモバイルセンサネットワークと呼ばれる技術がある。静的なセンサネットワークにおいて、通信障害に対してルーティングやクラスタリングなど、経路制御による対応策しか取れない問題があった。そこで、移動機能を持つモバイルセンサノードを用いることで、構成されたネットワークが自律性・仕様や環境の変化に対する柔軟性・センサの着脱可能性(拡張性)・対故障性といった性質をもつことができる [3][4]。

モバイルセンサネットワークの運用の一例を図 1.4 に示す。センサノードを広範囲に配置する方法の一つに、図 1.4(a) に示すように上空からの投下によるランダム配置があげられる。これは、災害時など一分一秒を争うような状況において迅速な配置を行う事が可能である。配置場所などの正確な位置決めを必要とせず、数百個単位のセンサノードを投下することができる。しかし、この配置方法では正確な位置決めが設定できないため、効果的なネットワーク構築を実現することができない。例えば、図 1.4(b) に示すように、空中から投下したセンサノードが他のノードと初めて通信を試みた時に、通信領域外に配置されたセンサは、他のノードとの通信を行う事ができない問題が生じる。図 1.4(b) は、通信可能なセンサノードを青色で示し、通信範囲外のものを赤色で示している。また、あるノードが故障した場合、観測情報やそのノードを通信経路としている他のノードの観測情報を得ることができない問題が発生する。

このとき、故障したセンサの位置情報を他のノードが把握していると仮定する。静的なセンサを用いる場合、故障センサの担当領域の情報を取得することができない。これを克

服するには、人間がセンサの配置を変更するか、新たなセンサを設置する必要がある。しかし、センサネットワークにおけるセンサの故障は頻繁に生じるため手間である。そこでセンサノードに移動機能を持たせた場合、故障したセンサの担当領域を埋め合わせるようにセンサが自律的に再配置される。また、モバイルセンサネットワークは、拡張性をもつので、正常なセンサの数の減少によって十分な情報が取れなければ、任意の位置にセンサを投入することで、自律的に効果的なネットワークを再構築することが可能である。

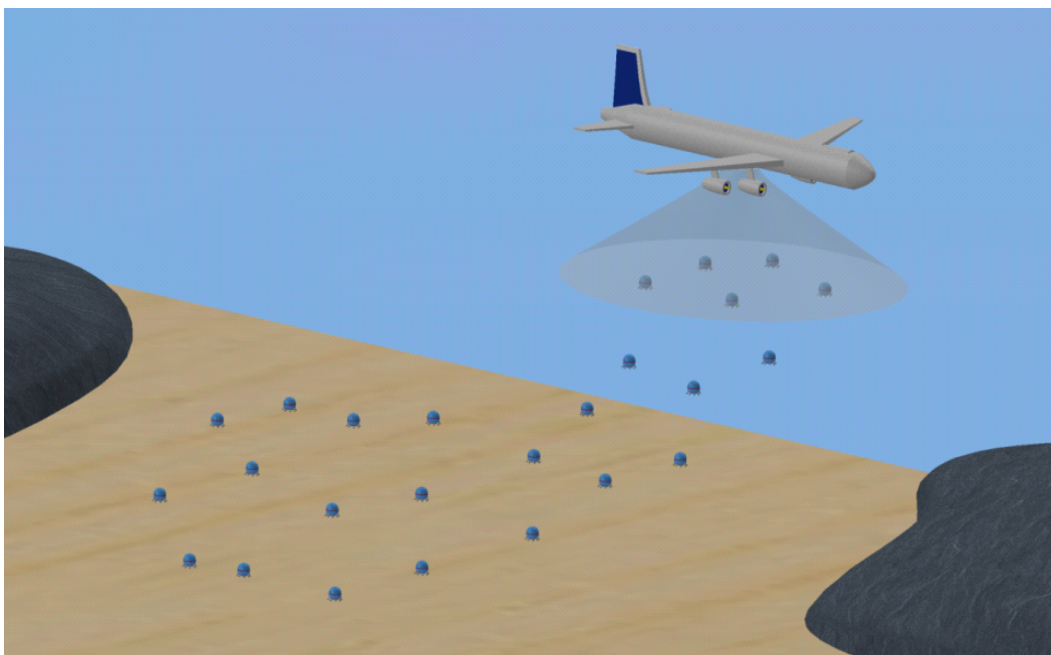
しかし、モバイルセンサネットワークは移動によるエネルギー消費の低減化が重要となる [5][6]。広範囲な領域の観測や耐故障性の改善が実現可能でも、短期間しか運用できないセンサネットワークとしては使用できない。そこで、モバイルセンサノードの移動機構には低エネルギー消費の機構が求められる。

1.3 本研究の目的

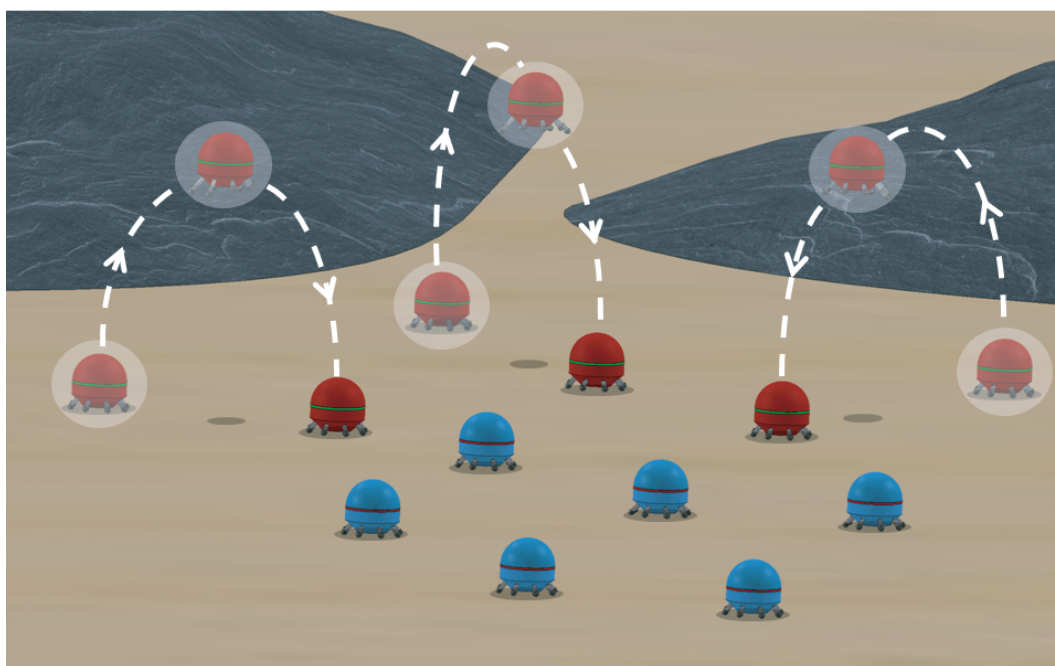
本研究の目的は、分散配置したセンサノードが自律的に移動を行い、効果的な通信ネットワークを構築して、目的の領域の環境情報を取得することである。この目的を達成するために、本研究では、モバイルセンサネットワークに応用可能なセンサノードの移動機構の開発を行った。この機構は、移動のためのエネルギー消費を抑えた機構であり、センサネットワークにおいて有効であると考ええる。

1.4 本稿の構成

本稿では、第2章でロボットに用いられている移動機構の特徴と最近の研究を述べる。第3章では、跳躍移動機構を有するロボットの関連研究と先行研究を示す。第4章では、機構の仕様について検討した。第5章では、バネを用いた8脚の同時脚解放機構を提案し評価する。第6章では、脚を斜めに設置した脚解放機構を提案している。本稿は、以上のような構成で、跳躍移動ロボットへの同時脚解放機構の適用に関する妥当性と省エネルギー化への有効性を示す。



(a) センサノードの空中投下によるランダム配置



(b) 移動による通信領域の拡大や拡充

図 1.4: Mobile Sensor network

第2章 ロボットの移動方法

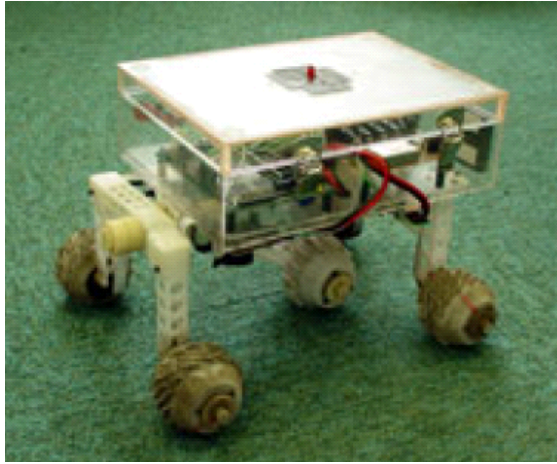
現在，移動方法に関する研究は，多種多様である [27]．したがって，ロボットへの応用方法も様々であり，いくつかの要因を示す．

- (1) マニピュレータに移動機能を付加したもの
- (2) 検査機に移動機能を付加したもの
- (3) 工場内無人誘導搬送車 (AVG:Automated Guided Vehicle)
- (4) 環境を認識して障害物を回避し経路を設計できる能力をもつ移動機構．
- (5) 通常の移動機械では行えない移動形態，様式 (二足歩行など)
- (6) 通常の移動機械では行えない移動経路を通行可能なもの (全方向移動など)
- (7) 通常の移動機械では行えない移動環境を通行可能なもの (不整地など)

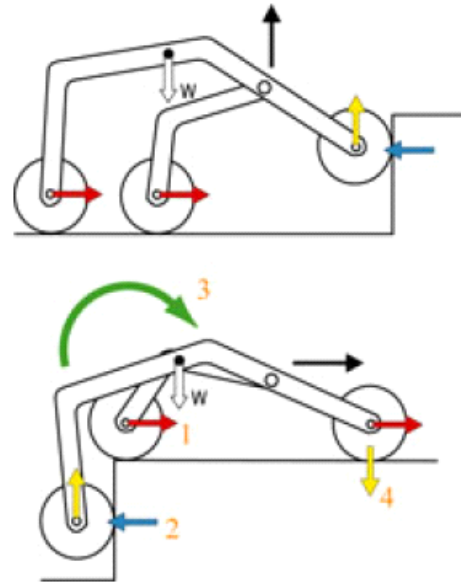
移動ロボットの形態は，その移動環境によって大きく左右される．移動機械一般の移動環境を大きく区分すると，地面，空中，水中や真空中など特殊環境に区分される．このとき，地面移動に限って言えば，車輪，クローラ，脚，体幹が4大形態である．本章では，地面移動方法の種類に関して特徴と共に全方向移動や不整地走破を実現した研究を述べる．

2.1 車輪形

車輪形移動機構の特徴は，他の移動機構と比較すると，高速安定移動が可能，エネルギー効率が良い，機構・制御が簡単，これまでに蓄積された自動車技術の適用が可能などの長所がある．一方，移動場所が平面に限定される短所があるが，原子力プラント内などのような，特殊な設備，あるいは山地，荒れ地などの自然環境を別とすれば，現在ロボットが必要とされている場所はそのほとんどが人工的な平面であるから，この意味では車輪形移動機構の利用価値は極めて高いといえる．また，段差や階段なども，車輪機構をベ-



(a) 1/3 Model Rover



(b) Kinematics of PEGASUS to climb a step

図 2.1: Rover

スとして多少の自由度を付加することにより移動走行は可能である．しかし，一般的に慣性力を用いない場合，車輪径の $1/3$ 以下の段差しか乗り越えられない．

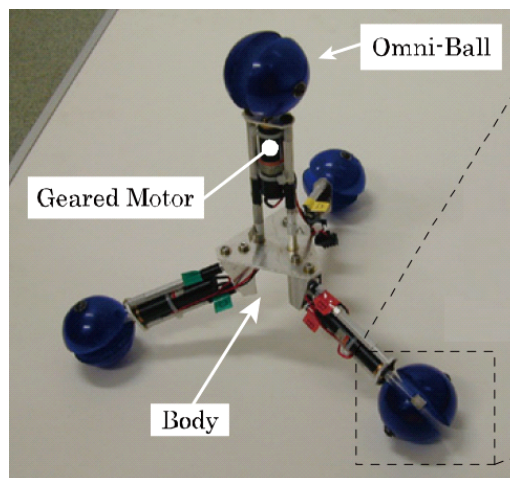
Y. Kuroda ら [7] は，4 輪駆動の機構に一つの補助車輪を追加して段差乗り越えを実現するロボット”Rover”(図 2.1(a))を開発した．このロボットは，図 2.1(b) に示す，”PEGASUS system”と呼ばれるサスペンション機構を提案している．補助車輪は，段差に対して昇降時は小負荷で乗り越え，後輪を引上げる時に姿勢を安定化させている．試作機の大きさは 10cm で，車輪の直径は 5cm である．同じ大きさの 4 輪駆動の機構では，3cm の段差を乗り越えることはできない．この試作機では，3cm の段差の乗り越え動作を実現している．

任意の方向に移動できる移動方式は全方向移動と呼ばれ，工夫の凝らした車輪機構が開発されている．オムニホイールは，図 2.2(a) に示すように，車輪の外周接線方向の軸回りに回転可能なローラを有する車輪である．この車輪は車軸の軸方向のグリップ力がなく，車軸方向に力が加わると容易に横方向に移動する．したがって，例えば車軸が直交する二つの車輪を用いれば，任意方向に移動可能な移動機構が実現できる．

K. Tadakuma ら [8] は，オムニホイールの原理を応用して開発した”Omni-Ball”を，4 つ搭載した全方向移動が可能なロボット”TMR(Tetrahedral Mobile Robot)”(図 2.2(b))を開発した．”Omni-Ball”は，回転軸を共有する 2 つの向かい合わせの半球状の受動回転車輪と，これらの半球状車輪全体を回転させる能動軸とで構成される．それぞれのオムニホ



(a) Omni Wheel



(b) TMR

図 2.2: Omni Wheel and Robot

イールにモータが直結されており，ボディの中心に一つのモータを搭載している．ボディのモータは，脚を移動させてロボットが変形することが可能である．これより，狭い場所での移動を実現している．

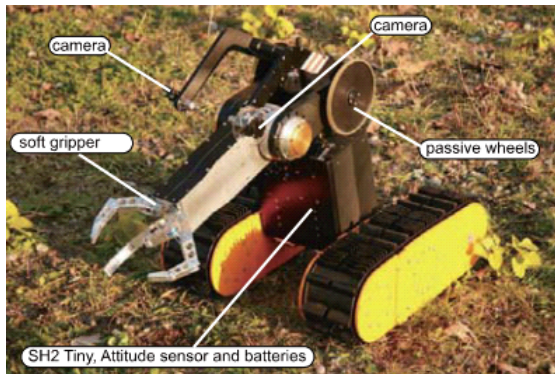
2.2 クローラ形

クローラ方式は無限軌道方式とも呼ばれ，最大の特徴は円環状の無限軌道履帯を複数の車輪に巻きつけることによって，車輪が路面に直接接しないようにすることにある．これにより，車輪に対する接地圧を小さくすることが可能となる．路面状態は履帯により緩和されるので，様々な状況の下で走行できる．

クローラ方式の利点の一つは，接地面積が車輪方式に比べ広いため接地面圧が低いことである．また，路面のグリップ力も強く，細かい凹凸を吸収することができる．このため凹凸のある路面や軟弱な路面を安定に走行することができ，不整地走行に適している．

クローラ方式のもう一つの特徴は，路面走破能力が高いことである．履帯の外周に設けた突起によって路面に対するスリップを防止し，推進力が大きい．さらに案内輪に対し先頭や最後尾の車輪を高く配置し履帯と路面の間に迎え角や背離角を形成することによって段差への乗り上げや降下を容易にすることができる．

G. Michele ら [9] は，グリップパを使用して段差を乗り越えるクローラ形移動ロボット”HELIOS VIII”(図 2.3(a))を開発した．このロボットは，2つのクローラを有しており，平面において安定な移動が可能である．ボディにはカメラとグリップパを搭載しており，遠隔操作で作業を行うレスキューロボットとして注目されている．グリップパはワイヤ駆動で，



(a) HELIOS VIII



(b) KOHGA2

図 2.3: Crawler Robot

モータで引張ることによってハンドの開閉を行う。カメラは2つ搭載し、腕を回転させて別々の視野から周辺状況を観察可能である。

H. Miyanaka ら [10] は、連結可能なクローラ形移動ロボット”KOHGA2”(図 2.3(b)) を開発した。このロボットは、4つのユニットから構成されており、これらを組み合わせることで連結ロボットを作製可能である。論文では、”KOHGA2”を3つ組み合わせて変形をしながら、不整地や段差を走破している。また、連結したジョイントの部分が段差に引っ掛らないように経路を選択して移動可能である。

2.3 脚形

脚移動ロボットは、階段や段差など人間が生活するのと同じような環境で適応性のある移動が期待される。

2.3.1 2脚

2本の脚機構を有する二足歩行は、哺乳類のなかでも人間に特有の移動形式である。二足歩行ロボットも基本的には人間の下肢機構を近似あるいは模擬した形態で作られている。

図2.4に示すのは、HONDAの”ASIMO”[11]である。”ASIMO”は、図2.4(a)に示す2000年に発表されたモデルの時に、高い歩行性能を実現していた。”ASIMO”の歩行技術の一つに、”i-WALK”と呼ばれる予測運動制御技術が使われている。これは、連続した動きの中で、将来の動きを予測して重心を移動させる技術である。これより、従来の歩き方では実現できなかったより自然で滑らかな動きが実現されている。

図2.4(b)に示すのは、”ASIMO”の2011年に発表されたモデルである。このモデルは、周囲の人の動きに合わせて自ら行動する判断能力を備えた自律ロボットである。従来のモ

デルに比べて、脚力の増加や脚の可動範囲の拡大している。また、動作中に着地位置を変更できる新たな制御手法を用いることで、歩行や走行、片足跳躍、両足跳躍等を連続して実現可能である。



(a) 2000年 model



(b) 2011年 model

図 2.4: ASIMO (HONDA)

2.3.2 多脚

4脚以上の脚数を持つ歩行ロボットの特徴について述べる。多脚ロボットの脚数は、大部分が4脚と6脚であり、それ以外の脚数を持つ歩行ロボットは少ない。これは、哺乳動物と昆虫が主に4脚と6脚であること、複雑な機構を持つ脚の数は少ないほうが好ましいからである。6脚では常に3脚以上の脚数で歩行することにより静歩行が可能であり、4脚では静歩行と動歩行の両方が可能である。

図 2.5 に、多脚ロボットを示す。

図 2.5(a) に示すのは、Boston Dynamics の Big Dog[12] である。このロボットは、4脚の歩行ロボットで駆動にエンジンを使用している。エンジンの出力で油圧ポンプを動かし直動アクチュエータを駆動している。主な制御は、ボディの姿勢、地面の反力、横方向のバランスの3点を実現している。これより、横から蹴られてもバランスを立て直す動作を可能にしている。

S. Fujii ら [13] は、6脚の蜘蛛のようなロボット”ASTERISK”(図 2.5(b)) を開発している。このロボットは、1本の脚に4自由度を備えており、6本の脚を胴体中心から放射状



(a) Big Dog



(b) ASTARISK

図 2.5: Walk Robot

に配置している．そのため，全方向に対して均等な作業能力と移動能力を有する．また，上下対称に設計されているため，各脚の可動範囲が上下に存在する．各関節にはサーボモータが搭載されており，脚の先端はフックになっている．平地での移動だけでなく，不整地，斜面，格子壁面など様々な環境での移動を実現している．

2.3.3 脚機構の種類

図 2.6 に脚機構の種類について示す．

a) 回転関節連続形図 2.6(a) のように回転関節が本体から順に接続された形式である．この形式は，機構的に最も考えやすく，脚先を 3 自由度的に駆動することが容易である．欠点としては，制御が比較的困難であることと，立脚相時のエネルギー消費が大きい．また，アクチュエータに負担がかかる構成である．

b) 伸縮形図 2.6(b) に示す機構は，伸縮により脚長が変化する脚全体を垂直面で旋回する機構をもつ．空圧の六脚歩行機械などに採用されている．この形式は，発生した力を直接取り出せる利点があり，エネルギーロスが少ない．また，構成要素が少ないため小型化に有効である．

c) 脚車輪機構車輪形と脚形の双方の長所を生かした脚車輪機構も研究開発されている．図 2.6(c) は，段差や階段を昇降できるロボットに採用されている機構である．通常は車輪で移動するが，階段や段差，不整地などで脚伸縮機能を用いて走破可能である．

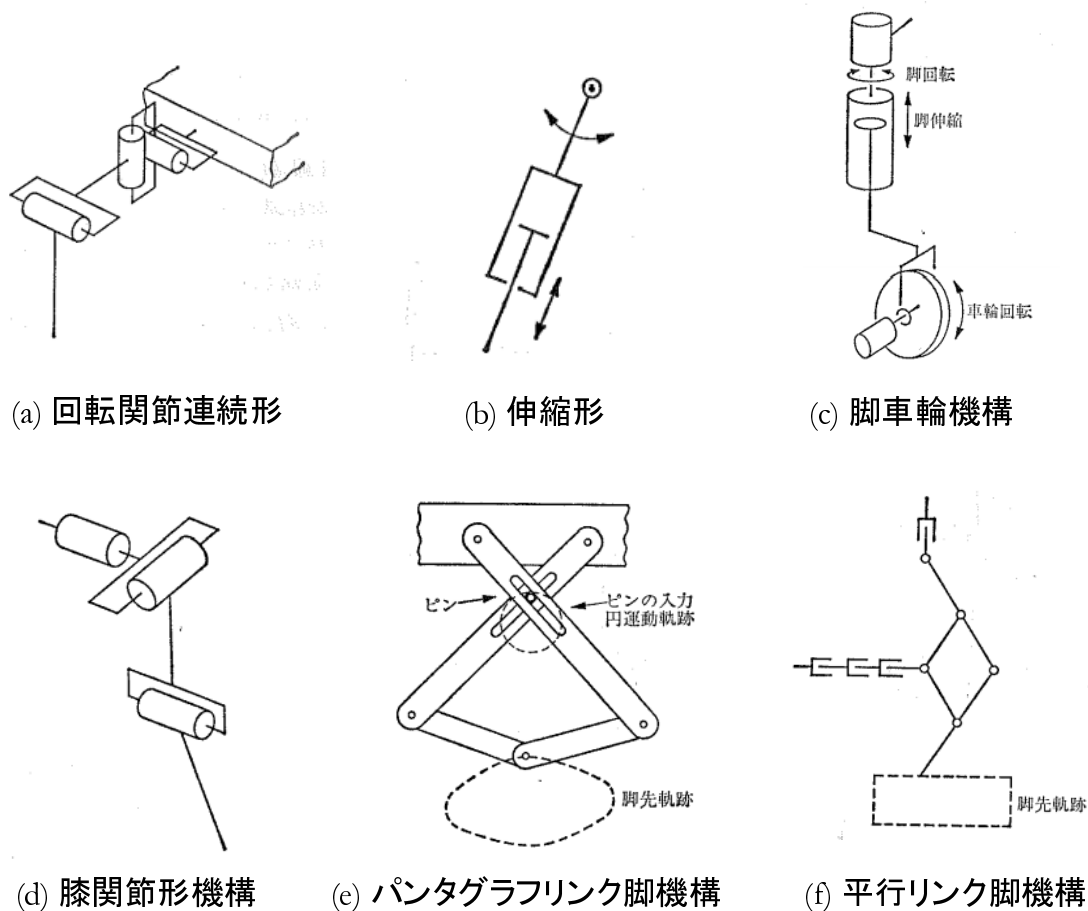


図 2.6: Leg Mechanism

d) 膝関節形これは、図 2.6(d) に示すように、人間などの足に似て膝関節のある形式である。機構が簡単であり、脚の移動自由度が高い。しかし、負荷容量が小さく、制御が複雑で困難である。

e) パンタグラフリンク形図 2.6(e) に示すように、リンクの交差点をピンなどで円駆動すれば、脚先はおむすび状の軌跡を描く。この機構は、脚先部の軌跡が固定的であり、立脚相の軌跡が直線ではないため本体が上下に大きく揺れる欠点がある。

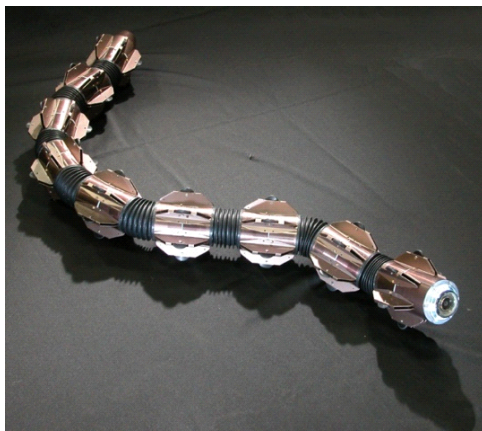
f) 平行リンク形図 2.6(f) に示す機構は、電車の集電用パンタグラフと同様な構成をもつ機構である。この機構は、直交座標系となるため、非常に制御が簡単になる。また、立脚相としての水平な直線軌跡を描かせるとき、これに対応する水平直動アクチュエータだけを駆動し、もう一つの垂直駆動アクチュエータを何らかの方法でホールドしてやれば、本体の重量を支えるのに要するエネルギーは不要になり、立脚相時のエネルギー消費が極めて少なくすむ特徴がある。この機構の欠点は、アクチュエータが直動形であるためスライドすべりのための機械要素が必要になることが多いこと、横方向剛性の低さなどがある。

2.4 特殊移動形

特殊移動形式では、ヘビ形ロボット、インチワーム方式など使用環境に応じた特殊な移動機構が数多く開発されている。また、水中の移動、空中の移動、はしごを昇るロボット、架線を移動して検査を行う移動機構も研究されている。代表してヘビ型ロボットの研究について述べる。

S. Hirose ら [14] は、水陸両用で移動可能なヘビ型ロボット”ACM-R5”(図 2.7(a)) を開発した。このロボットは、ヘビと同様に体をくねらせて推進することができる。関節はユニバーサルジョイントで構成し、蛇腹で覆って水の浸入を防ぐ構造である。水中で効率よく泳ぐために、ユニバーサルジョイントを採用している。また、体を覆うように受動車輪と水掻き板を装備している。これより、体が描く曲線の接線方向には滑りやすく、法線方向には滑りにくい性質を実現し推進力を得ている。

T. Ohashi ら [15] は、ループ型移動が可能な索状能動体”ACM-R7”(図 2.7(b)) を開発した。このロボットは、1 自由度関節が直列に 18 個つながれた、車輪を持たない索状能動体である。端部の片方にはグリッパが備えられており、もう片方の端部に取り付けたロッドを把持することでループ形状を実現している。一つの関節に 2 つのモータを搭載して、2 軸の駆動を行っている。ヘビの様に体を 1 本に伸ばして、狭い配管などを移動することが可能である。また、ループ形状に変形することで 20 倍の速度での移動を実現している。



(a) ACM-R5



(b) ACM-R7

図 2.7: Snake-like Robot

第3章 跳躍機構

脚形移動機構の移動方法の一つとして、跳躍移動がある。跳躍移動は、瞬間的な力の発生により地面との反発力を利用して移動する方法である。瞬間的な力が必要とされるので、消費エネルギーを連続的に使用する必要がないと考えられる。本研究では、消費エネルギーを抑えた移動機構を目指すため、跳躍機構に焦点をあてて研究を進めていく。跳躍は、地面移動に分類される移動方法の中では、数少ない空中移動を併せ持った方法である。このため、不整地や階段などを飛び越えて移動することが可能である。しかし、空中では動的安定性を確保するのが難しいため、現在でも跳躍運動を工学的に実現し、移動能力を高めるための跳躍機構について多くの研究がなされている。

3.1 関連研究

3.1.1 小型跳躍移動機構

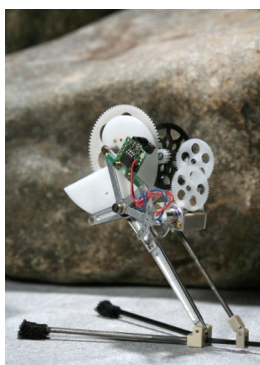
跳躍移動の研究には、いくつかの移動形態が異なった研究が行われている。図 3.1 に、小型の跳躍移動機構の研究を示す。

M. Kovac ら [16] は、7g で 1.4m 跳躍が可能な跳躍ロボット”EPFL jumper”(図 3.1(a))を開発している。小型モータを用いてカムを回転させ、バネに力を蓄えて解放することで跳躍している。モータの回転にギヤを用いて、トルクを増大させることで、ねじりバネに力を蓄えることを可能にしている。4本のリンクを用いて離陸角度と地面との反発力を調整している。

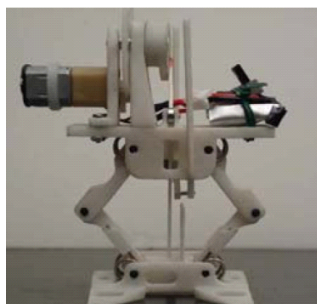
J. Zhao ら [17] は、離陸角度や姿勢を制御可能な跳躍ロボット”MSU robot 2”(図 3.1(b))を開発している。一つのモータで、跳躍動作、離陸角度調整、着地後姿勢制御を全て実現している。ギヤの回転を利用して跳躍方向制御を行うことができる。

U. Scarfoglio ら [18] は、バッタの跳躍を模倣した跳躍ロボット”Grillo”(図 3.1(c))を開発している。小型モータを用いて、板バネに力を蓄えて、直動に伸縮した2本脚を使用して跳躍を実現している。この機構では、跳躍に必要な2本脚以外に4本のバネによる脚を搭載しており、常に地面に対して安定な姿勢のまま跳躍を実現している。

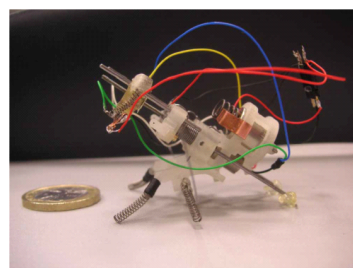
Y. Sugiyama ら [19] は、柔らかいボディを柔らかいアクチュエータで変形させ、移動と跳躍を実現するロボット”KOHARO”(図 3.1(d))を開発している。アクチュエータは、形状記憶合金 (SMA) アクチュエータを使用している。SMA コイルは、電流を流すことで収縮する特性を持つ。8本の SMA コイルを搭載し、ボディを任意形状に変形することで移



(a) EPFL jumper



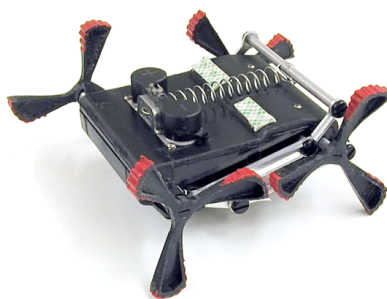
(b) MSU robot 2



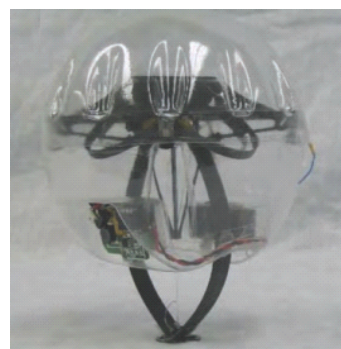
(c) Grillo



(d) KOHARO



(e) Mini-Whegs



(f) Microbot

図 3.1: Miniature jumping robots

動が可能になる。ボディにバネ鋼を用いることで曲げ弾性を利用して跳躍を可能にする。また、ボディがバネで構成されているため、着地時の衝撃を緩衝する。図 3.1(d) は、球形柔軟ロボットで 18 本の SMA コイルを搭載している。このため、多方向への移動と跳躍を実現可能である。

B. G. A. Lambrecht ら [20] は、圧縮バネとリンク機構を用いた跳躍ロボット”Mini-Whegs” (図 3.1(e)) を開発している。これは、ゴキブリの歩行を模倣しており、4 個のスポーク車輪を用いて車輪移動を行う。前輪 2 個の車輪の角度を変えることで、方向を制御することができる。このロボットは、いくつかのモデルが開発されているが、図 3.1(e) に示すのは、”Mini-Whegs 9J”である。このモデルは、跳躍用のモータを使用しており、圧縮バネに力を蓄えて解放することで跳躍を可能にしている。

S. Dubowsky ら [21] は、誘電エラストマアクチュエータ (DEA) を使用した、跳躍移動ロボット”Microbot” (図 3.1(f)) を開発している。DEA は、電圧を印加することで変位を発生させるアクチュエータである。この機構では、DC/DC コンバータを使用して、8.8kV の電圧を印加している。この変位を板バネに蓄積して解放することで跳躍を実現している。

表 3.1 に小型跳躍移動機構の機能を、表 3.2 に仕様を示す。

表 3.1: 小型跳躍移動機構の機能

Name	Actuator	Variable take-off angle	Variable ground force	Landing protection	Landing steering	On board energy
EPFL jumper [16]	a motor	Yes, using four bar linkage	No	No	No	Yes, 10mAh LiPo battery
MSU robot 2 [17]	a motor	Yes, using two legs	Yes, using spur gear	No	Yes, using two legs	Yes, 50mAh LiPo battery
Grillo [18]	a motor	No	No	Yes, using four spring legs	No	Yes, 300mAh battery
KOHARO [19]	eighteen SMAs	No	No	Yes, using elastic ribbons	Yes, crawling ability allows it to propagate in a wanted direction	No
Mini-Whegs [20]	two motors	Yes, using four bar mechanism	Yes, using four bar mechanism	No	Yes, wheels allow it to propagate in a wanted direction	Yes, 160mAh 2CR-1/3N
Microbot [21]	a DEA	No	No	Yes, using a plastic shell	No	Yes, 145mAh LiPo battery

表 3.2: 小型跳躍移動機構の仕様

Name	mass [g]	size [cm] 1	jump height [cm]	jump distance [cm]	jump height per mass [cm/g]	jump height per size [-]
EPFL jumper [16]	7	5	138	79	19.77	27.6
MSU robot 2 [17]	20	6.5	55	50	2.75	8.46
Grillo [18]	8	5	5	20	1.25	2
KOHARO [19]	5	9	20	5	4.02	2.23
Mini-Whigs [20]	190	10.4	22	22	0.12	2.25
Microbot [21]	11	46	38	0	3.45	0.83

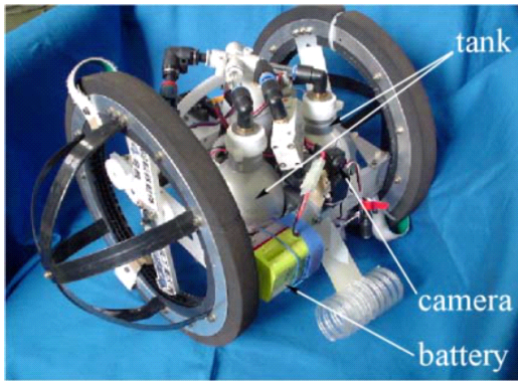
3.1.2 車輪形跳躍移動機構

小型の跳躍移動ロボットは、小型、軽量化を目指しバネとモータを用いた機構が多く開発されている。しかし、跳躍移動は不整地に対しては有効な移動方式となるが、平坦な地面では車輪形の方が効率が良いと考えられる。したがって、車輪形と跳躍移動を組み合わせた機構も開発されている。図 3.2 に、複数のアクチュエータを使用した車輪形跳躍移動機構を示す。

H. Tsukagoshi ら [22] は、モータ駆動の車輪と、空気圧シリンダを用いた跳躍移動機能を有するロボット”Leg-in-Rotor”(図 3.2(a)) を開発した。このロボットはポンペを搭載しており、跳躍に用いる圧縮空気は有限である。このため、跳躍を効率よく行うための弁制御手法を提案している。また、CMOS カメラを搭載して遠隔操作を可能にしている。光電スイッチを用いて、障害物との適切な距離を測定して跳躍動作を実行するシステムを提案している。

T. Tanaka ら [23] は、モータ駆動の車輪と、空気圧シリンダを用いた 4 脚の跳躍移動ロボット”AirHopper”(図 3.2(b)) を開発した。このロボットは、昆虫のようなボディを有しており、リンク機構を用いた 4 個の脚で不整地の影響や跳躍後の着地姿勢を安定化している。モータを脚部に埋め込み、ベルトを介して脚先の車輪を回転させている。空気は外部から供給されており、実機に搭載することが今後の課題となっている。

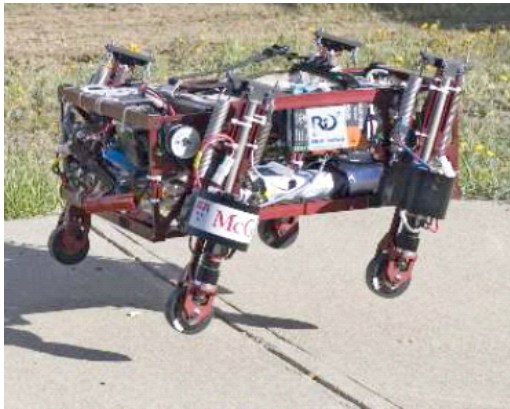
J. A. Smith ら [24] は、モータ駆動の車輪と、モータを用いた跳躍移動ロボット”PAW robot”(図 3.2(c)) を開発した。このロボットは、4 輪全ての脚部にモータが搭載しており、複雑な平面移動を可能にしている。後部ボディに搭載したモータで、脚部の圧縮バネに力を蓄え解放することで跳躍を可能にしている。全ての脚に圧縮バネを搭載しているため、着地時の衝撃吸収などに活用できる。車輪と跳躍移動を組み合わせることで、バウンド走



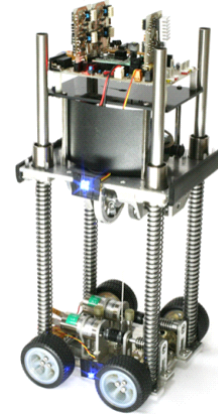
(a) Leg-in-Rotor



(b) Air Hopper



(c) PAW robot



(d) Justice

図 3.2: Multiple drive jumping robots

行²が実現している。

K. Kikuchi ら [25] は、単純な 2 自由度振動系を利用した移動ロボット”Justice”(図 3.2(d))を開発した。このロボットは、ワイヤと 4 本のばねによって結合された上部ボディと下部ボディの 2 自由度振動系から成る。下部ボディは、2 つのモータを使用した 4 輪駆動方式で、平面において安定した高速移動が可能である。跳躍機構は、モータを用いて圧縮バネに力を蓄えて、ソレノイドを用いて力を解放している。4 本のバネの力で下部ボディを引き上げ跳躍動作を実現している。バネの振動を利用した単純な跳躍機構を有しており、この振動特性から着地時の衝撃を吸収することができる。

表 3.3 に車輪形跳躍移動機構の仕様を示す。

²4 脚の動歩行の種類の一つで、”左右の前脚”と”左右の後脚”を順に前に出す対称な走り方。

表 3.3: 車輪形跳躍移動機構の仕様

Name	mass [kg]	size [cm] (高さ)	jump height [cm]	jump height per mass [cm/kg]	jump height per size [-]
Leg-in-Rotor [22]	2.3	23	80	34.7	3.47
AirHopper [23]	34.6	60	85	2.45	1.41
PAW robot [24]	20.9	21.2	5	0.24	0.23
Justice [25]	2.7	35	20	7.40	0.57

3.2 関連研究への問題提起

車輪形跳躍移動機構は、2種類の移動方式を用いて高い移動性能を有している。しかし、モバイルセンサノードには一台の高価で大きいロボットは不向きである。これより、小型で低エネルギー駆動が可能な小型跳躍移動機構に焦点をあてる。表??に示す小型跳躍移動機構の機能を見ると、離陸角度を調整できるのは、“EPFL jumper”[16]、“MSU robot2”[17]と“Mini-Whigs”[20]である。しかし、この3体のロボットは設定した離陸角度の跳躍は可能だが、任意の離陸角度での跳躍は実現されていない。このため、跳躍距離や跳躍高さの調整を行うことは難しい。また、着地後の姿勢制御を実現しているのは、“MSU robot2”[17]、“KOHARO”[19]と“Mini-Whigs”[20]である。着地後の姿勢制御を行うことで、目標方向に向かって跳躍移動が可能になると考えられる。

本研究の目的である、モバイルセンサネットワークでの移動機構を考慮すると、方向と距離の制御をおこなうことは、通信領域の拡大や、目標位置での環境情報の取得などが可能になると考える。しかし、従来の研究では、方向制御は実現しているが、距離や高さの制御は実現されていない。そこで、方向と距離を制御した跳躍移動機構を実現することが、モバイルセンサネットワークでの運用において有効であると考え、新たな跳躍移動機構を提案する。

3.3 先行研究

3.3.1 跳躍モデル

我々の研究室では図 3.3 に示す、センサノードの跳躍移動機構を提案している [26]。図 3.3(a) に示すように、センサノードの形状は球体でノード下部に等間隔で8本の圧縮バネと脚を配置する。図 3.3(b) には、バネ取付部の詳細図を示している。全てのバネは地面に対して45度の角度で取付けられている。バネを圧縮した状態を初期状態とし、任意のバネを解放することで方向と距離を制御した移動が可能になる。

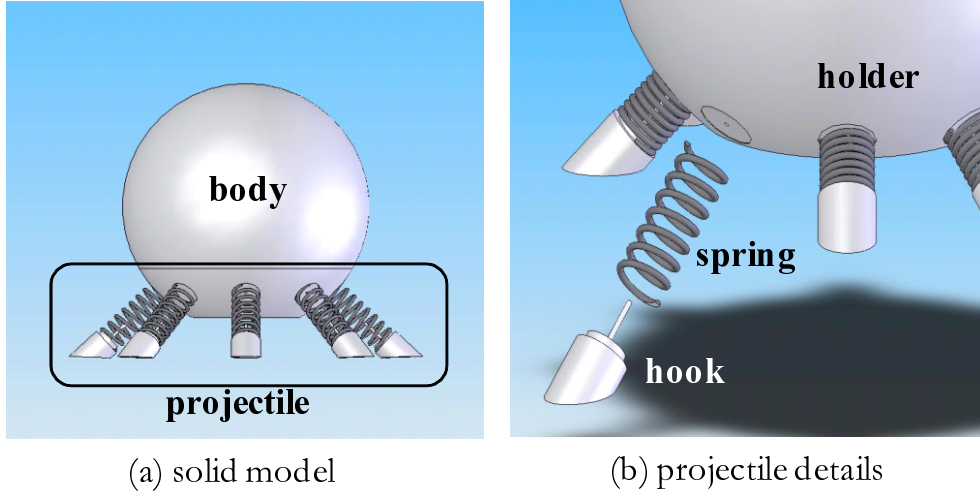


図 3.3: A mobile sensor node equipped with projectiles

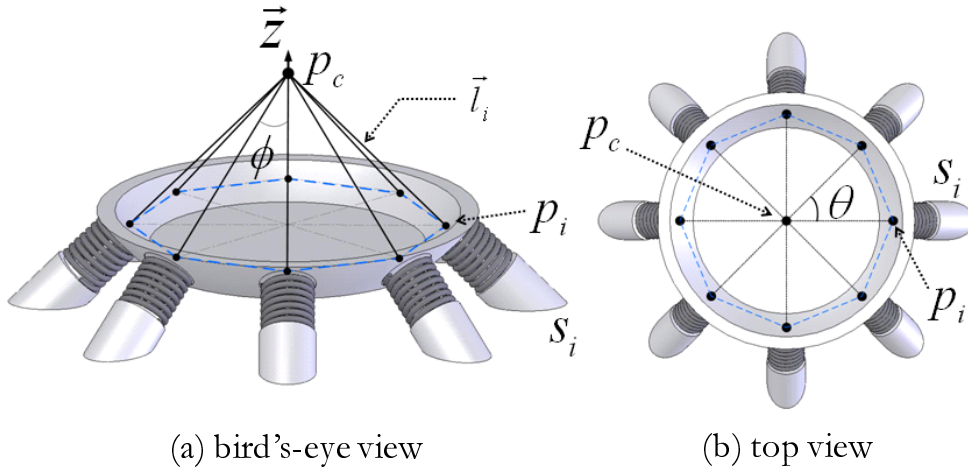


図 3.4: Details of the projectile

図 3.4 に示すように，センサノードの座標系はノード中心から鉛直方向を z 軸，水平方向を xy 平面とする．バネの番号を $1 \sim i \sim k$ とし， i 番目のバネを s_i と表す． z 軸とバネのなす角度を ϕ とする． p_c は，重心である．バネ s_i の付け根の点を p_i とし，重心 p_c と p_i の距離を $\vec{l}_i$ とする．図 3.4(b) の様に， $\vec{l}_i$ の間の角度を θ とする． ϕ と θ が等間隔になるようにバネを配置する．このとき， k 本のバネに対して θ は $2\pi/k$ となる．

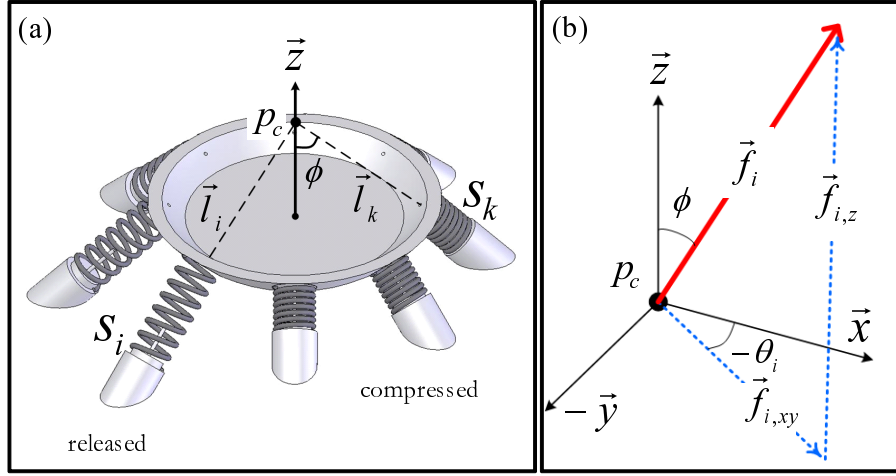


図 3.5: The Force exerted by spring release ((a) released spring s_i , (b) definition of the force $\vec{f}_i$)

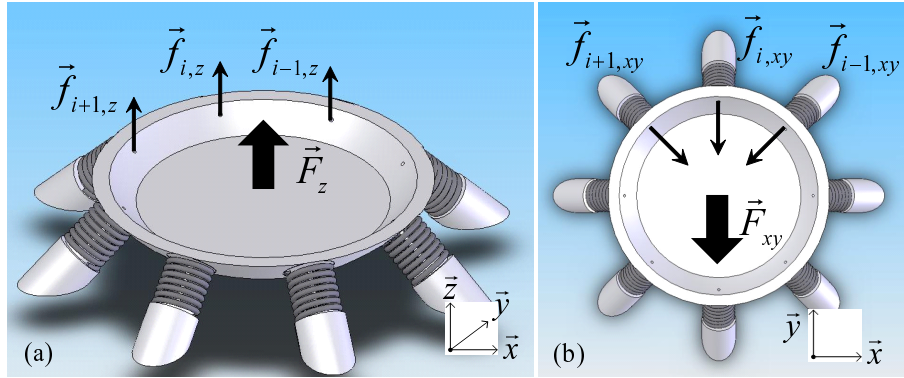


図 3.6: Illustration of the resultant force F exerted on the sensor node by n springs ((a) vertical force F_z , (b) horizontal force F_{xy})

3.3.2 地面への力

図 3.5 にバネにより発生する力の座標系を示す。図 3.5(b) に示すように、バネの力は重心 p_c を通る $\vec{f}_i$ で表す。バネの力を分解して z 軸方向の力を $\vec{f}_{i,z}$, x 軸方向の力を $\vec{f}_{i,x}$, y 軸方向の力を $\vec{f}_{i,y}$ と表す。単位ベクトル $\vec{i}_x, \vec{i}_y, \vec{i}_z$ を使うと, $\vec{f}_i$ は, $f_{i,x} \vec{i}_x + f_{i,y} \vec{i}_y + f_{i,z} \vec{i}_z$ となる。1 本のバネによるノードに加わる力を, 式 (3.1) に示す。

$$\begin{cases} f_{i,x} = f_i \sin\phi \cos\theta_i \\ f_{i,y} = f_i \sin\phi \sin\theta_i \\ f_{i,z} = f_i \cos\phi \end{cases} \quad (3.1)$$

図 3.6 に示すように, n 本のバネを解放したときのノードに掛かるバネの合力 F_x, F_y, F_z は式 (3.2) のようになる.

$$\begin{cases} F_x = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(i) f_i \sin\phi \cos\theta_i \\ F_y = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(i) f_i \sin\phi \sin\theta_i \\ F_z = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(i) f_{i,z} = n f_i \cos\phi \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで, $\text{sgn}(i)$ を次のように定義する.

$$\text{sgn}(i) = \begin{cases} 1 & (\text{if } s_i \text{ is released}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.3)$$

ノードの速度は力積の関係により, $v = Ft_s/m$ で表すことができる. ここで t_s はバネの伸び時間を示す. ノードの鉛直方向および水平方向の速度は, 式 (3.4) に示す.

$$\begin{aligned} v_z &= \frac{\vec{F}_z t_s}{m} - g t_s = \frac{n f_i \cos\phi}{m} t_s - g t_s \\ v_{x,y} &= \frac{\vec{F}_{xy} t_s}{m} = \frac{\sin\phi \sum_{i=1}^k \text{sgn}(i) f_i}{m} t_s \end{aligned} \quad (3.4)$$

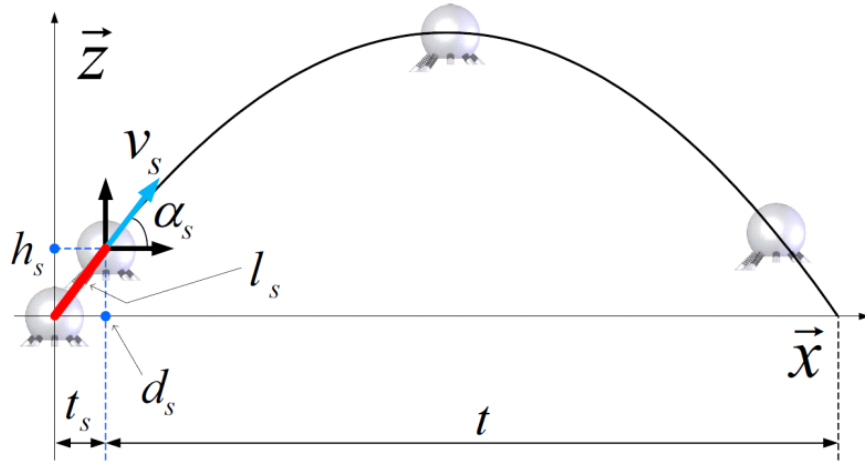


図 3.7: Trajectory of the sensor node through the leaping mechanism

図 3.7 にノードの跳躍軌跡を示す. 図に示すように, バネの伸び時間 t_s からの運動を斜方投射と考える. このとき, 空気抵抗は考慮しないとする. t_s 時のノードの位置を (d_s, h_s) と表す. 初期速度を v_s , 離陸角度を α_s とすると, 式 (3.4) を用いて表せる.

$$\begin{aligned} v_s &= \sqrt{v_{x,y}^2 + v_z^2} \\ \alpha_s &= \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

表 3.4: シミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of sensor node	$50 \times 50 \times 117$	mm^3
weight	280	g
weight of one spring	1.25	g
width of spring	11.25	mm
natural length	29.5	mm
compressed length	10.8	mm
maximum load	85.42	N
spring constant	4.51	N/mm
coefficient of friction	0.5	-

斜方投射の式より [28], 最大到達距離 $x_t(z = 0)$ と最大跳躍高さ $z_t(v = 0)$ は, 式 (3.6) となる.

$$\begin{aligned}
 x_t(z = 0) &= d_s + \frac{v_s^2 \sin 2\alpha_s}{g} \\
 z_t(v = 0) &= h_s + \frac{v_s^2 \sin^2 \alpha_s}{2g}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

3.3.3 シミュレーション

この研究では, ノードに配置するバネの数を 8 本とする. 設計したセンサノードをもとにノードの跳躍を機構解析ソフト RecurDyn を用いて解析を行った [30]. シミュレーション条件を表 3.4 に示す.

図 3.8 にシミュレーションの様子を示す. バネの解放を 1 本~8 本までの各解放数におけるセンサノードの跳躍距離の結果を, 図 3.9 に示す. 各本数における解放の組み合わせは隣合う連続したバネを解放する. 5 本解放の場合に距離 696mm で最大となった.

次に, 解放パターンによる跳躍距離の制御について述べる. 同じ 5 本解放であっても解放する組み合わせにより, 水平方向の合力が変化する. 図 3.10 に 5 本解放において水平方向の合力が最大になる組合せと最小になる組合せを示す. 解放パターンの違いによる移動距離の影響を確認するため, 図 3.10 に示す解放パターンでの結果を図 3.11 に示す. 図 3.11 に示すように, 図 3.10(a) と (b) でのパターンの違いで, 跳躍距離の差は約 650mm となった. これより, 解放パターンの組合せが跳躍距離の制御に有効であることがわかる. 解放パターンの違いにより発生する力の大きさを図 3.12 にまとめた. このとき, 力の方向は全て $\bar{y}$ 方向に統一している. 図 3.12 を見ると, 力の範囲は基準 f に対して, $0.41f, 1f, 1.85f, 2.41f, 2.61f$ の 5 パターンが生成可能である.

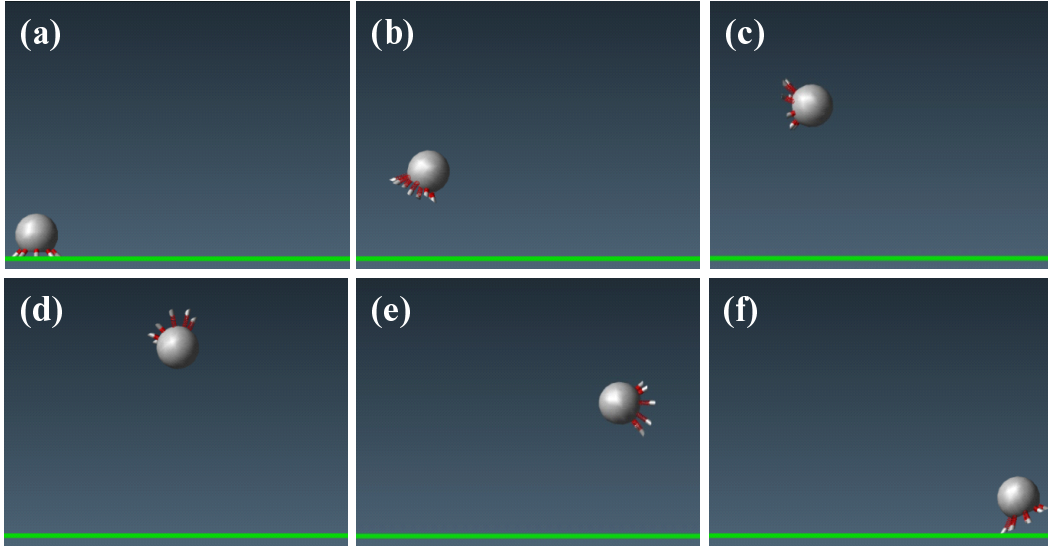


Figure 3.8: Snapshots of sensor node leaping

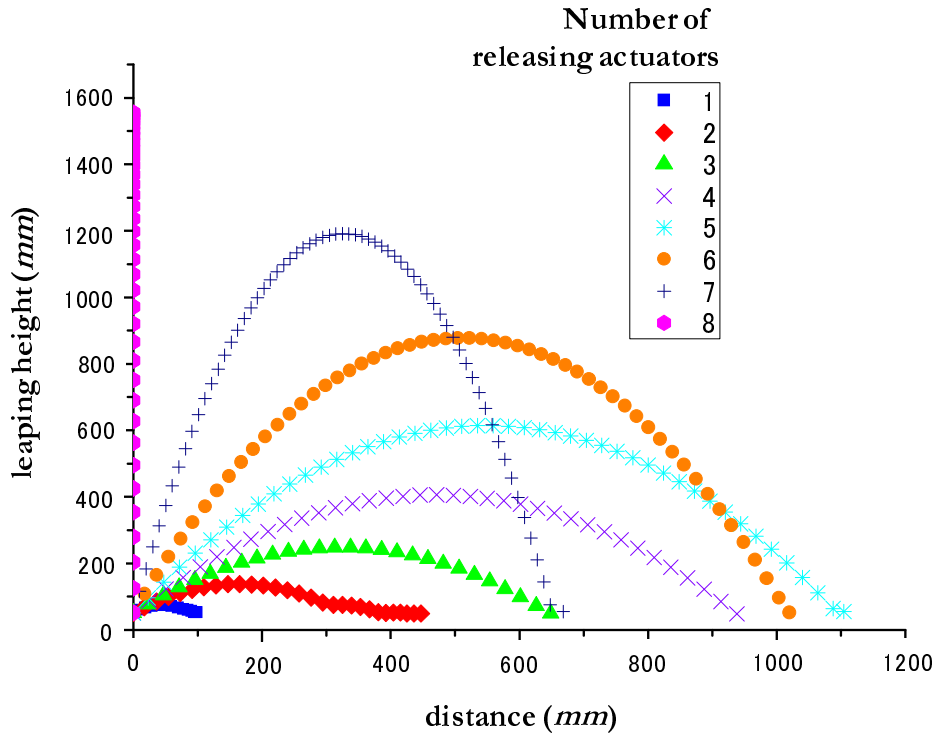


Figure 3.9: Leaping height and distance according to the number of released springs

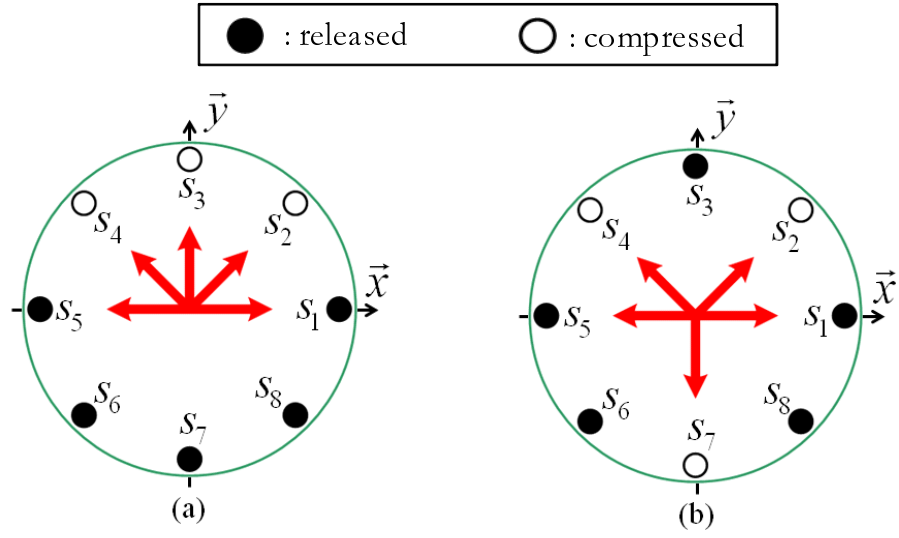


Fig. 3.10: Different resultant forces according to the releasing patterns ((a) $F_{xy} = -2.41f$, (b) $F_{xy} = -0.41f$)

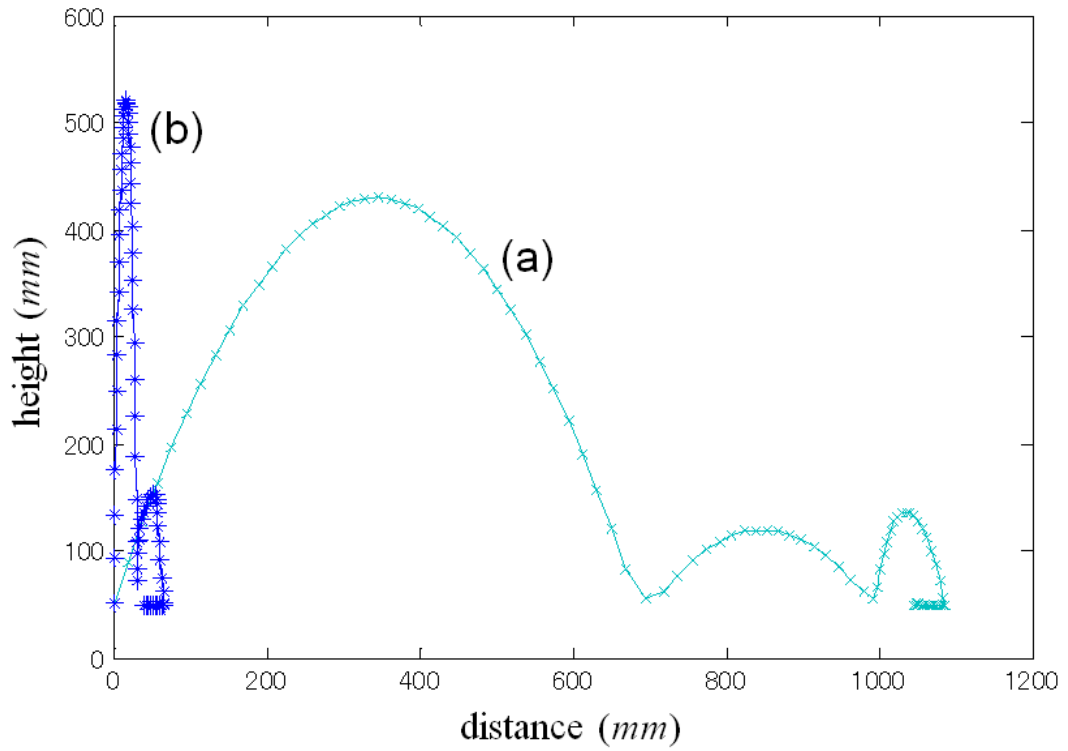


Fig. 3.11: Distance control according to the releasing patterns of five springs in Fig. 3.10

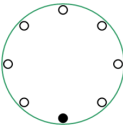
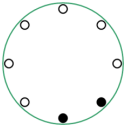
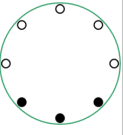
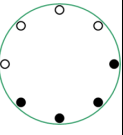
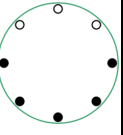
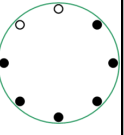
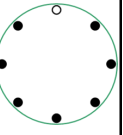
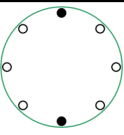
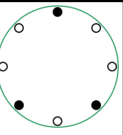
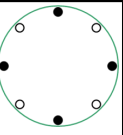
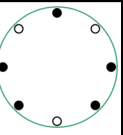
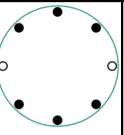
	1	2	3	4	5	6	7
large	 $1 \cdot f$	 $1.85 \cdot f$	 $2.41 \cdot f$	 $2.61 \cdot f$	 $2.41 \cdot f$	 $1.85 \cdot f$	 $1 \cdot f$
small		 $0 \cdot f$	 $0.41 \cdot f$	 $0 \cdot f$	 $0.41 \cdot f$	 $0 \cdot f$	

図 3.12: Largest and smallest resultant forces according to the number of the released springs

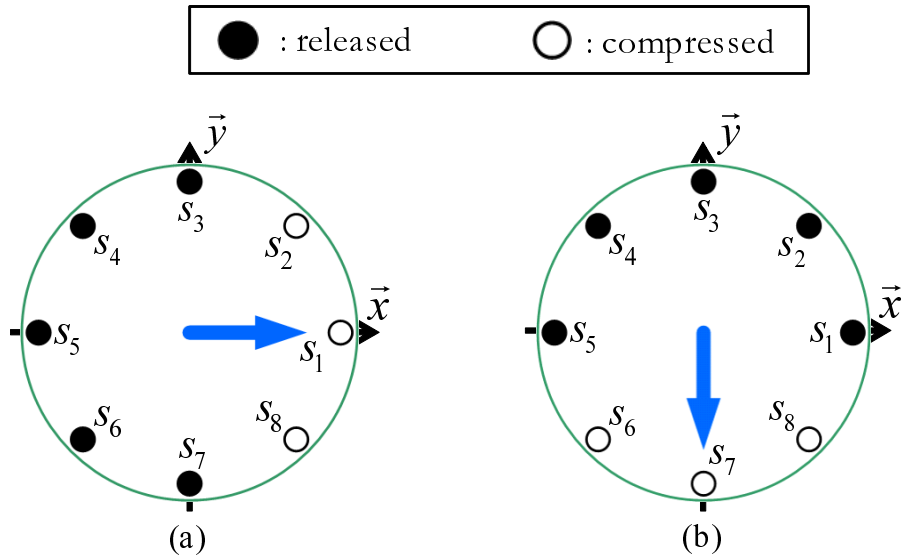


図 3.13: Leaping direction determination ((a) $\vec{x}$ direction, (b) $-\vec{y}$ direction)

解放パターンによる跳躍方向の制御について述べる．同じ解放パターンで解放箇所を変えた場合のパターンを図 3.13 に，結果を図 3.14 に示す．8 本の脚を有しているため，45 度間隔で 8 方向への移動が実現できた．これより，解放パターンの組合せが跳躍方向の制御に有効であることがわかる．

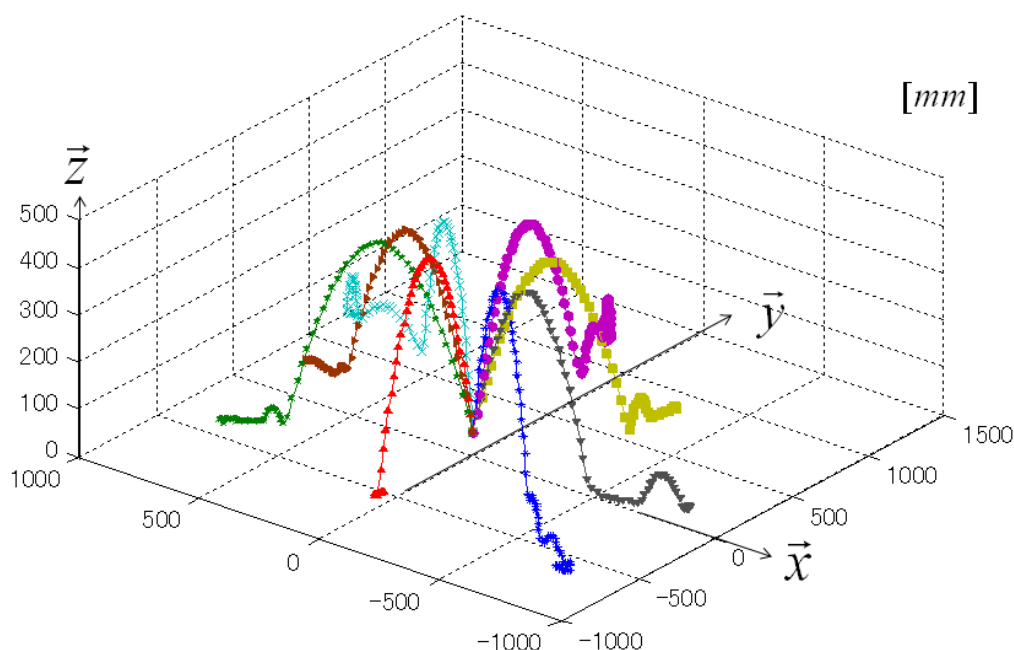


図 3.14: Direction control according to the releasing patterns of five springs

3.3.4 移動による通信接続性向上の検証

センサネットワークにおいて, 提案する移動機構により通信接続性の向上が期待できる. これを検証するために, モデルを用いてシミュレーションを行った. 図 3.15 にシミュレーションの様子を示す. 図 3.15 には使用するセンサノードを青点で示し, 各々のセンサノードは跳躍機能と通信機能を有している. 跳躍移動距離は, 通信範囲の半径と等しいとする. 空中から散布したセンサノードは, 図 3.15(a) に示すように分散配置される. 次にセンサノード間の通信を行い, 通信可能な場合図 3.15(b) に示すように青線で通信可能を表す. この時, 通信を行えないセンサノードは, 青円で表している. 通信不可のセンサノードはランダムに方向を決めて移動を行い図 3.15(c) の状態になる. また, 図 3.15(b) の状態から通信不可のセンサノードが一番近いノードの方向に移動を行った場合を図 3.15(d) に示す. この様に, 図 3.15(b) の状態からランダム移動と方向制御移動を行い通信結合率を比較する. 初期の分散配置による通信結合率を 3 種類に分類し, それぞれ 1000 回ずつシミュレーションを行った. シミュレーション結果を図 3.16 に示す. 初期の通信結合率を 30 %, 50 %, 70 % に分類した. A は, 初期配置後の通信結合率を示している. B はセンサノードがランダム移動を行う場合, C は方向制御移動を行う場合である. 1000 回の中で頻度が多い結果を四角形の範囲で表している. 図 3.16 を見ると, 初期配置 A の場合からランダム移動する B の場合では通信結合率が約 10 % 向上している. また, 方向制御移動する C の場合では大幅に通信結合率が向上している. これより, センサノードが移動することは通信エリアの拡大と通信結合率の向上に有効であることがわかる.

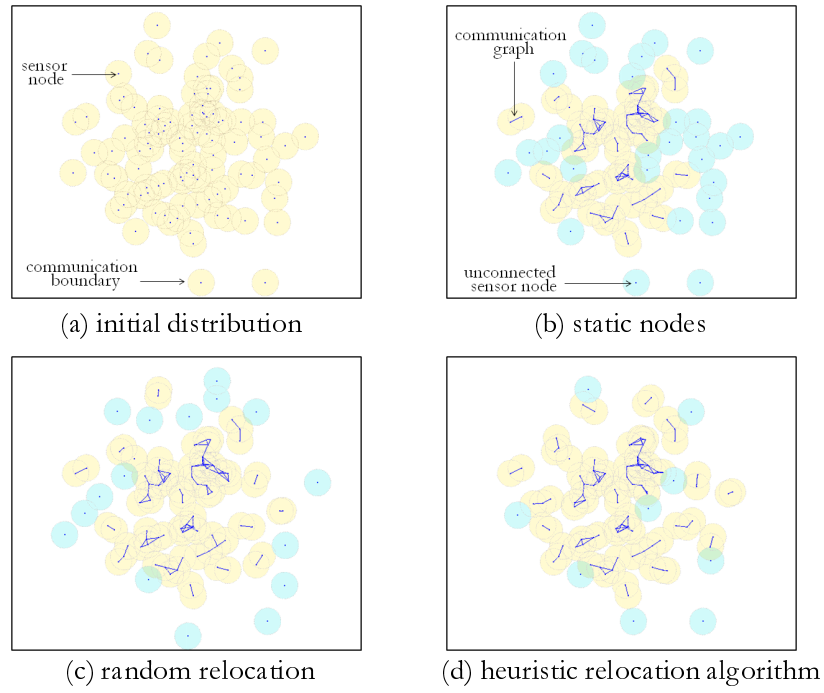


Fig. 3.15: Simulation results of investigating connectivity in the sensor network

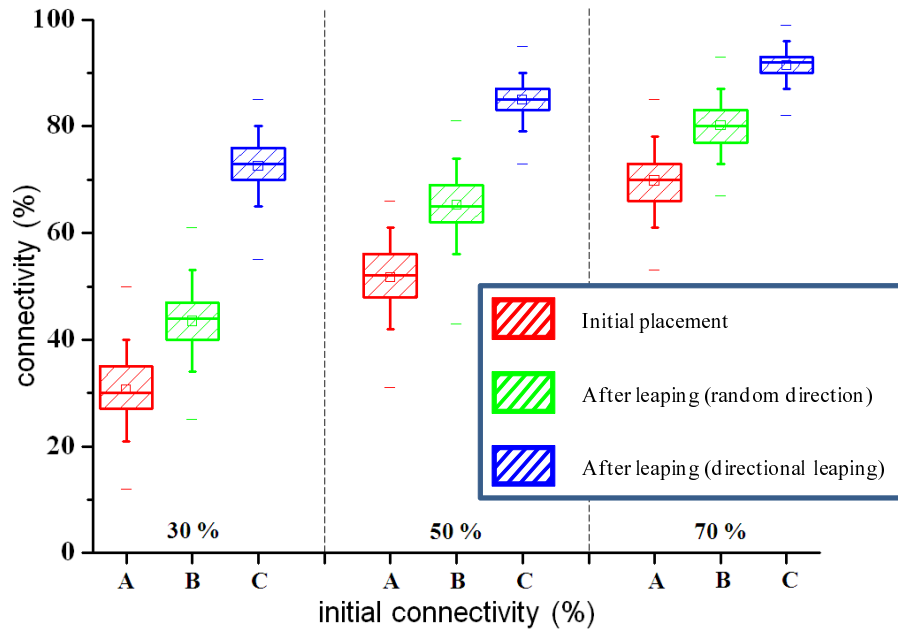


Fig. 3.16: Connectivity comparison results based on the simulations shown in Fig. 3.15

3.4 先行研究への問題提起

本研究の目的は、先行研究で提案された移動方法を実現する機構の提案である。方向と距離の制御を行うためには二つの機能が必要である。一つは、全ての脚解放を同時に実現する機能である。これが実現できないと、跳躍方向の精度が悪化することが予想される。もう一つは、任意の脚を解放可能な機能である。これは、解放パターンの生成に必要な機能である。

本研究では、これら二つの機能を有する新しい機構の提案を行う。図 3.17 に研究の流れと跳躍機構のモデルについて示す。図 3.17(a) に先行研究のモデルを示す。二つの機能に対して、本研究では図 3.17(b)(c) に示す二つの機構モデルを提案する。図 3.17(b) は、全ての脚解放を同時に実現可能な機構モデルである。この機構を試作機を用いて実験することで、提案した機構の原理が妥当であるかの検証を行う。

図 3.17(c) は、任意の脚解放を実現可能な機構モデルを提案する。この機構モデルは、一つ目に提案した機構原理を応用しているため、基本原理は同じである。このため、二つの問題を解決した跳躍移動機構モデルとなる。この機構を解析、試作機を用いて実験を行い、問題を解決する機構が妥当であるかの検証を行う。

また、シミュレーションでは着地時のノードの姿勢が安定しないため、センサノードの向きが不確定である。この問題を解決するために、本研究では着地制御に有効なユニットの提案を行う。

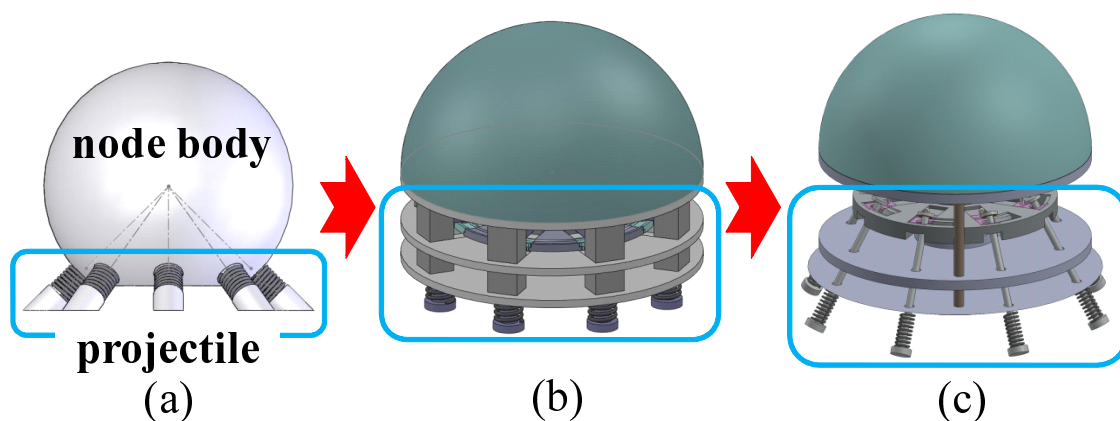


図 3.17: Study flow

第4章 仕様

前章で示した，移動機構モデルを開発するにあたり，環境情報や使用するセンサ，アクチュエータについて仕様を検討する．跳躍移動機構の目標仕様を，表 4.1 にまとめる．

表 4.1: 目標仕様

地形	平坦な床面
無線モジュール	PFU-Node
センサ	温度センサ, CdS セル
電源	単四 (2) 900mAh
アクチュエータ	SMA アクチュエータ (バイオメタル)
目標跳躍移動距離	約 1m
目標跳躍高さ	約 0.5m
目標重量	約 200g

4.1 地形

地形は，移動ロボットが重力に抗して自己姿勢を保持する必要がある壁面，天井面と，その必要がない地面，床面とに分かれ，さらにそれぞれが平坦面と凹凸面とに分かれる．凹凸面はさらに階段のように規則的なものとランダム路のような不規則なものに分けられる．このような種々の環境内を移動するために移動ロボットはそれに適したさまざまな形態をとる．

本研究での周辺環境としては，屋内の平坦な床面を想定する．これは，移動機構において移動しやすい環境であると考ええる．実際の運用を考えた場合，不整地を考慮するべきである．しかし，本研究では新たな機構の提案を行っているため，対象環境を複雑にすることは好ましくない．これより，不整地の影響を考慮することは今後の課題とする．

4.2 無線モジュール

無線センサネットワークでは、多数のデバイスを自然環境など比較的広範囲な環境に分散配置して使用する。このため、バッテリー駆動が前提となり、低消費電力な無線モジュールが使用される。代表的な無線モジュールを表 4.2 に示す。現在のセンサネットワーク用デバイスに用いられている無線モジュールの多くは、通信速度が数十 kbps～百数十 kbps 程度で、数 m～数百 m 程度の通信距離が確保できる微弱あるいは特定小電力無線通信モジュールである。

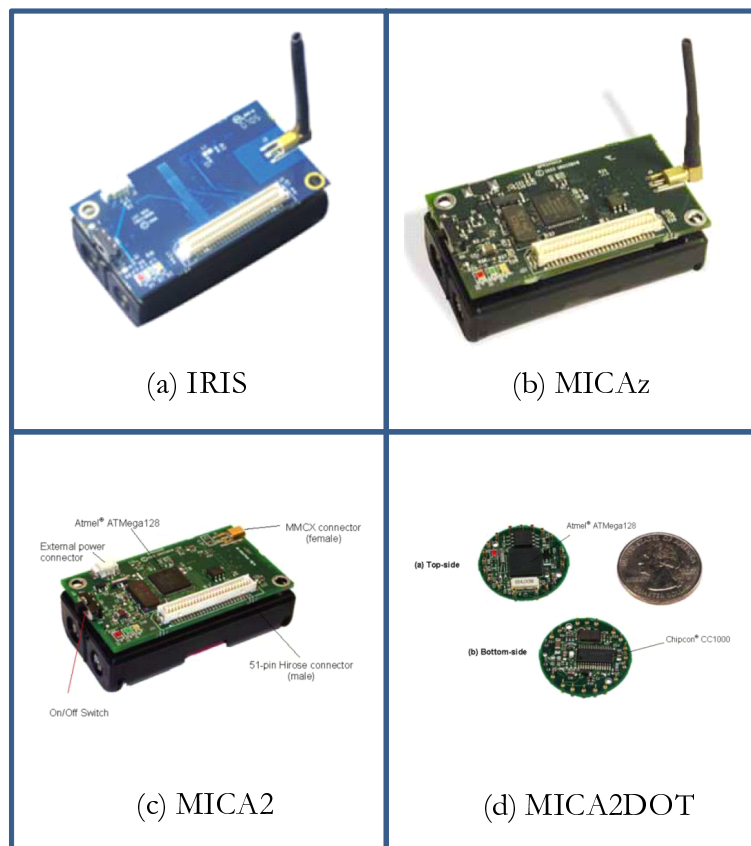
4.2.1 MICA MOTE

有名なセンサネットワークシステムの一つに図 4.1 に示す Crossbow 社の MICA MOTE がある。MICA MOTE は COTS ダスト¹をベースにいくつかの改良がくわえられたものである。MICA MOTE には種類があり、表 4.3 に特性をまとめる。

4.2.2 PFU-Node

我々の研究室では、(株)PFU と共同開発を行った図 4.2 に示す PFU-Node と呼ばれる無線センサモジュールの開発を行った。これは、指向性アンテナを用いており、最大通信距離は約 4m と他のモジュールと比較して距離が短い。しかし、アンテナを基盤に埋め込んでいるため、使用しやすい利点がある。また、このノードは、温度センサと CdS セルを有している。本研究では、この PFU-Node をモバイルセンサノードの通信モジュールとして使用する。

¹Commercial Off-the-Shelf：市販されている部品 (Atmel ATmega128(マイコン), Chipcon CC1000(通信 IC) など) で組み上げられた無線モジュール



(出典:Crossbow社Webページ)

図 4.1: MICA MOTE



図 4.2: PFU-Node

表 4.2: 代表的な無線通信モジュール

デバイス	Chipcon CC1000 シリーズ	RFM TR シリー ズ	ZigBee (Chipcon CC2420 など)	Bluetooth	各社特定小電力無 線モジュール
周波数帯	300～900MHz 帯	300～900MHz 帯	2.4GHz 帯 (868MHz 帯 , 915MHz 帯 も サ ポート)	2.4GHz 帯	400MHz 帯
規格	微弱無線	微弱無線	IEEE802.15.4	IEEE802.15.1	特定小電力無線 (ARIB-STD-T67)
最大チャネル数	数～数十チャネル	単チャネル	16 チャネル	32 チャネル	数十チャネル
最高通信速度	150kbps	111.5kbps	250kbps	1Mbps	2400bps
最大通信距離	約 10m	約 10m	約 30m	約 10m	約 百 m 程度
変調方式	FSK/ASK/ GFSK	ASK/OOK	DSSS	FHSS	FSK が多い
センサ ネット ワークシステム への適用例	MICA2 MOTE, Enter, Solar Biscuit	MICA MOTE, i-been, SmartIts, U-Cube	MICAz MOTE, Telos, i-bean, Sensimash	SmartIts (BTn- ode)	国内メーカーのセン サ ネットワーク試 作 システム など

表 4.3: MICA MOTE と PFU-Node の比較

Mote Hardware Platform	IRIS	MICAz	MICA2	MICA2DOT	PFU-Node
MCU(Chip)	ATMega1281		ATMega128L		PIC18LF2620
Sensor Board Interface		51pin		18pin	28pin
Mobile Chip	RF230	CC2420		CC1000	
電池タイプ (個数)		単三(2)		ボタン (CR2354 等)	単四(2)
電池容量 (mA-hr)		2000,Alkaline		560,Li-ion	900,Alkaline
動作電圧(V)		3.6 to 2.7			2.0 to 5.5
センサ		None		サーミスタ	温度センサ,CdSセル

4.3 アクチュエータ

移動機構の研究において、アクチュエータの選定は重要な要因の一つである。従来の研究で使用されたアクチュエータは、大きく4つの種類に分けられる。図4.3に、アクチュエータの種類を示す。比較のために、小型の製品を選定して紹介している。

図4.3(a)は、最も移動機構に採用されている電気式モータである。汎用性が高く、ギヤを取り付けることで高トルクを得ることができる。しかし、連続的に動作し続けるため、動作中は常にエネルギーを消費する。

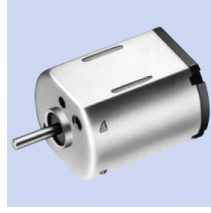
図4.3(b)は、空気圧式アクチュエータである。これは、空気圧を利用して直動のエネルギーを得ることができる。特徴として大きな力を出せることや、長いストロークを実現できる点が挙げられる。しかし、コンプレッサーや、制御用の電磁弁などの部品が必要となり大型になりやすい。

図4.3(c)は、形状記憶合金(SMA)を利用したSMAアクチュエータである。SMAは、電流を流すと収縮する性質をもつ。この性質を利用して、直動エネルギーを得ることができる。低電圧で駆動することが可能で、消費エネルギーを抑えることが可能である。しかし、低トルクであるため、使用できる機構が限定される。

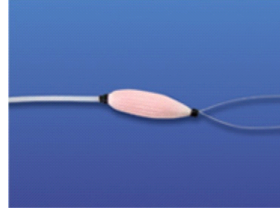
図4.3(d)は、磁力を利用したソレノイドアクチュエータである。内部に可動鉄心を設置し、電流を流すことで直動運動を得ることができる。ストロークが短い、小型で高速応答を得られる。このため、油圧、空気圧シリンダーの制御や燃料噴射装置のインジェクター開弁制御などに使用されている。

関連研究のアクチュエータと跳躍に必要な力を、表4.4にまとめる。表4.4を見ると、小型の跳躍移動機構で多く採用されているのは、“モータとバネ”の組合せであることが分かる。複合型の跳躍移動機構では、“空気圧式”が多く採用されている。これより、サイズが大型になると、必要な力が大きくなるため、大きな力を得られる空気圧式が採用されていることがわかる。小型の機構では、バネに力を蓄えて解放する動作を、モータとギヤにより実現させている。また、SMAアクチュエータを用いた“KOHARO”[19]は、SMAにより発生した力を使い、ボディのバネ鋼の変形により跳躍力に変換している。ボディの変形が伴う機構は、センサネットワークの運用を考えた場合、センサや通信モジュールの搭載が難しい。

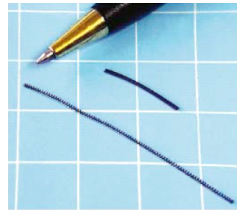
本研究では、消費エネルギーを抑えるために、“SMAアクチュエータとバネ”の組合せに着目する。これは、ボディの変形を伴うものではなく、バネに蓄えたエネルギーをSMAアクチュエータにより解放するものである。従来研究では、連続的な移動を目的に研究開発が進められている。本研究では、新しく一回の跳躍移動を想定している。これより、従来では取り扱わなかった組合せを使用し、省エネルギー化を図ることが期待できる。



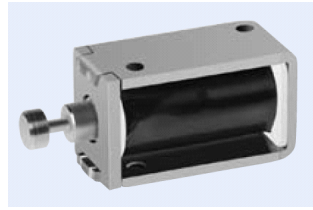
(a) electric motor
FF-M10VA
(マブチモータ)



(b) pneumatic actuator
PM-10R
(スキューズ株式会社)



(c) shape memory alloy
Biometal
(トキ・コーポレーション)



(d) solenoid
JPM1316
(HOSIDEN)

図 4.3: Tpe of actuator

表 4.4: 関連研究のアクチュエータ

Name	Actuator	Jumping energy
EPFL jumper [16]	a motor	two torsion springs
MSU robot 2 [17]	a motor	four torsion springs
Grillo [18]	a motor	two compression springs
KOHARO [19]	eighteen SMAs	spring steel body
Mini-Whegs [20]	two motors	a compression spring
Microbot [21]	a DEA	spring steel body
Leg-in-Rotor [22]	two motors and one pneumatic actuator	pneumatics
AirHopper [23]	four motors and four pneumatic actuator	pneumatics
PAW robot [24]	five motors	eight compression springs
Justice [25]	five motors and a solenoid	four compression springs

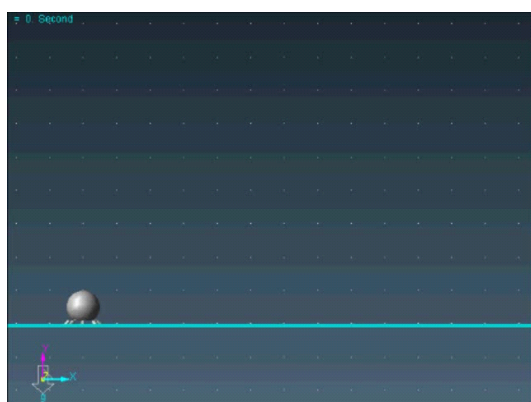
4.4 センサ機能

センサネットワークにおいて、どんな環境情報をセンシングするのは非常に重要である。センサの種類は無数にあるため、防犯・防災に使用されるセンサを代表して表 4.5 にまとめる。センサ素子の部品例を示し、センシング領域の目安として比較している。部品は、センサネットワークでの使用を考慮し、省電力性と小型の物を優先して選定した。

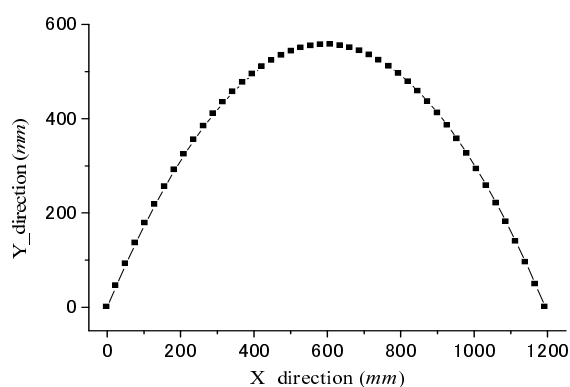
表 4.5 を見ると、ほとんどのセンサが測定範囲がその地点の情報の観測であることがわかる。これは、センサネットワークの運用において重要な点である。センサネットワークの目的は、目標場所での環境情報の取得である。したがって、モバイルセンサノードの最適な移動距離は使用するセンサに影響される。これより、比較的短い距離の移動性能でも、最適な移動計画によってセンサネットワークに有効性を示せると考える。本研究では、移動距離 1m 程度を目標移動距離とする。

4.5 バネの選定

跳躍移動に重要な役割を果たす、バネを選定する。様々な種類のバネから、バネ係数、自由長などから選定を行う。図 4.4(a) に、跳躍モデルのシミュレーションの様子を示す。この形状モデルは、3 章で紹介したモデルである。地面に作用する脚の力を設計変数とし、バネを 5 本使用した跳躍で目標距離を 1m に設定する。重量を 200g とした場合、一つのバネに必要な発生力は、200N となった。このとき、図 4.4(b) に示すように、跳躍飛距離は、1.193m で、跳躍高さは、0.603m となった。結果から、脚が地面に作用する力を 200N とし設計の参考値とする。



(a) snapshot of jumping



(b) result of jumping

図 4.4: Design calculation of spring constant

表 4.5: センサの種類

検知対象	センサ素子	用途	型番 (メーカー)	距離範囲 (m)
光	フォト ダイ オード	照明監視	S2506-02 (浜松ホトニクス)	None
	CdS セル	照明監視	MI527 (Macron Int.)	None
	焦電型赤外線 センサ	人間検知	RE-210(日本セラミック)	0~0.4
	CCD イメー ジセンサ	映像監視	MTV-54C0N (Mintron Enter- prise)	None
磁気	磁気センサ	金属探知	DM-106B (SONY)	None
温度	サーミスタ	温度検出	NCP18XH103F03RB (村田製作 所)	None
	アナログ温度 センサ	人間検知	LM20 (National Semiconduc- tor)	None
力	歪ゲージ	力検出	KSN-2-120-E3-11 (共和電業)	None
	振動センサ	振動検知	ENC-03RC/D (村田製作所)	None
	圧力センサ	重量検出	FSR-400 (Interlink Electronics)	None
	気圧センサ	気圧検出	MPS-2407-015AD (METRO- DYNE)	None
位置	レーザセンサ	距離検出	URG-04LN (北陽電機)	0.06~4.95
	赤外線測距セ ンサ	距離検出	GP2Y0A21YK (SHARP)	0.1~0.8
	超音波センサ	距離検出	UR1612MPR/UT1612MPR (SPL)	0.2~4
特殊	放射線センサ	放射線検出	900-2426 (SAINT-GOBAIN CRYSTALS)	None
	煙センサ	煙検出	RE46C140 (Microchip)	None
	ガスセンサ	硫黄化合物質 系ガス検出	TGS2450 (FIGARO)	None
	湿度センサ	湿度検知	HS-15P (GE)	None

第5章 脚解放の同期性を考慮した鉛直方向跳躍移動機構

第3章で、方向と距離の制御を実現させるには、全ての脚解放の同期性が必要であることを示した。本章では、全ての脚の同時解放機能を実現した跳躍機構を提案する。この機構は8本のバネと脚を有している。複数の脚を鉛直方向に設置することで、全ての脚解放の同時性の検証に有効であると考えられる。提案する機構は1回用の跳躍を想定しており、瞬間的なエネルギーのみ必要とする。この機構の重要な点は、蓄えたバネによる力を最小限のエネルギーで跳躍エネルギーに変換することである。このため、各所で発生する摩擦の影響を抑える工夫が重要である。機構のモデルを示し、動作パターンの制御により方向と距離の制御を実現する手順を説明する。解析ソフトウェアによる最大高さと必要トルク、機構の同期性を示す。スイッチ式実験機器を用いて同期性の実験を行い、評価する。

5.1 原理

図5.1に、提案する機構の原理を示す。提案する機構を3D-CADソフトSolidWorks[29]を用いて設計した。この機構は、複数の脚を同時に解放する機構である。主に2枚の円盤(Disk-1, Disk-2)と8本の脚(anchor)で構成されている。anchorにはフック(hook)部が付いており、Disk-2に引っ掛けることができる。Disk-1には、8か所の穴が開いており、anchorが直動移動するガイドの役目をしている。図の様に、Disk-2に8本のanchorを引っ掛けた状態を初期状態とする。Disk-2には8か所の切欠きがあり、Disk-2が回転すると切欠きの部分にhookが入り、anchorが解放される。これより、一つの回転軸から8つの直動移動が同時に可能となる。

また、任意の脚を解放する方法を図5.2に示す。これは、Disk-2の切欠きの部分に取り付けたストッパー(stopper)を使用する。stopperを移動させることで、anchorの解放を選択することができる。例えば、図5.2(a)の様に、初期状態時に全てのstopperを外周方向に移動させた場合、Disk-2の切欠きをstopperがふさぐことで全てのanchorの解放を止めている。また、図5.2(b)の様に、全てのstopperを内周方向に移動させた場合、Disk-2の切欠きにhookが入り、全てのanchorが解放されている。これより、任意のstopperだけを動かすことで、任意のanchorを解放可能となる。Disk-2の回転に必要なとされる角度は $22.5\deg$ である。このため、移動中に常に回転エネルギーを必要とする車輪型移動機構と比較して、消費エネルギーを抑えることができると考える。

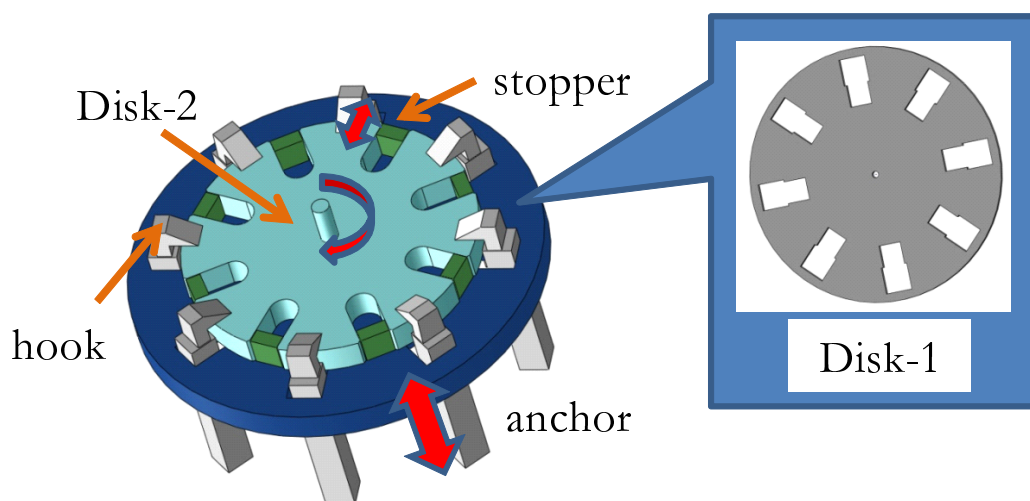


図 5.1: Principle of triggering device

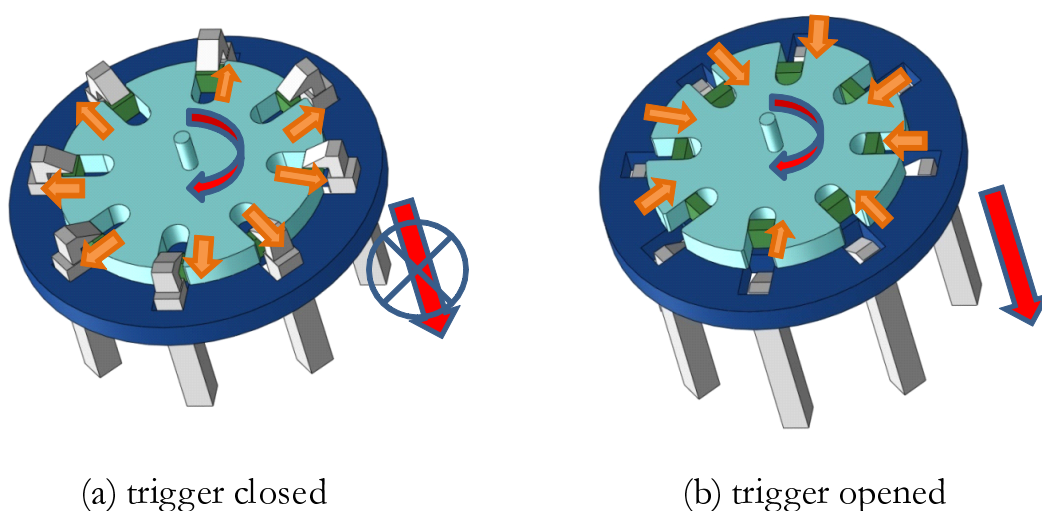


図 5.2: Control of triggering device

5.2 設計

前節で示した原理を基に，試作機の設計を行った．機構の全体図を図 5.3 (a) に，断面図を図 5.3 (b) に示す．この機構は，原理の機構に円盤 2 枚 (Disk-3,4) を追加している．

この機構の目的は，脚解放の同期性がとれるかどうかの検証であるため，消費エネルギーは考慮していない．したがって，回転駆動にはモータを使用している．この機構は，一回跳躍移動を想定している．

機構の本体部品は，円盤 3 枚 (Disk-1,3,4) で構成され，脚ガイド 8 本 (anchor guide) で

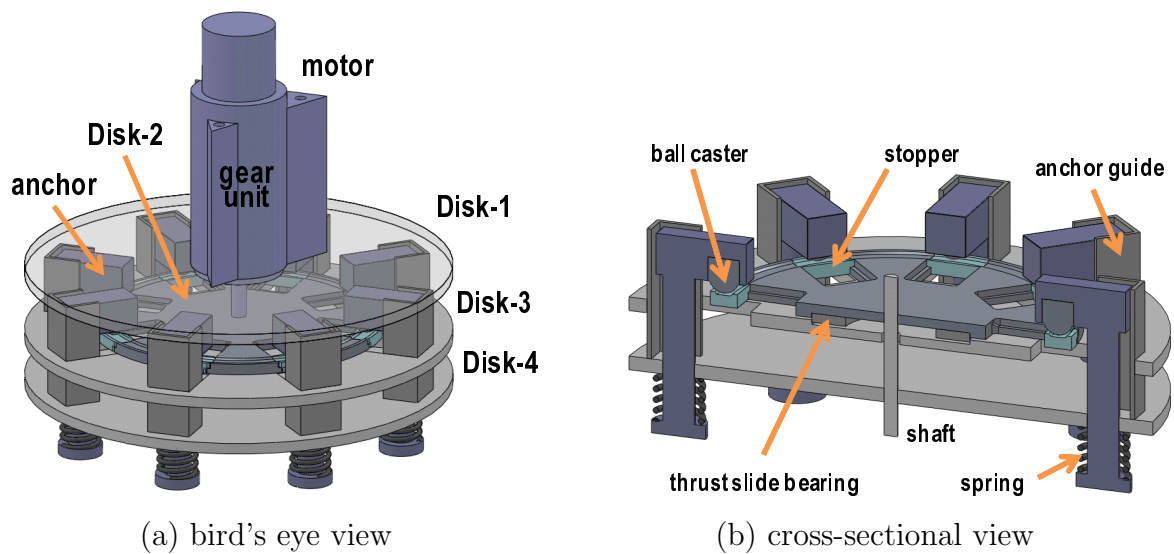


図 5.3: Schematic view of the prototype ver.1

固定されている。Disk-4 には, anchor が直動移動するための穴が空いている。Disk-3,4 間の距離は, anchor の移動距離であり, 長くすると spring による力を大きくできる。Disk-2 は, モータ軸と固定し回転駆動を可能にしている。この機構では, Disk-2 が回転するために必要なトルクを抑えることが重要である。少ないトルクで駆動させることが出来れば, モータのサイズを小さくすることが可能になり, 軽量化, 小型化が実現できる。また, モータ以外の低消費エネルギーのアクチュエータを使用することが可能になる。

5.2.1 Disk-2 と anchor の摩擦

Disk-2 と anchor の摩擦を減らすための部品選定を行った。図 5.4 に部品を, 表 5.1 に部品の仕様を示す。



図 5.4: Part for friction modification

表 5.1: 摩擦緩和部品の仕様

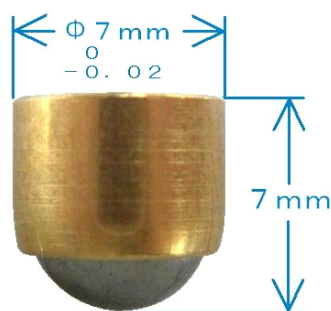
名前	外形サイズ (mm)	耐荷重 (N)	取り付け	特徴
(a) radial ball bearing	ϕ 5~28	50~1963	軸	回転軸に使用
(b) ball caster	ϕ 7~38	900~1200	ネジ, 接着	耐荷重が高い
(c) ball plunger	ϕ 1~20	1~53	ネジ	小型, 取り付け容易

ベアリングは耐荷重が高く、サイズの種類が豊富で使いやすい。しかし、回転軸が必要であり anchor に軸を通す必要がある。

ボールキャスターは、耐荷重が高い。図の製品は、ネジ固定式でありフランジ形状になるため中型になる。接着式の製品は小型である。

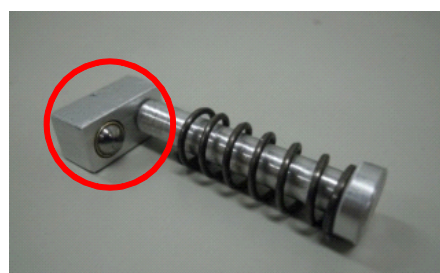
ボールプランジャーは、小型である。取り付けはネジ固定式で、容易である。しかし、耐荷重が低く衝撃に弱い特徴がある。

全ての部品で、転がり摩擦が適用されるため、摩擦係数は0.001程度である。この機構では、Disk-2 と anchor 間の摩擦を減少させる部品に、プチボールキャスター (カルチエ)(ball caster) を採用した。このボールキャスターは、図 5.5(a) に示すように直径が7mm と小型で、耐荷重が900N と高い。取り付けは、図 5.5(b) の様に anchor に埋め込んで接着している。この機構は、確実に動作し、脚解放の同期性実験をすることが目的である。したがって、耐荷重が高いボールキャスターを採用した。Disk-2 には溝があり、ボールキャスターの軌道を確保することが出来る。



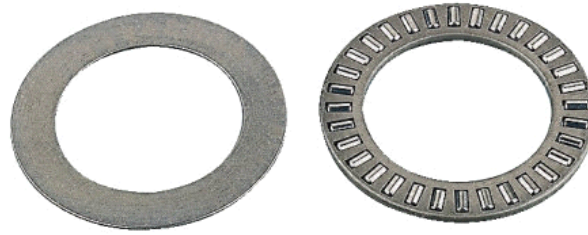
(出典) カルチエ

(a) ball caster



(b) anchor

図 5.5: Ball caster



(出典) IKO

図 5.6: Thrust slide bearing

表 5.2: スラストベアリングの仕様

parameters	value	unit
size	116 × 116 × 47.35	mm^3
weight	5	g
internal diameter	20	mm
outer diameter	35	mm
load capacity	46.5	kN
coefficient of friction	0.003	-

初期状態において Disk-2 に 8 本のバネによる力がかかることにより, Disk-2 が Disk-3 に押し付けられる. このため, Disk-2 と Disk-3 間での摩擦力が増大する. これを回避するために, Disk-2 と Disk-3 の間にスラストベアリング (IKO)(thrust slide bearing) を設置している. スラストベアリングを図 5.6 に, 仕様を表 5.2 に示す.

5.2.2 解放パターンの生成

図 5.7 に, 脚解放の流れと方向制御の仕組みを示す. 図 5.7(a) は, 初期状態である. 脚を解放する種類について図 5.7(b),(c),(d) の 3 つを示す.

図 5.7(b) は, 全ての脚を解放するパターンで図 5.7(b-1) の様に, 全ての stopper を駆動している. このとき, stopper の駆動はスライド方式を利用している. stopper を Disk-2 の中心軸方向にスライドすることで, Disk-2 に切欠きを発生させて脚を解放する機構である. 図 5.7(b-2) に示すように, 全ての脚を同時解放することで, 鉛直方向の跳躍を可能にしている. 図 5.7(c) は, 全ての脚を固定する方法で, 全ての stopper は駆動していないことがわかる. 図 5.7(d) は, 任意の脚を解放する方法で, 選択した stopper を駆動することで図 5.7(d-1) の様に解放パターンを生成している. これより図 5.7(d-2) に示すように任

意の脚解放が実現可能となる．この機構モデルでは，任意の解放パターンを生成しても脚角度が鉛直方向に設置しているため，水平方向の力は得られない．このため，次のモデルへの課題とする．

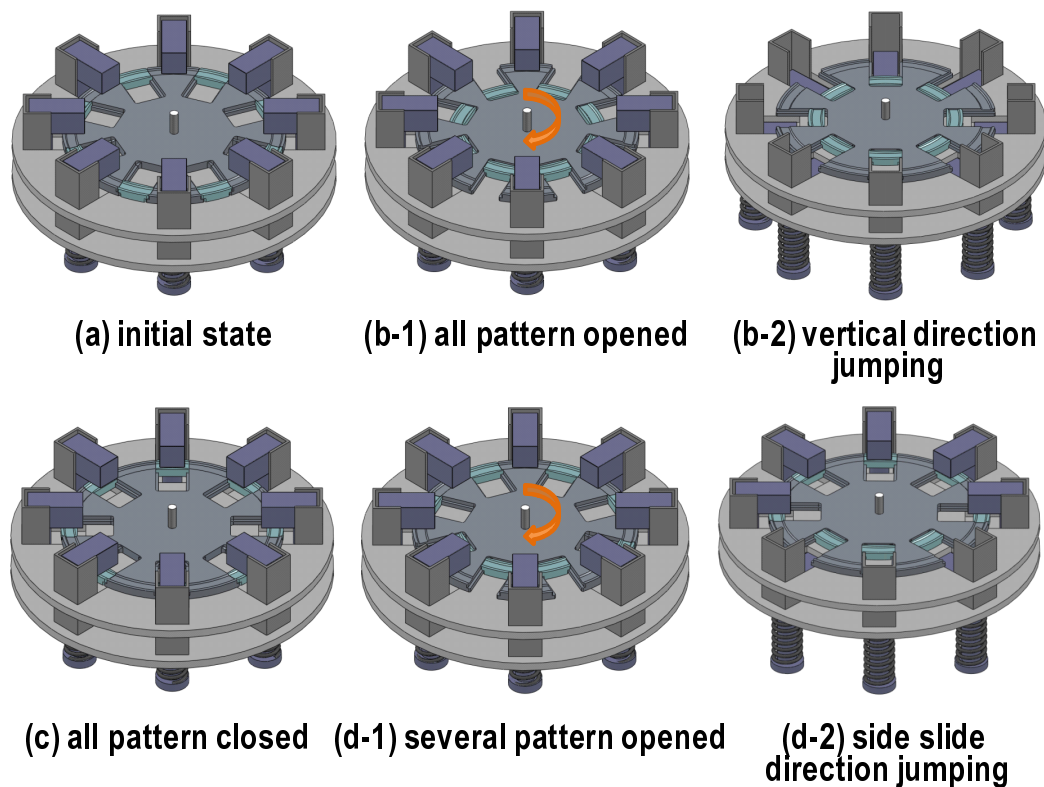


図 5.7: Direction control

5.2.3 数式モデル

図 5.8 に提案する機構の座標系を示す．図 5.8(a) に示すように，ノード中心から鉛直方向を z 軸，水平方向を xy 平面とする．バネの番号を $1 \sim i \sim 8$ とし， i 番目のバネにより発生する力を f_i と表す． p_c は，重心である．力 f_i の付け根の点を $p_{f,i}$ とし，重心 p_c と $p_{f,i}$ の距離を $l_{f,i}$ とする．Disk-2 と ball caster が接触する点を $p_{n1,i}$ とし，発生する摩擦力を $\vec{N}_{1,i}$ とする．重心 p_c と $p_{n1,i}$ の距離を $l_{n1,i}$ とする．Disk-2 と thrust slide bearing が接触する点を $p_{n2,i}$ とし，発生する摩擦力を $\vec{N}_{2,i}$ とする．重心 p_c と $p_{n2,i}$ の距離を $l_{n2,i}$ とする．Disk-2 が回転する中心軸の必要トルクを T とおく．

図 5.8(b) の様に， $l_{f,i}$ の間の角度を θ とする． θ が等間隔になるようにバネを配置している．このとき，8 本のバネに対して θ は $\pi/4$ となる．

1 本のバネにより機構に加わる力を，式 (5.1) に示す．

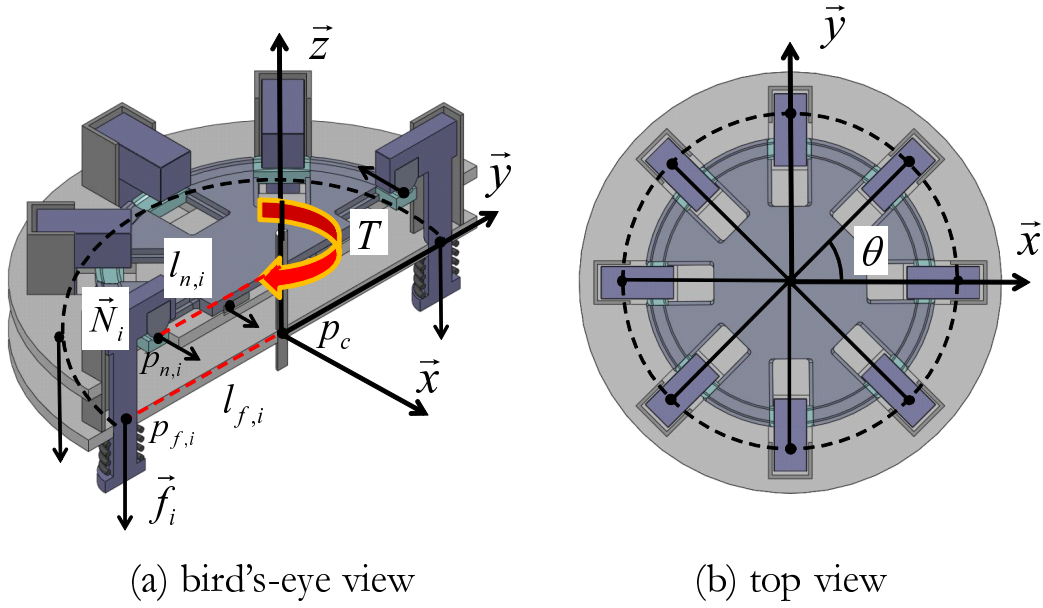


図 5.8: Details of the prototype ver.1

$$\vec{f}_i = f_{z,i} = -k_i \times \delta \quad (5.1)$$

このとき、 k_i はバネ定数、 δ はバネのたわみである。

式 (5.2) に、Disk-2 に発生する摩擦力を転がり摩擦力として示す。

$$\begin{cases} \vec{N}_{1,i} = \mu_1 \frac{f_{z,i}}{a_1} \\ \vec{N}_{2,i} = \mu_2 \frac{f_{z,i}}{a_2} \end{cases} \quad (5.2)$$

このとき、 μ_j は転がり摩擦係数、 a_j は回転体の半径である。 ($j=1,2$) anchor を剛体と考えて、垂直抗力にバネによる力 $f_{z,i}$ を代入している。式 (5.3) に、Disk-2 が回転する中心軸の必要トルク T を示す。

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^8 (\vec{N}_{1,i} l_{n1,i} + \vec{N}_{2,i} l_{n2,i}) \\ &= 8 \times \left(\mu_1 \frac{-k_i \times \delta}{a_1} l_{n1,i} + \mu_2 \frac{-k_i \times \delta}{a_2} l_{n2,i} \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

跳躍高さについて述べる。この機構は鉛直方向に脚を設置しているため、離陸角度を 90 度として式 (3.6) から最大高さを導くことができる。このとき、空気抵抗は考慮しないとする。跳躍最大高さ h_{max} を、式 (5.4) に示す。

$$h_{max} = h_s + \frac{v_s^2}{2g} \quad (5.4)$$

このとき, h_s はバネ解放時の機構の高さで, v_s は解放時の初速度である¹.

5.3 解析

設計した跳躍機構をもとに機構解析ソフト RecurDyn[30] を用いて解析を行った. 解析を行う目的は, 2つある. 一つは Disk-2 を回転させるために必要なトルクを求めることである. これより, モータの選定が可能になる. もう一つは, 提案する機構モデルが跳躍可能な最大高さを求めることである. これは, 製作した試作機との比較検証のために有効である.

5.3.1 必要トルク解析

Disk-2 を回転させるためには, Disk-2 と干渉する他の部品との摩擦力を超えるトルクが必要である. この解析では, 8 本のバネによる力で anchor と Disk-2 が接触している. Disk-2 に接触している部分は anchor に埋め込んだ ball caster で球面接触している. また, Disk-2 は Disk-3 との間に設置した thrust slide bearing と面接触している. このため, 両方の接触に発生する摩擦は転がり摩擦である.

シミュレーション条件を表 5.3 に示す.

表 5.3: シミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of sensor node	$116 \times 116 \times 47.35$	mm^3
weight	440	g
weight of one spring	2.5	g
width of spring	11.25	mm
natural length	29.5	mm
compressed length	10.8	mm
maximum load	85.42	N
spring constant	4.51	N/mm
coefficient of friction	0.002	-

シミュレーションの様子を図 5.9 に, 結果を図 5.10 に示す. 図 5.10 に示すように, Disk-2 に与えるトルクを step 入力を与えて, Disk-2 の回転が実現された瞬間にトルクを 0 にしている. これより, 必要トルクが明確にわかる. 図 5.10 を見ると, Disk-2 が回転する瞬間のトルクは 800 Nmm である. 1 本のバネにより蓄積された力は, 85.42 N より, 8 本のバネにより蓄積された力は, 683 N である. 転がり摩擦を活用しなければ, 摩擦係数が 10 倍

¹詳細は第 3 章に示す

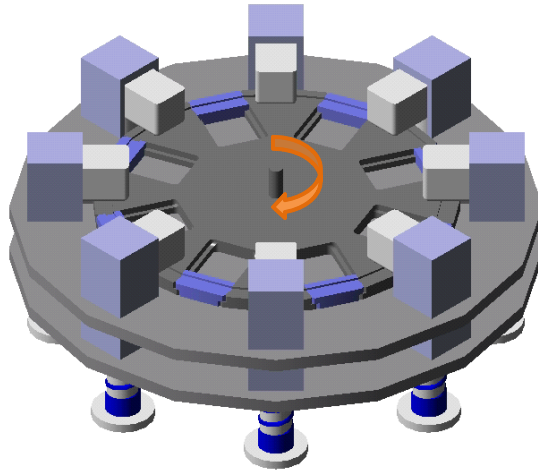


图 5.9: Snapshots of torque analysis

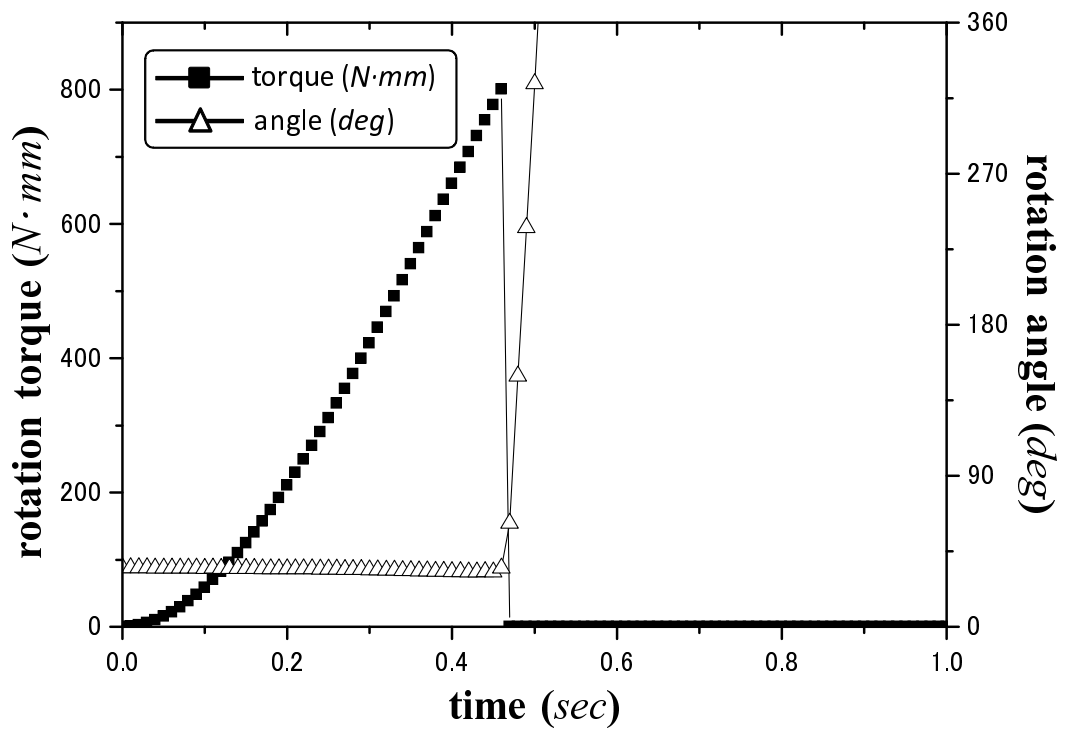


图 5.10: Torque required during releasing

以上増加するため、トルクは10倍以上増加する．これより、8本のバネによる力を機構を用いて必要トルクを抑えることを実現しているといえる．このトルクは、DC モータと遊星ギヤボックスを使用することにより実現可能である．

5.3.2 脚解放の同期性

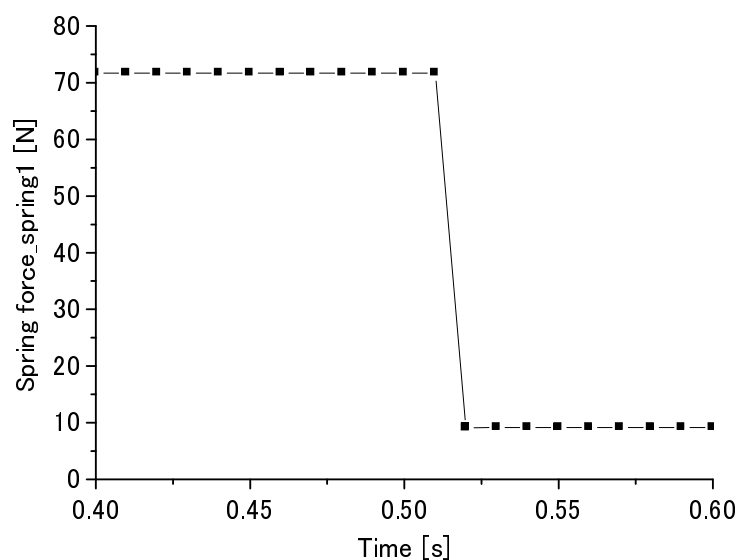


図 5.11: A spring force during releasing

表 5.4: Eight spring forces

times(s)	0.50	0.51	0.52	0.53
spring1(N)	71.68	71.68	9.10	9.15
spring2(N)	71.66	71.66	9.10	9.15
spring3(N)	71.70	71.70	9.12	9.15
spring4(N)	71.65	71.66	9.10	9.15
spring5(N)	71.63	71.61	9.08	9.10
spring6(N)	71.52	71.71	9.15	9.19
spring7(N)	71.81	71.82	9.08	9.10
spring8(N)	71.52	71.65	9.11	9.15

脚解放の同期性の検証を行うために、バネの解放時のエネルギー遷移を解析した。図 5.11 は、1 つの脚に取付けたバネの解放瞬間を示しており、約 0.53sec で蓄えられたバネの力が解放されていることがわかる。表 5.4 に、8 つのバネについて解放の瞬間のバネエネルギーの遷移を示している。これにより、高い精度で同期性がとれているといえる。

5.3.3 最大跳躍高さ解析

提案する機構では、必要トルクを獲得するために DC モータを使用した。しかし、Disk-2 の必要回転角は 22.5deg と小さいため、機構の工夫次第で消費エネルギーの少ないアクチュエータで駆動することが期待できる。

図 5.12 に、モータを搭載した機構モデルの跳躍の様子を、図 5.13 に跳躍高さの結果を示す。これは、8 本のバネを全て解放した場合の跳躍高さを示している。この結果を見ると、最大跳躍高さは 537.98mm である。バネ定数を 9.02N/mm で解析した結果、必要トルクが 1481.49Nmm 、最大跳躍高さが 1136.91mm となった。これより、バネ定数に比例して必要トルクと最大長約高さが増加することがわかる。

図 5.10 と図 5.13 を見ると、Disk-2 が回転してから跳躍移動までの時間がほとんど同じであることがわかる。これは、バネによる大きな力が微小時間内で解放されていることを示している。これより、全てのバネが同時に解放される同期性が重要な要素であることを示している。

5.4 試作機

5.4.1 ver.1

上記の設計と解析を基に、試作機の製作を行った。図 5.14 に、試作機を、表 5.5 に試作機の仕様を示す。構造材はアルミを、モータは遊星ギヤボックスセット (タミヤ) を用いている。遊星ギヤは軸上にギヤを配置している。このため、センサノードの重心を中心軸上に設定することが可能である。また、ギヤ比の調整により、段階的にトルクを変更して駆動することができる。

しかし、図 5.15 に示す様に Disk-2 の変形により新たな摩擦力が発生した。バネの力 f_i により押しつけられた Disk-2 が変形を起こし、Disk-3 と面接触しており、摩擦力 $N_{3,i}$ が発生する。これより、Disk-2 に必要なトルクが増加し、中心軸の回転を実現できない問題が生じた。問題の原因として以下の要因が考えられる。

- Disk-2 に使用した材料が、強度が低いアルミ (A5052) であった。
- anchor と Disk-4 の取り付けにがたつきが存在し、Disk-2 と anchor の接触にモーメントが生じている。

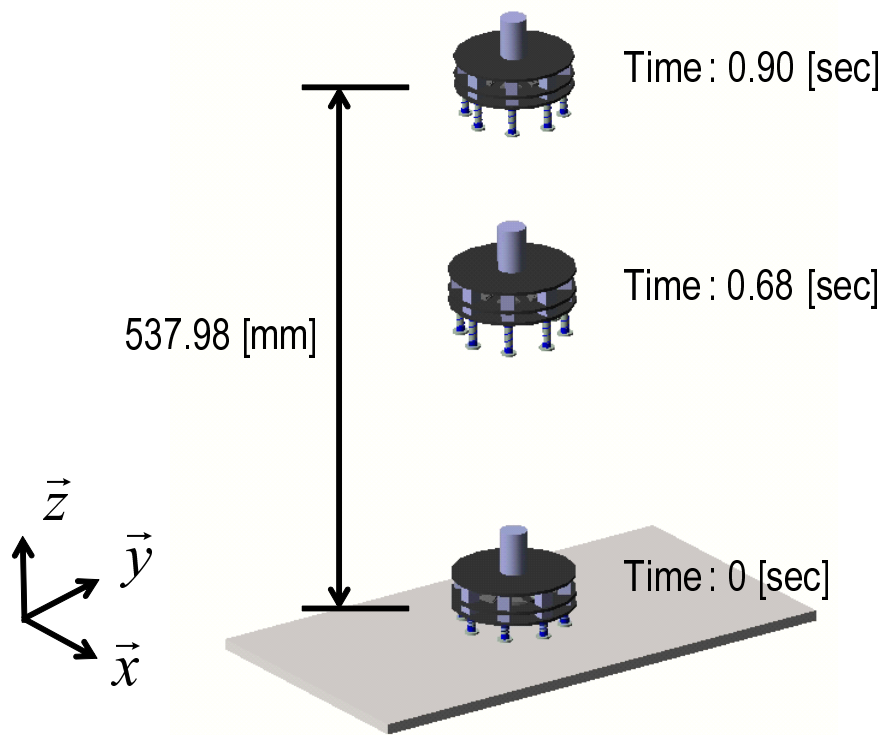


図 5.12: Snapshots of sensor node leaping

- Disk-2 と Disk-3 の設置距離が近すぎたため，微小たわみにより接触した．

これらの要因を考慮し，試作機を改良する．

表 5.5: 試作機 ver.1 の仕様

unit	size(mm)	weight(g)	material
Disk-1	t3 ϕ 116	70	aluminium alloy
Disk-2	t3 ϕ 80	20	aluminium alloy
Disk-3	t3 ϕ 116	80	aluminium alloy
Disk-4	t3 ϕ 116	110	aluminium alloy
thrust slide bearing	t2 ϕ 35	36	steel
anchor	44(length)	7	aluminium alloy
spring	29.5 ϕ 11.25 (compressed: 16)	20	steel

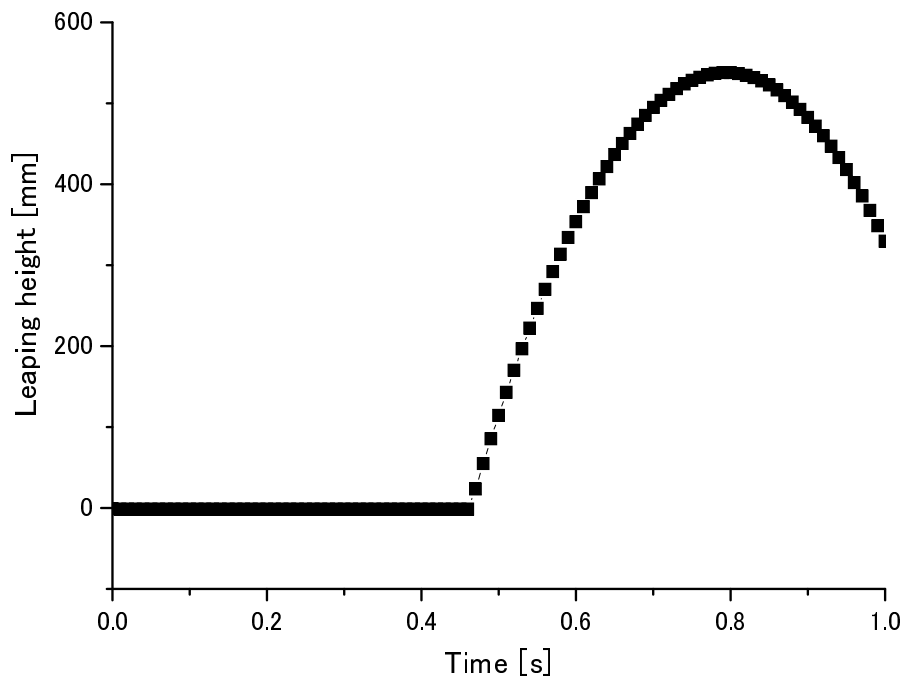


図 5.13: Leaping height

5.4.2 ver.2

試作した機構での検証を実行したが、問題が生じたため、正確に動作しなかった。そこで改良した試作機について述べる。図 5.16 に改良した試作機を示す。変更した点を以下にまとめる。

- a . ギヤボックスを増やして、駆動トルクを $T=634Nmm$ に増加した。
- b . Disk-2 に flange 部品を取り付け、軸の回転を Disk-2 に伝達している。
- c . Disk-3 を取り外し、Disk-2 との接触を避けた。
- d . anchor を 2 本取り外し、計 6 本とした。

これより、試作機の動作を実現可能となった。したがって、機構に必要な駆動トルクは、 $T=634Nmm$ となる。

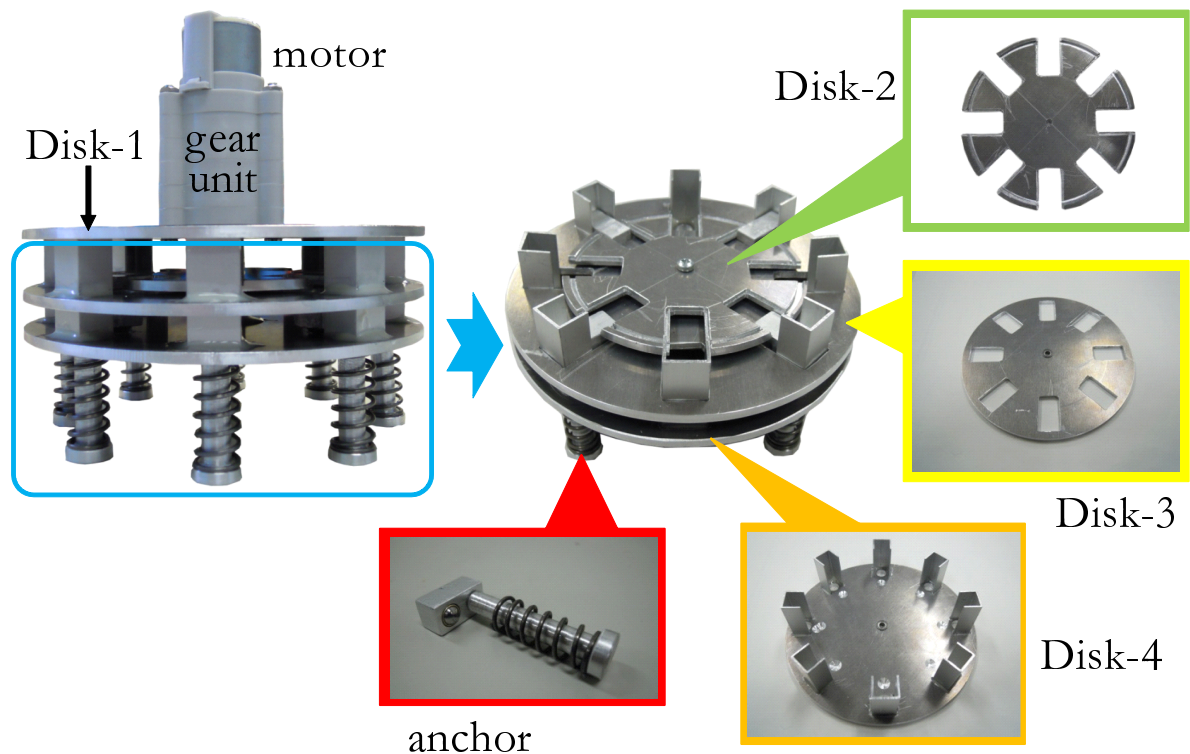


図 5.14: Sensor node prototype equipped with leaping actuators

5.5 実験

5.5.1 跳躍実験

図 6 に示した試作機を用いて跳躍実験を行った。試作機の製作の都合上、6 本のバネ解放による跳躍に変更した。6 脚の結果から予想される 8 脚での跳躍高さ と解析結果の比較を行う。脚数と Disk-3 の変更に伴い、重量は 350 g に減少した。実際の跳躍の様子を図 5.17 に示す。実験では、 10 cm 間隔で印をつけたポールを設置している。図 5.17 を見ると、試作機での跳躍高さは約 400 mm となった。計算される 8 脚での跳躍高さは約 533.33 mm となり、解析結果の 537.98 mm と等しい結果になっていることがわかる。これより、解析モデルの妥当性が検証されたといえる。また、モデルのパラメータを変えることで跳躍高さや必要トルクの改善を行うことが可能となった。

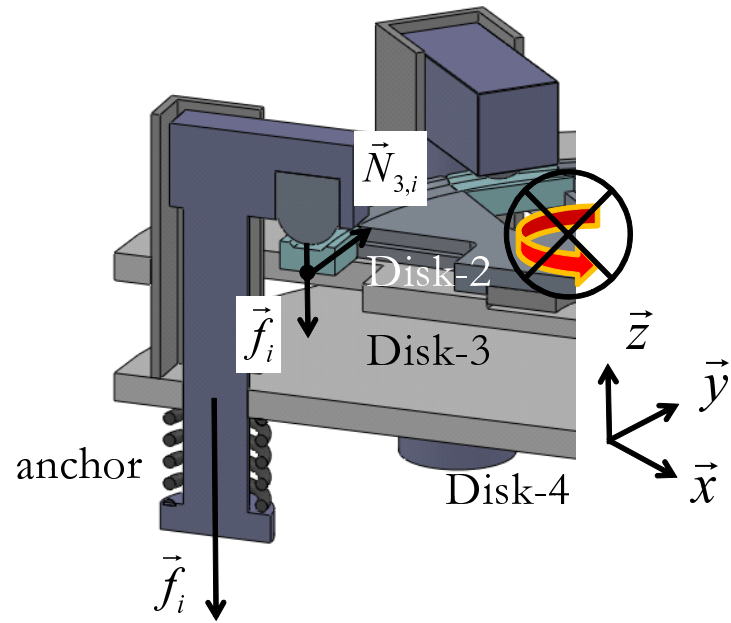


图 5.15: Zoom view of the prototype ver.1

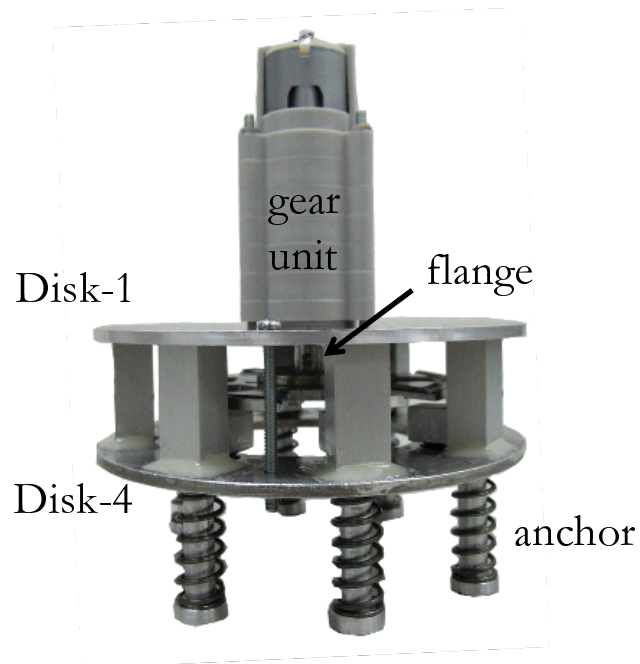


图 5.16: Improvement of the prototype

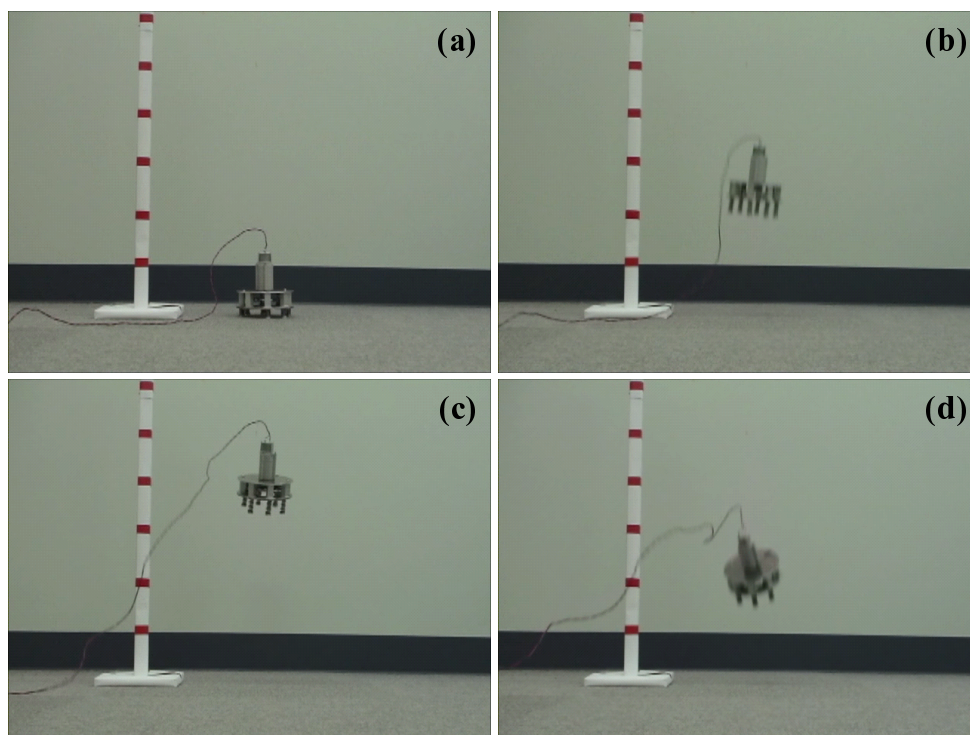


図 5.17: Experimental result: prototype leaping

5.5.2 同期性実験

図 5.18 に、スイッチ式実験装置について示す。図 5.18(a) は、試作機を搭載した状態で、それぞれの脚先にプッシュボタンスイッチを配置している。試作機の脚解放により、スイッチを押しこみ、その電圧データを計測する。スイッチが押された瞬間の電圧をみることで、脚解放の同期性が実現できているかを検証する。実験は、10 回繰り返して行った。図 5.18(b) は、スイッチ式実験装置を上面からみた図で、スイッチの配置場所を示す。

図 5.19 に、実験結果を示す。図 5.19 を見ると、最初の脚の解放と最後の脚の解放の差は 0.763msec である。跳躍に必要な時間を考慮すると、この時間は微小であることがわかる。したがって、この機構の同期性は跳躍動作の方向、距離制御に有効であるといえる。

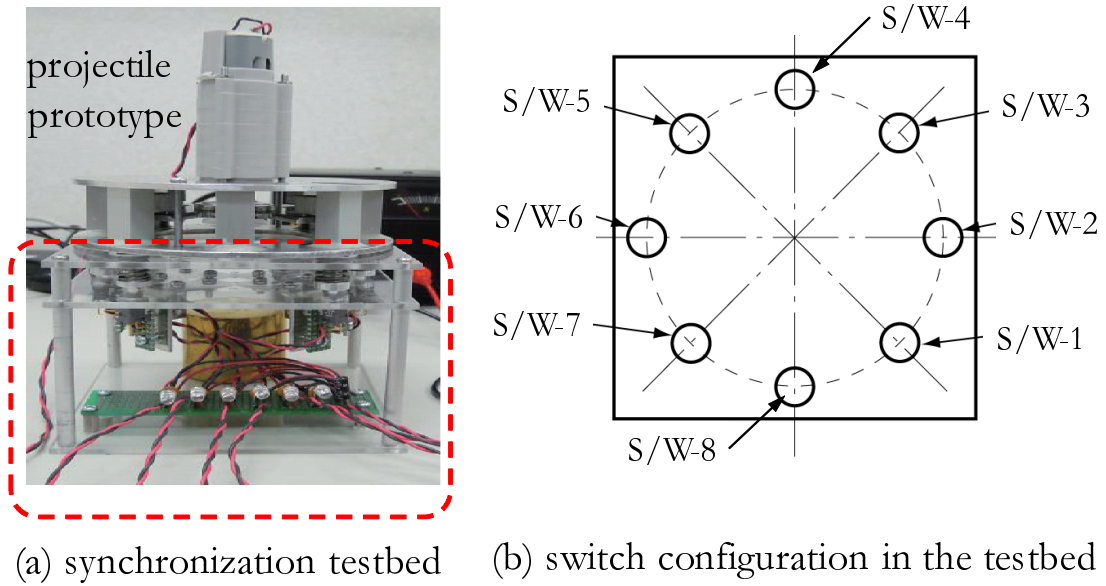


图 5.18: Synchronization testbed

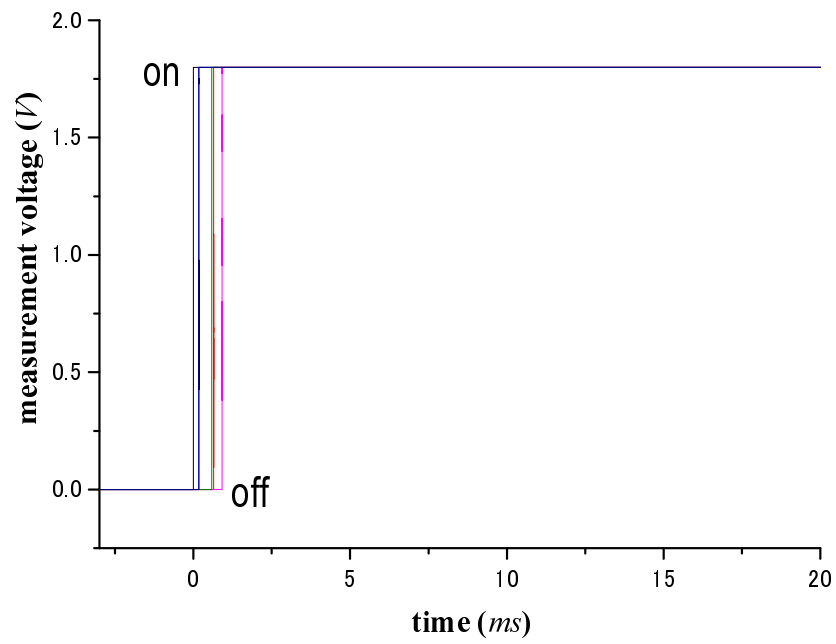


图 5.19: Result for the releasing synchronization

5.6 まとめ

本章では, 消費エネルギーを抑えた, 方向と距離の制御に有効な新しい跳躍移動機構を提案した. 機構の設計を行い, 解析により最大高さと必要トルクを計算した. 現在の機構では DC モータを採用しているため, 重量の問題により跳躍高さの減少, 必要トルクの増大が生じている. 構造材をアルミから CFRP に変更することで軽量化を行い, 必要トルクの減少を実現できる.

本章では, 機構の動作を検証するために試作機を製作している. このため軽量化に関しては, 今後の課題とする. バネエネルギーの遷移を調べることで, バネ解放の同期性がとれていることを示した. 製作した試作機に対して検証を行い, 機構の有効性を示した.

第6章 方向と距離の選択が可能な跳躍移動機構

本章では，移動方向を選択可能な跳躍移動機構を提案する．

6.1 原理

前章で提案した機構を応用して，脚を解放する機構を設計する．提案する機構の原理モデルを図 6.1 に示す．図 6.1(a) に全体図を，図 6.1(b) に構成図を示す．図 6.1(b) に示すように，この機構では前章で提案した機構に下記の機構を追加した．

- 脚を斜めに設置し，同時解放可能にする機構．
- 脚を任意に選択して解放可能にする機構．
- ねじりバネによる回転駆動を実現する機構．

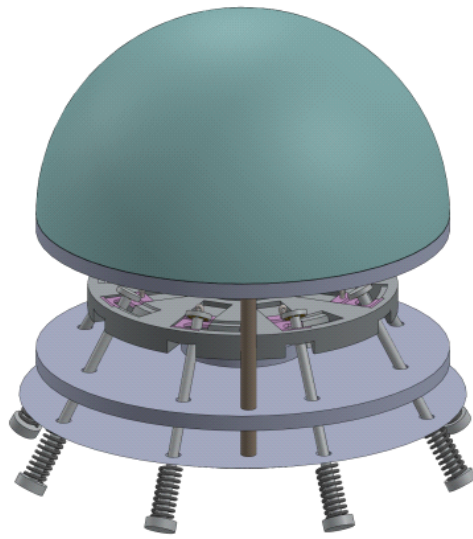
前章で提案した機構は，脚を鉛直方向に設置しているため，跳躍動作が鉛直方向しか実現できない．そこで，脚を斜めに設置することで，鉛直と水平方向の力を発生可能にする．

図 6.2 に，動作の流れを説明する．図 6.2(a) に初期状態を，(c) にフローチャートを示す．あらかじめ，目標位置に対してどの脚を解放するか決めておく．まず，1 番目に選択した脚を固定する動作を行う．これより，選択された脚は拘束される．図 6.2(a) では，正面 3 つの脚を固定脚と選択して拘束を行った．2 番目に，脚を固定している円盤部品を回転させる．これより，全ての脚を同時に解放可能となる．このとき，固定された脚は拘束されているため解放されない．3 番目に，脚を斜めに設置することにより，それぞれの解放された脚から水平，鉛直方向の力を発生させて，跳躍動作を実現できる．図 6.2(c) に，脚を解放した状態を示す．選択した正面の 3 本の脚は固定されていることがわかる．これより，方向と距離の制御を実現し，目標位置への到達が実現可能であると考ええる．

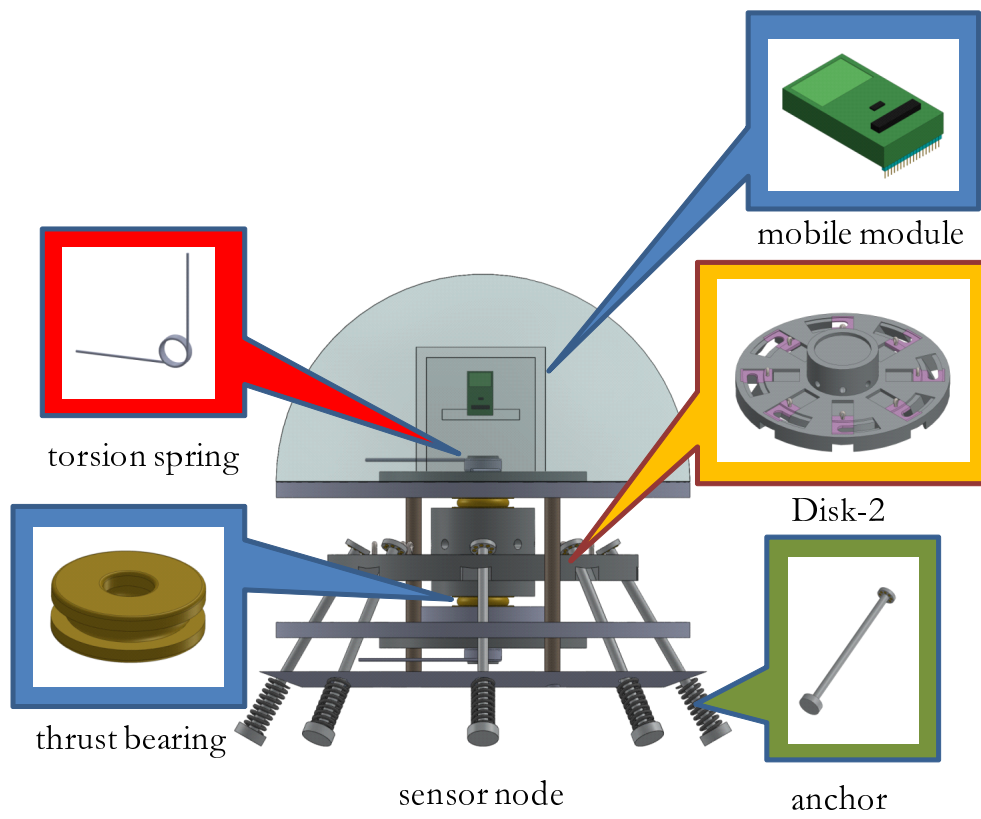
本章では，それぞれの動作に対して実現可能な機構を提案している．

6.2 機構

コンセプトを基に，機構の設計を SolidWorks[29] を用いて行った．図 6.3 に，設計した試作機を示す．この試作機は，複数の機構を提案しており大きく 3 つに分けられる．1 つ目



(a) over all view of design



(b) cocept of sensor node

图 6.1: Concept of prototype ver.2

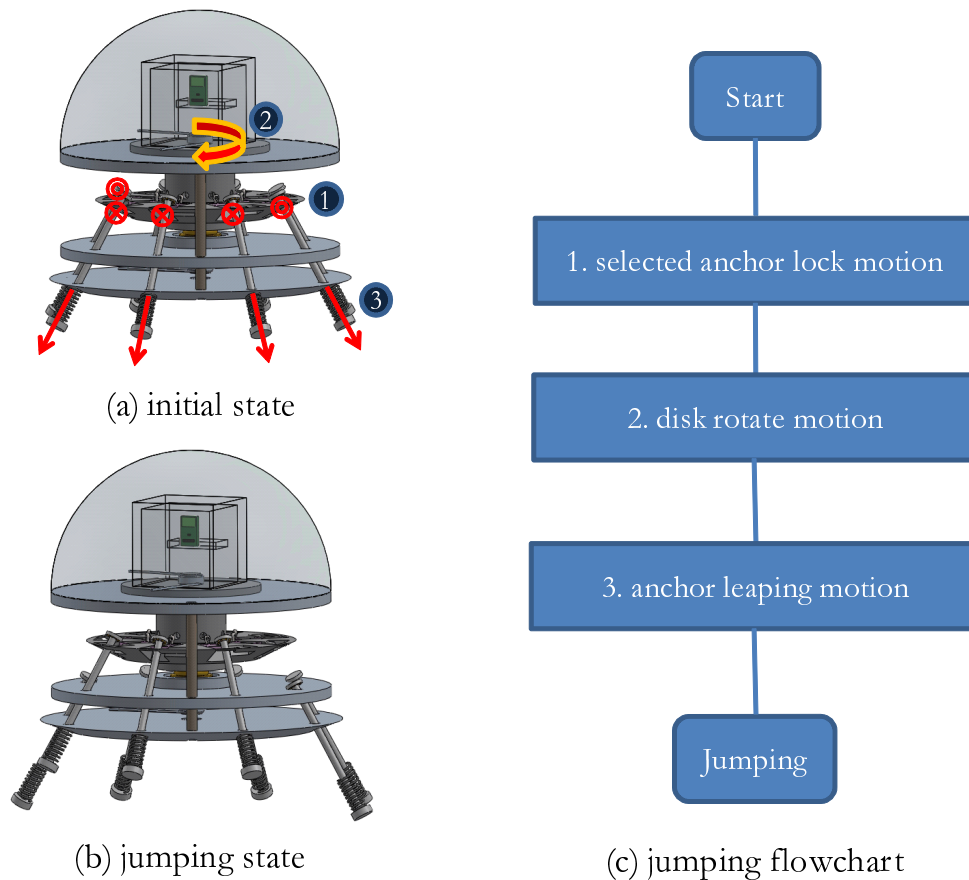


図 6.2: Flowchart of the prototype ver.2

は、前章で提案した脚の同時解放機構を応用した”triggering device”である。これは、脚を斜めに配置することで、水平、鉛直方向の力を発生させている。脚の形状、固定方法等を検討することで、摩擦を抑えて低トルクでの駆動を実現可能にしている。

2つ目は、脚を任意に選択することが可能な”anchor lock part”である。この機構は、1つの脚をロックする機構であり、全体で8つ搭載している。個々の機構を別々に駆動することで、任意の選択要求に応えることが可能となる。3つの方式を検討しており、省スペースで駆動可能な機構を実現している。

3つ目は、脚を固定している部品を回転駆動させる”locking device”である。前章では、モータを使用して軸を回転駆動させていたが、省エネルギー化を考えると改良の必要がある。そこで本章では、ねじりバネを用いた機構を提案することで、省エネルギー性を有した跳躍機構への実現を目指す。

これらの機構を制御し、通信を行う”controller housing”を搭載している。通信モジュールとして”PFU-Node”を採用しており、環境情報を搭載センサで観測し通信を行う事が可能である。

本章では，上記した3つの機構に対して設計，解析を行った．

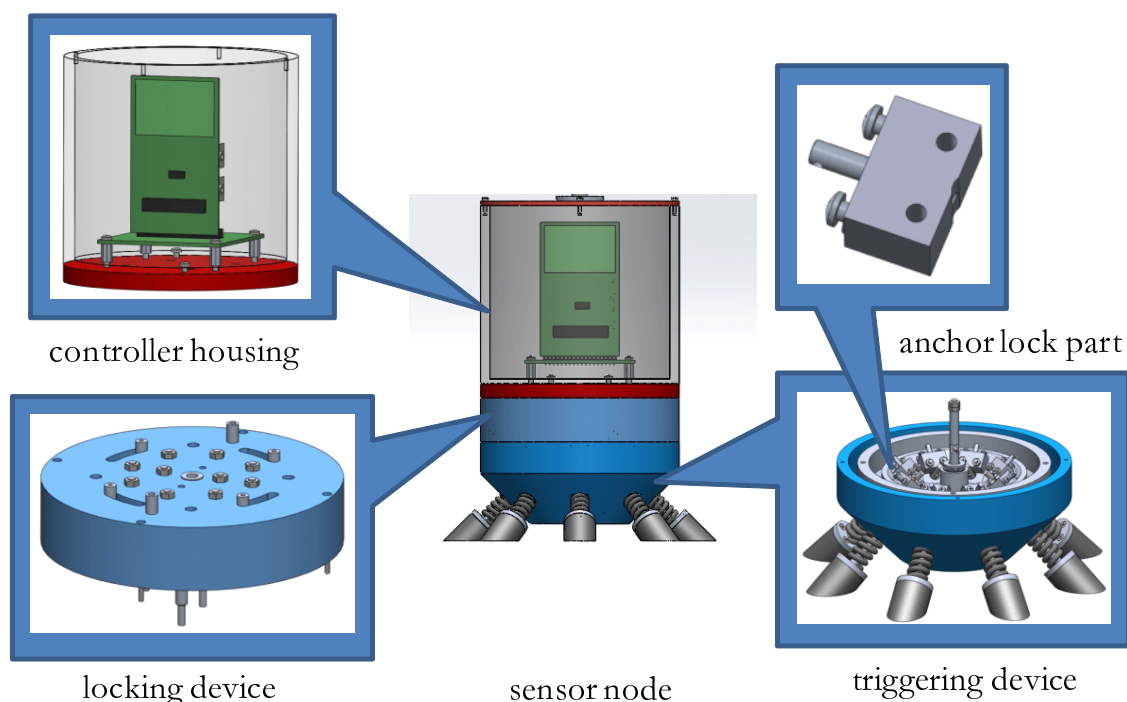


図 6.3: Detail of the prototype ver.2

6.2.1 脚同時解放機構

図 6.4 に，”triggering device”の構成図を示す．この機構は，主に4枚の部品 (Disk-1～4) と脚8本 (anchor) から構成される．前章で提案した機構から大きく変更した点は，脚を斜めに配置した点である．これより，鉛直方向だけでなく，水平方向の力を発生させることができる．Disk1,4は，固定用の部品と筐体である．これらの部品を設置することで，全体の剛性を上げている．Disk2,3は，anchorを固定するための部品で，この機構では，2つの部品でanchorを支える．Disk2,3には，切欠きを設けており，anchorの解放に使用する．前章では，鉛直方向のみの固定方法であったため，モーメントの発生が見られた．本章では，anchorを斜めに設置することで発生するモーメントを極力抑えるために，両端支持方法で対応する．anchorは，2 bearings方式を採用した．これは，脚の解放中心軸に対して，等間隔に2つのラジアルベアリングを配置することで，モーメントを防ぐ方式である．これより，モーメントによるたわみを減少させ，摩擦の発生を防いでいる．また，脚先部品を交換可能にしており，地形による影響を考慮して部品の形状や材質を変更可能にしている．Disk2とDisk4間，Disk3とDisk1間の摩擦をへらすため，それぞれにスラストベアリング (オリジン電気) を搭載している．これより，軸方向の剛性を高くし，跳躍時の衝撃に耐える構造としている．

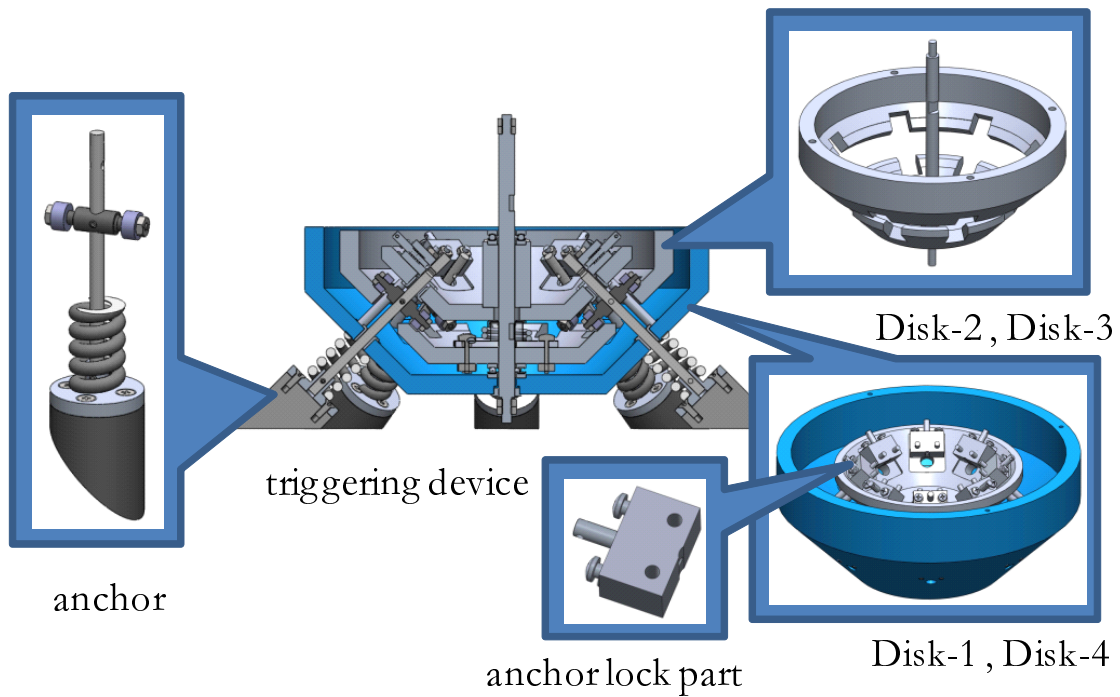


図 6.4: Detail of the triggering device

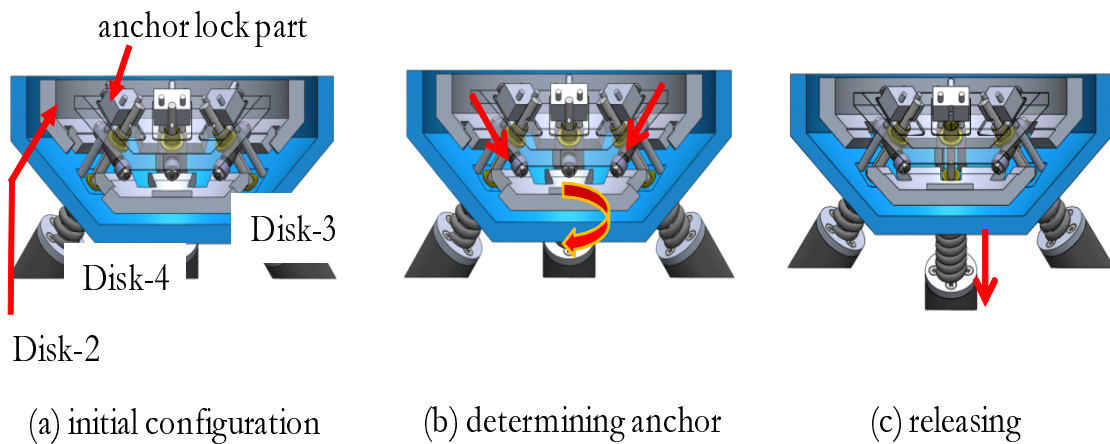


図 6.5: Motion of the triggering device

それぞれの脚を固定する機構”anchor lock part”を，8つ搭載している．この機構に関しては後述する．

図 6.5 に機構の動作について説明する．図 6.5(a) に示す様に， anchor を Disk-2, Disk-3 のレール上に引っ掛けた状態を初期状態とする．この状態から Disk-2, 3 を回転することで， anchor に搭載したベアリングが Disk-2, 3 の切欠きに来ると， 脚が解放される機構と

なっている。図 6.5(b),(c) には、任意の脚を解放する方法について示している。図 6.5(b) に、図の 3 本の脚の内、両側 2 本の脚を固定した状態を示す。これより、図 6.5(c) に示す様に、真ん中の脚 1 本だけが解放される。

脚方式の検討

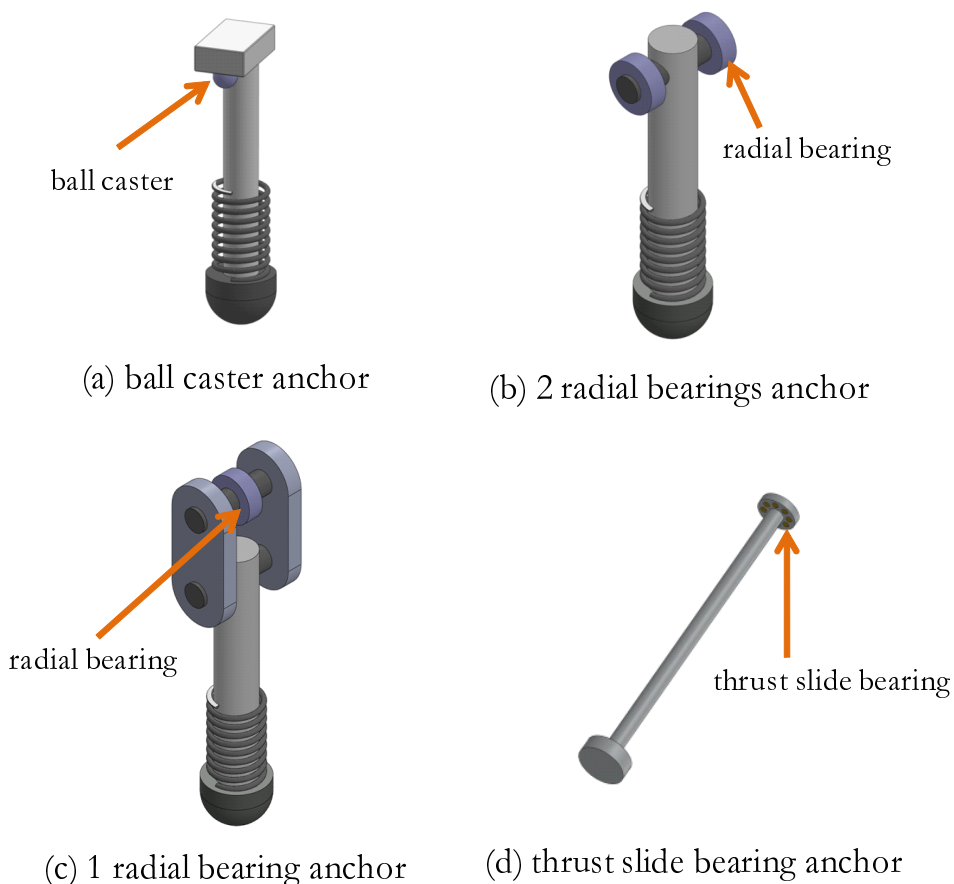


図 6.6: Type of anchor parts

脚の解放機構を設計するにおいて、脚をどのように固定し解放するかが重要である。最適な機構を考案する上で、脚への要件を以下にまとめる。

- 脚の固定と解放を容易に切り替え可能である。(駆動容易性)
- 高荷重の負荷を保持できる。(耐荷重性)
- 小型，軽量である。(跳躍高さ)

駆動容易性は、他の部品との兼ね合いも考慮する必要がある。他2つの要件を考慮して、図6.6に示す4つの脚方式を検討した。

全ての脚方式に転がり摩擦を利用している。これは、転がり摩擦係数が、摩擦方式の中で最も小さい値をとるためである。

図6.6(a)は、前章で提案した機構に採用した”ball caster”方式である。これは、脚元にボールキャスター(カルチエ)(ball caster)を搭載し、全方向荷重に対応した方式である。この方式は、脚の軸中心にボールキャスターを配置することができないため、片側支持になる。このため、モーメントが発生して他の部品と干渉することで摩擦の発生が生じることが考えられる。ボールキャスターの特徴として、耐荷重性が高いため、高負荷の保持が実現できる。小型のボールキャスターは、直径 $\phi 7\text{mm}$ を有しているため、脚全体の小型化は難しい。

図6.6(b)は、本機構に採用した”2 bearings”方式である。これは、脚元に軸を通して、軸の両端にラジアルベアリング(radial bearing)を配置している。この方式では、2点接触で脚を固定できるためモーメントの発生を防ぐことが可能である。また、荷重を半分ずつ負担することができるため、耐荷重性が上がる。小型のラジアルベアリングは、直径 $\phi 3\text{mm}$ の製品が存在するため、小型化の応用も可能である。しかし、脚部品に軸を通すための穴を空けるため、耐荷重性が下がる。このため、小型化する際に材質を考慮する必要がある。

図6.6(c)は、1つのラジアルベアリングを用いた”1 bearing”方式である。これは、脚の中心軸と2つの軸を使用して構成している。この方式は、レール部品の様になっているため、脚の中心軸周りの回転力を受けにくい長所がある。しかし、軸を2つ追加するため、大型になる。

図6.6(d)は、スラストベアリングを用いた”thrust bearing”方式である。これは、脚元にスラストベアリングを取り付けている。これより、小型でモーメントが発生しにくい脚が実現可能である。しかし、スラストベアリングは3つの部品から構成されており、それらを固定する方法が難しい。

以上の4方式を検討し、実用性と小型化への応用性が期待できる”2 bearings”方式を採用した。

脚ガイドの検討

脚を”2bearings”方式を採用したが、この方式では、脚の中心軸まわりの回転力を抑えることができない。そこで脚の回転を抑えるために、脚ガイド(anchor-guide)の設置を検討した。図6.7に2つの方式を示す。

図6.7(a)に、脚全体をガイド部品で覆う”anchor-guide”方式を示す。これは、脚部品の直動移動のみを取り出すために、経路に溝を作っている。脚は、溝の部分をスライドするため、回転は発生しない。しかし、干渉による摩擦が発生しやすく、取り付けにフランジが必要であり小型化が難しい等の問題がある。

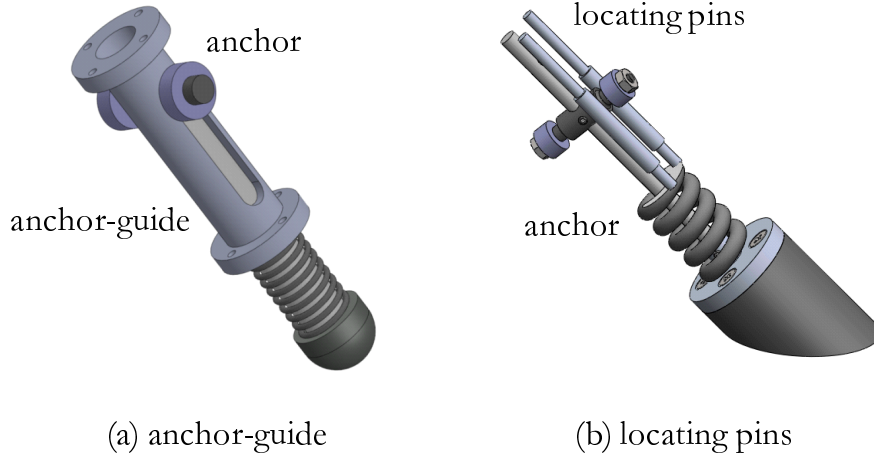


図 6.7: Anchor guide system

図 6.7(b) に、位置ピンを用いた”locationg pin”方式を示す．これは、2つの位置決めピンを用いて、脚の回転を防いでいる．これより、小型で取り付け容易なガイドが可能である．したがって、この機構では、”locationg pin”方式を採用した．

座標系

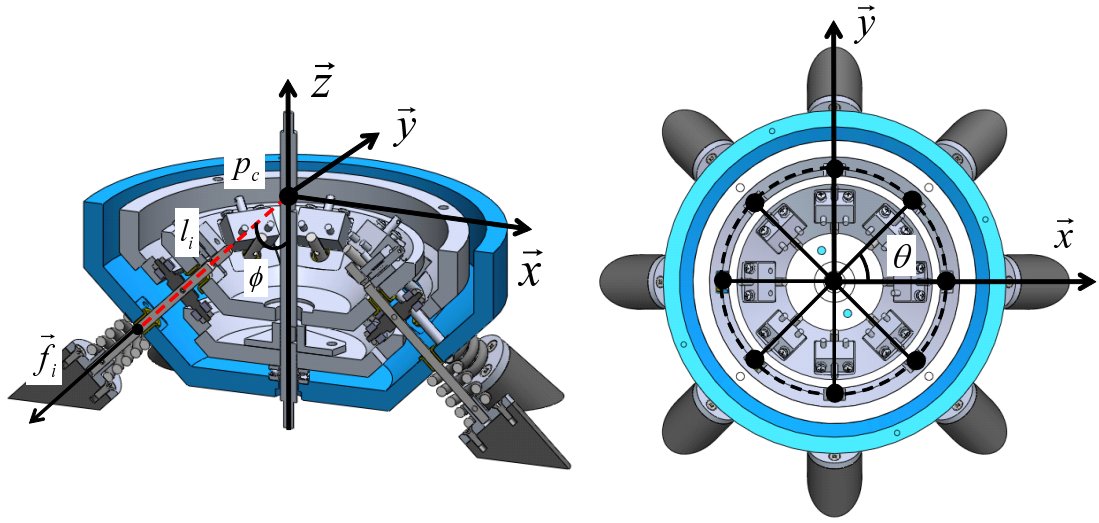
図 6.8 に、”triggering device”の座標系を示す．これは、第 3 章で紹介した先行研究のモデルと同様に座標系を設定した．図 6.8(a) に示す様に、重心を p_c とし、 i 番目のバネにより発生する力を $\vec{f}_i$ とする．また、重心 p_c から力 $\vec{f}_i$ までの距離を l_i とする．図 6.8(b) に上面図を示す．脚設置角度は、 θ で表す．この機構では、8 本の脚を $\theta=45$ 度で設置している．

これより、3 章で示した跳躍運動の式を利用可能である．式 (3.6) を用いて、最大跳躍距離や高さを導出可能である．

図 6.9 に、”triggering device”の x, z 平面座標系を示す．斜方投下において最も飛距離が出る角度は 45 度である．このため、脚と重心の角度を ϕ とし、45 度で設定している．また、バネにより発生する力 $\vec{f}_i$ により、2つのベアリングに力 $\vec{f}_{bn,i} (n=1,2)$ が作用する． n は、ベアリングの番号とする．この機構では同じベアリングを使用する．内側の Disk-2 と接触するベアリングを 1 番，外側の Disk3 と接触するベアリングを 2 番とする．脚には左右対称にベアリングが取り付けられているため、 $\vec{f}_{b1,i} = \vec{f}_{b2,i}$ となる．このとき、力が作用する Disk-2,3 とベアリングの接点を $p_{bn,i}$ とおく．2つの接触点を結んだ線と、脚と重心を結ぶ線の交差する点を、 $p_{b,i}$ とする． $p_{b,i}$ から $p_{bn,i}$ までの距離を l_{bn} とする．重心 p_c から、 $p_{b,i}$ までの距離を $l_{b,i}$ とする．

両方のベアリングに作用する力 $\vec{f}_{bn,f}$ を、式 (6.1) に示す．

$$\vec{f}_{bn,i} = \vec{f}_i / 2 \quad (6.1)$$



(a) bird's-eye view

(b) top view

图 6.8: Coordinates of the triggering device

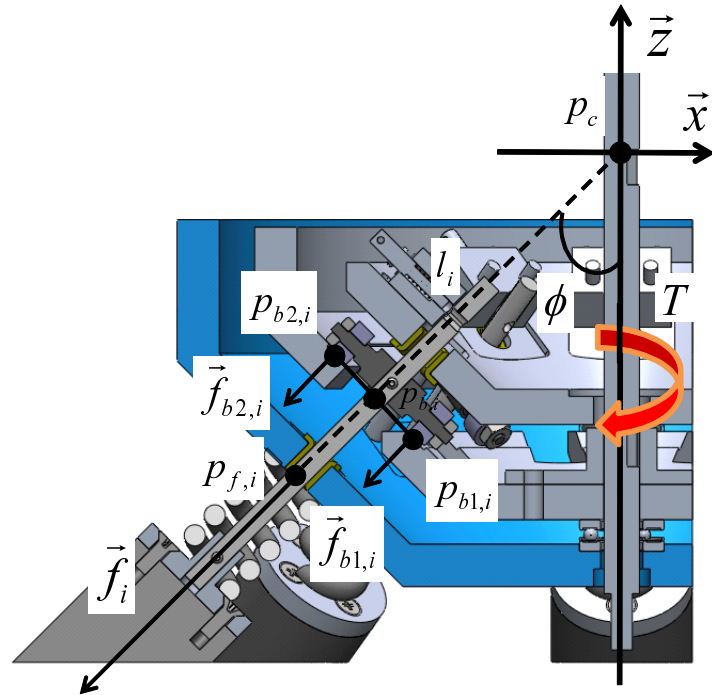


图 6.9: Zoom view of the triggering device

それぞれのベアリングと Disk が接触する点 $p_{bn,i}$ を, 式 (6.2),(6.3) に示す.

$$\begin{cases} p_{b1,i,x} = p_{b,i,x} - l_{b1} \cos\phi \cos\theta \\ p_{b1,i,y} = p_{b,i,y} + l_{b1} \sin\theta \\ p_{b1,i,z} = p_{b,i,z} - l_{b1} \sin\phi \end{cases} \quad (6.2)$$

$$\begin{cases} p_{b2,i,x} = p_{b,i,x} + l_{b2} \cos\phi \cos\theta \\ p_{b2,i,y} = p_{b,i,y} + l_{b2} \sin\theta \\ p_{b2,i,z} = p_{b,i,z} + l_{b2} \sin\phi \end{cases} \quad (6.3)$$

このとき, $p_{b,i}$ を, 式 (6.4) に示す.

$$\begin{cases} p_{b,i,x} = l_{b,i} \sin\phi \cos\theta \\ p_{b,i,y} = l_{b,i} \sin\phi \sin\theta \\ p_{b,i,z} = l_{b,i} \cos\phi \end{cases} \quad (6.4)$$

Disk とベアリング間の摩擦力 $N_{bn,i}^{\rightarrow}$ を, 式 (6.5) に示す.

$$\begin{cases} N_{fb1,i}^{\rightarrow} = \mu_1 \frac{f_{b1,i}}{a_1} \\ N_{fb2,i}^{\rightarrow} = \mu_2 \frac{f_{b2,i}}{a_2} \end{cases} \quad (6.5)$$

このとき, μ_j は転がり摩擦係数, a_j は回転体の半径である. ($j=1,2$) 垂直抗力にバネによる力 $f_{bn,i}^{\rightarrow}$ を代入している.

式 (6.6) に, Disk-2,3 が回転する中心軸の必要トルク T を示す.

$$T = \sum_{i=1}^8 (N_{fb1,i}^{\rightarrow} p_{b1,i,x} + N_{fb2,i}^{\rightarrow} l_{b2,i,x}) \quad (6.6)$$

6.2.2 脚解放選択機構

全ての脚を同時に解放することで, 鉛直方向に跳躍することは, 前章で確認した. 本章で提案するモデルは, 方向と距離の制御の実現が目的である. このため, 任意の脚を解放する機構は, 重要な機構である. 図 6.10 に示す様に, 任意の脚を選択して固定する機構の候補を 3 つ示す.

図 6.10(a) は, スライド式の脚解放機構である. これは, 脚を固定するための部品 (stopper) を, スライドすることで任意の脚を固定する方式である. stopper と Disk-2 にそれぞれ取り付けられた guide-pin を使用して, スライド動作を実現させる. この方式では, 脚を斜めに設置した場合, スライドも斜めに取り付ける必要がある. これより, Disk-2 の小型化が難しい. また, スライド式では摩擦が多く発生することが考えられるため, 望ましくない.

図 6.10(b) は, ヒンジ式の脚解放機構である. これは, Disk-2 に取り付けられた stopper をヒンジ部品により, 回転動作を実現させた方式である. 直動アクチュエータを用いて支持

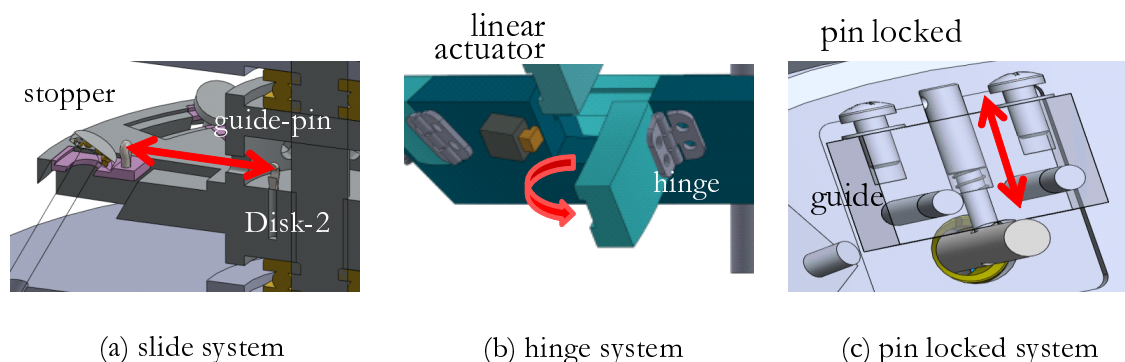


図 6.10: Type of the anchor locking part

することにより、任意の脚解放を実現できる。しかし、stopper の回転動作により、Disk-4 等他の部品との干渉が起こるため、小型化には難しい。

図 6.10(c) は、ピン式の脚解放機構である。これは、anchor 部品に空けた穴にピンを押し込むことで任意の脚解放を実現できる。圧縮バネを用いることで、連続使用が可能となる。この方式では、anchor に空けられる穴は小さいため、ピンに荷重が多くかかる。このため、耐荷重性が下がる問題がある。

3つの脚解放選択機構を検討したが、この機構では、小型で、駆動しやすいピン方式を採用した。ピンにかかる荷重が大きいため、ピンの材質をステンレスなど、硬い材料で試作を行う。

6.2.3 Disk 回転駆動機構

脚同時解放には、Disk-2,3 の回転駆動が必要なことを前述した。前章で提案した機構ではモータを使用して回転駆動を実現したが、省エネルギー化を考慮すると望ましくない。そこで、本章では、ねじりバネとバイオメタルを使用した回転駆動機構を実現する。

提案する回転駆動機構を図 6.11 に示す。この機構は、3枚の円盤ボディ(Disk-5,6,7)と、4本のピン(pin locked-2)とねじりバネから構成されており、上述したピン方式の解放機構を用いている。この機構は、"triggering device"と組み合わせられる。Disk-3 と Disk-7 を固定することで、回転駆動を Disk-2,3 に伝えている。また、Disk5 は筐体の Disk-4 と固定される。

図 6.12 に、動作原理を示す。Disk-5 が筐体に固定されており、Disk-7 が回転駆動する機構である。Disk-6 には、4本のピンが取り付けられており、鉛直方向に駆動可能である。Disk-7 には、穴が4つ空いている。初期段階で、Disk-7 が回転することで、ねじりバネに力が蓄えられる。Disk-7 が回転すると、Disk-6 に搭載した4本のピンが Disk-7 の穴に入る仕掛けになっている。ピンが Disk-7 の穴に差し込んだ図 6.12 の状態を初期状態とする。この状態で、ねじりバネにエネルギーが蓄積された状態を保持できる。差し込んだピンを抜く

ことで、Disk-7を回転駆動できる。このとき、ピンを抜く動作をバイオメタルで実現する。Disk-6には、ドライブッシュ(ミスミ)を取り付けており、ピンを抜く抵抗を減らしている。

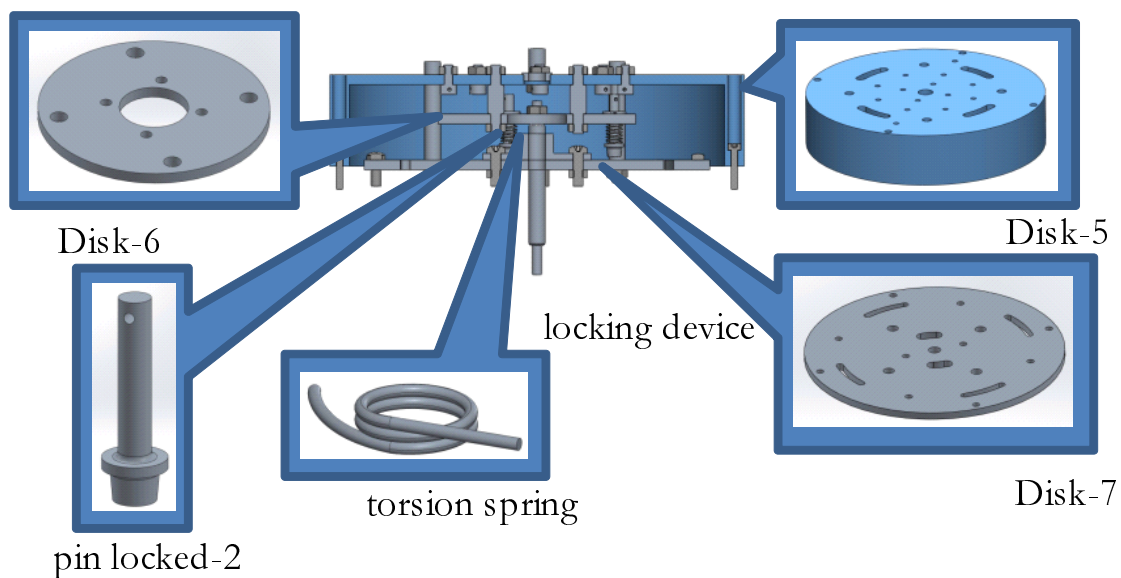


図 6.11: Detail of the locking device

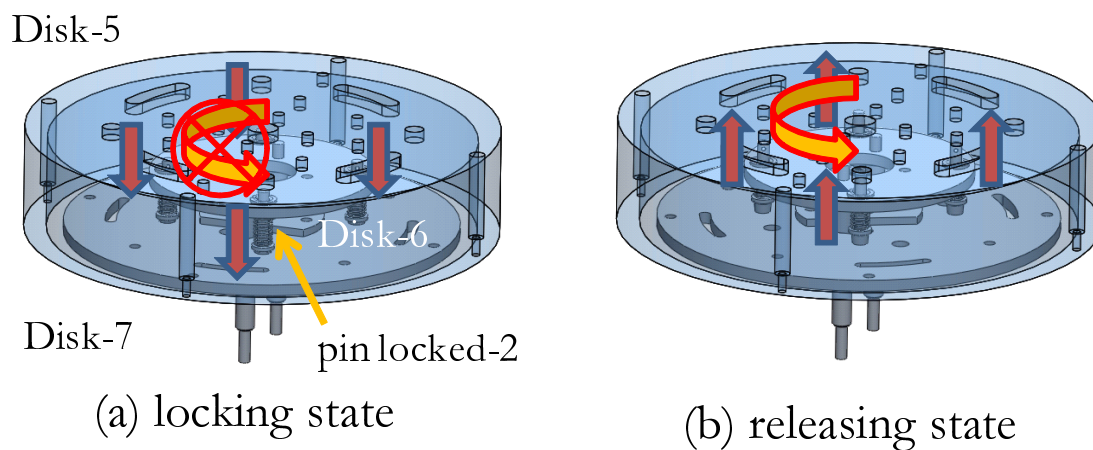


図 6.12: Motion of the locking device

6.3 解析

設計した跳躍機構をもとに機構解析ソフト RecurDyn[30] を用いて解析を行った。それぞれ提案した機構に対して、解析を行った。

6.3.1 脚同時解放機構

この機構は、中心軸を回転するためトルクが必要である。8本のバネを圧縮した状態で Disk-2,3 により保持する。中心軸に徐々にトルクを与えて、Disk-2,3 が回転する瞬間のトルクを解析する。回転対象の Disk-2 に接触するボディは、Disk-4 と anchor のベアリングが考えられる。Disk-3 では、Disk-1 と anchor のベアリングが接触する。Disk-2 と Disk-4, Disk-3 と Disk-1 の間には、スラストベアリング (オリジン電気) を取り付けており、転がり摩擦により必要トルクを抑えている。anchor のベアリングとの接触も転がり摩擦となる。シミュレーション条件を表 6.1 に示す。図 6.13 に解析の様子を、図 6.14 に解析の結果を示す。図 6.14 を見ると、回転トルクが約 $180\text{N} \cdot \text{mm}$ の時点で Disk-2,3 の回転が実現している。一つのバネが発生する力は 236N であり、8本で 1888N である。この力を解放する必要トルクを $180\text{N} \cdot \text{mm}$ に抑えることができた。これより、低トルク駆動が実現可能であることを検証した。前章のモデルでは、脚軸中心から荷重作用点が片側しかなく、モーメントが発生し、脚と他の部品の干渉による摩擦力の増加が見られた。このモデルでは、脚をベアリングによる2点支持にしたことで、モーメント発生を防いだと考えられる。

表 6.1: 脚同時解放機構のシミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of mechanism	$120 \times 120 \times 65$	mm^3
weight	602	g
weight of one spring	1.25	g
width of spring	18.716	mm
natural length	30	mm
compressed length	13.7	mm
maximum load	194.65	N
spring constant	17.25	N/mm
coefficient of friction	0.003	-

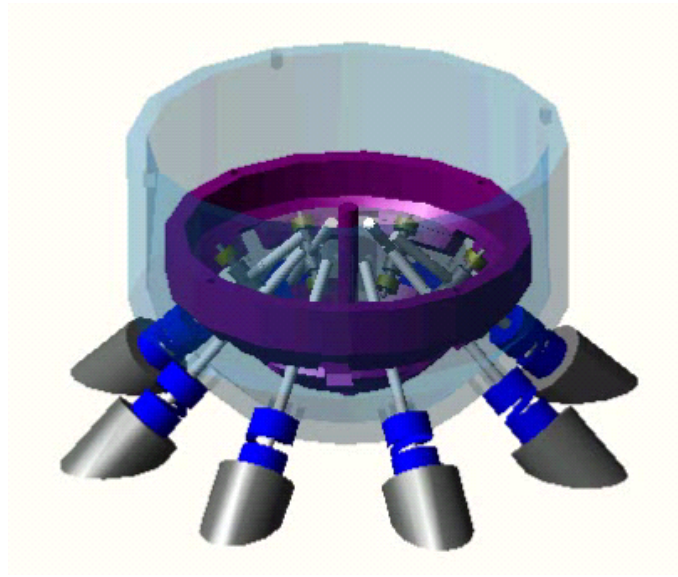


图 6.13: Snapshot of triggering device analysis

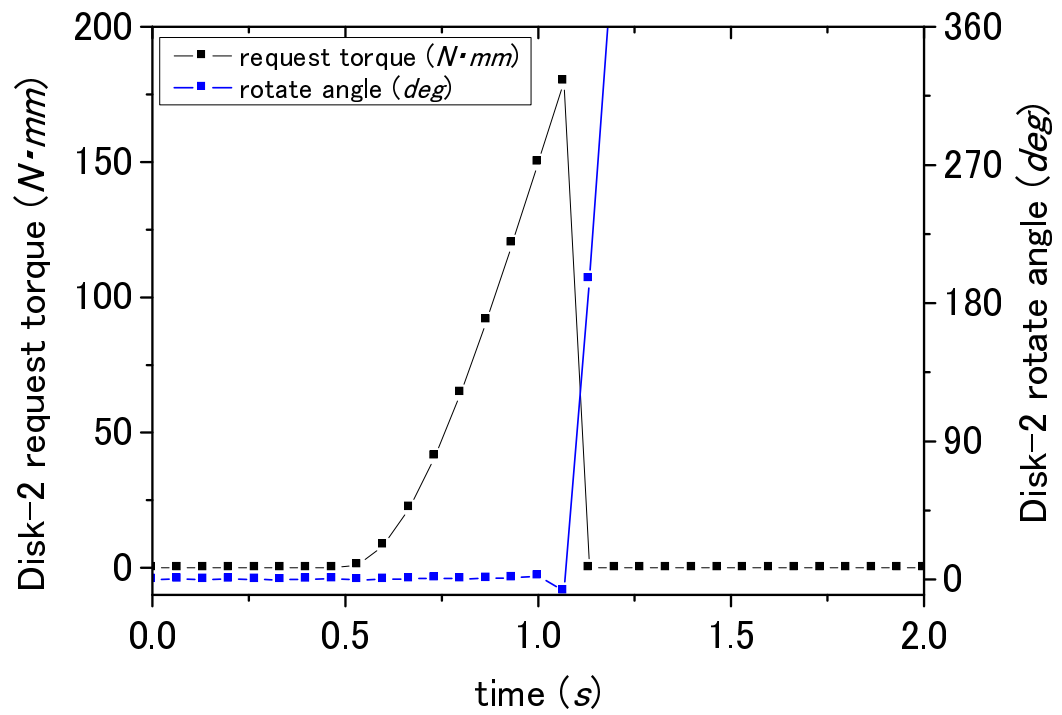


图 6.14: Request torque of triggering device

6.3.2 脚選択解放機構

この機構は、任意の脚を解放するためにピンを押し込んで脚を固定する機構である。ピンを押し込んでから中心軸を回転することで、ピンにどれだけの力が発生するかを解析する。一本の脚に関して解析を行った。図 6.15 に解析の様子を示す。図 6.15 に示す様に、一つの脚を圧縮した状態で Disk-2,3 に固定した状態を初期状態とする。最初に” anchor lock part”のピンを押し込む。これより、脚をロックした状態になる。この状態で、中心軸にトルクを与えて Disk-2,3 を回転させる。Disk-2,3 の切欠きに脚が来たときに、ピンに発生する力の変化を解析した。表 6.2 に、シミュレーション条件を示す。spring1 は、脚のバネで、spring2 は、” anchor lock part”に使用したバネである。図 6.16 に、ピンに発生する力と、Disk-2,3 が回転する角度を示す。図 6.16 を見ると、Disk-2,3 が回転した瞬間に、ピンに $245N$ の衝撃力が発生している。衝撃力が発生してから $0.5sec$ 後に、蓄えられたバネの力 $194N$ に収束しているのがわかる。これより、ピンに大きな衝撃力が発生することが予想されるため、ピンの試作材料はステンレスなど硬度が高いものを選択する。

表 6.2: 脚選択解放機構のシミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of mechanism	$120 \times 120 \times 65$	mm^3
weight	585	g
weight of one spring1	1.25	g
width of spring1	16.3	mm
natural length	30	mm
compressed length	13.7	mm
maximum load	236.325	N
spring constant	17.25	N/mm
weight of one spring2	0.5	g
width of spring2	3	mm
natural length	5	mm
compressed length	2	mm
maximum load	0.562	N
spring constant	0.281	N/mm
coefficient of friction	0.003	-

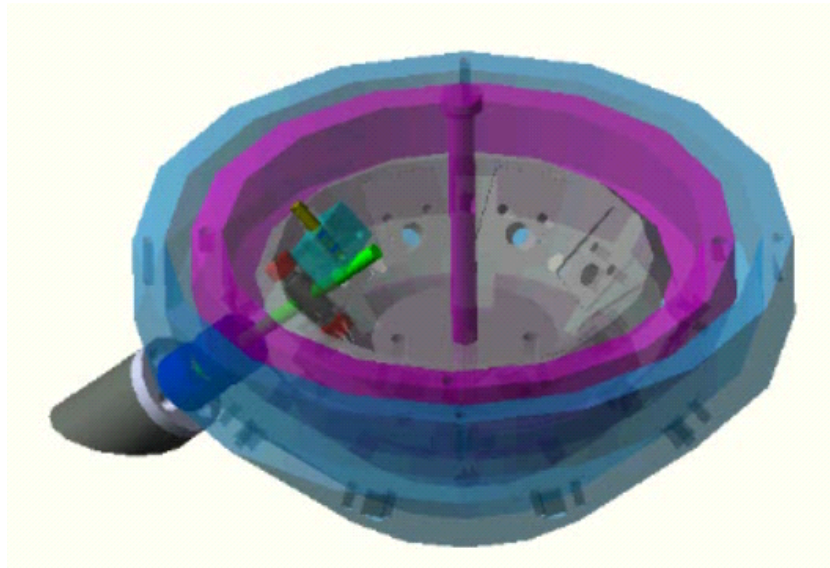


图 6.15: Snapshot of anchor lock part analysis

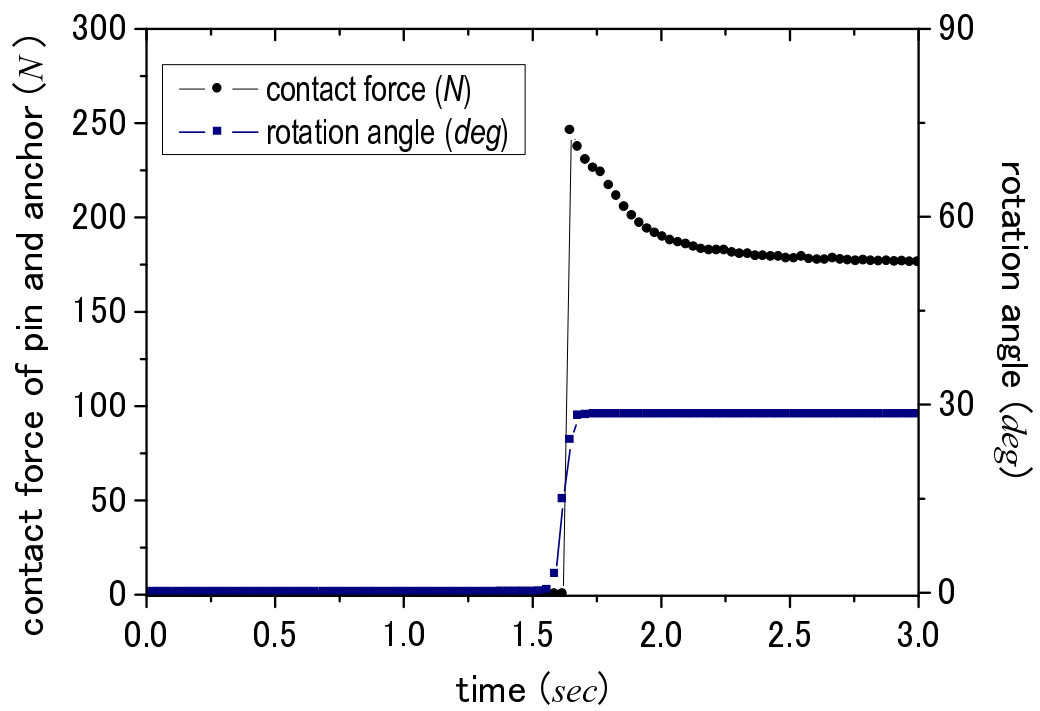


图 6.16: Contact force of lock pin

6.3.3 Disk 回転駆動機構

この機構は、Disk-7の回転を4つのピンで駆動する機構である。4つのピンをDisk-7に差し込んだ状態を、初期状態として図6.17に示す。4つのピンには、圧縮バネがそれぞれ搭載している。Disk-7に $200N \cdot mm$ のトルクを与えて、ピンに負荷を与える。このとき、ピンにはバネによる力とDisk-7との接触力が働く。これらの力に対して、ピンを抜くための力を解析する。表6.3に、シミュレーション条件を示す。図6.18に、Disk-7に与えるトルクと回転角度を示す。図6.18を見ると、 $200N \cdot mm$ のトルクが作用するのは $0.7sec$ 、回転が生じるのが $2.4sec$ であるのがわかる。図6.19に、4つのピンに発生する力を示す。図6.19を見ると、トルクが発生する $0.7sec$ 付近で最初のピークを迎えており、約 $2.5N$ が最大である。さらに、回転が生じる $2.4sec$ 後は、ピンを抜き終わったので、ピンにかかる力は $0N$ になる。 $2.4sec$ の少し前で、それぞれのピンにかかる力にばらつきが生じている。これは、先に抜けたピンが存在するため(lock pin2)、他のピンに負荷が集中しているためと考えられる。これより、1本のピンに負担がかかることも想定されるため、ピンの材質はステンレスで試作することが必要である。図6.20に、4つのピンを駆動させる力を示す。これは、ピンを抜くために、徐々にピンに力を与えていることを示す。ピンが抜けた $2.4sec$ 付近の値は、 $1.7N$ 程度である。これより、小さい力でピンを抜くことが出来ることを検証した。

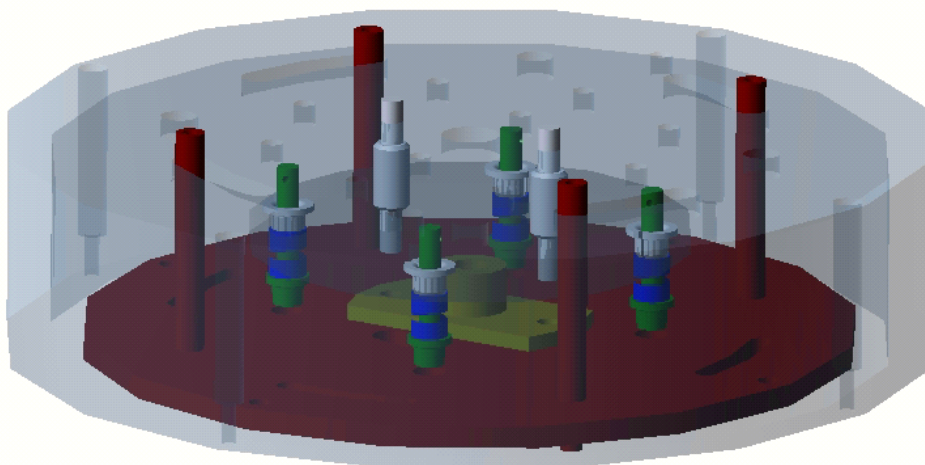


図 6.17: Snapshot of locking device analysis

表 6.3: Disk 回転駆動機構のシミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of mechanism	$120 \times 120 \times 25$	mm^3
weight	367	g
weight of one spring1	0.8	g
width of spring1	9.4	mm
natural length	10	mm
compressed length	4	mm
maximum load	1.68	N
spring constant	0.56	N/mm
coefficient of friction	0.003	-

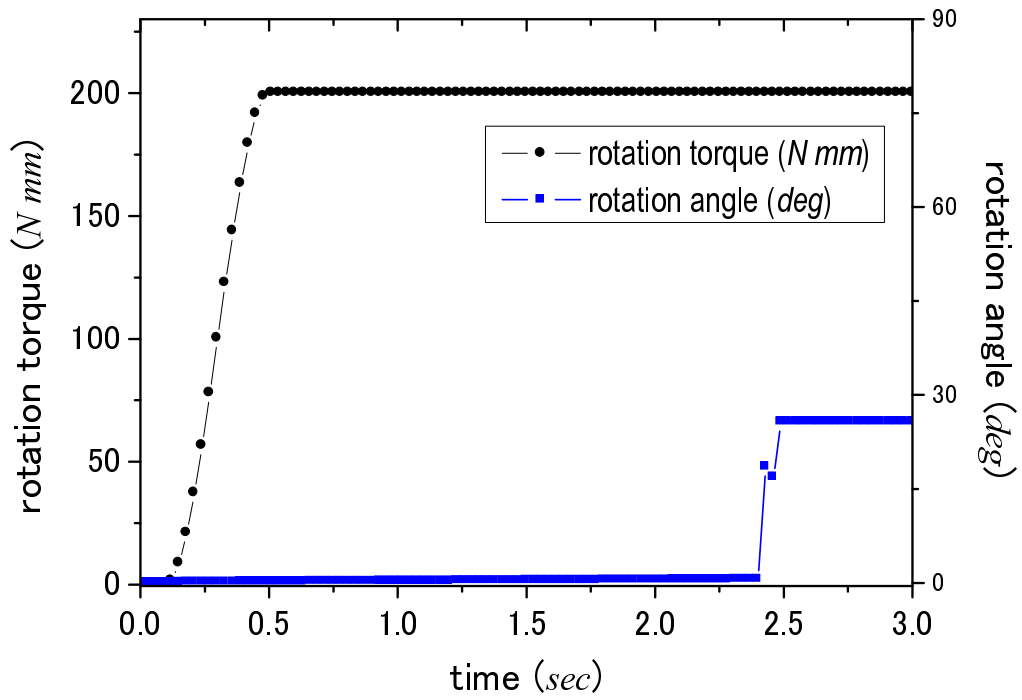


図 6.18: Disk rotate torque and rotate angle

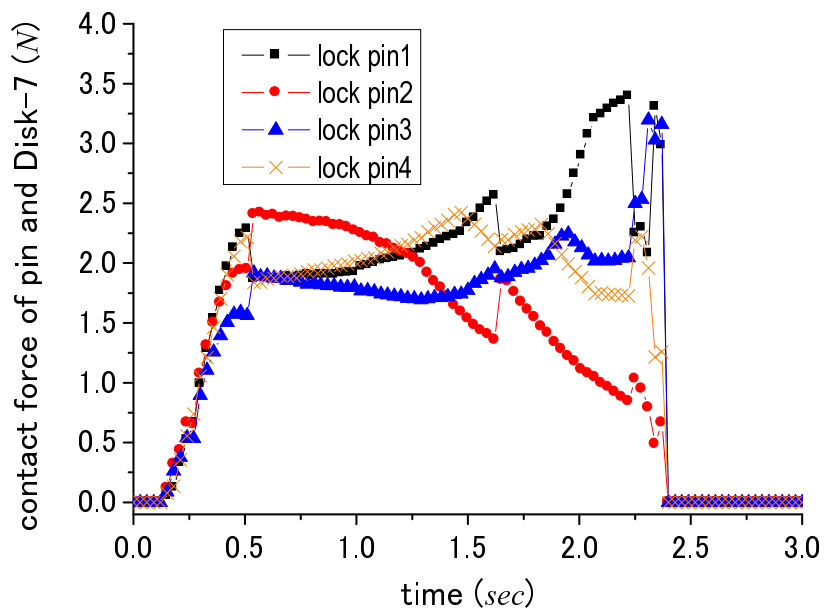


图 6.19: Contact force of four pins

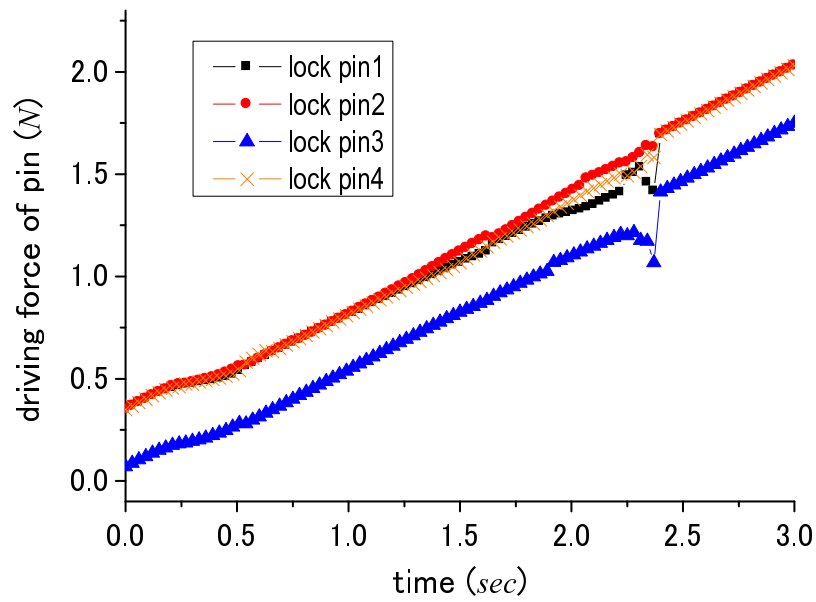


图 6.20: Driving force of four pins

6.3.4 鉛直方向跳躍

提案した機構に対して、跳躍解析を行った。図 6.21 に鉛直方向に跳躍する解析の様子を示す。8 本のバネを同時に解放することで、垂直方向の力が相殺され、鉛直方向の力のみが機構に生じる。これより、最大の跳躍高さを有する跳躍が可能になる。表 6.4 にシミュレーション条件を示す。重心を調整するために、跳躍機構上部に cover を取り付けている。地面は平坦なコンクリートを想定し、摩擦係数は 0.6 とする。図 6.22 に、跳躍高さの結果を示す。図 6.22 より、最大跳躍高さ $1.61m$ を実現した。跳躍高さは、重量と、バネによる力に左右されるため、高さが重要ではなく、跳躍できるかどうか重要である。図 6.23 に、Disk を回転可能なトルクと回転角度を示す。図 6.23 より、Disk-2 に作用するトルクが、 $200N \cdot mm$ の辺りで Disk-2 が回転していることがわかる。これより、低トルクでの駆動が実現できているといえる。図 6.24 に、バネに蓄えられた力を示す。図 6.24 より、全てのバネが同時解放できていることがわかる。以上の結果より、提案した機構が全ての脚解放を同時に行い、低トルクで解放駆動を実現できていることがわかる。

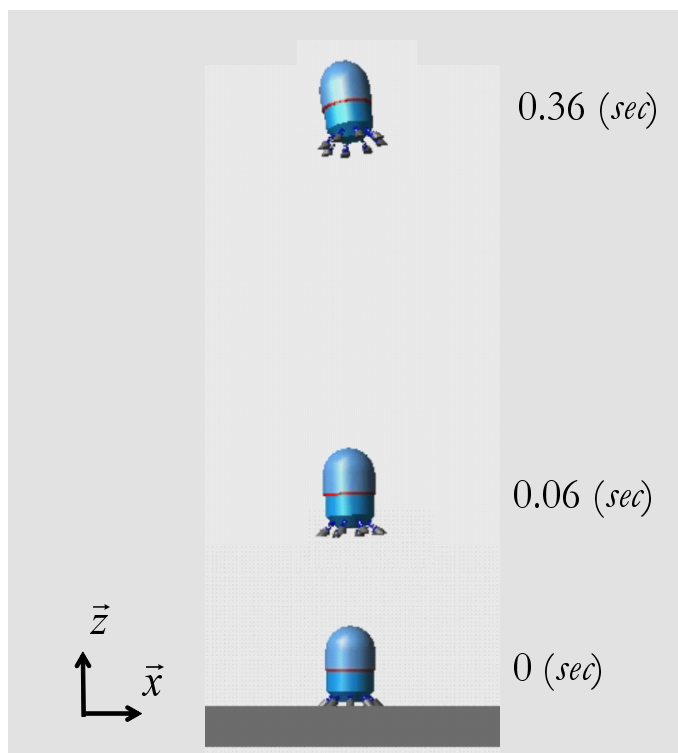


図 6.21: Snapshot of vertical jumping analysis

表 6.4: 鉛直方向跳躍のシミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of mechanism	$120 \times 120 \times 200$	mm^3
weight	683	g
weight of one spring1	1.8	g
width of spring1	16.3	mm
natural length	30	mm
compressed length	13.7	mm
maximum load	376.8	N
spring constant	27.5	N/mm
coefficient of friction	0.003	-

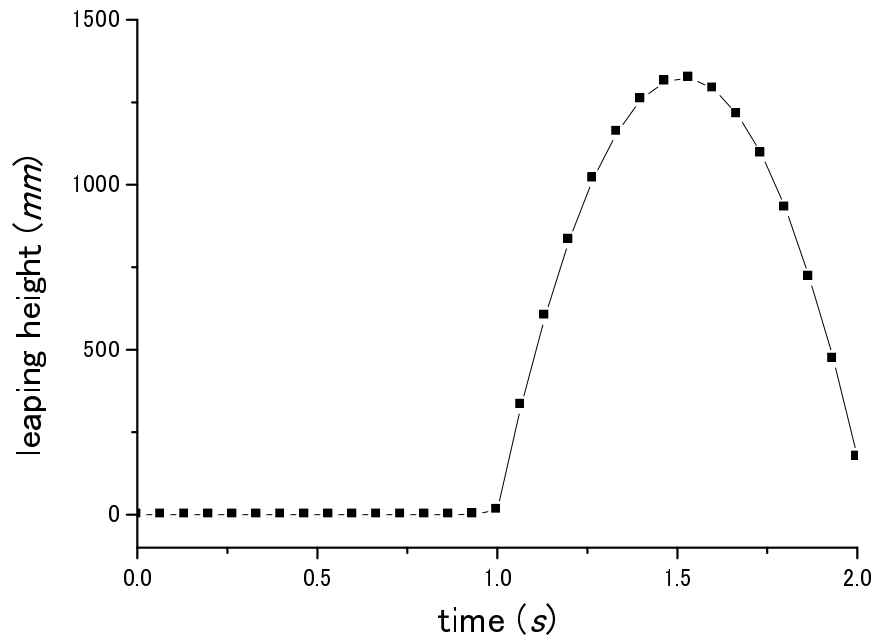


図 6.22: Leaping height of the prototype ver.2

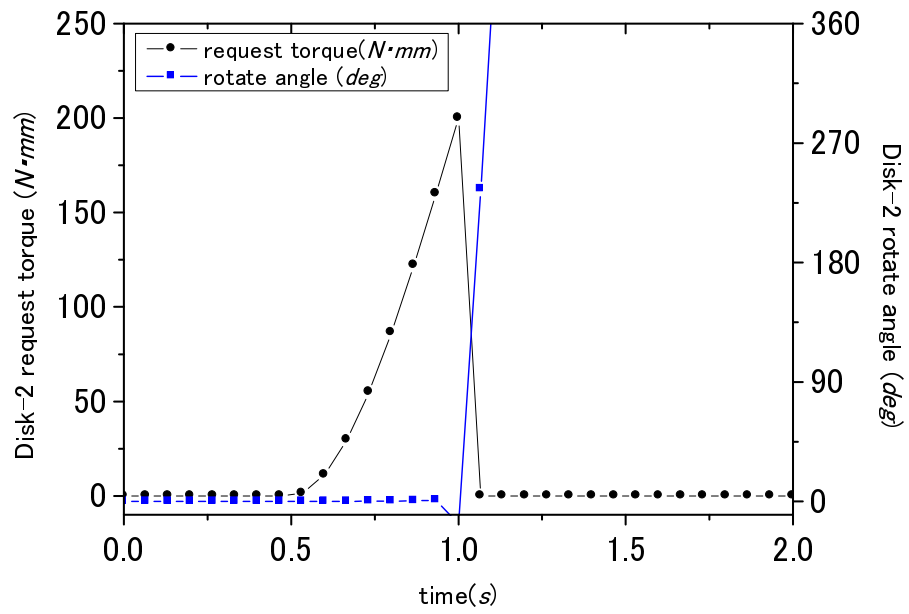


图 6.23: Request torque for vertical jumping

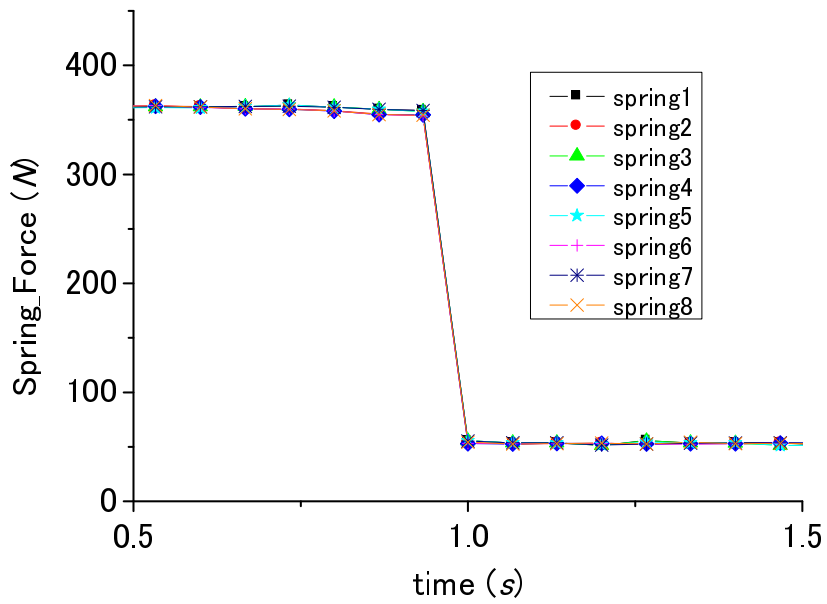


图 6.24: Spring force of the prototype ver.2

6.3.5 方向と距離を制御した跳躍

この機構では、脚を選択して解放することができる。このため、任意の脚を解放して方向と距離を制御した跳躍について解析を行った。図 6.25 に $\vec{x}$ 方向への跳躍を実現した解析の様子を示す。このように、方向を制御した跳躍が実現できている。表 6.5 に、シミュレーション条件を示す。鉛直跳躍と同様に、重心調整のため cover を取り付けている。地面は、平坦なコンクリートを想定し、摩擦係数は 0.6 とする。まず、3 本の脚を固定し、5 本解放で $\vec{x}$ 方向への移動を解析する。図 6.26 に、 xy 平面の跳躍移動結果を示す。図 6.26 を見ると、 $\vec{x}$ 方向に移動できていることがわかる。このとき、最大跳躍距離は 400mm で、最大跳躍高さは、 600mm 程度である。次に、図 6.27 に示す様に、3 種類の解放パターンを用意して比較を行った。先程の結果は、脚 5 本解放 1 で示されており、同じ $\vec{x}$ 方向へ 5 本固定で 3 本解放した場合と、脚 5 本解放して $\vec{z}$ 方向へ跳躍する場合を解析した。図 6.27 を見ると、方向と距離の制御が実現していることがわかる。しかし、脚 5 本解放 2 と 1 の違いがあるなど、精度の面で安定性が保証されていない。これは、機構内部で回転エネルギーを発生させているためと考えられる。対策として、設計の最適化を行うことで、パラメータを調整して精度の誤差を少なくすることが考えられる。以上の結果より、提案した機構が方向と距離の制御を実現した跳躍に有効であることを検証した。

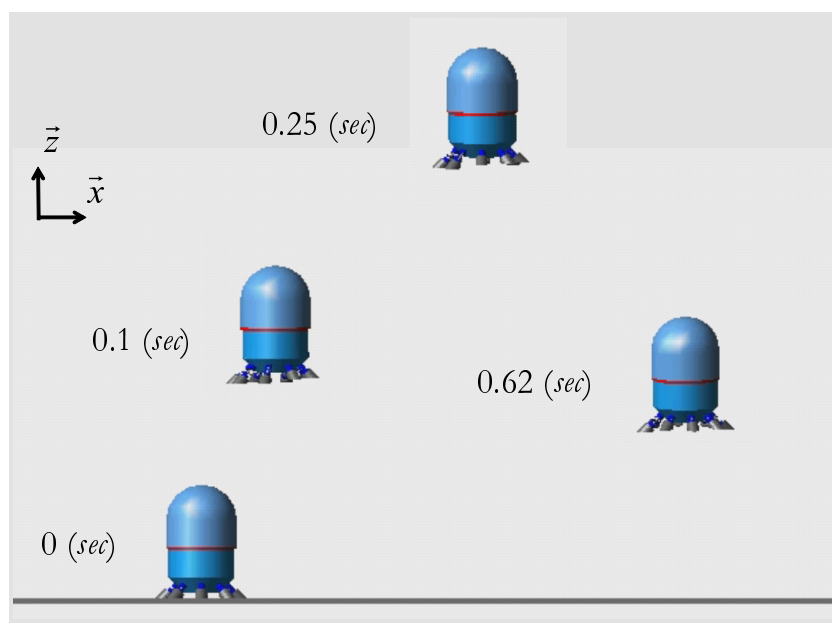


図 6.25: Snapshot of direction control jumping analysis

表 6.5: 方向と距離を制御した跳躍のシミュレーション条件

parameters	value	unit
dimension of mechanism	$120 \times 120 \times 200$	mm^3
weight	1154	g
weight of one spring1	1.8	g
width of spring1	16.3	mm
natural length	30	mm
compressed length	13.7	mm
maximum load	411	N
spring constant	30	N/mm
coefficient of friction	0.003	-

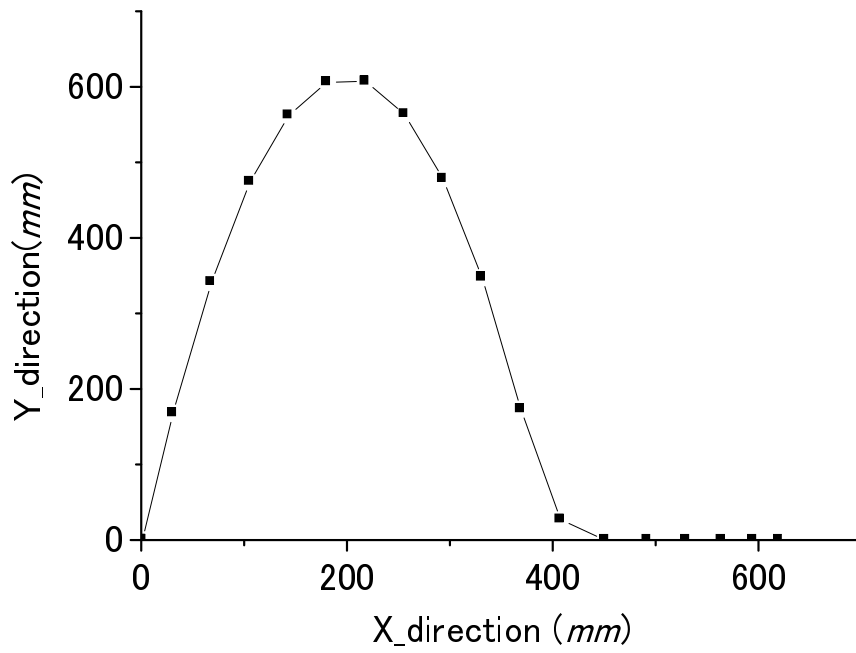


図 6.26: Direction and height of control jumping

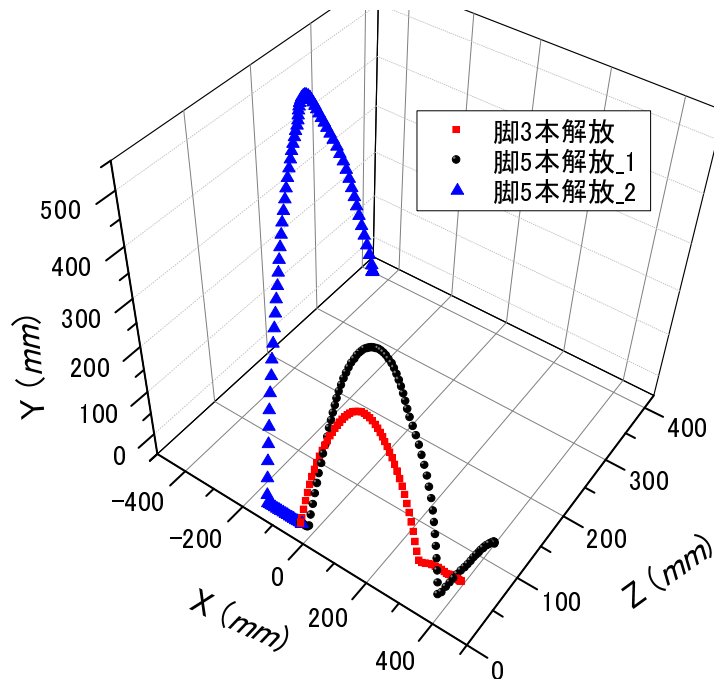


図 6.27: Leaping direction and distance control

6.4 駆動ユニット

これまで、機構の動作について提案してきたが、これらの機構を駆動する方法について述べる。この機構の駆動部分は、2つある。一つは、“anchor lock part”のピンを差し込む動作である。二つ目は、“locking device”のピンを抜く動作である。これらに、共通して必要な駆動力は、ピンを直動に駆動させる力である。本研究で目指すアクチュエータは、“SMA アクチュエータとバネ”である。この直動駆動力を、“SMA アクチュエータ”(バイオメタル)を使用して実現する。ここでは、“locking device”のピンを抜く方式について説明する。

図 6.28 に、“locking device”でのピン駆動方法を示す。“locking device”は、Disk-7 の回転を 4 本のピン (pin locked-2) を抜くことで動作する。このピンには、 $\phi 1\text{mm}$ の穴が空いており、バイオメタルを図 6.28(a) に示す様に取り付ける。バイオメタルに電流を流すと収縮するため、図 6.28(b) の様に、ピンを引っ張り抜くことが可能となる。この駆動方式の利点は、小型であることと、バイオメタルの長さを十分に利用可能なことである。“anchor lock part”では、力の方向が逆なため、設置を調整することで駆動させる。

図 6.29 に、制御システムを示す。センサノードは、コントローラ、無線モジュール、センサ、SMA アクチュエータ、試作機 v2 で構成される。基本動作は、センサにより得られた観測情報を無線モジュールを利用して、他のノードや外部要素に相互通信することで、センサネットワークを運用する。通信領域の拡大や、故障したセンサの交換など、目的

をもった移動が必要になった場合，試作機 v2 が活用される．コントローラからバイOMETALを駆動し，“locking device”と”anchor lock part”が動作することで，跳躍移動が実現する．

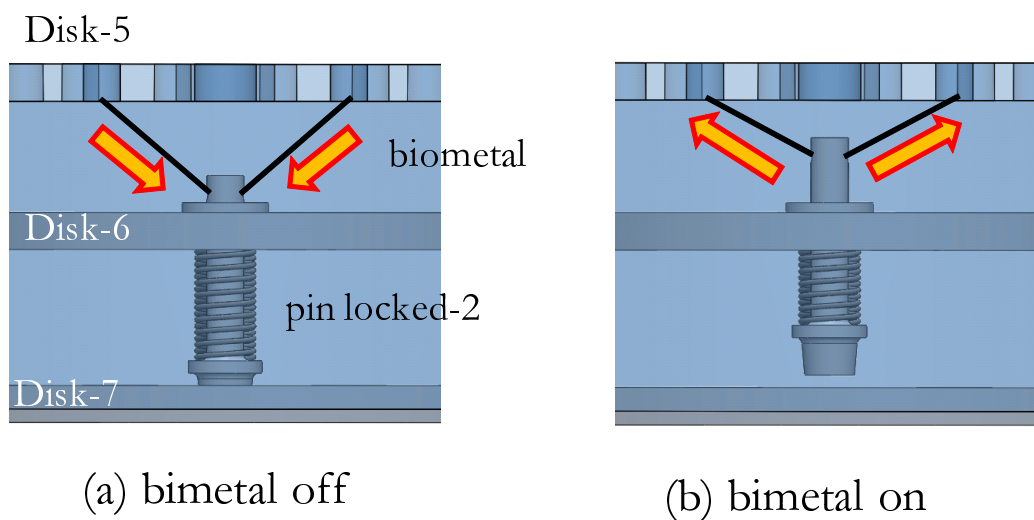


図 6.28: SMA actuator

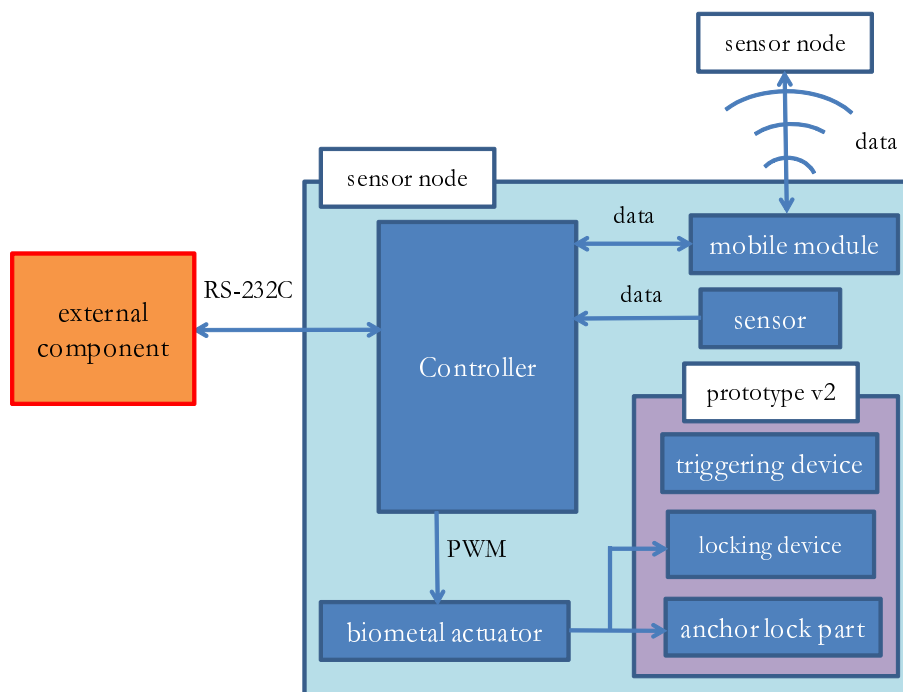


図 6.29: Control system

6.5 試作機

図 6.30 に，試作機 ver.2 を示す．これは，”triggering device” と ”locking device” と ”anchor lock part” から構成されている．全ての部品を，アルミ (Al2017) とステンレス (SUS304) で試作しており，総重量は 1.26kg になる．表 6.6 に，試作機の重量についてまとめた．

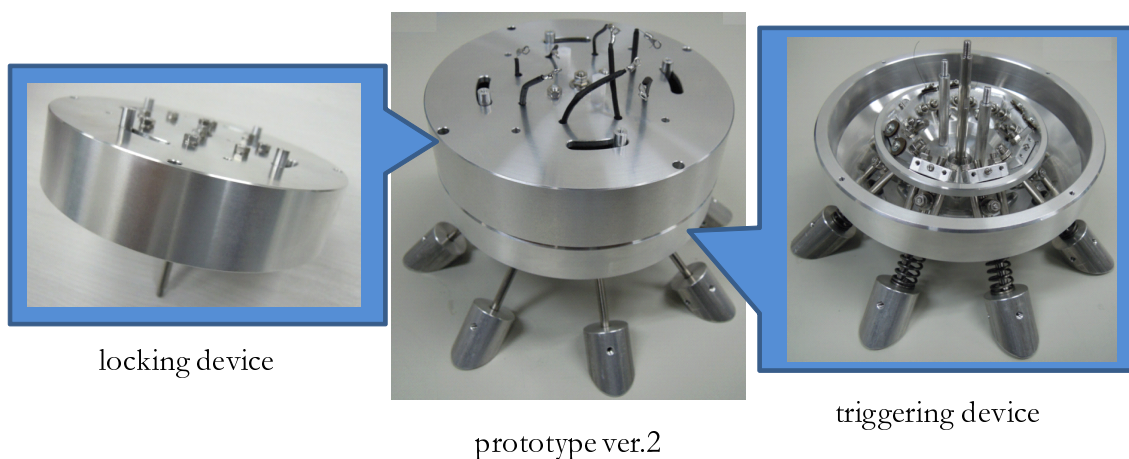


図 6.30: Prototype v2

表 6.6: 試作機 ver.2 の重量

unit	size(mm)	weight(g)	material
Disk-1	t3 ϕ 116	80	aluminium alloy
Disk-2	t3 ϕ 80	60	aluminium alloy
Disk-3	t3 ϕ 116	100	aluminium alloy
Disk-4	t3 ϕ 116	330	aluminium alloy
Disk-5	t3 ϕ 80	250	aluminium alloy
Disk-6	t3 ϕ 116	20	aluminium alloy
Disk-7	t3 ϕ 116	60	aluminium alloy
thrust slide bearing	t2 ϕ 35	36	steel
anchor	44(length) 29.5 ϕ 11.25	18	aluminium alloy
spring	(compressed: 16)	20	steel

6.5.1 脚同時解放機構

図 6.31 に, "triggering device" の試作機を示す. この試作機を用いて, 提案した機構の動作検証を行った. 図 6.32 に, 動作検証の様子を示す. 図 6.32(a) に, 8 本のバネを圧縮して Disk-2,3 にロックした状態を示す. この初期状態から, 中心軸に回転トルクを与えることで, 図 6.32(b) に示す様に, 全ての脚が解放出来ている. これより, "triggering device" の機構の動作の妥当性を示した.

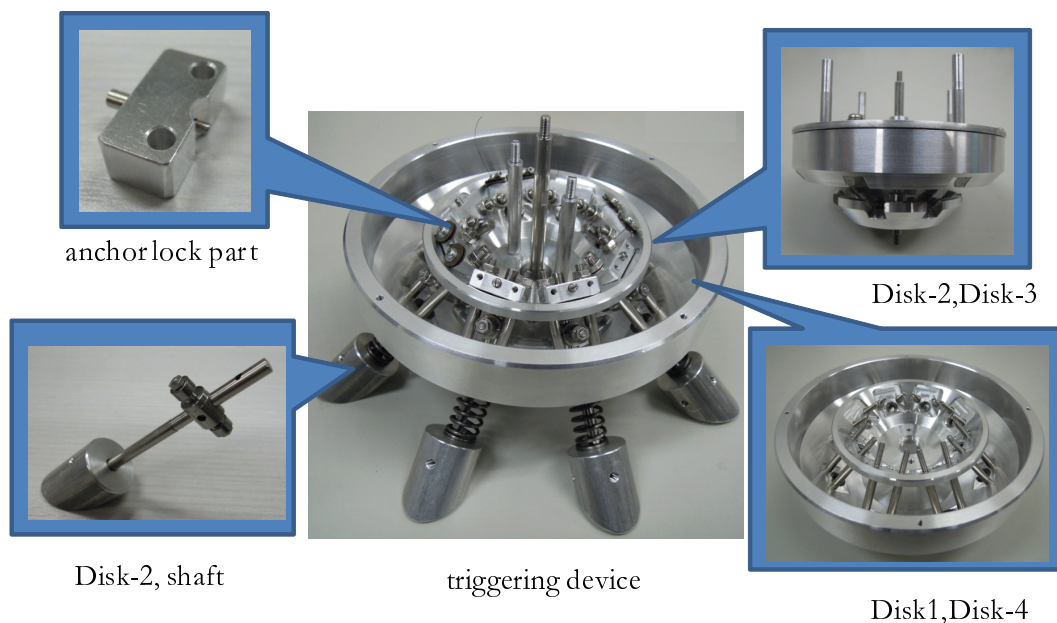


図 6.31: Prototype of the triggering device

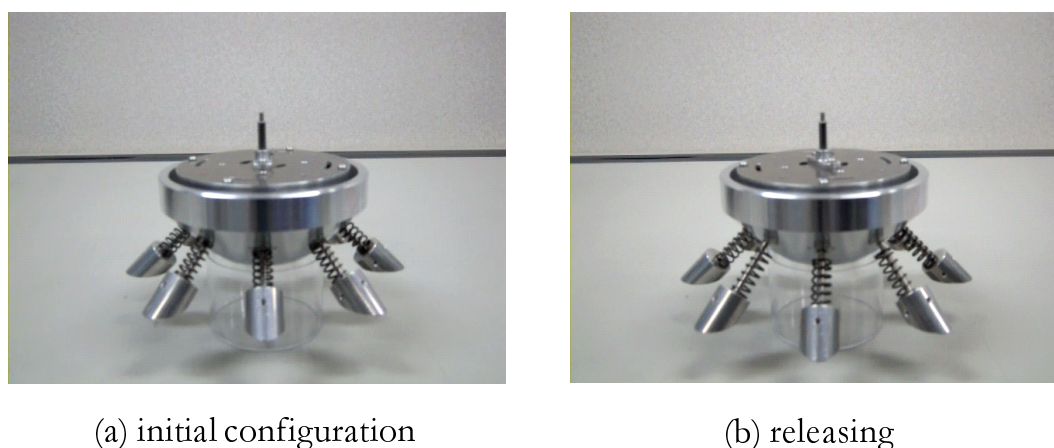


図 6.32: Verify operation of the triggering device

脚解放機構に対して、跳躍実験を行った。単一の機構の検証のため、Disk の回転駆動力のためにモータを使用した。このモータと遊星ギアボックスは、第5章で提案した試作機に用いたものと同じである。図 6.33 に跳躍実験の様子を示す。図 6.33(a) に、初期状態を示す。中心の Disk をモータの駆動力で回転し、跳躍を実現した。図 6.33(b) に、最大跳躍高さ時の様子を示す。これより、提案した機構が跳躍動作に有効であることを検証した。

しかし、跳躍高さが低いため、目標の跳躍性能は得られていない。この原因として、全体の重量が大きいことが考えられる。機構全体の質量が $1.26kg$ であり、モータを搭載すると、 $1.45kg$ となった。これは、全体の剛性を向上させるために、筐体をアルミで製作したからである。対策案としては、機構の軽量化が考えられる。図 6.34 に、重量の改善モデルを示す。図 6.34(a) に、現在のモデルを示す。図に示す様に、筐体を全てアルミで覆っている。図 6.34(b) に、重量を減らしたモデルを示す。これは、筐体部品である、Disk-4, Disk-5 を大幅に軽量化している。表 6.7 に、改善を行った場合の重量を示す。これより、全体の重量を $900g$ に抑えることが出来るため、跳躍高さの改善が可能であると考えられる。

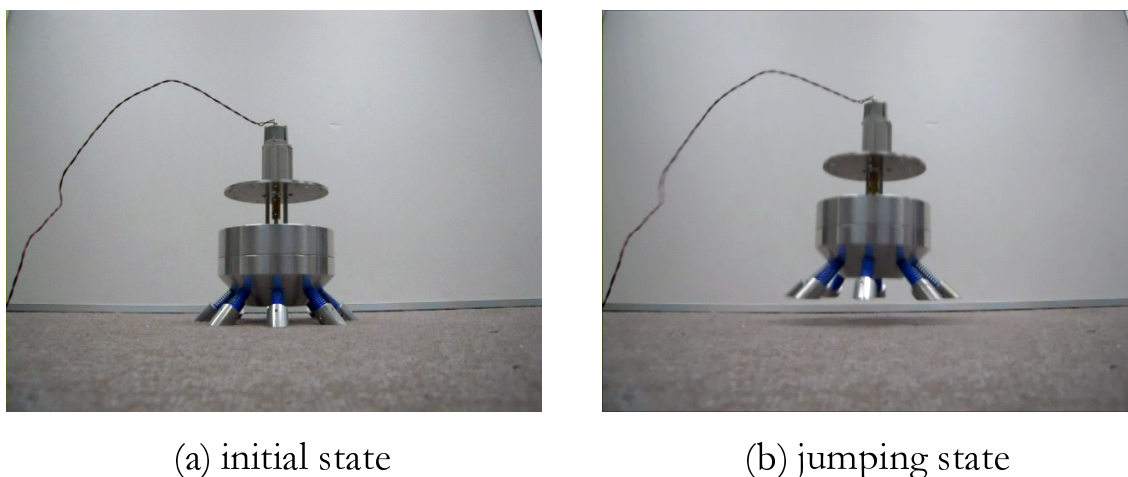


図 6.33: Snapshot of prototype jumping

表 6.7: 重量改善

unit	current weight(g)	saving weight(g)
Disk-4	330	250
Disk-5	250	90
anchor	18	10
total	1260	900

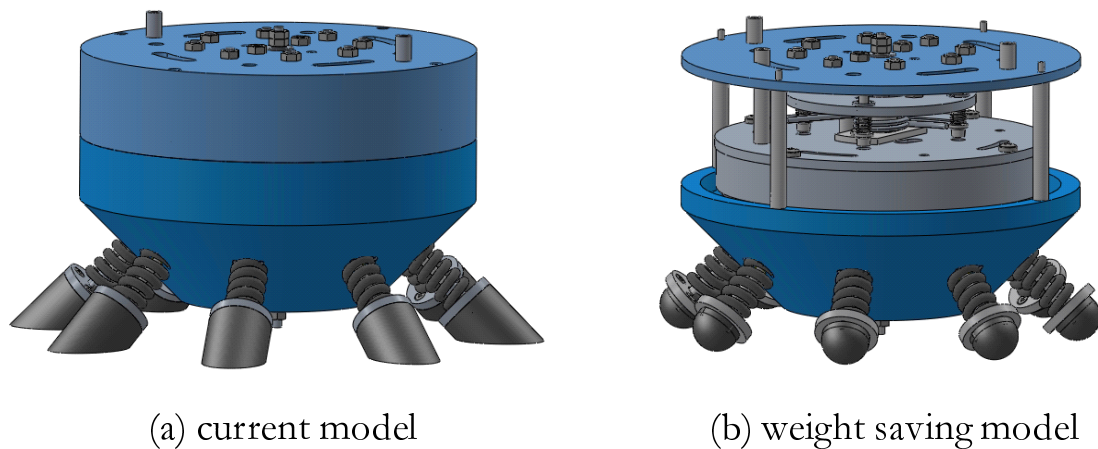
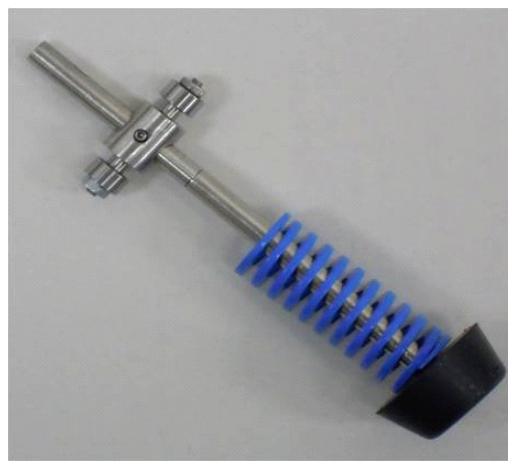


図 6.34: Weight saving of prototype

跳躍高さが低いことの原因の一つとして、脚が地面で滑っていることが考えられる。この対策として、図 6.35 に示すように、脚先部品の”ankle”を交換可能にした。図 6.35(a) に示すのは、アルミ製の脚先部品である。これは、地面と平坦な面で接触する。図 6.35(b) に示すのは、ゴム製の脚先部品である。これは、地面に対して滑りにくい特性を有しているため、跳躍高さの改善に有効であると考えられる。



(a) aluminum ankle



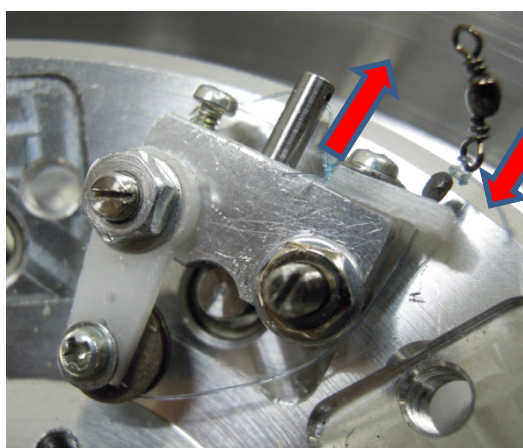
(b) rubber ankle

図 6.35: Type of ankle

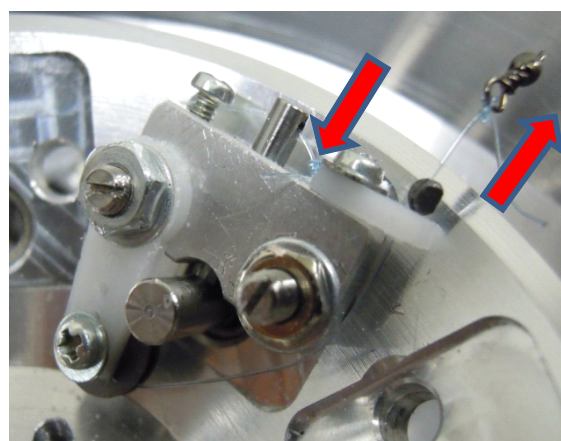
6.5.2 脚解放選択機構

図 6.36 に，”anchor lock part”の駆動実験の様子を示す．図 6.36(a) に示す様に，ピンを駆動させるためにラインを使用している．バイオメタルは，縮む力を発生させるアクチュエータである．このため，ピンを押し込むためには，力の方向を変換する必要がある．耐熱プーリを利用して，滑車の様に力の方向を変えている．図 6.36(b) に，ピンを押し込む様子を示す．図のように，ラインを引くことで，ピンを押し込む動作を実現していることがわかる．脚を引き上げた状態で，ピンを押し込むことで，脚の固定動作を実現した．

しかし，バイオメタルはニクロム線のような導線と同じような形状をしており，アルミの部品と接触すると通電して正常に動作しない．対応策として，図 6.35 に示す様に，バイオメタルをシリコンチューブに通すことで絶縁性を確保する．図 6.35(b) に，シリコンチューブを使用したバイオメタルを示す．シリコンチューブは，内径 $\phi 0.5$ ，外径 $\phi 1$ の小型の製品を使用している．これより，ラインとバイオメタルを交換し，駆動が行えると考ええる．

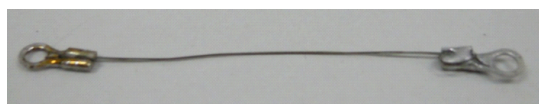


(a) unlocked pin

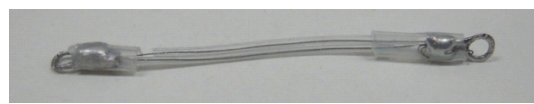


(b) locked pin

図 6.36: Verify operation of the anchor lock part



(a) uncovered biometal



(b) biometal with silicone rubber

図 6.37: Biometal in silicone rubber

6.5.3 Disk 回転駆動機構

図 6.38 に、Disk 回転駆動機構”locking device”の試作機を示す。この機構の駆動実験を行った。図 6.39 に駆動実験の様子を示す。図 6.39(a) に、初期状態を示す。これは、4つのピンがDisk-7に押し込まれた状態で、Disk-7の回転を抑制している。図 6.39(b) に、Disk-7の回転駆動が実現した様子を示す。バイオメタルに電流を流すことで、ピンが抜かれて、Disk-7の回転が実現している。これより、機構の駆動に関して、妥当性を検証することができた。

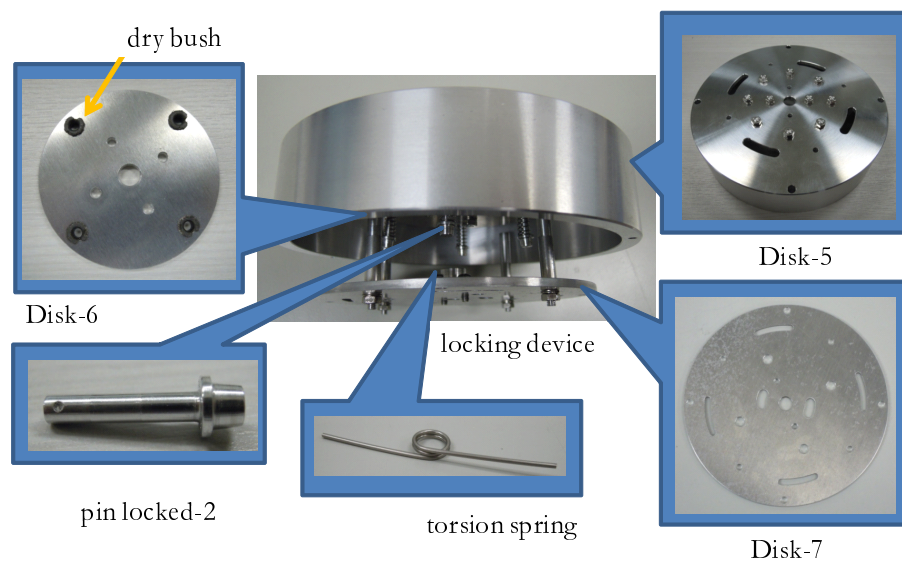


図 6.38: Prototype of the locking device

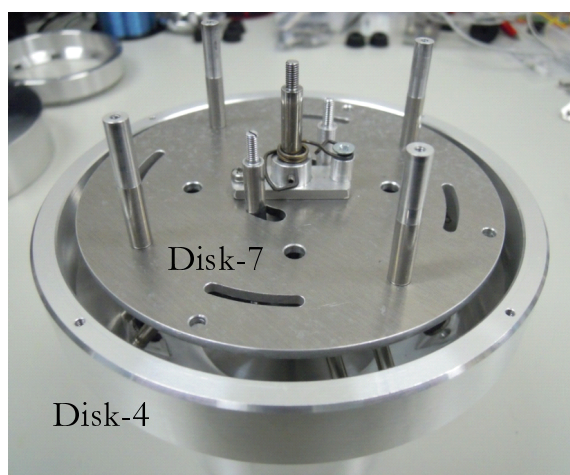


(a) locked pins

(b) unlocked pins

図 6.39: Verify operation of the locking device

しかし、ねじりバネによる駆動は実現できなかった。この原因として、図 6.40 に示す。図 6.40 に、Disk を回転駆動するねじりバネを搭載している状態を示す。図 6.40(b) に示す様に、ねじりバネを搭載し、回転駆動力を得ることを実現している。しかし、単一のねじりバネを使用することで、中心軸に偏荷重が発生してしまう。これより、中心軸をずらす力が加わり、部品の干渉が生じてしまう。この対策として、2つのねじりバネを搭載して、偏荷重の発生を防ぐことが考えられる。



(a) bird's-eye view



(b) zoom view

図 6.40: Zoom view of the locking device

第7章 まとめ

本研究では、センサノードに応用可能な、消費エネルギーを考慮した全方向移動用跳躍機構の提案を行った。消費エネルギーが重要視されるモバイルセンサネットワークにおいて、消費エネルギーを抑えた移動機構の開発は実現されていない。関連研究を見ても、バネとモータを使用した連続跳躍移動機構の研究が多くされており、実際に通信モジュールを搭載可能な機構モデルは提案されていない。そこで、本研究では、省エネルギー性が期待できるバネとSMAアクチュエータの組合せに着目し、跳躍移動機構の提案を行った。

先行研究で提案されたモデルは、一回跳躍を想定しており、目的位置に到達するために方向と距離の制御が実現できることが期待される。しかし、実機での検証はされていない。本研究では、方向と距離の制御を実現するために、新しい2つの機構モデルを提案した。一つ目の機構は、脚解放を同時に行う機構である。設計、解析、実機実験により、原理の検証を行った。これより、機構原理が脚の同時解放性を実現できることが確認できた。二つ目の機構は、任意の脚を同時解放できる機構である。一つ目の機構を応用し、設計、解析を行い、機構の妥当性を検証した。解析により、跳躍動作を実現できることが確認できた。以上の結果から、提案した機構は、方向と距離の制御に対して有効であるといえる。これより、他の関連研究とは違うアクチュエータ組合せの移動機構の有効性を示した。設計したモデルを基に、試作機の作製を行った。試作機の駆動実験により、個々の機構に関して動作を検証することができた。機構が複雑であるため、現在のモデルでは、センサノードでの運用は難しいと考えられる。しかし、複合型の跳躍移動機構への応用など他の機構への応用は十分に期待できる。

試作機が全体のシステムとして稼働するためには、いくつかの課題が存在する。試作機の課題を下記にまとめる。

- 重量による跳躍高さの低下
- バイオメタルの設置手法
- ねじりバネによる偏荷重の発生

これらの課題に対して、対応策を示した。今後の課題を下記にまとめる。

- 実機実験による提案原理の検証
- 不整地での跳躍移動の実現

- 通信による移動計画の設定
- 跳躍後の着地姿勢の安定化の実現

以上の課題を踏まえて、モデルの改良を行うことで、センサノードでの活用が期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，篤く御指導して頂いた丁洛榮 教授に深く感謝の意を表します。また，細部にわたり熱心かつ親身に御助言を賜りました李根浩特任助教に厚くお礼申しあげます。研究室の先輩として公私ともに御助言を賜りました西村康弘さん，大沼孝徳さんに感謝致します。試作機の製作に関して，的確な助言と加工を支援していただいた工作室の宇野宗則さん，友徳精機の北政和さんに感謝致します。そして，ロボティクス講座のみなさんに感謝致します。

参考文献

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal,
“Wireless sensor network survey”,
Computer Networks, vol.52, no.12, pp.2292-2330, 2008.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci,
“A survey on sensor networks”,
IEEE Communications Magazine, vol.40, no.8, pp.102-114, 2002.
- [3] G. Lee, and N. Y. Chong,
“A geometric approach to deploying robot swarms”,
Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, vol.52, no.2-4, pp.257-280, 2009.
- [4] W. Spears, D. Spears, J. Hamann, and R. Heil,
“Distributed, physics-based control of swarms of vehicles”,
Autonomous Robots, vol.17, no.2-3, pp.137-162, 2004.
- [5] W. Wang, V. Srinivasan, and K. Chua,
“Extending the lifetime of wireless sensor networks through mobile relays”,
IEEE/ACM Trans. Networking, vol.16, no.5, pp.1108-1120, 2008.
- [6] C. C. Ooi, and C. Schindelhauer,
“Minimal energy path planning for wireless robots”,
Mobile Networks and Applications, vol.14, no.3, pp.309-321, 2009.
- [7] Y. Kuroda, T. Teshima, and Y. Sato,
“Mobility Performance Evaluation of Planetary Rover with Similarity Model Experiment”,
Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, ThA-9(CD-ROM), 2004.
- [8] K. Tadakuma, R. Tadakuma, K. Nagatani, K. Yoshida, M. Aigo, M. Shimojo, and K. Iagnemma,
“Throwable Tetrahedral Robot with Transformation Capability”,
Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2801-2808, 2009.

- [9] G. Michele, T. Inoh, F. Fukushima, and S. Hirose,
 “HELIOS VIII Search and Rescue Robot: Design of an Adaptive Gripper and System Improvements”,
Proc.IEEE/RSJInt.Conf.IntelligentRobotsandSystems, pp.1775-1780, 2007.
- [10] H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, T. Shingo, H. Igarashi, and F. Matsuno,
 “Development of an Unit Type Robot ”KOHGA2” with Stuck Avoidance Ability”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.10-14, 2007.
- [11] J. Chestnutt, P. Michel, J. Kuffner, and T. Kanade,
 “Locomotion Among Dynamic Obstacles for the Honda ASIMO”,
Proc.IEEE/RSJInt.Conf.IntelligentRobotsandSystems, pp.2572-2573, 2007.
- [12] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the BigDog Team,
 “BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot”,
Proc.Int.FederationofAutomaticControl(IFAC08), pp.10822-10825, 2008.
- [13] S. Fujii, K. Inoue, T. Takubo, Y. Mae, and T. Arai,
 “Ladder Climbing Control for Limb Mechanism Robot ”ASTERISK””,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.3052-3057, 2008.
- [14] S. Hirose, and H. Yamada,
 “Snake-Like Robots”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.88-98, 2009.
- [15] T. Ohashi, H. Yamada, and S. Hirose,
 “Loop Forming Snake-like Robot ACM-R7 and Its Serpenoid Oval Control”,
Proc.IEEE/RSJInt.Conf.IntelligentRobotsandSystems, pp.413-418, 2010.
- [16] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.-C. Zufferey and D. Floreano,
 “A miniature 7g jumping robot”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.373-378, 2008.
- [17] J. Zhao, N. Xi, B. Gao, M. W. Mutka, and L. Xiao,
 “Development of a Controllable and Continuous Jumping Robot”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.4614-4619, 2011.
- [18] U. Scarfogliero, C. Stefanini, and P. Dario,
 “Design and development of the long-jumping ”Grillo” mini robot”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.467-472, 2007.

- [19] Y. Sugiyama, M. Yamanaka, and S. Hirai,
“Circular/spherical robots for crawling and jumping”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.3595-3600, 2005.
- [20] B. G. A. Lambrecht, A. D. Horschler, and R. D. Quinn,
“A small, insect-inspired robot that runs and jumps”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.1240-1245, 2005.
- [21] S. Dubowsky, S. Kesner, J. S. Plante, and P. Boston,
“A hopping mobility concept for search and rescue robots”,
IndustrialRobot : AnInternationalJournal, pp.238-245, 2008.
- [22] H. Tsukagoshi, M. Sasaki, A. Kitagawa, and T. Tanaka,
“Design of a Higher Jumping Rescue Robot with the Optimized Pneumatic Drive”,
Proc.IEEEInt.Conf.RoboticsandAutomation, pp.1276-1283, 2005.
- [23] T. Tanaka, and S. Hirose,
“Development of Leg-wheel Hybrid Quadruped ”AirHopper””,
Proc.IEEE/RSJInt.Conf.IntelligentRobotsandSystems, pp.3800-3895, 2008.
- [24] J. A. Smith, I. Poulakakis, M. Trentini, and I. Sharf,
“Bounding With Active Wheels and Liftoff Angle Velocity Adjustment”,
TheInt.JournalofRoboticsResearch, Volume 29, No.4, pp.441-427, 2010.
- [25] K. Kikuchi, K. Sakaguchi, T. Sudo, and N. Bushida,
“A study on a wheel-based stair-climbing robot with a hopping mechanism”,
MechanicalSystemsandSignalProcessing, Volume 22, Issue 6, pp.1316-1326, 2008.
- [26] Y. Nishimura, G. Lee, and N. Y. Chong,
“Design and analysis of one-time-use sensor node leaping mechanism”,
Proc.5thInt.Conf.AdvancedMechatronics, pp.219-224, 2010.
- [27] 社会法人 日本ロボット学会,
“ロボット工学ハンドブック”,
コロナ社, pp.321-385, 1995.
- [28] A. P. French,
“Newtonian mechanics (1st ed.)”,
New York: W. W. Norton and Company Inc., 1970.
- [29] <http://www.solidworks.co.jp/>
- [30] <http://www.functionbay.co.jp/>