

可撓性材料からなる歩行ロボットに関する研究

電気通信大学大学院電気通信学研究科
博士（工学）の学位申請論文

西 田 麻 美

2009 年 3 月

可撓性材料からなる歩行ロボットに関する研究

博士論文審査委員会

主査	田中	一男	教授
委員	松野	文俊	教授
	下条	誠	教授
	明	愛国	准教授
	金森	哉吏	准教授

著作権所有者

西田 麻美

2009

A Study on Walking Robots Consisting of Flexible Material.

Mami Nishida

Recently, in the environment that coexists with human, the research of the robots that thinks about life is demanded. As for human behavior, safety and flexibility are necessary for the robots because it is very complex. In addition, we demand the ability to move the body freely from the robot. However, generally present walking robots are large, heavy, hard body structure. Therefore, there is a possibility of harming human when coming in contact at an early speed. So as not to have come in contact with human up to now, it has avoided clash on the robots side. In a word, software of robots is controlled well and the problem of the collision has been solved. However, it is difficult to solve the clash problem completely with the software of the robot because human is complex. Therefore, the walking robot from which the whole body is encompassed with flexibility is necessary. We investigated paying attention to the main part of the robot like links and actuators. As a result, a lot of solid body links and the solid body actuators are researched. And, our life has changed greatly by those robots. However, the research of the robot with a flexible whole body is very little. In addition, the robot has the problem of the passing speed of taking about as much as eight minutes a drive. On the other hand, a flexible robot of the polymer gel should be used with the liquid. Therefore, there is a problem that the range that can be driven is limited. Therefore, the robot where it walks by a flexible body has not been achieved globally. Then, a flexible robot greatly depends on the actuator. A lot of artificial muscular actuators are researched now. However, those actuators have the problem that the rigidity is low as the link and the using in water. In addition, mounting is difficult though there is a robot that moves rubber by using the air actuator, too.

Thus, there is no actuator that can use flexibility as a walking robot. Then, we developed some flexible robots where it walked by using the displacement of a flexible link of laminae. These robots are locomotion strategies different from a past mechanism. And, we finally aim to expand the field of research of the flexible walking robot.

This dissertation is composed of Chapter 6, and each content of a chapter is as follows. Chapter 1 describes the background and the trend of the research, and shows the issues and the problem of a past robots. Next, I explains the purpose, and the composition of the dissertation has been put together. In Chapter 2, I investigated a flexible actuator. And, I proposes the FFP actuator that combines SMA (shape-memory alloy) and a lamina for a walking robot. As for the produced FFP (Flexible Flat Plate) actuator, it is disengaged from the liquid and assembly in the robot is easy because of a simple mechanism. In addition, the dynamic characteristic of the FFP actuator is evaluated for the development of the robots from the next chapter. In Chapter 3, to expand the field of research of the flexible walking robot, some kinds of the FFP actuators are presented. The expansion of the movement morph and the effectiveness of the robots are referred by achieving the robot. In Chapter 4, the two-legged walking robot was developed for the flexible walking robot of the simplest composition and the control. And, the examination of effectiveness and the problem is added from the result of the walking achievement. In Chapters 5, quadruped walking robot was developed. And, the payload of the robot was confirmed. The gait pattern of the robot (advancement walking, retreat walking, and turn walking) was established at eventually. Chapter 6 refers the view and the problem in the future. As mentioned above, this dissertation is a summary of purport of developing the walking robot using the displacement of a flexible link, and expanding the flexible walking robot field.

可撓性材料からなる歩行ロボットに関する研究

西田 麻美

概 要

近年、人間と共存する環境において、生活を配慮したロボットの研究が求められている。人間の行動は極めて複雑なため、生活の場で活躍するロボットには安全性や柔軟性が不可欠である。またこうしたロボットには人間の生活環境を自由に移動できる能力が求められる。特に、人間と人間が接触したとしても大事に至ることはないが、今日の歩行ロボットは一般的に大きく、重く、硬いボディ構造をしている。したがって、ある程度の速度で人間と接触したときに危害を加える可能性が大きい。このような場合を想定して、相手を傷つけないようにするための柔らかさ（フレキシビリティ）が歩行ロボットに要求される。この問題に対して従来の研究は、人間に接触をしないようにロボット側で回避をさせようとする方法、すなわち、利用者の都合に合わせてソフト側でリンクをコントロールする手法を主流として行っている。しかしながら本来、人間の行動は作業目的がバラエティであり、個々に複雑な動作をするため、ソフト側で完全に回避することは難しい。また故障や誤作動が生じたとき、ロボットは危険な機械と化す。したがって、どのような状況においても相手を傷つけないという機構、すなわち、全身がフレキシビリティで包まれた歩行ロボットに期待が持てる。今日のハード系では、知能の部分（基板）やエネルギーを供給する部分（バッテリー）をフレキシブルにすることは難しい。そこで筆者は、ロボット構成のコアな部分（リンクとアクチュエータ）に焦点をあて、「柔」と「硬」とに分類し、柔軟性への研究活動についてどのように行われているのか調査した。その結果、剛体リンクや剛体アクチュエータを利用した研究は従来から数多く行われており、現在でもロボット技術は切磋琢磨され、我々の生活は大きく変化しつつある。しかしながら、柔軟リンクと柔軟アクチュエータ、すなわち、全身が柔らかいロボットの研究は非常に少なく、特に歩行ロボットになると開発段階の研究が1~2件である。さらにそれらのロボットは、移動速度の問題や駆動できる空間が限定されているという課題がある。一方で、柔軟ロボットはアクチュエータに大きく依存する。現在、ソフトアクチュエータの研究が多く報告されている。しかしながら、剛性が低いことや複雑で大掛かり

な構成になるため、ロボットへの実装が難しい。したがって、歩行ロボットとして柔らかさを十分に活用できるアクチュエータが必要であると考え。そこで本論文は、可撓性材料（撓むことのできる材料）の薄板と形状記憶合金の組み合わせを利用した柔軟歩行ロボットを開発し、具体的に実例を示すことによって、従来の問題・課題をまずは克服して、柔軟歩行ロボットの研究分野を拡大させようという主旨をまとめたものである。本論文は、以下の6章で構成され、各章の概要は次の通りである。

第1章では、本研究の背景と動向を述べるとともに、既往研究における諸問題を述べて本研究の位置づけを定め、目的と研究へのアプローチ、本論の構成についてまとめている。

第2章では、柔軟歩行ロボットのアクチュエータを選定するため、従来の柔軟アクチュエータを調査し、性能比較を行っている。そして、形状記憶合金(SMA)に注目し、SMAの背景、動向について説明し、SMAと可撓性材料として、高耐熱性および非導電性のポリエチレンプレートを組み合わせたFFP(Flexible Flat Plate)アクチュエータを提案、試作している。さらに、ロボットの歩行に向けて動特性について実験的に評価し、検討を加えている。

第3章では、FFPアクチュエータを用いた柔軟歩行ロボットの基礎概念について議論している。また、ロボットの導入にあたり、FFPアクチュエータの種類とロボットの移動形態をいくつか提示するとともに、FFPアクチュエータを外部から支持して歩行する振り子柔軟歩行ロボットと機構の一部として利用したカニ柔軟歩行ロボットを製作し、従来の課題を克服している。さらに、それぞれの歩行実験により柔軟歩行ロボットの有効性について言及している。

第4章では、可撓性材料の長所を生かし、屈曲部に関節を持たない二足柔軟歩行ロボット(2.8g)を開発し、単純化・軽量化・小型化について追求している。また、歩行実験の結果から、本ロボットの題点について検討を加えている。

第5章では、床の摩擦や反発のばらつきに強い歩容を確保するため、四脚柔軟歩行ロボットを開発し、ペイロードの確保および歩行パターン(前進・後退・旋回歩行)を実現することで柔軟歩行ロボットの方向性を示唆している。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに今後の展望と課題について述べている。

研究にあたり、いままでに確立されていなかった柔軟な歩行ロボット分野を探求することで、多くの知見と産業上有用な成果を得ることができ、本分野への貢献も大きいものと考え。また、人間とロボットが共存する社会において、新しいロボットタイプとして、産業界の発展に大きく寄与するものと考え。

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 ロボットの柔軟性	1
1.1.2 柔軟歩行ロボットの研究の位置づけ	6
1.2 関連する研究の問題点	8
1.2.1 従来の柔軟歩行ロボット	8
1.2.2 従来の柔軟アクチュエータ	10
1.3 研究の目的とアプローチ	12
1.4 論文構成	13
1.5 定義	14
1.6 記号表	14

第2章 柔軟アクチュエータの提案と試作

2.1 はじめに	16
2.2 柔軟アクチュエータの選定	17
2.2.1 従来の柔軟アクチュエータの性能比較	17
2.2.2 SMA の背景	19
2.2.3 SMA の動向	20
2.2.4 ロボットへのアプローチ	21
2.3 FFP アクチュエータの提案	27
2.3.1 FFP アクチュエータの概要	27
2.3.2 FFP アクチュエータの基本構成	28
2.4 FFP アクチュエータの基本動作	31
2.5 FFP アクチュエータの動特性	32
2.5.1 実験目的と実験システム	32
2.5.2 FFP アクチュエータの長さの決定	35
2.5.3 FFP アクチュエータの幅の決定	37
2.5.4 FFP アクチュエータの駆動電圧の決定	39

2.6 柔軟歩行ロボットの脚への応用	41
2.6.1 FFP アクチュエータの変位量と推進力の関係	41
2.6.2 FFP アクチュエータの荷重と変位の関係	42
2.6.3 FFP アクチュエータの材料強度の比較	44
2.7 まとめ	45

第3章 可撓性材料を用いた歩行ロボット

3.1 はじめに	46
3.2 柔軟歩行ロボットの基本概念	47
3.3 FFP アクチュエータの種類	52
3.4 柔軟歩行ロボットの導入	54
3.4.1 柔軟歩行ロボット (振り子歩行)	54
3.4.2 柔軟歩行ロボット (振り子歩行) の推進力	57
3.4.3 柔軟歩行ロボット (振り子歩行) の歩行実験	58
3.4.4 柔軟歩行ロボット (カニ歩行)	64
3.4.5 柔軟歩行ロボット (カニ歩行) の歩行実験	66
3.5 まとめ	69

第4章 二足柔軟歩行ロボットの開発

4.1 はじめに	71
4.2 二足柔軟歩行ロボットの概要	72
4.3 二足柔軟歩行ロボットの試作	74
4.4 二足柔軟歩行ロボットの脚の応答性	78
4.5 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験	81
4.5.1 実験システム	81
4.5.2 信号タイミング	82
4.5.3 二足柔軟歩行ロボットの脚の運び方	84
4.5.4 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験	86
4.6 まとめ	91

第5章 四脚柔軟歩行ロボットの開発

5.1 はじめに	92
5.2 四脚柔軟歩行ロボットの概要	93
5.2.1 四脚柔軟歩行ロボットの動作領域	92

5.2.2 四脚柔軟歩行ロボットの構成	95
5.2.3 四脚柔軟歩行ロボットの脚形状	97
5.3 四脚柔軟歩行ロボットの歩容原理	101
5.3.1 歩容の決定	101
5.4 四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験	104
5.4.1 実験システム	104
5.4.2 ON-OFF 信号タイミング	105
5.4.3 四脚柔軟歩行ロボットの移動距離	109
5.5 四脚柔軟歩行ロボットのペイロード	110
5.6 四脚柔軟歩行ロボットの旋回歩容	115
5.7 まとめ	121

第6章 結論

6.1 本研究で得られた成果	123
6.2 今後の展望と課題	127

参考文献	129
------	-----

謝辞	136
----	-----

発表論文	137
------	-----

第1章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 ロボットの柔軟性

近年、人間と共存する環境において、生活を配慮したロボットの研究が求められている。人間の行動は極めて複雑なため、生活の場で活躍するロボットには安全性や柔軟性が不可欠である。またこうしたロボットには人間の生活環境を自由に移動できる能力が求められる。今日では、ロボットの技術力が高まり、人に近い形状および機能を持つ人間型のロボットが一般家庭の中で普及しはじめている。また、人間をサポートし、共に働く歩行ロボットの活躍も目覚ましい。このように人間社会に与えるロボットの役割は年々大きくなり、多様化したロボットが市場へと投入される傾向にある。しかしながら、現在のロボットは、一般的に大きく、重く、硬いボディ構造をしている。特に、人間と人間が接触したとしても大事に至ることはないが、硬いボディのロボットが、ある程度の速度で人間と接触したときに危害を加える可能性は大きい。このような場合を想定して、相手を傷つけないようにするための柔らかさ（フレキシビリティ）が歩行ロボットに要求される。そこでまず、ロボットの柔軟性を実現するための手法について図 1.1 に大別した。ロボットのフレキシビリティを実現する方法は、アクティブ的なアプローチとパッシブ的なアプローチがある。アクティブ系は、人間に接触をしないようにロボット側で回避させようとする方法、すなわち、利用者の都合に合わせてソフトウェアで機構をコントロールする手法である。その特徴としては、それぞれの要素は硬いものでできていても、ある自由度の運動機構で接続することにより、ロボットに柔軟性を持たせている。つまり、機能を柔らかくするという考え方である。例えば、モジュール型ロボット[1]がそれに該当する。一方のパッシブ系では、機構そのものに柔軟性を持たせる方法、すなわち、ロボットを柔らかい材料で構成して、どんな状況でも自由に柔軟性を発揮できるハードウェアからのアプローチである。代表的

なソフトロボットの研究として、円形柔軟ロボット[2]が挙げられる。

人間との相互作用を考慮した場合、いずれかの柔軟なアプローチがロボットに要求される。現在のロボティクスでは、「人間と接触したときの危害」という問題に対して、システムにコンプライアンスを付加する研究、すなわち、制御の立場を優先としたアクティブ系の研究を主流として行っている。

しかしながら本来、人間の行動は作業目的がバラエティであり、個々に複雑な動作をするため、ソフト側で完全に回避することは難しい。またシステムが故障した場合には、柔軟さは失われ、人間に対してより危険な機械と化す。

したがって、どのような状況においても相手を傷つけないという機構、つまり、全身がフレキシビリティで包まれた歩行ロボットができれば、人間とロボットの共存における安全性を向上させることが可能である。

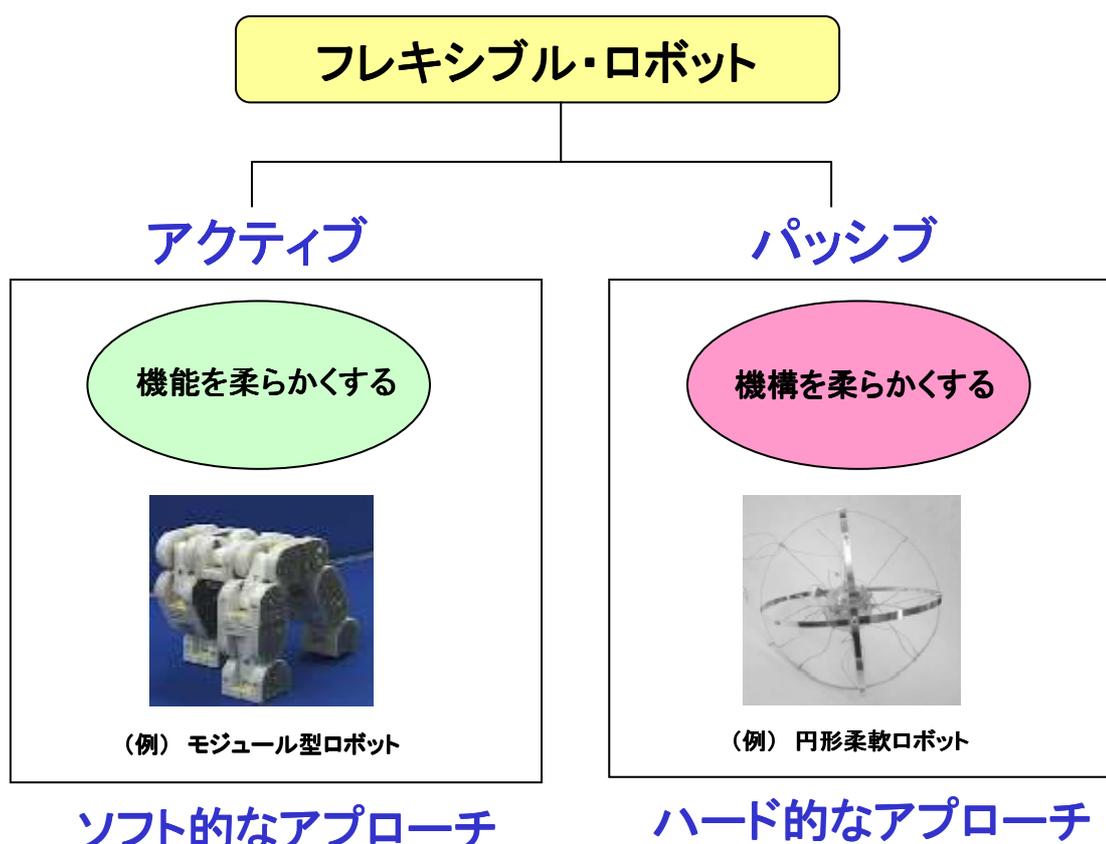


図 1.1： 柔軟性へのアプローチ

今日、ロボット構成するハードウェアの知能の部分（基板）やエネルギーを供給する部分（バッテリー）に関しては、フレキシブルにする技術が確立されていない。したがって、全身が完全に柔らかいフレキシブルロボットを実現することは現時点では困難である。そこで本論文は、ロボット構成のコアな部分（リンクとアクチュエータ）に焦点をあて、それぞれの研究の柔軟性について調査を行った。

まず、ロボットの構成要素を「硬」と「柔」に大きく大別し、さらに、各々の組み合わせを

- (a) 剛体リンクと剛体アクチュエータ
- (b) 剛体リンクと柔軟アクチュエータ
- (c) 柔軟リンクと剛体アクチュエータ
- (d) 柔軟リンクと柔軟アクチュエータ

と分類した。そして、それぞれの構成材料および柔軟性に対するアプローチについて図 1.2 のようにまとめた。

全身が柔らかいロボットは、素材そのものが物理的に低剛で出来ているため、剛体の組み合わせと比較すると、安全性が高くなる。同時に軽量・小型も可能になる特徴がある。

ロボットの組み合わせ要素		構成材料		柔軟性に向けたアプローチ
リンク	アクチュエータ	リンク	アクチュエータ	
剛体	剛体	金属	モータ	関節やユニットを多くする
		アルミ	ソレノイド	
		セラミックス	-	
剛体	柔軟	金属	SMA(形状記憶合金)	機構の一部を柔軟にする
		アルミ	高分子ポリマー	
		セラミックス	IPMC	
柔軟	剛体	ゴム	モータ	物理的に全身が柔らかい
		シリコンゴム	ソレノイド	
		弾性チューブ	空気	
柔軟	柔軟	SMA(形状記憶合金)		物理的に全身が柔らかい
		高分子ポリマー		
		IPMC		

図 1.2 : ロボットの構成要素

ここで、それぞれの歩行ロボット分野に関する研究について具体的に述べる。

(a) 剛体リンクと剛体アクチュエータ

(a)分野の歩行ロボットの研究は、1972年にゼロモーメント（ZMP）の軌道生成と制御補方が発表され、この歩行規範を用いた研究が1980年から1990年に向けて多くなされている。加藤、高西らは計測されたZPMを利用することによって補償運動の学習制御[3]、未知の凹凸路面に対する適用歩行[4]など多彩な歩行制御を見せた。1990年代頃からは、ロボットの実現化に向けて拍車がかかり、家庭、オフィス、病院、建築災害現場、海洋、宇宙空間までに介入するようになった。その中でも、介護ロボット[5]やレスキューロボット[6]は、多くの研究者の間で注目され、実現化に向けて開発が進められた。1990年代後半になると、犬型のエンターテインメントロボット[7]や防犯警備ロボット[8]が実用化された。現在でも尚、小型（約10～30cm）の歩行ロボットや個人や小規模での研究が盛んに行われている[9][10]。さらに1996年、自動車メーカーのホンダがヒト型ロボットP-2を発表し、その完成度と斬新さが社会に大きなインパクトを与えた。その後、ホンダのロボットはASIMO[11]と名づけられ、2005年12月に時速6km、跳躍時間0.08秒の歩行を実現するロボットとして商品化された。

一方で、4足歩行の研究も多く行われている[12][13]。4足歩行は静歩行や動歩行といった様々な歩容が可能である。現在、昆虫や爬虫類など、脚を胴体側に屈曲させ、全方向に進行可能なタイプのロボットと馬のように脚を胴体下に取り込んで、前進方向に特化した哺乳類タイプのロボットとに分けて研究が行われている。爬虫類タイプは荷重効率よく、運搬することに適した構造で、この脚式の研究が圧倒的に多く見られる[14][15][16][17][18]。また哺乳類タイプは高速移動に適した構造であり、走行・歩行のメカニズムについての研究も近年では多く見られるようになった[19][20][21][22]。

2000年代からはアクチュエータの性能が高まると同時に、IC関係がコンパクトに設計されるようになったことから、ロボットの性能がより向上し、操作も比較的容易になった。そして総合的に価格が下ることにより、一般の家庭のレベルで歩行ロボットが入手できるようになり、こうして我々の身近な存在となってきた。

このように、剛体リンクと剛体アクチュエータで構成された歩行ロボットは、長年の歳月を経て、多くの研究者により開発が行われ、発展してきている。

(b) 剛体リンクと柔軟アクチュエータ

(a)の剛体リンクと剛体のアクチュエータを用いた歩行ロボットは、一般的に、金属でできたリンク材料に伝達機構を介してモータなどで駆動しているため、ロボットが重厚で複雑になる。そこで、柔軟なアクチュエータを剛体アクチュエータの代わりに置き換えて、リンク機構へと取り込むことで、軽量化、単純化を目指そうという立場の研究が(b)分野である。

現在、スマート材料、未来型アクチュエータと呼ばれる新しいアクチュエータの研究[23][24]や高分子材料[25]、IPMC[26]や静電アクチュエータ[27]など人工筋肉を模写した柔軟なアクチュエータの研究[28]がなされている。しかしながら、これらの材料を機械や機器に用いた実例が少なく、開発の段階から実現化・実装化に移行されていない。そこで、ロボットのアクチュエータとして利用することで、ソフトアクチュエータ分野を拡大させようとする動きがある。ロボットへ用いた例としては、脚構造の一部に柔軟なアクチュエータ(たとえば、形状記憶合金[29]など)を配置し、拮抗筋関節で伸縮、屈曲駆動させるテンドン機構ロボットの研究[30][31]なども古くから試みられている。

(c) 柔軟リンクと剛体アクチュエータ

柔軟リンクと剛体アクチュエータの研究では、主に、ゴム材料と空気圧を利用した研究[32][33][34]が多く見られる。ゴム人工筋をロボットへと応用しようとする研究[35]は従来から長い月日を経て行われており、現在では、圧膜面でできた構造物を風船のように空気圧によって膨張させて駆動源にするインフレーター機構ロボットの研究[36]などがある。また、アクチュエータそのものは、直接ロボットの脚として利用するのではなく、歩行支援用のパワーアシストとして開発されている傾向がある。現在のこの分野の研究では、実機の精度を向上するために、シミュレーションによるアプローチの研究が多く行われており、空気圧に関するコンプライアンス制御[37][38]について具体的な研究が進められている。

(d) 柔軟リンクと柔軟アクチュエータ

柔軟リンクと柔軟アクチュエータの研究は、その運動や力学的特性などに大きな影響を与えるにも関わらず、(a)~(c)分野と比較して、あまり関心が持たれ

ていない。この原因の一つには、機械はそもそも剛体システムの中で制御され、そこでの構造的な柔らかさは、時として振動の原因となり、作業効率の低下や不安定現象を招くため、高性能化を目指す研究分野での導入は難しいという産業用ロボットの考え方が大きく反映しているからだと思われる。したがって、産業機械のコアな部分では導入されにくい柔らかい材料に注目した歩行ロボットの研究は非常に少なく、具体的な研究報告はほとんどない。柔軟な材料をどのようにロボットへと取り扱うかという議論すらなされていないのが現状である。

1.1.2 柔軟歩行ロボットの研究の位置づけ

本節では、柔軟歩行ロボットの研究の位置づけを明確にするため、リンクとアクチュエータ（剛と柔）で構成されたロボットの研究についてまとめ、4つのベクトルに分類し比較した。その結果を図 1.3 に示し、以下に説明する。

(a)剛体リンクと剛体アクチュエータ (b)剛体リンクと柔軟アクチュエータを利用した研究分野は、従来から多く行われており、現在でもロボット技術は切磋琢磨され、我々の生活は大きく変化しつつある。実用化に向けて、長い年月をかけて成熟され、今日では、空間領域内に自由に位置や姿勢を決めることができるようになり、理論体系もできあがってきている。また、歩容や安定性などの、普遍的な基本用語や概念が確立されている。そして、一般のロボティクスの教科書には、クローラ、トロットといった歩容の種類名、安定余裕やZMP(Zero Moment Point)など、これらのロボットを対象とした基礎概念や用語がごく日常に登場する。そして、言うまでもないが、研究開発はとどめることなく行われ、最新のデータを基に多くの研究やリストがアップされ、それらの参考文献を基にして、新しい研究分野も拡張されている。(c)柔軟リンクと剛体アクチュエータに関しては、人工筋を直接ロボットの脚へと実装した研究は少ないが、従来からシミュレーションのアプローチが行われ、コンプライアンス制御について具体的な研究が行われている。しかしながら、(d)柔軟リンクと柔軟アクチュエータ、すなわち、全身が柔軟であるロボットの研究は非常に少ない。特に、柔軟な歩行ロボットになると具体的な研究は報告されておらず、開発段階の研究が1~2件である。このような結果から、柔軟歩行ロボットの研究は、将来のロボティクスにおいて、大変重要で、意味のある研究であることは明確である。そこで本研究では、柔軟アクチュエータおよび柔軟歩行ロボットを開発して、柔軟歩行ロボットの分野を拡大することを目指す。

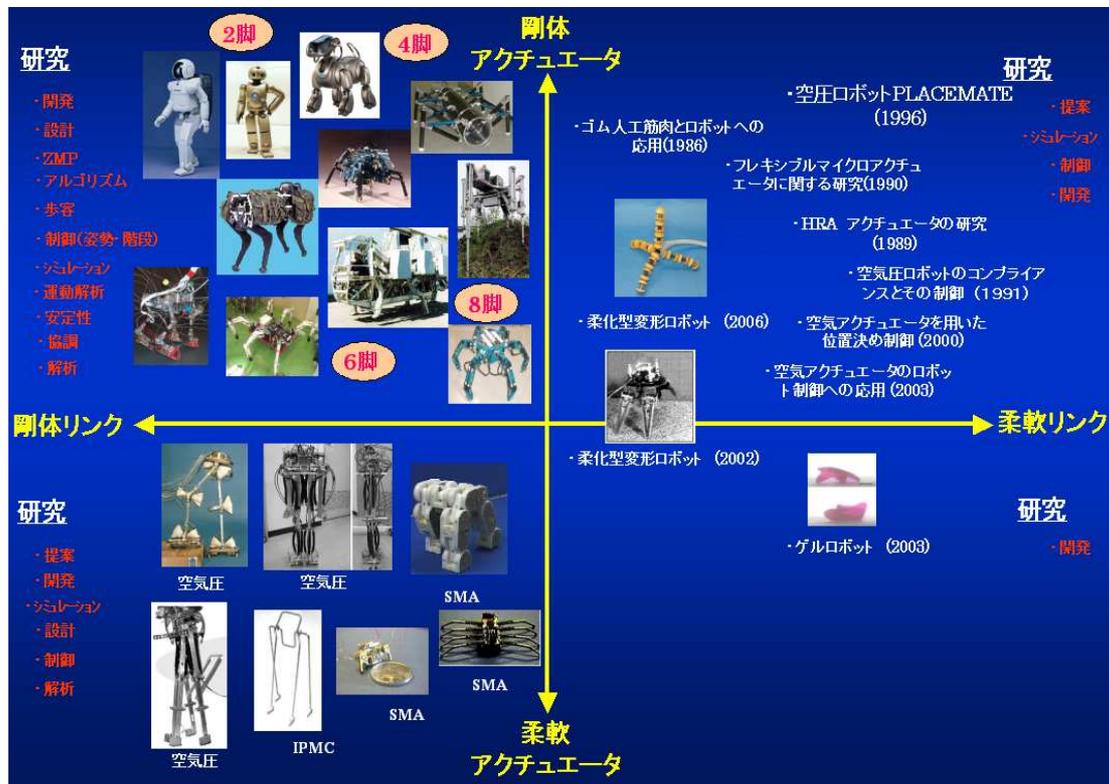


図 1.3 : 従来の歩行ロボットの比較

1.2 関連する研究の問題点

1.2.1 従来の柔軟歩行ロボット

前章でも述べたように、柔軟リンクと柔軟なアクチュエータを用いた柔軟歩行ロボットの研究は非常に少ない。特に、全身が柔らかい歩行ロボットとなると、その例は、1～2件である。そこで、従来の柔軟歩行ロボットの問題点について具体的に述べる。

図 1.4 は、電場応答性高分子で構成されたゲルロボット[39]である。1999 年から、機械の柔らかさを実現するために、人工筋肉素材である電場反応性高分子ゲルを用いたロボットの研究が開始され、電場に応じて力を発生する高分子アクチュエータと柔軟な機構の両機能を持つロボットとして開発された。ゲル自体は、高分子が三次元網目状に絡まりあった間隙に、溶液が保持されているため、物理的な柔軟性をボディ全体に持つ。また、溶液を通じて、外部環境とエネルギー・物質・情報も交換できると述べられている。しかしながら、溶液中のみでの歩行となると、駆動空間が限定されるという大きな問題がある。また、論文では、開発されたロボットを「軟体型ゲルロボット」と称している。しかし、実際には、機構についての定義は何らされていないため、移動ロボットではあることは確かだが、歩行ロボット分野の研究とは言いがたい。

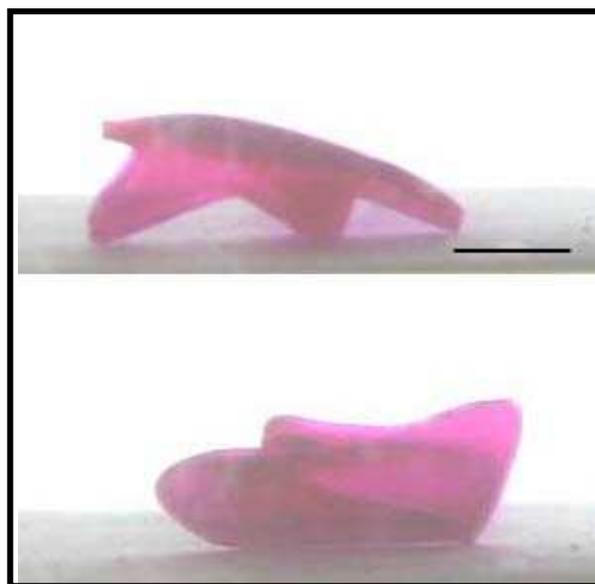


図 1.4： 高分子を用いたゲルロボット

一方で、図 1.5 に示す軟化変形ロボットの研究[40]がある。このロボットは、低融点金属材を温度によって変化させ、形状と剛性を行動目的に合わせて、自由に変化させようというものである。融点が 50°C の低融点の合金をシリコンラバーで包み、周囲に熱センサとヒーターを取り付けた脚を持つ総重量 $440[\text{g}]$ の柔軟ロボットである。脚部の加熱機構は、 $8.67[\text{W}]$ ($5[\text{V}]$, $3[\Omega]$) であり、加熱開始後、軟化変形状態に達するまでに 3 分を要し、軟化変形状態から自然放冷によって冷却し、構造が完全に硬化するまでには 5 分を要すると述べている。したがって、一脚を駆動するために、8 分もかかるため、歩行速度が遅いという問題が生じている。また、初期状態では、脚は硬いため、全身が柔らかいロボットとして扱うことは難しい。

このように、柔軟なボディで且つ歩行するロボットは今のところ実現されていない。

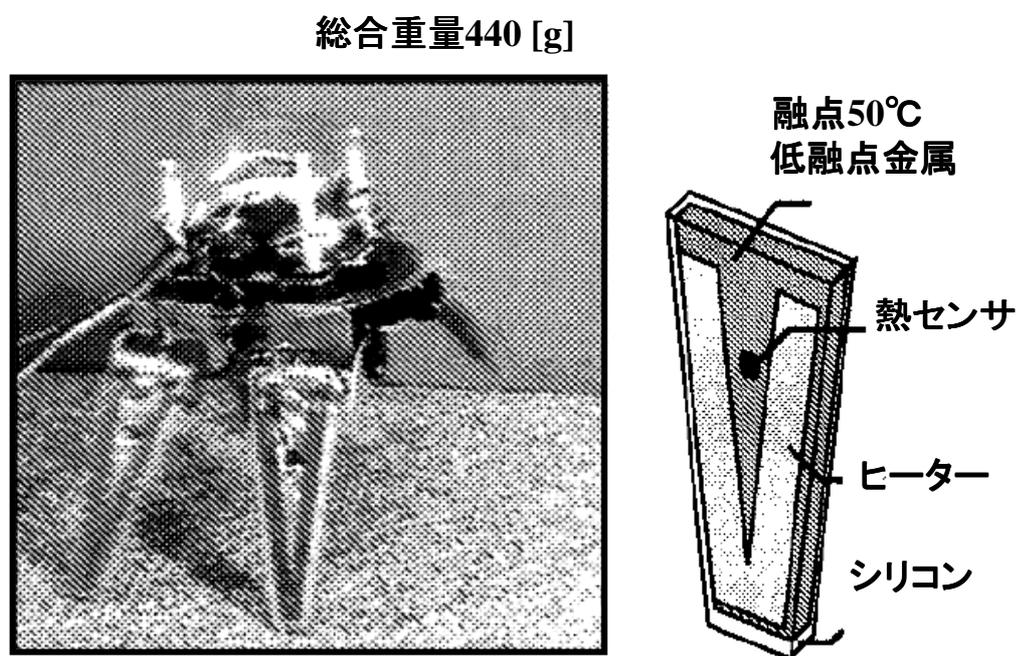


図 1.5： 軟化型変形ロボット

1.2.2 従来の柔軟アクチュエータ

アクチュエータは、ロボットを支える柱の一つである。特に、柔軟ロボットは、アクチュエータに大きく依存する。したがって、柔軟歩行ロボット用としてアクチュエータの選定は重要である。現在、人工筋肉アクチュエータの研究が多く行われているが、柔軟アクチュエータ技術が確立されにくい現状がある。その理由の一つとして、最近では、高分子アクチュエータの実用化や、電気粘性流体や磁気粘性流体の研究も少しずつ進んでいるが、材料の「柔らかさ」は、ヤング率とポアソン比でほぼ決定され、発生応力は材料の弾性率に起因する。したがって、高分子ゲルなどは、電圧印加に伴ってヤング率が増大する傾向があるため、フックの法則が成り立たなくなり、安定したコントロールを得ることが難しくなるためだと思われる。筆者はこのような材料を扱う場合、副次的な施しを行うとよいと考えている。

ここで、実現化されつつある最新の柔軟アクチュエータを取り上げ、柔軟歩行ロボット用としての立場から問題点について述べる。

図 1.6 は、トキ・コーポレーションが開発した軟化アクチュエータ（人工筋肉アクチュエータ）である。形状記憶合金としての BMF (商品名) アクチュエータをシリコンゴムの中に埋め込み、アクチュエータに電圧印加を行うと、収縮、伸展の動作により、大きな発生力と変位を得ることができる。このアクチュエータは、主として低剛性と操作性に難がある。したがって、仮に歩行ロボットとして実装したとしても、歩行を実現するための制御手法を確立することが難しい。

図 1.7 は、東工大で研究されているイオン伝導性高分子 (IPMC) である。IPMC アクチュエータは、高分子と同様に特殊溶液中の使用という制限があるため、適用範囲の課題がある。

図 1.8 は、岡山大で研究されている収縮型湾曲空気圧ゴム人工筋である。風船のように、外部からゴム内に空気を投入して柔らかさを持たせたアクチュエータである。しかしながら、空気を送る側の装置（コンプレッサー）は大きく大掛かりであるため、柔軟歩行ロボットとして、機構内に配置することは考えにくい。

このように、歩行ロボットとして柔軟さを十分に活用できるアクチュエータがない。

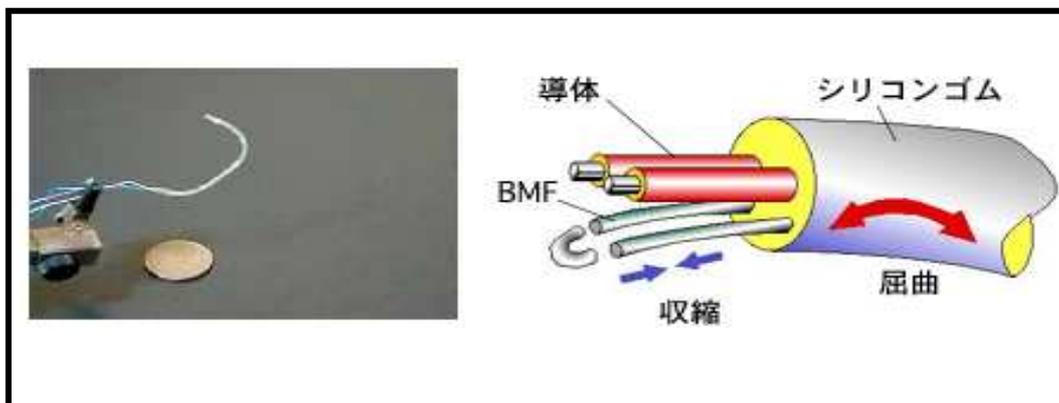


図 1.6： 軟化アクチュエータ
 出典：トキ・コーポレーション(2008)

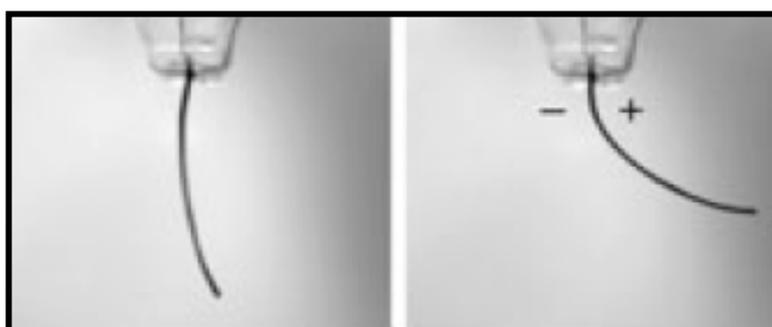


図 1.7： イオン導電性アクチュエータ (IPMC)
 出典：東工大 (2002)



図 1.8： 収縮型湾曲空気圧ゴム人工筋
 出典：岡山大 (2006)

1.3 研究の目的とアプローチ

以上により，柔軟歩行用ロボットとして，十分に活用できるアクチュエータおよび柔軟歩行ロボットの研究が非常に少ないことがわかる．したがって，本論文では，柔軟歩行ロボットに関する分野を拡大するために，研究へのアプローチを以下の通りに行う．

①柔軟アクチュエータの開発

まずは柔軟なアクチュエータとそれに関連する柔軟ロボットを調査する．その結果に基づいて，歩行用のアクチュエータを提案し，試作する．この時，従来の課題とされている液体からの離脱を可能にする．また，柔軟歩行ロボットを歩行させるための信号タイミングの決定と移動速度の向上に向けて，製作したアクチュエータの動特性を実験的に評価する．

②柔軟ロボットの開発

次に，ロボットの開発にあたり，歩行ロボットの研究の方向性を調査した結果，従来から以下のように述べられているので参照したい．

「脚移動（歩行）ロボットは，その対地適応能力の高さが期待されていながら，マニピュレータのような実用性の高い分野と比較して，実用化に向けての研究の道のりは長く，新規参入の研究が取り付きにくい．その理由として，未だ理論と実機とのギャップが大きく，シミュレーションのみでは納得できないという風潮がある．したがって，この分野では，実機を上手く制御して歩行実現させたことによるアピールの度合いが非常に大きい．」

米田完，“脚移動”日本ロボット学会誌 Vol, 16 No7, pp897-901 (1998)．

したがって，本論文では，柔軟歩行ロボットの開発に向けて，実機を上手く制御し，実際に歩行を示すことによって，研究の有効性を明らかにする．さらに，開発にあたって，従来の柔軟型歩行ロボットの問題点である移動速度を向上させる．

③歩容パターンの確立および移動形態の拡大

これまでに開発されていなかった柔軟な歩行ロボットに加えて，歩容パターン（前進・後退・旋回），ペイロードを確保し，また製作したアクチュエータを自由に組み換えられることによって，将来的にロボットの種類や移動形態をより拡大できるような開発を試みる．そして当研究分野を全体的に拡張していくことを目指す．

1.4 論文構成

本論文は、以下 6 の章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と研究の動向を述べるとともに、既往研究における諸問題を述べて本研究の位置づけを定め、目的と研究へのアプローチ、本論の構成についてまとめている。

第 2 章では、柔軟歩行ロボットのアクチュエータを選定するため、従来の柔軟アクチュエータを調査し、性能比較を行っている。そして、形状記憶合金 (SMA) に注目し、SMA の背景、動向を述べるとともに、SMA と高耐熱性および非導電性のポリエチレンプレートを組み合わせた FFP (Flexible Flat Plate) アクチュエータを提案、試作している。さらに、歩行を行うため、動特性について実験的に評価し、検討を加えている。

第 3 章では、FFP アクチュエータを用いた柔軟歩行ロボットの基礎概念について議論し、FFP アクチュエータの種類とロボットの移動形態を提示している。そして、FFP アクチュエータを外部から支持して歩行する振り子柔軟歩行ロボットと機構の一部として利用したカニ柔軟歩行ロボットを製作し、歩行を実践することで、液体からの離脱および移動速度の向上を図っている。さらに、歩行実験により柔軟歩行ロボットの有効性について言及している。

第 4 章では、可撓性材料の特徴を活かし、屈曲部に関節を持たない二足柔軟歩行ロボット (2.8g) を開発し、単純化・軽量化・小型化について追求している。また、歩行実験の結果により、本ロボットの題点について検討を加えている。

第 5 章では、床の摩擦や反発のばらつきに強い歩容を確保するため、四脚柔軟歩行ロボットを開発し、ペイロードの確保および歩行パターン (前進・後退・旋回歩行) を実現することで柔軟歩行ロボットの方向性を示している。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに今後の展望と課題について述べている。

1.5 定義

本研究における柔軟歩行ロボットを開発するにあたり，論文中で用いられる新たに提示した用語について下記に説明する．具体的な内容については，各章で述べられている．

FFPアクチュエータ

可撓性材料として，高耐熱性，非導電性のポリエチレン材料の薄板に，形状記憶合金アクチュエータを組み合わせることで，剛性を確保しながら且つ機械的な変位が得られるという柔軟歩行ロボット用のアクチュエータである．このアクチュエータをFFP(Flexible Flat Plate)アクチュエータと命名する．

1.6 記号表

本論文で用いられる主な記号は以下の通りである．ここに示す記号意外で使用されている記号およびここで示されていない記号は本文中に説明されている．

t_p : FFP アクチュエータの板厚

E : FFP アクチュエータのヤング率

ν : FFP アクチュエータのポアソン比

L_g : FFP アクチュエータの全長

W_p : FFP アクチュエータの幅

L_s : SMAの全長

ζ : FFPアクチュエータの中央ひずみ量

U_1 : Y方向におけるFFPアクチュエータの先端のひずみ量

W_1 : X方向におけるFFPアクチュエータの先端のひずみ量

P : X方向における力

f : FFPアクチュエータにかかる摩擦力

F_1 : FFPアクチュエータの発生力

m : 柔軟歩行ロボット（振り子タイプ）の質量

I : 柔軟歩行ロボット（振り子タイプ）の慣性モーメント

L_i : 二足柔軟歩行ロボットの全長

H_i : 二足柔軟歩行ロボットの全幅

P_1 : 二足柔軟歩行ロボットの脚間の幅

S_1 : 二足柔軟歩行ロボットの脚先の幅

U_2 : 二足柔軟歩行ロボットのY方向の先端ひずみ量

W_2 : 二足柔軟歩行ロボットのX方向の先端ひずみ量

R : 四脚柔軟歩行ロボットの脚の曲率半径

L : 四脚柔軟歩行ロボットの付け根から接地面までの高さ

φ : 四脚柔軟歩行ロボットの先端の法線となす角

Q : 四脚柔軟歩行ロボットの先端の変位量

τ : 四脚柔軟歩行ロボットの動作領域

第2章

柔軟アクチュエータの提案と試作

2.1 はじめに

本章では、柔軟歩行ロボット分野を拡大するために、ロボットの柱となるアクチュエータを開発する。柔軟な構造を持つロボットは、柔軟な行動を決定するアクチュエータに大きく依存する。現在、生体の運動や人工筋肉の研究が進みつつあるとともに、柔軟で軽やかなアクチュエータが数々報告されている。そこで、従来のソフトアクチュエータに注目し、具体的に比較検討した結果を述べる。次に本研究では、優れた機械特性を持つ SMA (形状記憶合金) を選定し、このアクチュエータに関する背景と動向、特徴について説明した後、ロボットの応用例についていくつか紹介する。さらに、柔軟歩行ロボットのアクチュエータとして、SMA と可撓性材料の耐熱性、非導電性の高いポリエチレン薄板を組み合わせたアクチュエータを提案する。本章では、このアクチュエータ Flexible Flat Plate アクチュエータ (以下 FFP アクチュエータと呼ぶ) と命名している。さらに、歩行するための信号タイミングの決定および移動速度の向上に向けて、製作した FFP アクチュエータの動特性について実験的に評価し、検討を加える。

2.2 柔軟アクチュエータの選定

2.2.1 従来の柔軟アクチュエータの性能比較

近年では、柔軟なアクチュエータの研究が多く行われており、様々な分野で応用が期待されている。少子高齢化社会の中で、人間と共に作業するロボットには柔軟な体や機能が要求されるため、柔軟アクチュエータや人工筋肉に対する関心は一層高くなると思われる。今日では、構造システムや材料システムの知能化が進み、「スマート」材料あるいは、「インテリジェント」材料と呼ばれる新しい材料がロボットの発展と共に注目されている。これらの材料には、構造や材料に生体と同じ機能を持たせ、同じ働きをさせようという主旨がくみ取られる。その特徴について説明すると、ソフトアクチュエータは、骨格（構造）と筋肉（アクチュエータ）が一つに組み合わせられており、同時に神経（センサ）としての機能も持ち合わせる。これらが一体となって外部の情報を検知する。そして、脳（プロセッサ）へとフィードバックすることで、環境の変化に一早く対応させることができる。このように、生体と同じ機能をロボットに応用すれば、その動作形態や範囲が大きく広がると考えられている。

そこで、最近のキーテクノロジーとして注目されている柔軟なアクチュエータを取り上げ、それらの特徴を比較した。代表的な柔軟アクチュエータの分類と性能比較を表 2.1 に示し、以下に説明する。

高分子材料は動作電圧が低く、自己体積変化が可能な柔らかいアクチュエータとしてのメリットがあり、幅広く応用がされている。しかし主としてウェットな環境、すなわち、電解質を保持された環境内で用いられることが多く、ドライな環境で使うためには、特殊な処置が必要とされる。最近の高分子アクチュエータは、ポリマーゲル、ICPF/IPMF、導電性ポリマーなどに分類されるが、いずれも形状保持や耐久性に難がある。

静電アクチュエータは、速い応答性があり、小型軽量化しやすい。しかしながら、高電圧、発生力が小さいなど、解決が難しいトレード・オフの問題がある。

ロボットの移動には動作ストロークとスピードが重要である。したがって、高分子アクチュエータのような大きな発生力（変位）と静電アクチュエータのような速い応答速度が同時に求められる。そこで、柔軟アクチュエータの応答速度と弾性エネルギー密度の関係を図 2.1 に比較して示す。その中でも形状記憶

合金(Shape Memory Alloy : SMA) は、発生応力が大きく、比較的応答速度もやや速いことで、古くから実用化されている。

一般的に形状記憶合金(以下 SMA と省略する)は、耐食・耐摩耗性に優れ、無音で振動が無く、体積あたりの発生力が大きい機能性材料であることが知られている。小型で大きな力が得られるため、動作ストロークを拡大する目的で用いられることが多い。また優れた機械的特性のみならず、組み立て調整などの手間が不要な材料であること、安価であることも大きな利点である。しかしながら、他のアクチュエータに比べると、動作性能が熱や温度に依存しているため、ヒステリシス、再現性、スタビリティ、応答速度などのバラツキに問題がみられる。

表 2.1 : 次世代柔軟アクチュエータの性能比較表

		最大発生力 [MPa]	伸縮率 [%]	応答速度 [Hz]	動作電圧 [V]	メリット	デメリット	
人間の筋肉 (参考)		0.4	40	10	—	—	—	
高分子材料	ポリマゲル	0.3	40	0.1	3	形状保持 高伸縮率	耐久性低 応答性低	湿式
	ICPF・IPMF	0.1	10	100	1.5	高速応答 低印加電圧	低発生力 形状保持難	電解質の保持
	導電性ポリマ	5	10	5	2	形状保持 高効率	低耐久性 (10回)	
静電 アクチュエータ		0.05	50	1000	600	高速応答 高伸縮率	低発生力 高電圧駆動	
形状記憶合金 (SMA)		300	5	0.3	3	高発生力	冷却時に低応答 低エネルギー効率	

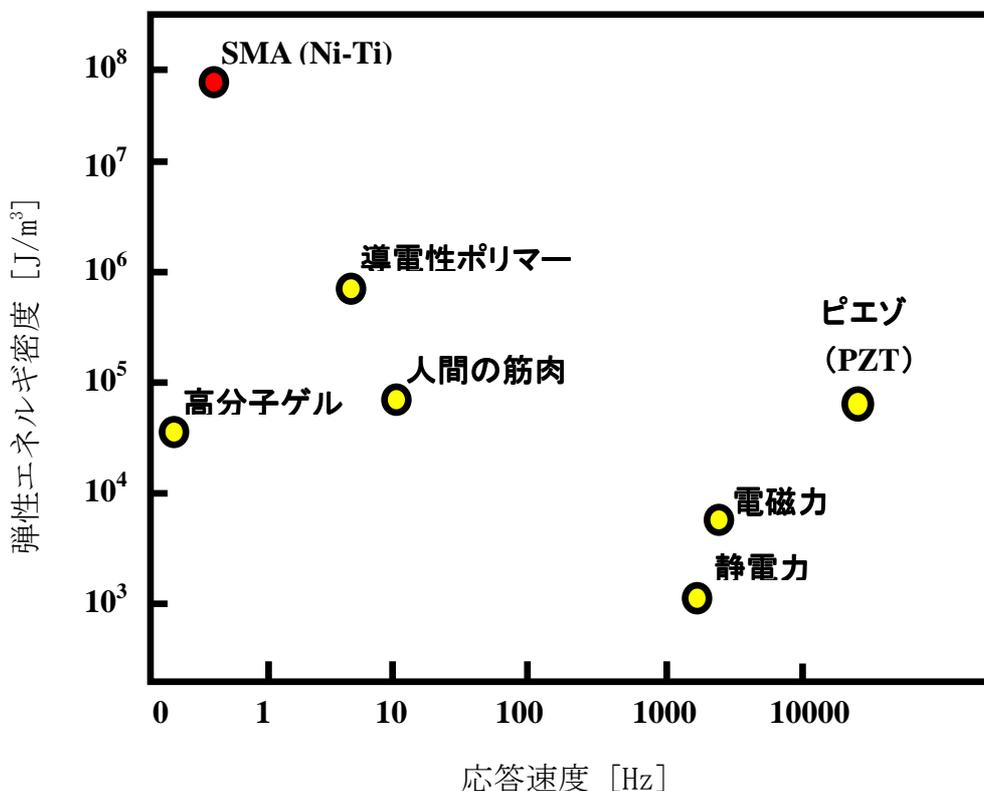


図 2.1 : 柔軟アクチュエータの応答速度とエネルギー密度の関係

2.2.2 SMA の背景

SMA 合金における形状記憶効果は、1951 年に米国コロンビア大学の Read らにより、Au-Cd (金-カドニウム) 合金において最初に発見されたことに始まり、続いて 1953 年に、In-Tl (インジウム-チタン) 合金においても報告されている。

しかし、この時点では、形状記憶効果は単に学問的興味の対象でしかなく、限られた材料にしか出現しないものと思われており、実用化へ向けた動きがなかった。形状記憶効果による実用化は、1963 年に Ti-Ni (ニッケル-チタン) 合金が報告されてからである。その後、多くの非鉄及び鉄系合金において、次々と形状記憶効果を見出すことに成功したが、実用化に関しては Ti-Ni 合金に勝る材料が発見されなかった。しかし 1980 年代に入り、結晶構造、形状記憶の

機構，変態および変形挙動等の材料学的な特性がほぼ解明されるようになり，近年になって様々な分野で用いられるようになった．身近な実用例としては，珈琲メーカーや炊飯器等の温度調節機能，自動車のリトラクタブルライトやサーモスタット等の制御箇所に見られる．現在，形状記憶合金は更なる高速化や安定性の向上を目指して研究がなされており，実用域は大きく広がるものと思われる．その一つがロボットへの応用である．

2.2.3 SMA の動向

我が国における SMA の特許の初期出願は 1960 年代初頭であり，当時の出願特許はわずか 10 件余りであった[41]．それから十数年後，形状記憶合金は「珍しい材料」として，テレビを通して大衆へ広がった．そのころから実用材料としても着々と容認されるようになった．そして急激な勢いで，電気電子機器，機械装置・部品をはじめ，医療，衣類，玩具，スポーツ，福祉の多岐に渡る分野の製品開発部門で採用されるようになった．SMA を用いた製品は，ここ数十年で大幅に伸び，材料技術（合金組成，材料製造技術）分野や製品開発に結びつく応用技術分野でも研究材料の一つとして取り扱われるようになった．

SMA は，工業界に広く浸透している．近年，医療器材の進歩発展に伴い，ガイドワイヤ，カテーテル等人間の体内に挿入して検査・処置をする装置として具現化され，先端技術の一旦を担っている．また，SMA は単純な操作方法と手軽に購入できるアクチュエータとして，研究分野から個人に渡って幅広く利用されている．形状記憶効果は直感的に見てもわかりやすいため，工業界以外の異分野でも関心が寄せられているのであろう．

本来，SMA を利用したアプリケーションは，形状回復機能を可逆的もしくは非可逆的に利用したもの，物理的な特性の変化を利用したものとして開発されている．最も実現しやすいものとしては，熱を感知して形状を回復するという機能，すなわち，感熱センサとアクチュエータを兼ねた使い方である．一般的には，通電により熱を積極的に与えて形状を回復させる機能としての利用が有効的であると考えられている．また，変形ひずみを与え，負荷を除くと元の形状に戻るという超弾性材としての利用も期待されている．例えば，ゴムのよう伸縮する軽い材料は，人間にフィットしやすく，またしなやかさを再現することができるため，ロボット分野においても多くの利用がなされるであろう．

2.2.4 ロボットへのアプローチ

従来、SMA を移動ロボットへと応用する場合には図 2.2(a) 拮抗型と (b) 軟体型のいずれかの手法を採用している [42]。拮抗型は骨格筋型ともよばれ、SMA とばね (バイアス) を用いたメカニズムにより、互いに拮抗して駆動させる。一方の軟体型は、SMA アクチュエータ自身が構造となるタイプである。一般的に歩行ロボットでは、(a) のタイプを多く利用している。具体的には、2 つ以上の平行リンク機構にプーリを介して SMA ワイヤで引っ張るという手法である。軽量化や小型化に向けて、モータを SMA に置き換えたロボット [43] として開発される場合が多い。SMA の形状は、線形タイプとばねタイプと板タイプの 3 つに分類できる。機構部には、変位が大きくとれるばね形状タイプが用いられる。SMA を用いる場合は通電方式が最も効率が良く、反応が速い。また、SMA は線径が太くなるにつれ、荷電流が大きくなるなどの欠点があるため耐久性を考慮した制御手法が必要になる。

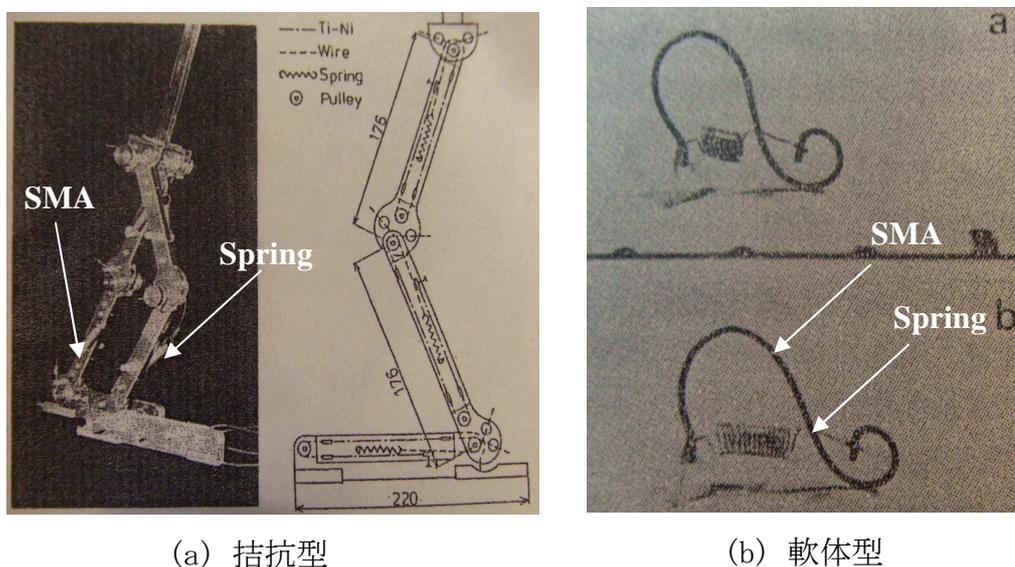


図 2.2: 従来の SMA を利用したロボット

ここで、SMA をロボットに応用した最近の例についていくつか紹介する。

図 2.3 は、MEMS 技術により、小エリア内に SMA を複数配置させることで変位量の増大を可能にし、強力なアクチュエータとして小型移動ロボットへ応用した例である。220 本の SMA の足を使って、ムカデのように抵抗を運ぶロボット[44]の状態がわかる。メインとなる形状記憶合金薄膜は、独自に開発された半導体の成膜プロセスを経て製作されている。圧電素子と比較すると発生力で 15 倍以上、変位量で 50 倍以上の性能を示すことが可能だと述べている。このようなマイクロ化へ向けたロボットの可能性に今後期待される。

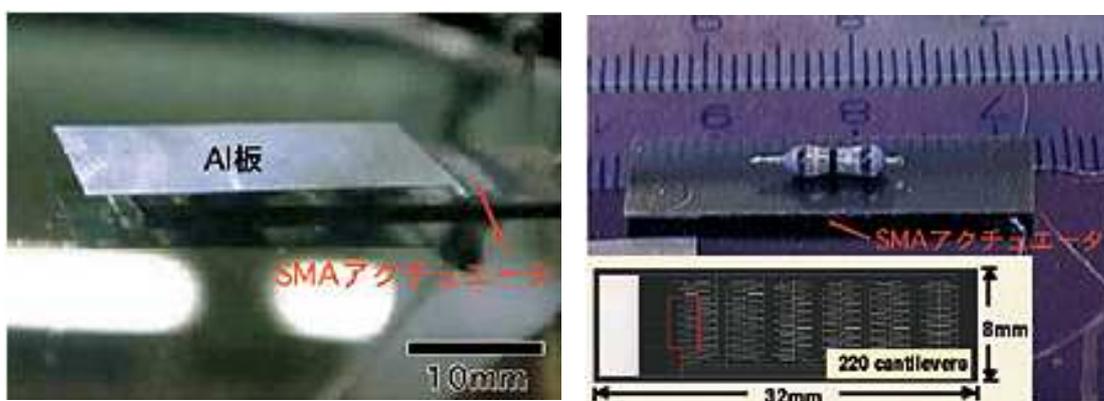


図 2.3： MEMS 技術を用いたムカデロボット

(出典:独立行政法人 材料・物質研究機構)

SMA を用いた研究は、ロボット分野の中でも比較的ハンド系に多く見られる。図 2.4 の小型ロボットフィンガ[45]は、人間の指の屈曲運動を再現するため、二本の対となった SMA 1, SMA2 を交互に通電し、伸縮させる典型的な方法により駆動する。この研究は、SMA の収縮量と発生力、すなわち応答性について焦点をあて、得られた実験結果に基づいて構造設計 (寸法の決定) が行なわれている。応答実験の結果により、0.75[mm]の SMA 線径が最も応答性が速く、フィンガ駆動機構として最適であることが確認されている。また人間の指の柔軟な動きをより再現させるために、SMA とプーリおよびリンクをいくつか順次繋げて、それぞれのジョイント箇所で伸縮駆動させる研究も数多く報告されている。

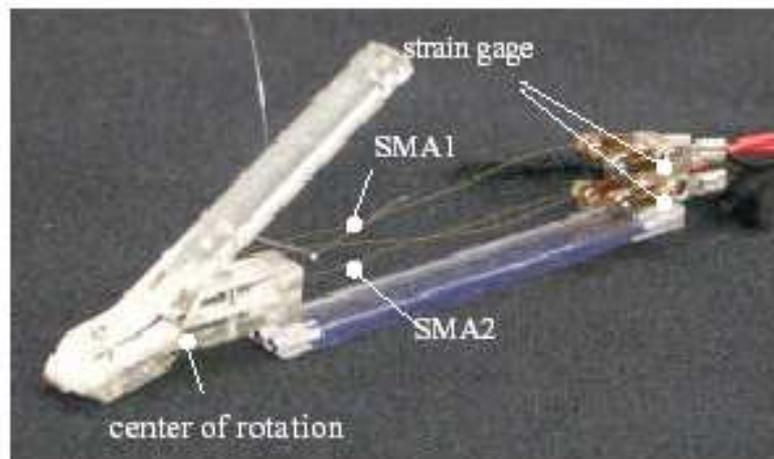


図 2.4： 小型ロボットフィンガ
(出典:慶応大学)

SMA を利用したロボットは, 人間の腕の機能に全体的に近づける研究が古くから行われている. 日立製作所では, SMA アクチュエータを駆動源にして, 3 指 (12 自由度), 手首 (2 自由度) を備えたほぼ人間の手と同じ大きさのロボットハンド(図 2.5)を 1984 年に開発している[46]. このロボットは, 3 本の指でボールを掴んだり, 放したり, 柔軟で器用な動作を再現することができる.

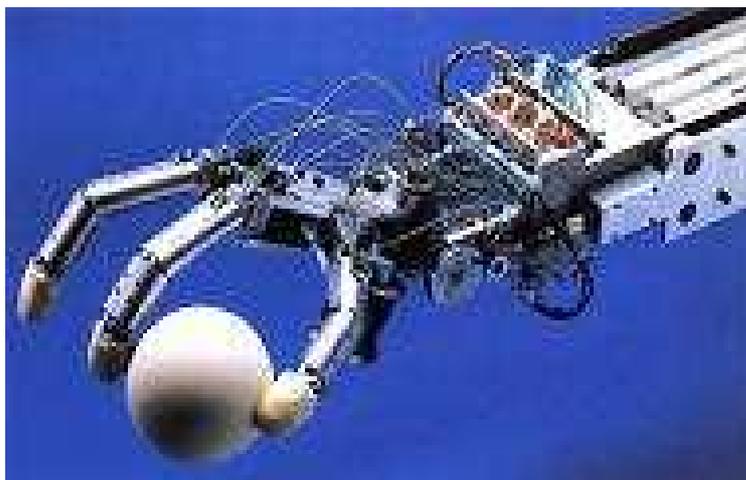


図 2.5： SMA によるロボットハンド
(出典:日立製作所)

SMA は協調ロボットにも活用されている。図 2.6 は、約 2 cm の立方サイズのマイクロ組み立てユニット[47]である。正方形ユニットの対角頂点に、ばね状の 2 つの SMA を配置し、通電することでトルクを発生させ、これを機構全体の回転運動へと変換する。一つのユニットの結合部（オス）が別のユニットの結合部（メス）へと回転しながら結合・離脱を行う。小型の多目的ロボットや極限環境の検査機械などへの応用が期待されている。

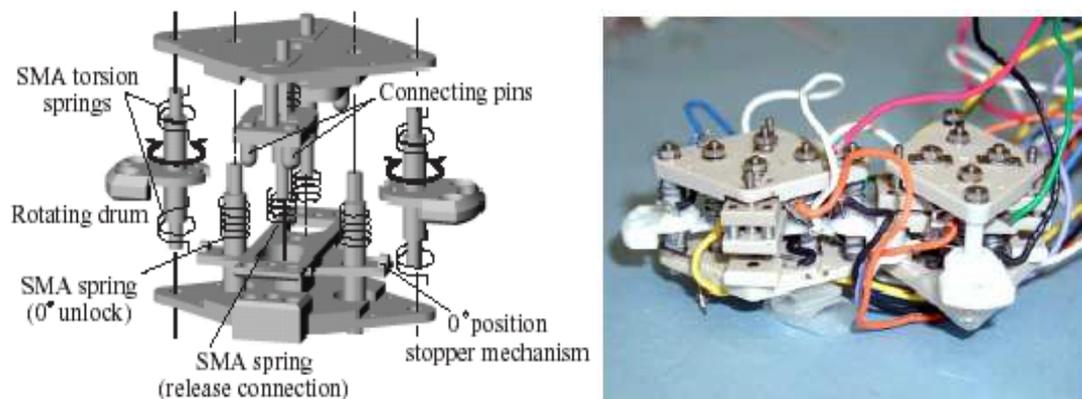


図 2.6： マイクロ自己組立て機械ユニット
(出典:機械研)

今日、SMA の開発は、新デバイス材料として特化したものでなく、直にアプリケーションできる応用技術として確立されてきている。SMA 材料を販売している企業（トキ・コーポレーション[48]）においてもそのような多目的使用の研究開発が日々行われている。図 2.7 は、自社の SMA（バイオメタル）をマイクロロボットとして応用した例である。図 2.7(a)では、SMA（商品名：BMF）を関節部に配置して、アームを柔軟に屈伸させる。単純な構成で小型アームを再現できることをアピールしている。このロボットアームは 5 自由度である。一方、(b)の尺取虫ロボットは 2 自由度で移動する。SMA とばね（バイアス）を用いたメカニズムにより、ON-OFF という 2 値の制御で、拮抗して駆動させるロボットである。これらのロボットは現在販売されている。

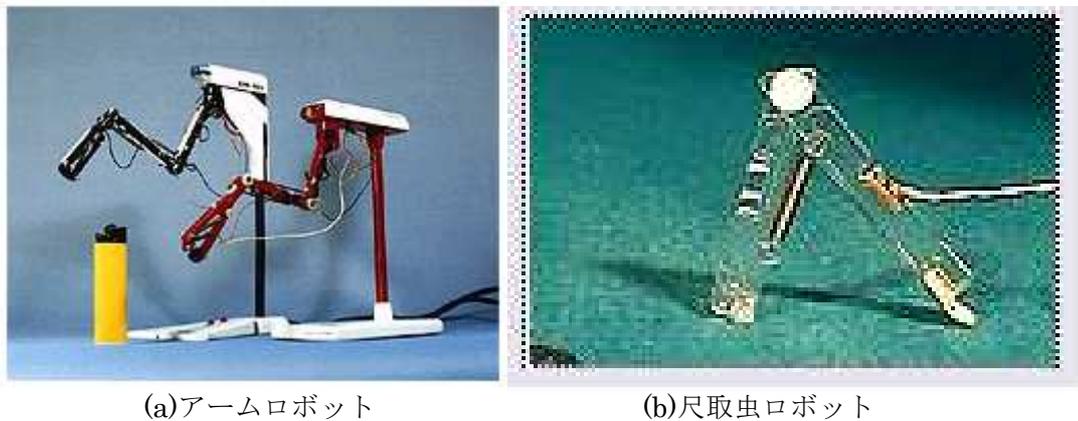
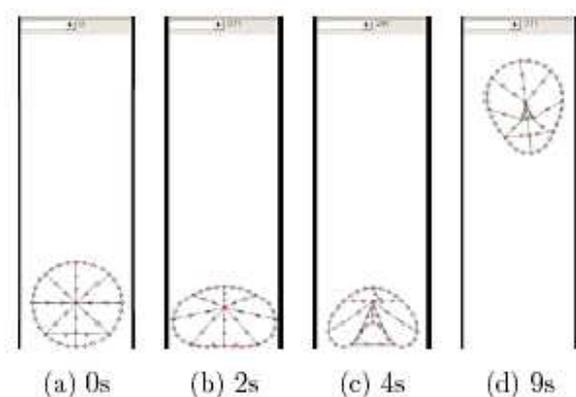


図 2.7: SMA を利用したマイクロロボット
(出典: トキコーポレーション)

SMA は複雑な調整がなく、形状を自在に加工でき、耐食・耐摩耗性に優れているという特徴を持つことから、移動ロボットの構造として多種多様な形態をとることが出来る。

図 2.8 に SMA により構造材を歪ませ、得られた弾性エネルギーを運動エネルギーへと変換することで移動を可能する円形ソフトロボット[49]を示す。図 2.8(a)のように、円の中央から外周に向け 8 本の SMA を取り付け、A から H の SMA の位相差を時々刻々と変えることで移動させる。また SMA の大きな発生力を利用して、(a) ~ (d) へと飛躍することも可能である。この研究をベースに、環状にした金属の帯を組み合わせることで球形状にし、約 20 本の SMA コイルを帯内面に接続した構造のロボット「KOHARO」(図 2.8(b)) が立命館大学(平井研究室)と東レエンジニアリング(本社大阪市)の共同研究により開発されている。構造が柔らかくて軽いため、人にぶつかっても危害を与える可能性が低く、製作費が約 1 万円と安価なことが特徴である。



(a) 円形ソフトロボット

(b) 飛躍ロボット [KOHARO]

図 2.8 : SMA の弾性エネルギーを利用したロボット
(出典:立命館大学)

以上のように、SMA は、非常にシンプルで壊れにくい、優れた機能性材料である。しかしながら、医療やセンサなどのニッチな領域を除いた分野のアクチュエータ材料として、その特徴を十分に生かされた応用例や実例が数少ない。

今後のロボット分野を通して、従来から存在するヒステリシス、応答速度などの問題を克服しながらも、軽量で単純な構造、そして大きな発生力と変位量のメカニズムの長所を上手に生かすことができれば、とても魅力的なアクチュエータとなるであろう。また SMA は安価であり、簡単な制御で駆動することから、身近に取り入れやすいアクチュエータである。したがって、個人レベルの利用や教育関係での利用、さらには量産・汎用に大変有利であると考えられる。我々の使い方によっては、新しい技術の場でこのアクチュエータを用いることも期待できる。

2.3 FFP アクチュエータの提案

2.3.1 FFP アクチュエータの概要

前章で述べたように、実用化されている SMA は、軽量ながら、わずかな応力で大きな変形と復元力が得られ、強度が高く、さらにエネルギー効率が良いという優れた機械的・電気的特性がある。またロボット分野にとどまらず、機械・電気[50][51]、宇宙 [52]、土建築[53][54] 医療・福祉[55][56]など様々な分野で用いられていることで実績がある。

そこで、柔軟歩行ロボットの脚として、SMA と可撓性材料の薄板を融合させた柔軟なアクチュエータを提案する。図 2.9 に示すように、SMA はコイル、ワイヤ、板の 3 つの種類がある。SMA を薄板のような形状にする、もしくは SMA と耐熱性、非導電性の薄い柔軟なプレートを組み合わせることで、剛性のある単純な構造のアクチュエータが可能となる。本論では、柔軟歩行ロボット用のアクチュエータとして、FFP(Flexible Flat Plate)アクチュエータと命名する。

Flexible Flat Plate

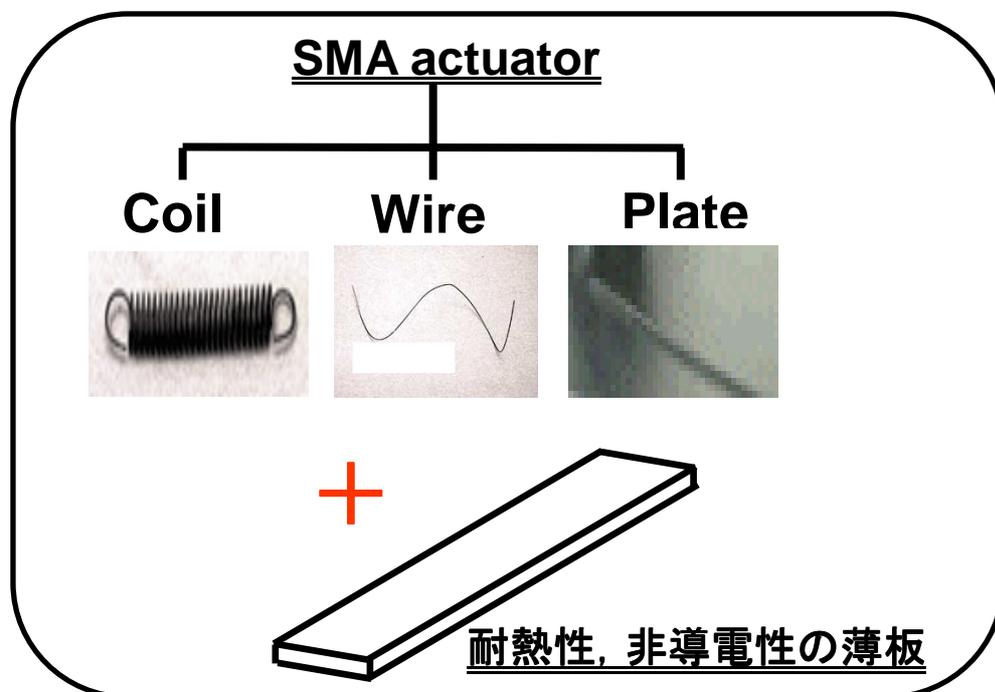


図 2.9: FFP アクチュエータの提案

2.3.2 FFP アクチュエータの基本構成

FFP アクチュエータは、耐熱性と非導電性の薄板に、形状記憶合金のような ON-OFF で駆動する柔軟な機能材料を組み合わせることで、剛性を保ちながら、機械的な変位が得られるというアクチュエータである。

ここで、FFP アクチュエータについて、SMA を薄板の内部に持つタイプ図 2.10(a)および外部に配置するタイプ図 2.10(b)とに大別し、以下に説明する。

本来、FFP アクチュエータの機能を最大限発揮させるためには、(a)の内部タイプ構造が望ましい。その理由として、(a)タイプは、SMA の駆動用のスペースをとらず、ロボット全体の設計の自由度を向上させる可能性がある。実際にこのタイプに、エポキシと SMA を複合した試験片として、能動的な可変制御の有効性を検証した文献がある[57][58]。しかしながら(a)タイプの FFP アクチュエータを製作するには、高圧プレスを使いながら真空炉で焼き固める方法か、スパッタリングなどの難易な技術を伴う。したがって、高価な装置が必要となる。本研究では、単純な材料構成を目標の一つとしているため、耐熱性と非導電性の薄板および SMA を樹脂ネジで固定した(b)の外部タイプを用いて、基礎的な研究を行う。

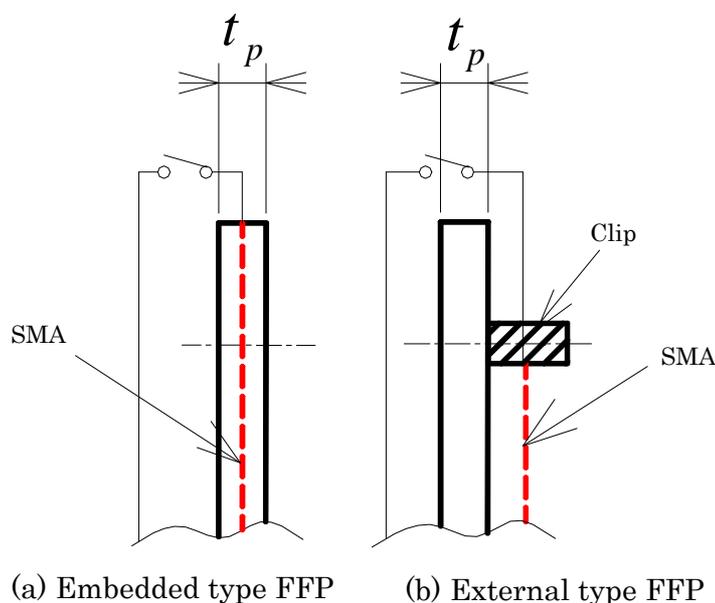


図 2.10 : FFP アクチュエータの種類

製作した FFP アクチュエータの概略を図 2.11 に示す。FFP アクチュエータのパラメータは柔軟プレートのヤング率 E [Gpa], ポアソン比 ν , 全長 L_g [mm], 幅 W_p [mm], 板厚 t_p [mm] に SMA のパラメータ (直径 ϕ [mm] \times 全長 L_s [mm]) で決定される。

本研究では, 高い熱を発生する SMA をアクチュエータとして採用しているため, 組み合わせる薄板は, 高耐熱性の材料を用いる。また SMA を構成する場合には絶縁をとる必要があるため, 薄板は非導電性の材料でなくてはならない。そこで, 耐熱性が高く, 柔軟に屈曲可能な非導電性のポリエチレンに注目した。柔軟材料として用いたポリエチレンフィルム (ダイヤホイル S100-350 ($t_p=0.35$ [mm])) : 三菱化学ポリエステルフィルム会社製) は, 調査したポリエチレンの中でも最も耐熱性, 伸展性が高く, 現在では, 100×100 [mm], 厚さ 0.35 [mm] に関して既製品として販売されている。これ以外の寸法を要求すると, コスト高になるため, 本論文では, このフィルムを実験材料として用いる。SMA は (トキ・コーポレーション製バイオメタル BMF250 直径 $\phi=0.25$ [mm]) を採用する。そして, ポリエチレンフィルムと SMA を耐熱樹脂のネジとナットで固定する。

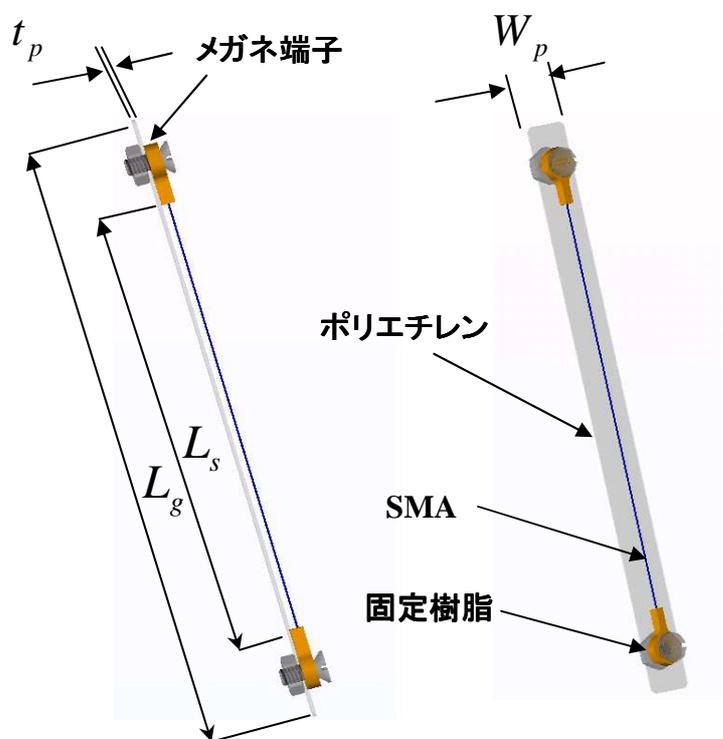


図 2.11 : FFP アクチュエータの構成

ポリエチレンプレートと SMA の材料特性を表 2.2 と表 2.3 に示す。本研究で採用したポリエチレン材料は耐熱性に優れている。使用温度は、 -70°C から 150°C の範囲で稼動可能なため、多くの環境に応用ができると考えられる。またアセトンやベンゼンのような強化学薬品にも対応できるため、例えば、金属の剛体で構成されたロボットでは介入できないガスや液体が発生している特殊な環境内や腐食が厳しい場所で働く柔軟歩行ロボットとしての応用にも期待がもてる。

表 2.2： ポリエチレンフィルムの諸元

MD(縦方向)	引張強さ		伸び率(%)
	N/[mm ²]	N/15[mm] 幅	
	13	88	150
TD(横方向)	引張強さ		伸び率(%)
	N/[mm ²]	N/15[mm] 幅	
	14	74	140
耐熱性	T _g (260 ^o C)		
使用可能範囲温度	(-)70~(+150 ^o C		
体積低効率	10 Ω ¹³ ·cm/常温		
吸水率	0.30%		
耐薬品性	塩酸(18%)	強度以下 (10%以内)	常温(20 ^o C) 20日間
	硫酸(70%)		
	アセトン		
	ベンゼン		
	クロロホルム		
特徴	耐薬品性, 耐熱, 耐水性に優れている		

測定法 JIS C-2318 によるショッパース式引張試験 (20^oC ± 2)

表 2.3： SMA (バイオメタル B250) の諸言

コイル直径	φ0.25 [mm]
発生力(負荷)	250 [gf]
運動ひずみ	4%
動作寿命	10000000回
駆動電流	0.58 [A]
駆動電圧	0.62 [V]
電力	0.36 [mW]
抵抗値	1 [Ω/m]
引張強さ	5 N/[mm ²]
質量(1m)	15.6 [mg]

2.4 FFP アクチュエータの基本動作

FFP アクチュエータの基本的な動作原理について説明する。本来 SMA は極性を持たない。したがって、SMA の両端部に配線を施し電圧印加 (ON) する。これにより SMA が急速に収縮し、それに伴ってポリエチレンプレートが変形し、ひずみ量 (変位) を得る。ON 時では、プレートにエネルギーを蓄積する。OFF 時では、SMA が初期の状態 (長さ) に戻ると同時にプレートも復元力によって元の形状に戻る。このように柔軟な薄板に ON-OFF を繰り返すことで得られるエネルギー、すなわち、薄板に蓄積された弾性エネルギーを運動エネルギーに変換させて駆動源に用いる。

FFP アクチュエータをロボットへ利用する場合は、中央のひずみ量 ξ を利用するタイプ (図 2.12) と片側を固定して先端のひずみ量 (変位) U_1 と W_1 を利用するタイプ (図 2.13) とに分けられる。

ON-OFF 信号によって FFP アクチュエータを湾曲・復元させ、弾性エネルギーを運動エネルギーへと変換させることを利用しながら、歩行ロボットの脚兼駆動源として応用すれば、単純な機構と制御の柔軟歩行ロボットが可能となる。

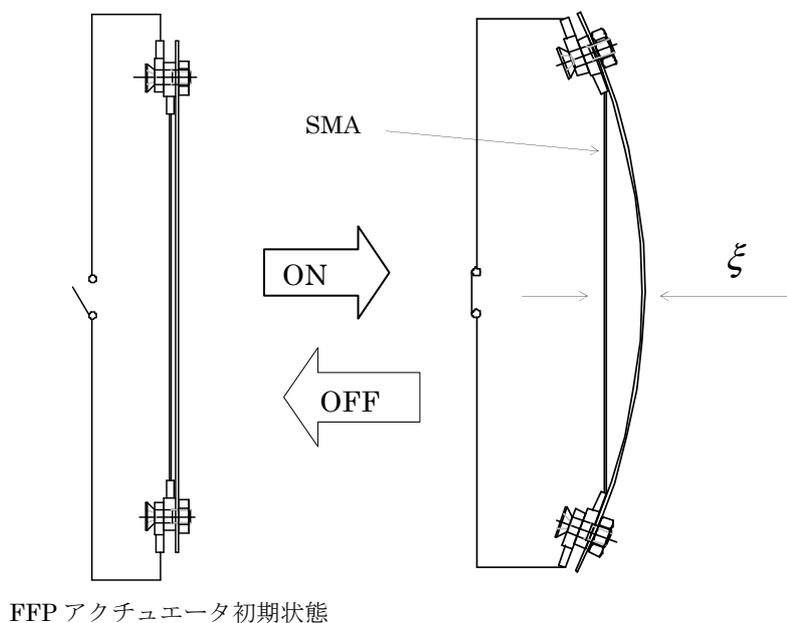


図 2.12 : FFP アクチュエータの動作原理 (中央ひずみ)

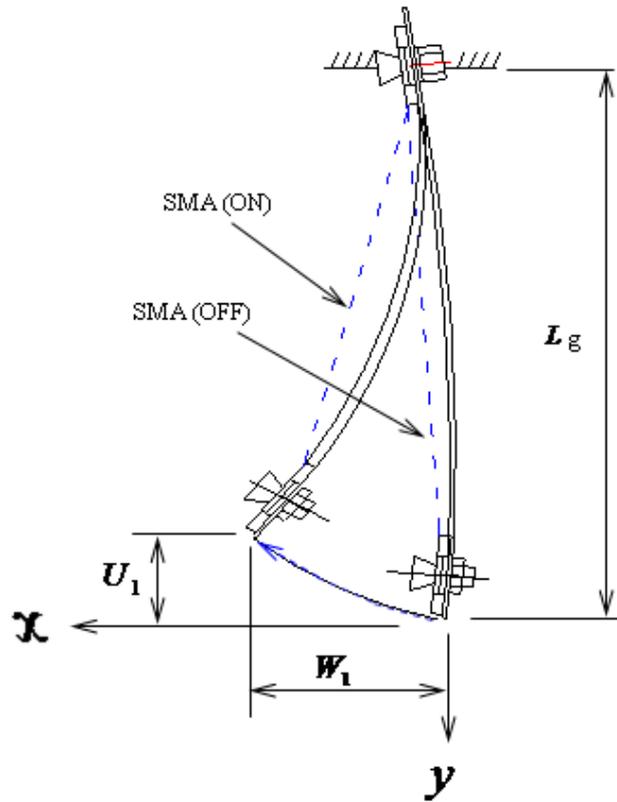


図 2.13： FFP アクチュエータの動作原理（先端ひずみ）

2.5 FFP アクチュエータの動特性

2.5.1 実験目的と実験システム

FFP アクチュエータをロボットの脚へと用いるには、まず歩行のタイミングを決定するために FFP アクチュエータの動作を確認し、その結果を制御側へとフィードバックする必要がある。また、ロボットの移動は、動作スピードとストロークが重要である。したがって、速く歩行させるための FFP アクチュエータの最大変位と応答速度を確認する必要がある。そこで、FFP アクチュエータの動特性について実験的に評価し検討を行った。実験は図 2.14 に示すように 2 台のカメラを用いた 3 次元画像処理装置で測定する。実験に用いる FFP アクチュエータは、実際に脚として利用可能な 2 つの変位、すなわち、 U_1 と W_1 を求めるタイ

プで行う。次に、アクチュエータの片側を固定して、ON-OFF 時の X 方向、Y 方向の時間に対する最大変位について確認する。3 次元画像処理装置については、株式会社応用計測研究所の「D I A d e m」測定装置を用いて計測した。

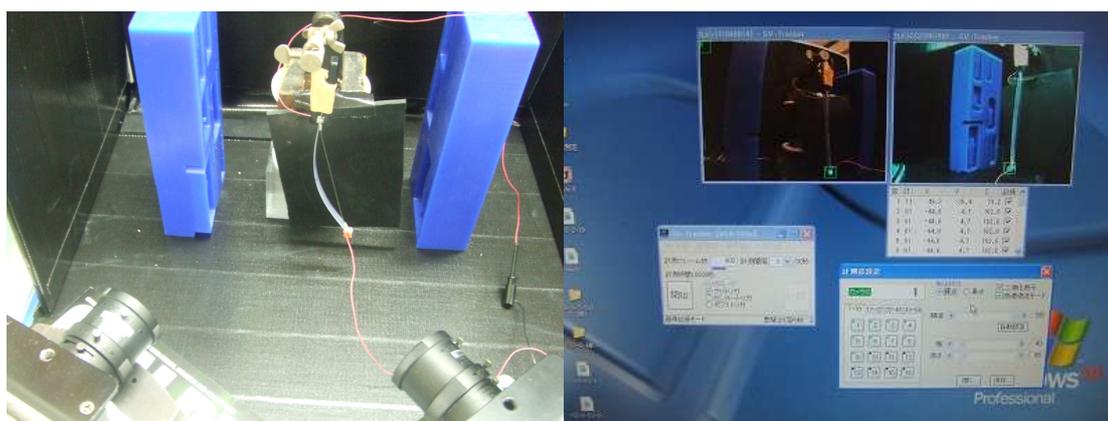
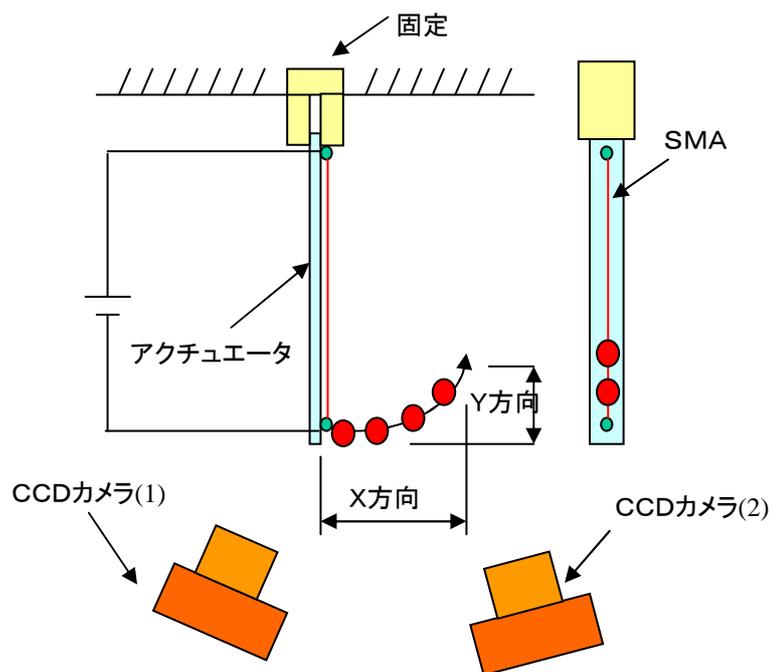


図 2.14： FFP アクチュエータの基礎実験の様子

FFP アクチュエータの特性について評価する手順は次の通りである。(図 2.15)

まずは、電圧印加によるステップ応答によって、(1)に示すように、薄板の長さ L_g を変更して、最大変位の値を求める。その結果を用いて(2)薄板の幅 W_p の最大変位を求める。最後に FFP アクチュエータの駆動電圧[V]を決定する。FFP アクチュエータの板厚は 0.35[mm]、使用環境温度は常温で約 23°Cとする。

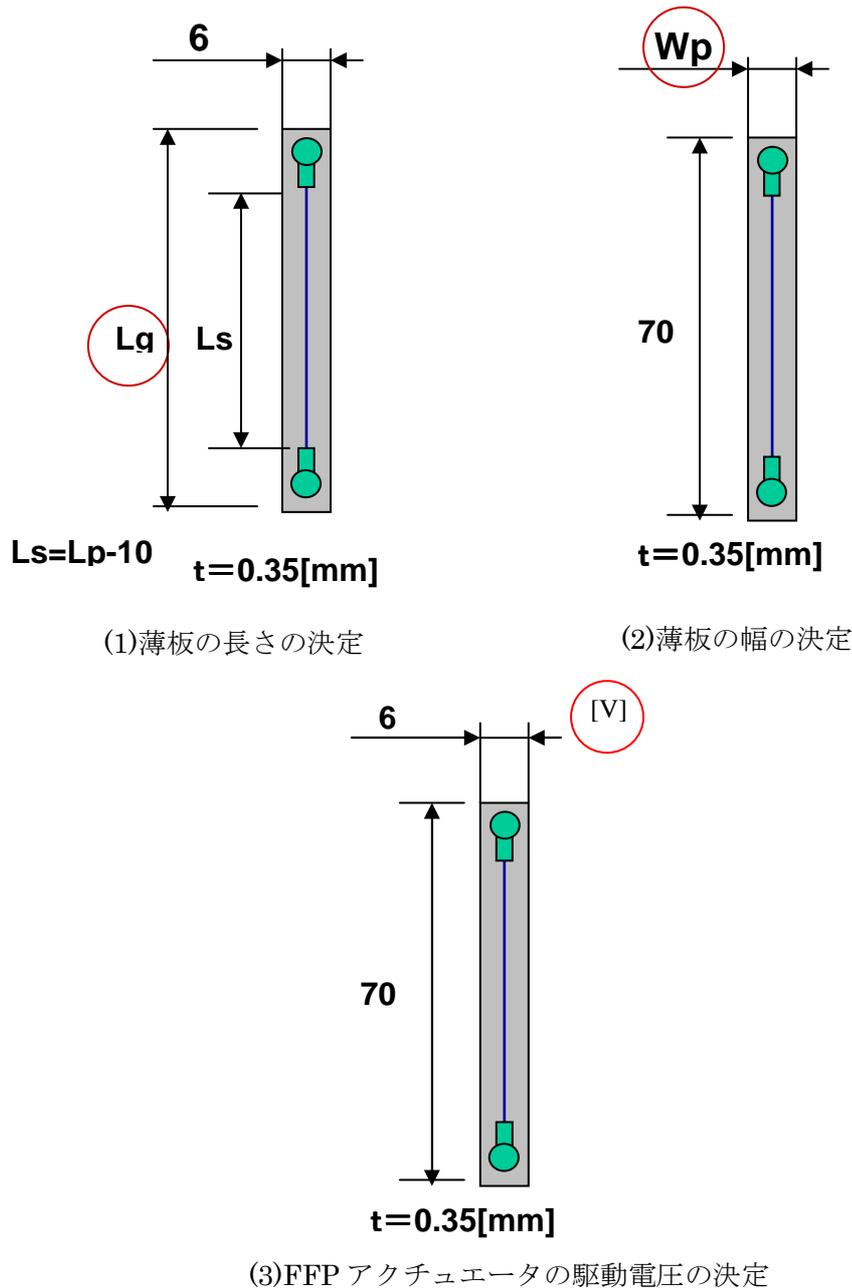


図 2.15 : FFP アクチュエータの評価手順

2.5.2 FFP アクチュエータの長さの決定

全身が柔らかい歩行ロボットの脚となるには、機構そのものが柔軟でありながら、強度を確保しているものでなくてはならない。そこで、基礎実験として、前節で述べたポリエチレンプレート、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 、 0.35mm を 1mm ずつスライス状に切り出し、縦に配置して、それと直角にして約 $10[\text{g}]$ のおもりをかける実験を行った。(図 2.16 参照)。その結果、 5mm までは、おもりに耐えられず大きな湾曲を示したが、 $6[\text{mm}]$ 幅になると耐えられることを確認した。そこで、FFP アクチュエータの最小幅を 6mm 、薄板の厚みは 0.35mm で固定寸法として実験を行う。薄板の長さはそれぞれ $10[\text{mm}]$ から $100[\text{mm}]$ まで 10mm 単位で長さを変え、電圧 $3[\text{V}]/0.7[\text{A}]$ によるON信号のひずみ特性を確認する。このとき、薄板の長さ L_g とSMAの長さ L_s は同じ比で変更する。

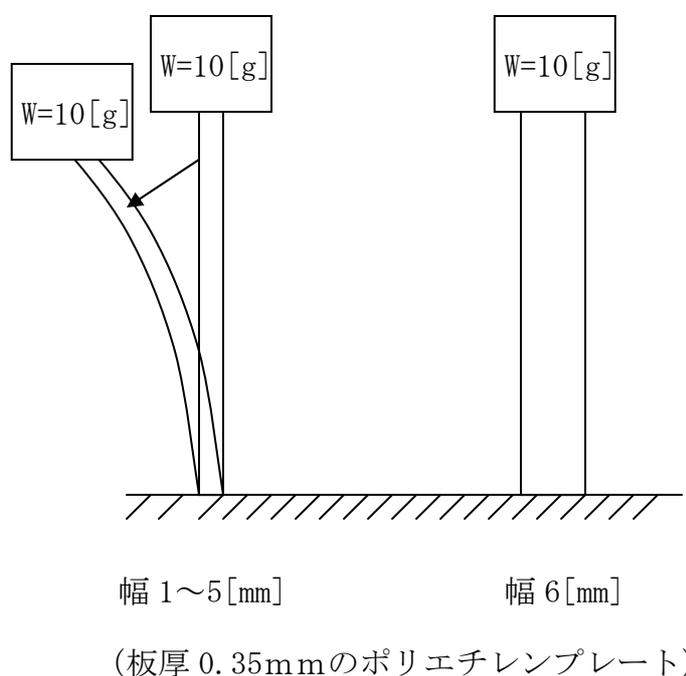


図 2.16 : 基礎実験

実験結果を図 2.17 に示す。それぞれ電圧印加時での薄板の側面をプロットしたものである。プレート長さが 70[mm]の時に約 23[mm]の最大変位を得られることが確認された。これをピークに減少していく様子が見える。

この原因として、SMA の張力が薄板の長さの拡張と共に保たれなくなり、減少したのではないかと考えられる。したがって、変位を確保するためには、SMA の本数を増やすか、プーリにより安定を確保するなどの方法が考えられる。しかしながら、本研究では、単純な構造と制御を目指しているため、70[mm]の薄板と 60[mm]の 1 本の SMA アクチュエータを採用する。

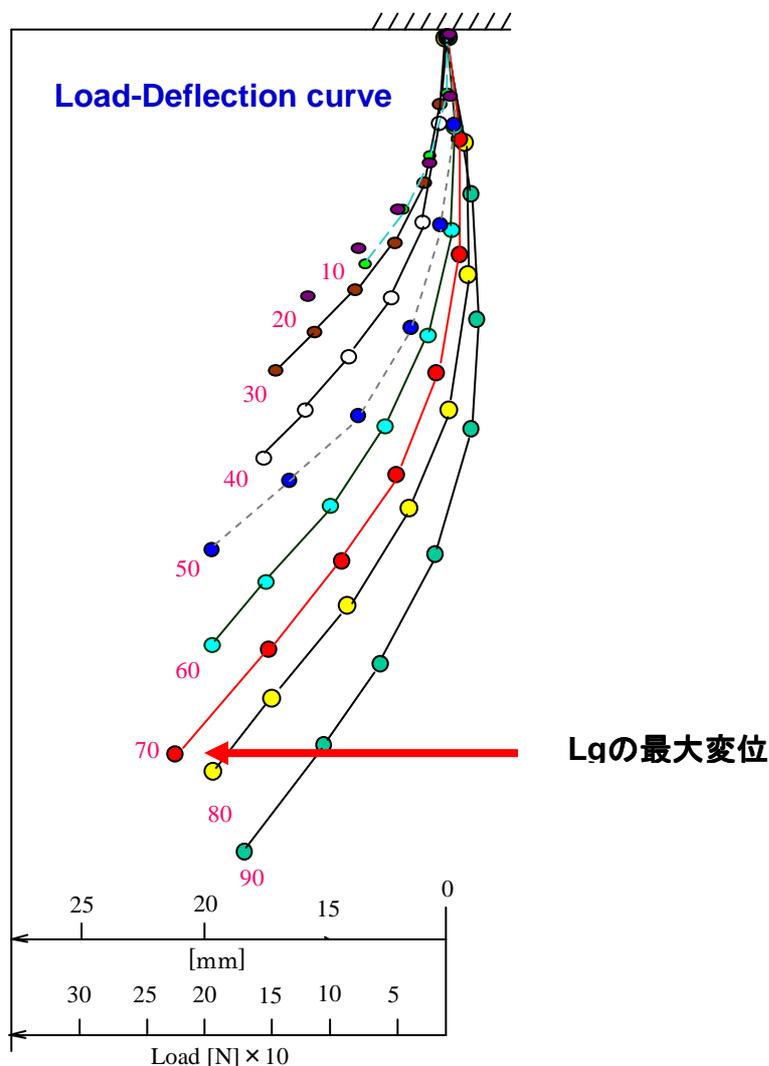


図 2.17 : FFP アクチュエータの長さ方向の変位

2.5.3 FFP アクチュエータの幅の決定

前節で 70[mm]の長さのアクチュエータが最大変位を確保できることがわかった。この実験結果を元にして、次に 70[mm]の長さで 0.35[mm]の板厚みを固定値として、薄板の幅 W_p を最小 6[mm]から順に、20[mm], 40[mm], 100[mm]と増やして評価する。実験結果を図 2.18 に示す。

FFP アクチュエータはわずかな時間の電圧印加で大きな湾曲挙動を示し、OFF 後はほぼ滑らかに初期状態に戻り整定する。したがって、ON 時では速く応答し、OFF 時では遅い応答であるため、ON-OFF のタイミングが非対称であることがわかる。 W_1 の変位はでは 6[mm], 20[mm]幅の時、約 23[mm]~24[mm]の最大変位量、 U_1 では 7[mm]の最大変位量が得られることがわかった。また数回連続して試行したが、同結果が得られたことから、再現性が高いことがわかった。FFP アクチュエータをロボットの脚として見立て、直接用いた場合を考慮すると、ON 信号によって得られる値、すなわち、 W_1 はロボットの歩幅を意味し、 U_1 はロボットの脚挙げ高さを意味する。したがって、6[mm]~20[mm]幅のいずれかのアクチュエータを採用することになるが、本研究では、より単純な構造の柔軟歩行ロボットとして開発を行うため、できるだけコンパクトになるような寸法がよい。その結果、薄板の幅を 6[mm]として決定した。

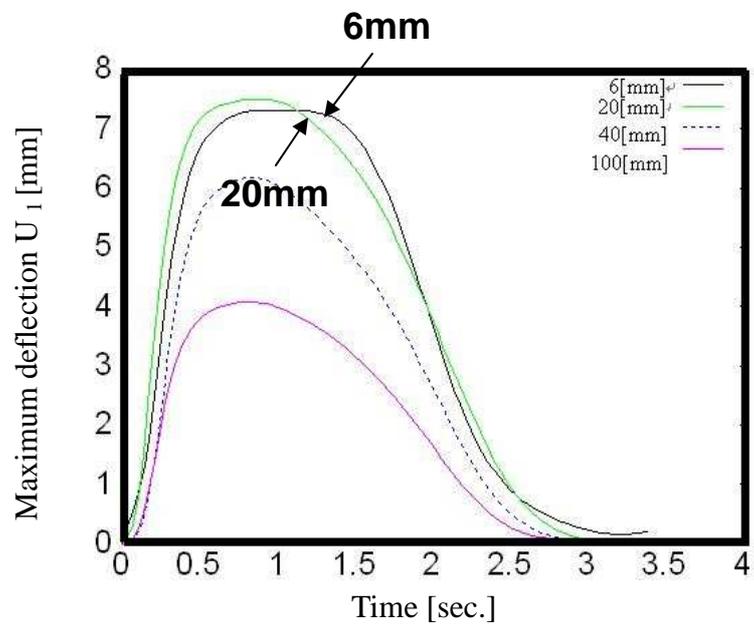
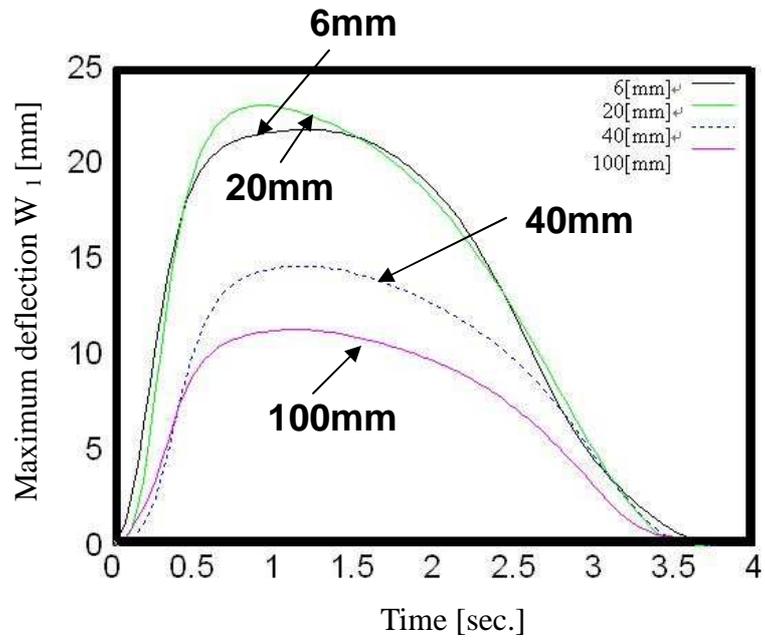


図 2.18 : FFP アクチュエータの幅方向の変位

2.5.4 FFP アクチュエータの駆動電圧の決定

前節までの結果より，柔軟歩行ロボットとして，プレートの長さ 70[mm]，幅 6 [mm]，SMA の長さ 60[mm]の FFP アクチュエータを採用して実験を行う．

本節では，歩行ロボットをより速く移動させるため，電圧印加により，プレートを変形させた後，初期位に戻るまでの状態について検討する．

プレートの最大変位，23[mm]に達するため時間を確認するため，2[V]，2.5[V]，3[V]，3.5[V]，4[V]と0.5[V]の単位で電圧を変更していく．この時，電流は0.7[A]で固定する．電圧印加により FFP アクチュエータを湾曲させ，電圧解除により自然放冷させて初期状態に復帰させる．これを1サイクルとする．

実験結果を図 2.19 に示す．2[V]では，電圧印加後，23[mm]に達した後，初期位置に戻るまでに約 5 秒を要する．3.5[V]以上の電圧印加時では，急速にプレートは湾曲し，初期位置に戻るまでに 2.5 秒と速い応答を示した．また 3.5[V]以上の電圧をかけても状態は変わらないことが確認された．従って，柔軟歩行ロボットの移動速度を速めるために，FFP アクチュエータの動作スピードを高速に駆動できる 3.5[V]/0.7[A]を採用する．

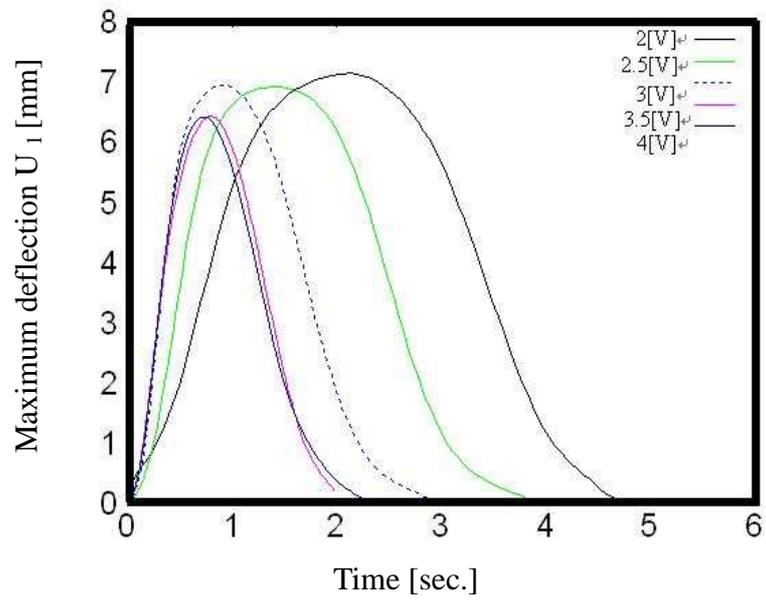
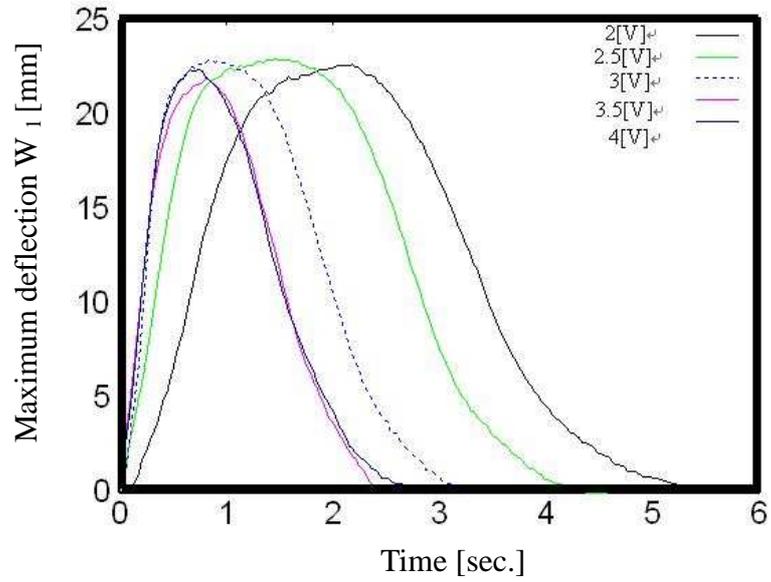


図 2.19 : FFP アクチュエータの電圧と変位の関係

2.6 柔軟歩行ロボットの脚への応用

2.6.1 FFP アクチュエータの変位量と推進力の関係

柔軟歩行ロボットの脚として大きな変位を得ることは重要である。FFP アクチュエータは、より単純な構造で蓄積されるエネルギーが大となるようなプレート設計がよい。また蓄積されたエネルギーはロボットの推進力となる。そこで、FFP アクチュエータの推進力を明らかにするため、片側端部を固定し、もう片側を自由端とする片方持ち梁として最大たわみ量を算出する。FFP アクチュエータの断面が全長にわたって一様とし、板厚を t_p 、幅を W_p とする。この端部に x 方向の力 P が作用した時、図 2.20(破線)のようなたわみ曲線を得る。ここで $\delta/L > 0.2$ となる場合、片持ち梁の理論式を利用すると、最大たわみ $\delta(\max)$ および最大応力 $\sigma(\max)$ はせん断方向を考慮すると次のように書ける。

$$\delta(\max) = \frac{4pl^3}{EW_p t_p^3} (1 - \nu^2) \quad (2.1)$$

$$\sigma(\max) = \frac{6pl}{W_p t_p^3} \quad (2.2)$$

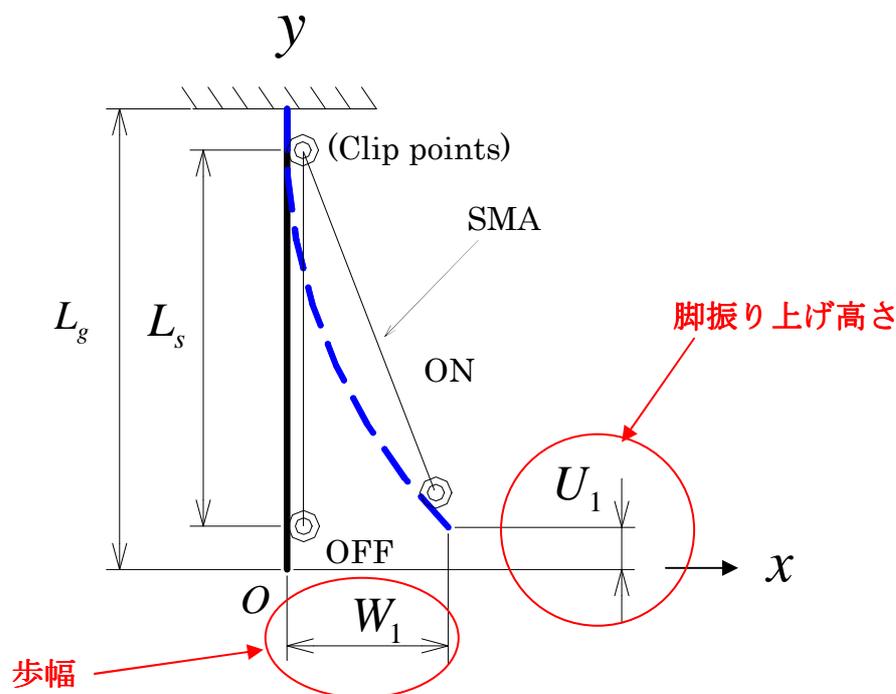


図 2.20： FFP アクチュエータの変位量と推進力の関係

ここに、 ν はポアソン比を表し、 E はヤング率である。仮にこのモデルを歩行ロボットの脚として配置した場合、図 2.20 に示すように電圧印加に伴って、 O 点(初期位置)から x 方向に湾曲する。この時得られるたわみ量 W_1 が脚の歩幅となり、 y 方向のたわみ量 U_1 が脚の振り上げ高さとなる。また脚の先端面と床面との間には動摩擦が生じる。この動摩擦を f とすると脚単体の推進力 F は(1)式を用いて下記のように表せる。

$$F = \frac{\delta(\max)Ebt^3}{4l^2(1-\nu^2)} - f \quad (2.3)$$

ここで、SMA の長さ L_s 、薄板の長さを L_g とし、SMA の固定箇所は二重円マーク◎で表記する。

2.6.2 FFP アクチュエータの荷重と変位の関係

材料の「柔らかさ」は、ヤング率とポアソン比で決定され、発生応力は材料の弾性率に起因する。今日、柔軟材料として注目されている高分子ゲルなどは、電圧印加に従ってヤング率が増大するために、フックの法則が成り立たなくなり、副次的な施しが必要になると考える。したがって、直接移動機構の脚として用いる場合はヤング率が一定であることが望まれる。

ここで、図 2.21 の点 O から x 方向へ力を加えた時に得られる変位量と力の測定を行う。試作した FFP アクチュエータは、ポリエチレンプレート(ヤング率 $E = 4[\text{Gpa}]$ 、ポアソン比 $\nu = 0.44$ 、全長 $L_p = 70[\text{mm}]$ 、幅 $W_p = 6[\text{mm}]$ 、板厚 $t_p = 0.35[\text{mm}]$)である。図に示すように、薄板の端に数グラム～数十グラムのおもりを順にかけて行き、薄板の変位と力について求めた。荷重による W_1 と U_1 についての具体的な実験結果を図 2.22 にプロットした。その結果約 2.6[g]すなわち、0.025[N]の時、 W_1 では最大 20[mm]、 U_1 では最大 6[mm]の変位が確認された。

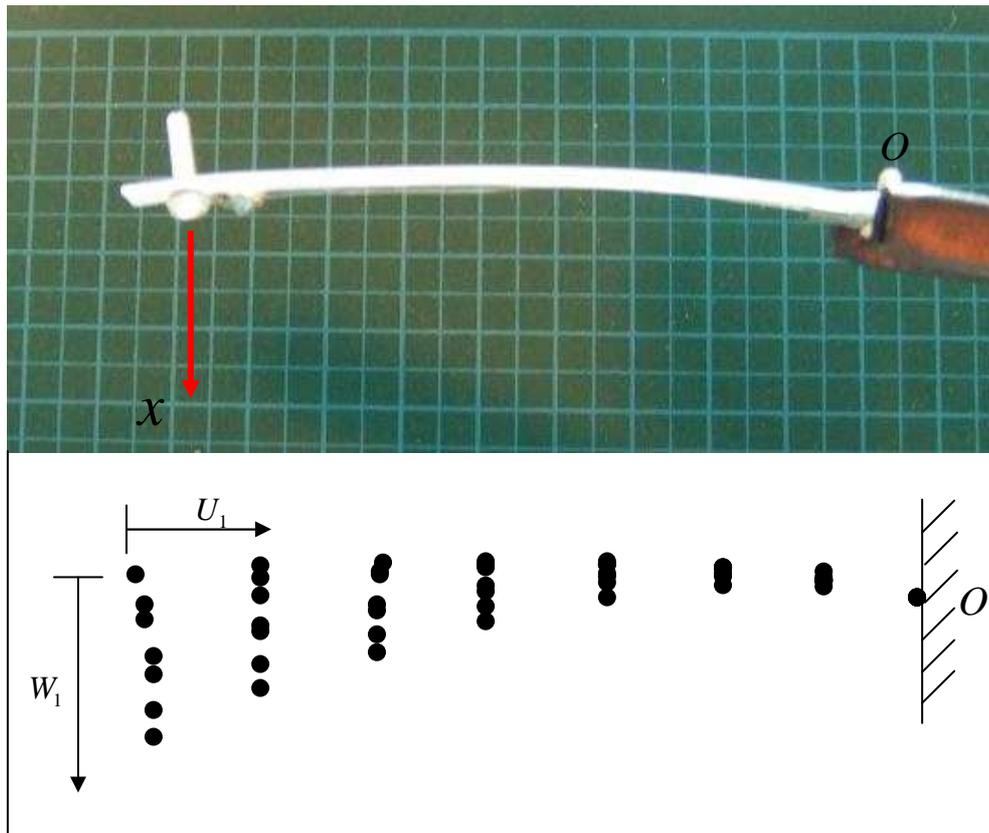


図 2.21 : 荷重による薄板の変位結果

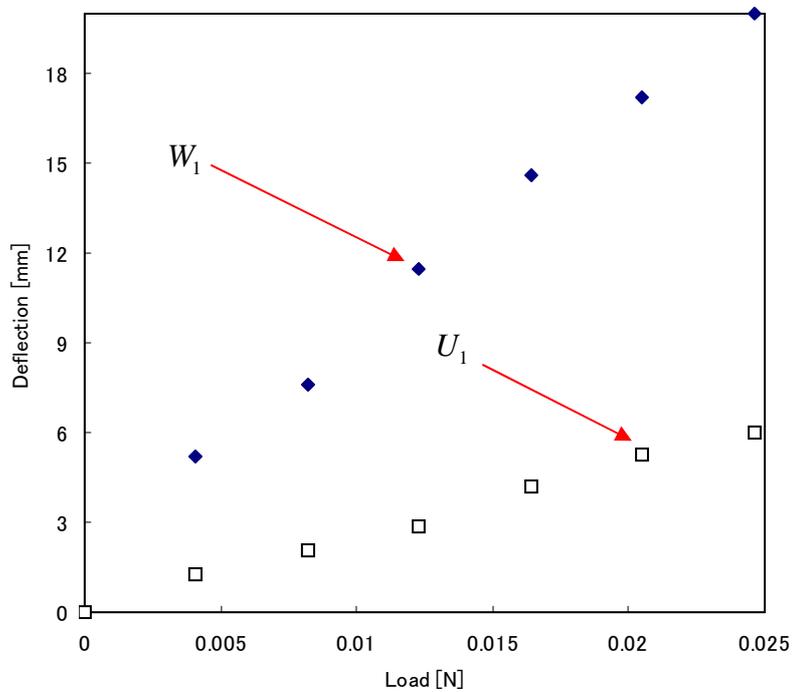


図 2.22 : FFP アクチュエータの荷重と変位の関係

2.6.3 FFP アクチュエータの材料強度の比較

本研究では、SMA の選定に基づいて、薄板の選定では、高耐熱性、非導電性の強ポリエチレン材料を採用している。仮に、可撓性材料としてポリエチレン以外の別の非導電性薄板材料で FFP アクチュエータを構成することを考える。材料の変位と力の関係を式 (1) および式(2)より求めた。算出した結果を図 2.23 に示す。全長 $L_p=70$ [mm]，幅 $W_p=6$ [mm]，板厚 $t_p=0.35$ [mm] の薄板と仮定し，柔軟プレートの材料は，アルミ ($E=71$ [Gpa]， $\nu=0.34$) 樹脂 ($E=11$ [Gpa]， $\nu=0.35$)，ポリカーボネイト ($E=2.3$ [Gpa]， $\nu=0.25$) およびポリプロピレン ($E=1.5$ [Gpa]， $\nu=0.25$) とし，それぞれそれぞれのたわみ量の比較を行った。

アルミは最大変位量が 1[mm]以下となり，試作した FFP アクチュエータと同等の変位量を得るには，0.15[N]すなわち，約 15 倍の力が必要になる。また板厚を薄くすることによって同じの変位量を得ることができるが，床面との接触面積が，歩行への大きな障害となる可能性がある。逆にポリプロピレンのような材料は，大きな変位を得られるが，同時に強度の低下を招き，歩行ロボットへ実装するには難しい。したがって，柔軟歩行ロボットを構成する材料として，ポリエチレン材料は有効性の高い材料であると考えられる。

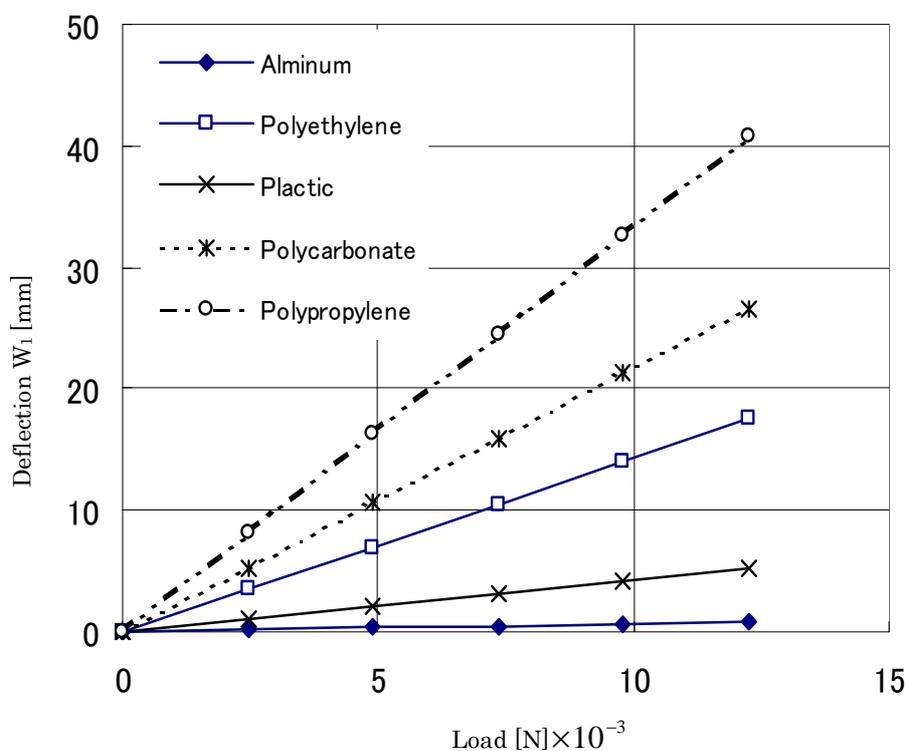


図 2.23 : 薄板素材を変更した時の荷重と変位の関係

2.7 まとめ

本章では、柔軟歩行ロボットに用いる柔軟アクチュエータを提案するため、現在の柔軟アクチュエータの動向について、調査し比較した。柔軟アクチュエータに関する研究は、幅広く行われており、文献の出典も様々である。そのため、本章で取り上げられなかった研究も多く存在すると思われる。その中でも、従来から応用が多くなされている形状記憶合金 (SMA) は、機械的特性に優れたアクチュエータである。本研究では、柔軟歩行ロボット用として、SMA を採り上げ、これに高耐熱性、非導電性の薄板を組み合わせた FFP アクチュエータを提案、製作し、動特性について評価・検討を行った。本章で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 従来の柔軟アクチュエータの動向について調査し、比較を行った。その結果、SMA は機械的特性に優れており、幅広い分野で実現されている実績がある。そこで、柔軟歩行ロボットの駆動源として、SMA を採用した。
- (2) SMA と高耐熱性、非導電性の薄板を組み合わせた柔軟なアクチュエータを提案した。本論で、このアクチュエータを Flexible Flat Plate アクチュエータ (以下 FFP アクチュエータと省略) と命名した。
- (3) ロボットの歩行には、動作スピードとストロークが重要である。そこで、ロボットの歩行実現するためのタイミングの決定と移動速度を向上させるために、FFP アクチュエータの動特性を実験により評価した。以下に実験結果を述べる。

大きな動作ストロークを得るには、板厚 0.35[mm]、幅 6[mm]、全長 70[mm] のポリエチレンプレートと、SMA 直径 0.25mm、長さ 60[mm] の組み合わせがよい。この時の最大変位量は、X 軸方向では約 23[mm]、Y 軸方向へは約 7[mm] である。また、このアクチュエータを高速に駆動させるための電圧電流値は、3.5[V], 0.7[A] である。

- (4) FFP アクチュエータの荷重と変位の関係を求めた。2.6[g] すなわち、0.025[N] の時、 W_1 では最大 20[mm]、 U_1 では最大 6[mm] の変位が確認された。また、ポリエチレンとそれ以外の材料の機械的特性について比較し、ポリエチレン薄板の有効性について言及を加えた。

第3章

可撓性材料を用いた歩行ロボット

3.1 はじめに

2章では、柔軟歩行ロボットのアクチュエータとして、SMAと薄板形状のポリエチレンプレートで構成されたFFPアクチュエータを提案した。現在、多くの柔軟アクチュエータが報告されている。しかしながら、それらを歩行ロボットへと適用した研究は非常に少なく、実際に実現されているものはない。したがって、柔軟なアクチュエータを歩行ロボットへどう導入するかについて議論を行う必要がある。本章では、FFPアクチュエータを柔軟歩行ロボットへ用いる場合について述べ、次にFFPアクチュエータの種類とそれらを利用した柔軟歩行ロボットの歩行形態についていくつか提案する。次に、従来の課題であった液体からの離脱と柔軟歩行ロボットの移動速度の向上に向けて、それぞれの立場からロボットを製作して歩行実験を行い、本研究の有効性を明らかにする。

3.2 柔軟歩行ロボットの基本概念

ロボットが人間と接触した場合を想定すると、剛体で構成されたロボットは、大きな危害を加え可能性がある。しかし、全身が柔軟なボディで構成されたロボットができれば、人間とロボットの共存における安全性を向上することが可能である。しかしながら、柔軟歩行ロボットの分野においては、開発に関する研究報告が少なく、歩行ロボットは未だ実現されていない。柔軟なアクチュエータをどのようにロボットへと導入すればよいかといった議論がなされていないのが現状である。

現在、柔軟な構造材料は、日常の中に様々に存在する。ゆえに、柔軟歩行ロボットを開発するためのアプローチは様々であると考えられる。

例えば、2章で製作した FFP アクチュエータは、ドライな環境での利用が可能で、工作機械や特殊な加工を施すことなく、容易に加工と組み立てができるアクチュエータである。このようなアクチュエータの長所を生かして、ロボットのバリエーションをレゴのように自在に組み替えることができれば、柔軟歩行ロボットの応用範囲は格段と高まるものと考ええる。

従来の柔軟ロボットは、「柔らかさ」を表現する一方で、低剛性で使用環境に制限があり、移動速度が遅いといった素材自身の問題があった。したがって、ロボットの実現化に向けて、これらを改良するためには長い時間を要すると思われる。しかしながら、柔軟で剛性のある素材は我々の身近に多く存在している。例えば、誰でも一度は手にしたことのある紙は、そのまま利用すると、重さに耐えない状況が発生する場合もあるが、形状を折り曲げたり、重ねたりすることによって、構造的な剛性を強化することができる(図 3.1)。また、情報の記録、伝達、包装、吸収などの用途だけではなく、多くの優れた性質があり、その種類も新聞紙から金属合金紙まで幅広く日常生活に実在し、容易に入手することが可能である。

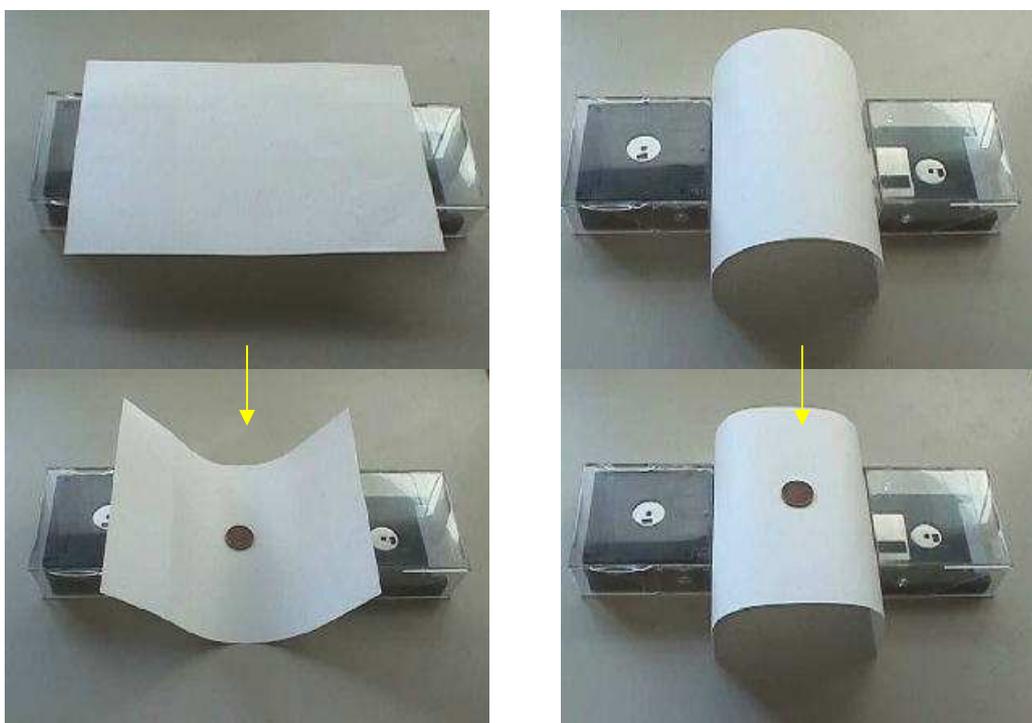


図 3.1： 紙の強度の例
 (熊本国府高校パソコン同好会資料参照)

そこで、紙で構成された柔軟歩行ロボットについて検討してみる。ロボットのコンセプトフローについて図 3.2 に示す。まず、Step 1 で、目的のサイズの紙を用意する。次に Step 2 で使用目的に合わせた構造をイメージし、設計（検討）する。最後に、Step 3 で設計通りに組み立てを行って、最後にアクチュエータを取り付ける。以上のように、柔らかい材料を選定し、折り曲げることによって形状と剛性を確保し、ロボットを簡単に製作することが可能である。ロボットのワークプロセスをできるだけ少ない条件と手順で示すことにより、柔軟歩行ロボットのメリットや応用分野をより拡大することが期待できるであろう。さらに、この考え方を基にして、FFP アクチュエータをロボットへと応用する場合について考察する。（例としてあげた構造については折り紙のホームページ[59]を参照。）

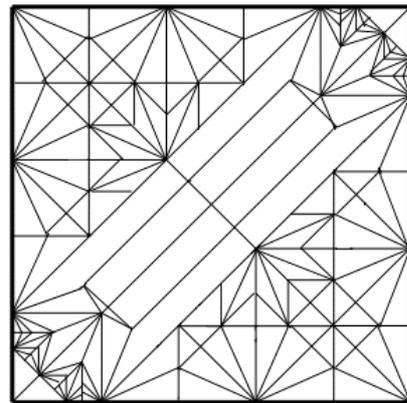
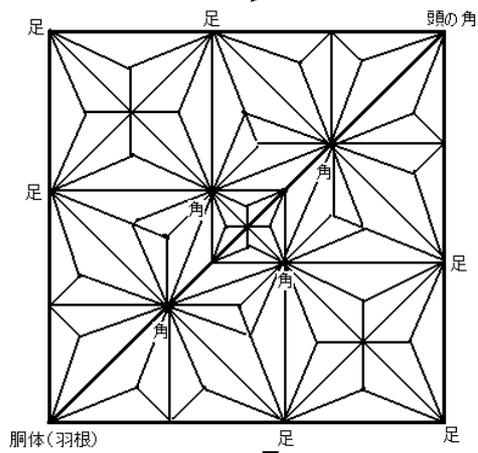
複雑な加工を一切必要としない FFP アクチュエータは、簡単に好みの形状へと切り張りしてロボットを構成し、駆動できるという大きな利点がある。例えば、図 3.3 に示されるように、ロボットの設計後に、用途や状況に合わせてアクチュエータやリンクを修正変更し、簡単に組み立てることができる。FFP アクチュエータや柔軟リンクは軽量で、加工が容易であるため、直接作業現場に素材を運んで、その状況を確認し、すばやく製作することもできる。具体的には、探査などの作業目的で、狭い場所での作業を必要とするロボットを現場で確認して組み立てなくてはならない場合でも、瞬時に可撓性材料を形状加工して、状況に応じた小さなロボットへと組み立てることができる。また、運搬移動が必要であれば、運搬スペースが確保された路面の凹凸やガタに対して強化されたロボットへと加工、組み立てを施して、歩行をさせることも可能である（図 3.4）。このように、使用目的に応じたロボットを簡単に製作することで、柔軟歩行ロボットの活躍の場がより広がると考える。

さらに、柔軟歩行ロボットを容易に制御しながら、安定的に歩行させるためには、材料のヤング率が一定であることが望まれる。材料の「柔らかさ」は、ヤング率とポアソン比でほぼ決定され、発生応力は材料の弾性率に起因する。したがって、高分子ゲルなどのように、電圧印加に従ってヤング率が増大する材料で構成された歩行ロボットは、制御が複雑になるだけでなく、歩行時に不安定な状態を招き、動作に大きく影響する可能性がある。このような材料を現場で加工調整することも難しい。したがって、可撓性材料と ON-OFF で駆動するソフトアクチュエータの組み合わせは、機構や制御が全体的にシンプルになると考える。

Step 1

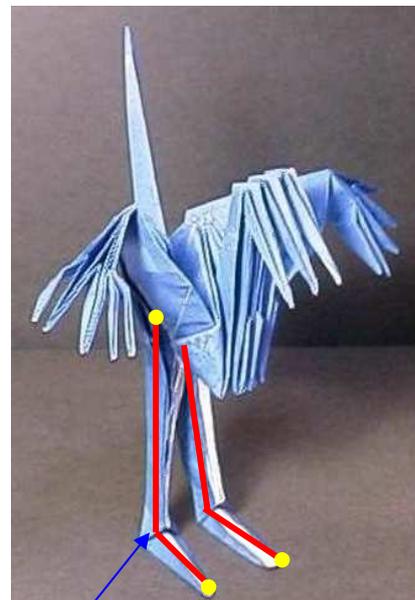
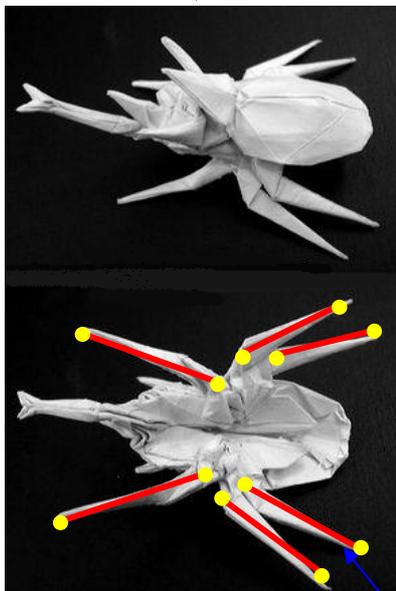


Step 2



それぞれの用途へ加工

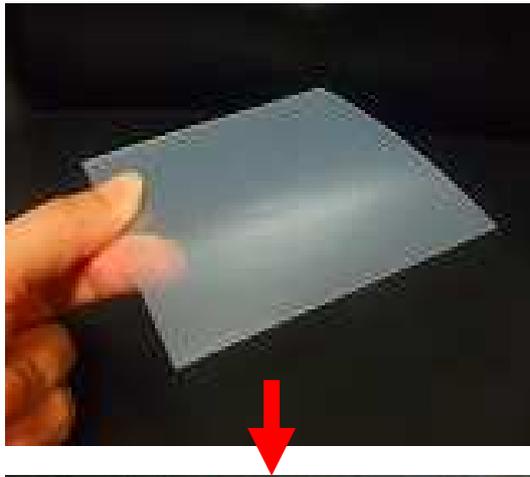
Step 3



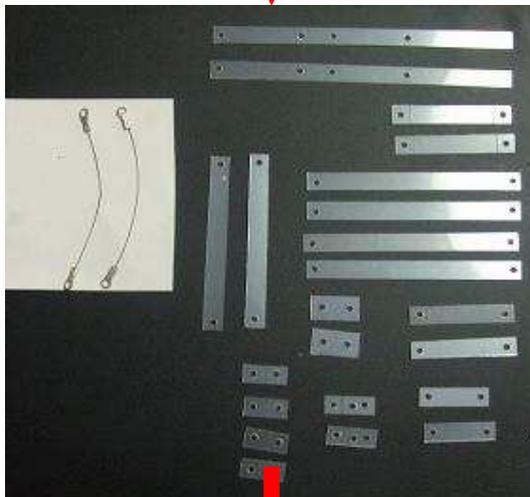
柔軟なアクチュエータ (SMA) の取り付け

図 3.2 : 紙ロボットのコンセプトフロー

Step 1



Step 2



Step 3

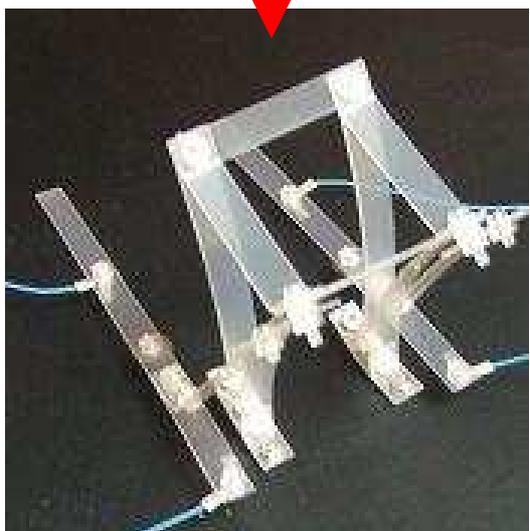


図 3.3 : 柔軟歩行ロボットのコンセプトフロー

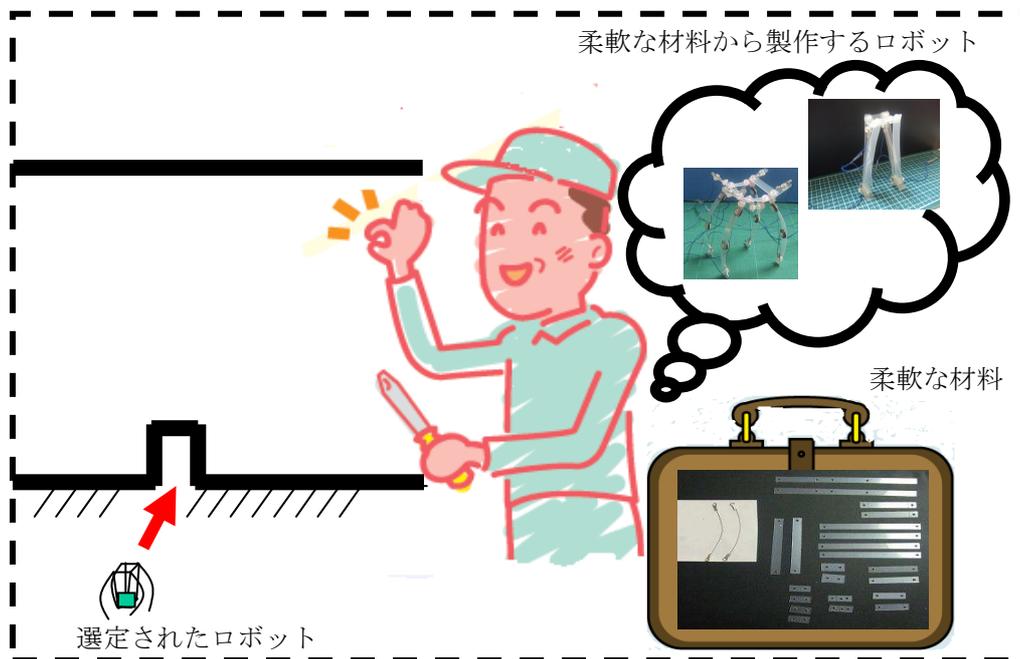


図 3.4： 柔軟歩行ロボットの応用例（イメージ図）

3.3 FFP アクチュエータの種類

状況や環境に応じて、目的のロボットを簡単に素早く製作し、歩行実現させることで、柔軟歩行ロボットの活躍の場はより拡大する可能性がある。一つのアプローチとして、FFP アクチュエータおよび柔軟歩行ロボットを選定する前に、アクチュエータの種類をあらかじめ用意しておくことで、作業効率が向上する。FFP アクチュエータは基本的に、耐熱性と絶縁性のある柔軟なプレートに SMA を取り付けた縦長形状の形状である。このアクチュエータを柔軟歩行ロボットの脚として配置し、駆動させる。FFP アクチュエータ一枚に対して自由度は1である。自由度を増やすことで複雑な動作も可能となる。一般的に動作が複雑になると制御も複雑になるという問題が生じる。一方で、FFP アクチュエータは自由に加工でき、ON-OFF 制御というシンプルな方式で構成されている。そして、これに追従してロボットが柔軟に駆動する。したがって、加工や組み合わせによっては、簡単な制御で、複雑な動作も可能であると考えられる。そこで、ON-OFF 制御による FFP アクチュエータの種類について図 3.5 に示す。

それぞれをアルファベットの形になぞり，C型～V型 FFP アクチュエータと命名する．電圧印加した場合(ON)と解除した場合(OFF)の形状を示す．ここで提案した方式は一例である．例えば，アクチュエータの長さや配置を変えれば，より複雑な動作も可能であると考える．また，自由に切り出した形状を折り曲げるなどして，部品点数の少ない構造として組み合わせれば，軽量小型のロボットも可能である．本研究は基礎実験のため，単純なアクチュエータをいくつか製作し，歩行実験を行う．

Type	Electrical current OFF	Electrical current ON	Type	Electrical current OFF	Electrical current ON
C			K		
E			L		
F			M		
H			T		
I			V		

図 3.5： FFP アクチュエータの種類

3.4 柔軟歩行ロボットへの導入

FFP アクチュエータを歩行ロボットに配置する場合について述べる。FFP アクチュエータは、単純な構造であるため、(a)アクチュエータそのものが体の一部として利用する場合と(b)柔軟歩行ロボットの機体をサポートする場合とに分けて使うことができる。現在、ロボットの歩行形態は様々に存在する。簡単な構造と制御で歩行するロボットとしては、ロボット自身の力学的なダイナミクス（重力と慣性力）のみを使って歩行する受動ロボットや SMA を利用して伸縮を繰り返しながら歩行するシャクトリ型の歩行形態などが挙げられる。本研究の目的は、柔軟歩行ロボット分野の拡大である。そこで、単純な制御で移動できるこれらのロボットをまずは参考にして、柔軟歩行ロボットのプロトタイプの開発を試みる。

3.4.1 柔軟歩行ロボット(振り子歩行)

ロボット機構を外側から支援しながら歩行をするための FFP アクチュエータとして、T 型 FFP アクチュエータを製作した。図 3.6 に概要と製作した T 型 FFP アクチュエータ (T 型-FFP と省略する) 示す。長さ 100[mm]、幅 6[mm]の薄板に約 50[mm]の SMA テンション保護機構を介して固定する。次に、アクチュエータと垂直の位置に配置した誘導プレートをジョイントプレートで固定する。アクチュエータの総重量は約 1.43[g]である。誘導プレートはアクチュエータが屈曲すると同時に、ロボットの体を前方方向へ押し出す役割をする。取り付け角度は、ロボット足底部と腰部との二点を結ぶ角度と平行である $115^{\circ} \pm 5^{\circ}$ の範囲内で固定した。T 型-FFP は、薄板の中央のたわみ量を駆動源として利用する。電圧 OFF から ON へ信号が変わると、SMA テンション保護機構を介して SMA が収縮し、薄板が湾曲する。同時に、誘導プレートは初期状態の 115° の取り付け角度から 125° に広がる。この動作を利用し、ロボットを前へと押し出す。テンション保護機構は、歩行時に SMA の収縮による緩みを保護するために取り付けた。3.5[V]/0.7[A]の電圧印加の時では、15mmの中央の歪量を得ることが実験よりわかった。このたわみ量を利用し、ロボットの機構を外部からサポートしながら歩行実現する。ロボットの構造について図 3.7(a)に示す。T 型 FFP アクチュエータは図 3.7(b)のロボットの脚部の外側に位置するように固定する。足底にはポリエチレンプレートの裏側に柔軟なスポンジを取り付けている。このスポンジの役割は、床にわずかな凹凸があると床反力により足底と接地面との間に

摩擦の差が生じ、それが一定の信号で入出力している制御系に影響を与え、歩行の乱れが起こる。そこで、足底に柔軟なスポンジを取り付けるようにした。製作したロボットを図 3.8 に示す。ロボットは、高さ 70[mm]、幅 34[mm]、総重量は 5.5[g]である。ロボット機構と T 型 FFP アクチュエータを取り付ける場合には、取り付ける角度や位置によって、移動距離や制御系に影響を与える。したがって、FFP アクチュエータと機構が歩行実現の最中に接触しないように、注意して固定する必要がある。

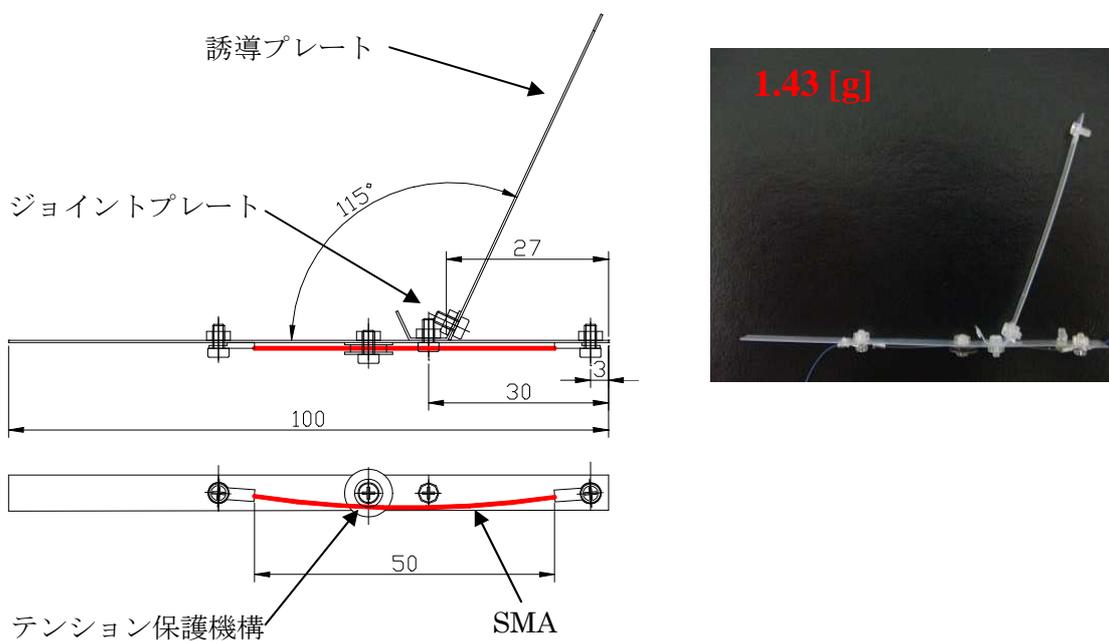
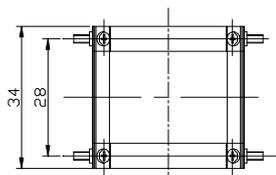
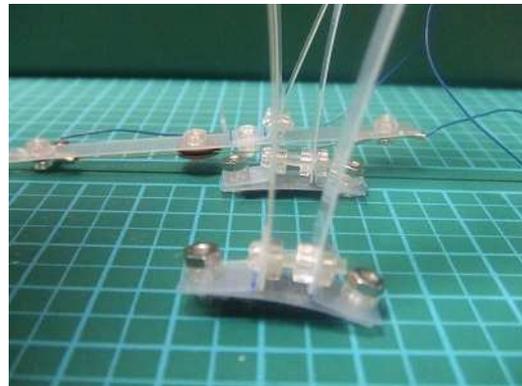
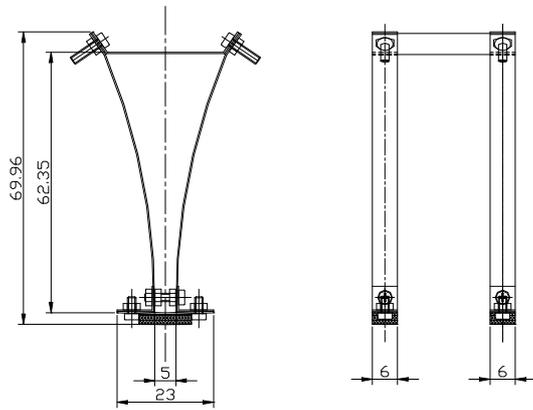


図 3.6： 製作した T 型 FFP アクチュエータ



Cross section view of the robot sole



(a) ロボットの機構

(b) T型 FFP の取り付け方法

図 3.7 : ロボットの詳細と T 型 FFP アクチュエータの取り付け方法

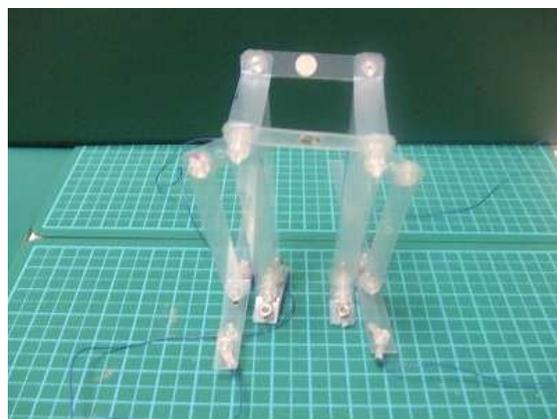
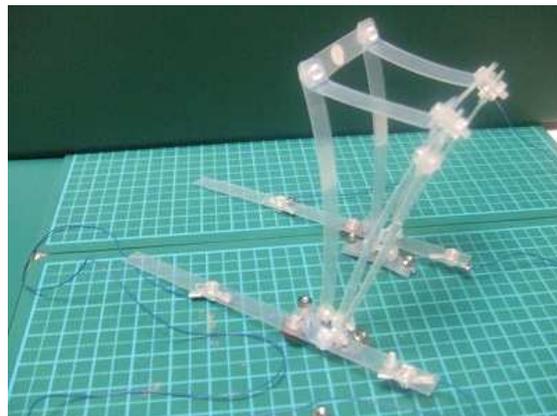


図 3.8 : 柔軟歩行ロボット (振り子歩行タイプ)

3.4.2 柔軟歩行ロボット（振り子歩行）の推進力

ロボットの推進力について考える。片方のアクチュエータへ3[V]/0.7[A]の電圧印加すると、SMAが収縮し、それに伴って薄板の中央が湾曲する。すなわち、発生力 F_1 を得て中央が大きく歪み、柔軟リンクで接続されたロボットの脚が設接地面より浮き上がり遊脚となる。ここで、ロボットの総重量 m 、重力を mg とすると接地点に向かう成分 x が接地点の反力とつりあってキャンセルされる。またそれと直交する成分 y が回転力 $mg \sin \theta$ を支点にした回転運動を引き起こす。(図3.9)ここで慣性モーメントを I 、接地点と重心との距離を L_1 とすると、運動方程式は

$$L_1 mg \sin \theta = I \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (3.1)$$

と与えられる。

仮に I が大きくなると、ロボットの振動エネルギーも大きくなるため、床面と足底の間で衝突やすべりが起こりやすく不安定な移動になる。また脚の長さ L_i や脚間隔 H_i を小さくすると、 θ が0に近づくため、逆に左右の脚の振幅が大きくなる。さらに、 $\theta = 0$ を過ぎると、その方向へと転倒する可能性が大になる。このように、重力と慣性によりロボットを前方へと押し出す振り子歩きの原理を利用して柔軟歩行ロボットを推進させる。

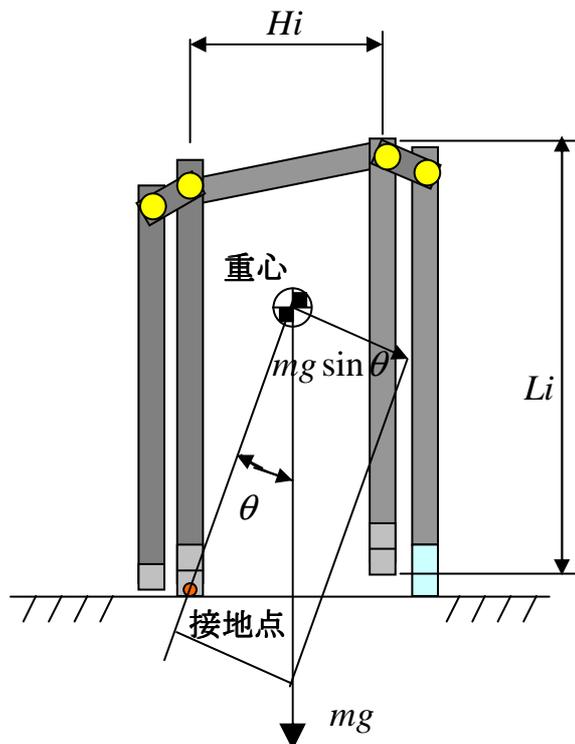


図 3.9： 柔軟ロボット（振り子歩行）の推進力

3.4.3 柔軟歩行ロボット（振り子歩行）の歩行実験

はじめに、柔軟ロボットの歩行が可能か否かを確認する。タイミング信号は、取り付けられた2つのアクチュエータに交互に入力する。次に、ロボットを目的の場所へ効率よく移動するためにはいくつかのON-OFF 駆動方法があると考えられる。そこで、右左片側のアクチュエータへ交互にON-OFF を繰り返す左右片側駆動(a)と両方の脚へ同時にON-OFF 信号を入力して移動させる両脚駆動を行い、それぞれ比較して、ON-OFF 制御の入力信号の違いによる柔軟歩行ロボットの影響について検討した。

(a) 左右片脚駆動

脚の左右に取り付けたT型FFPアクチュエータへ交互にON-OFF 信号を繰り返し行った結果、ロボットは転倒することなく、歩行を達成した。この成果は大きなものである。次に、ロボットの歩行距離について、図3.10に示す。結果は約20秒で26[mm]の移動距離が確認された。従来の軟化型ロボットと比較すると、移動速度が一段と向上されたことがわかる。歩行達成した時のON-OFF 信号のタイミングは図3.11である。左脚から1.5秒のON、その11秒後二回目のON、また右脚は左脚ONから5秒後に位相をずらし同様のタイミング信号を入力するとロボットは前進する。

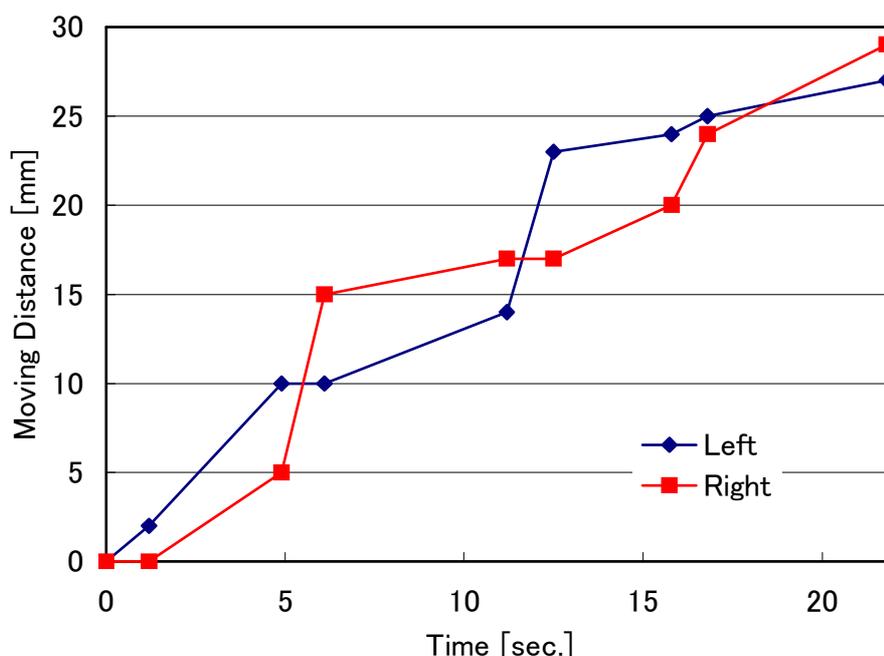
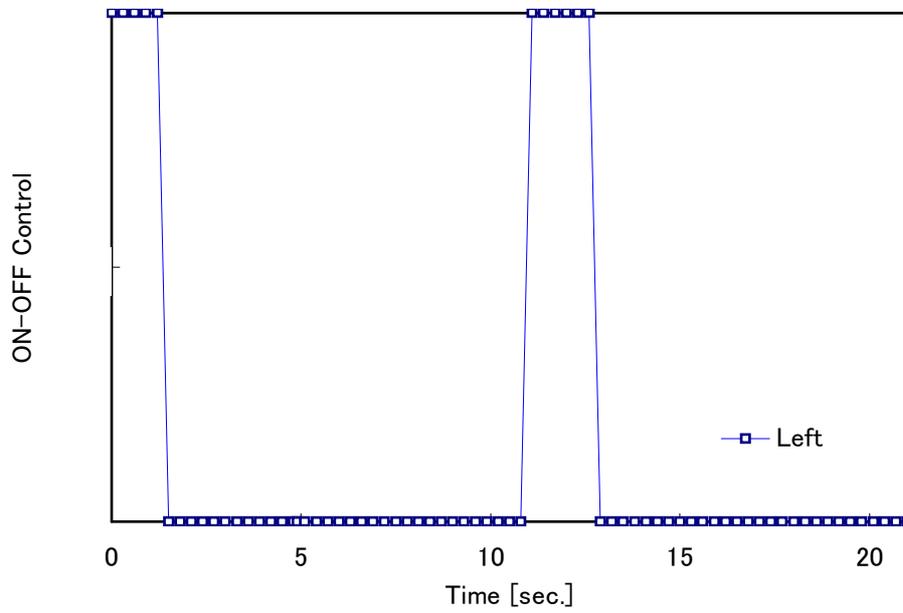


図 3.10： 振り子歩行タイプの移動距離（片脚駆動）

3.5[V]/0.7[A]



3.5[V]/0.7[A]

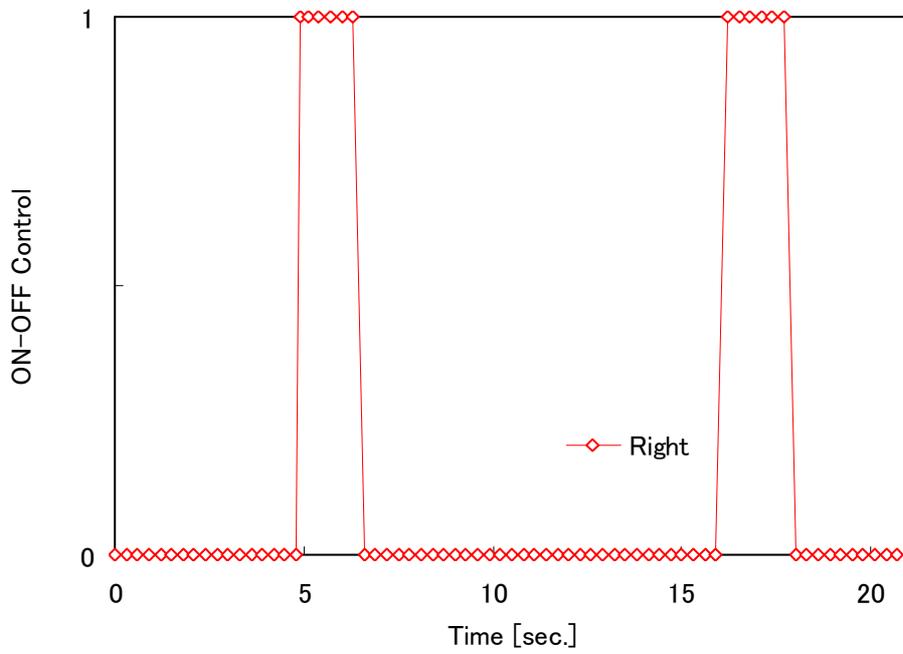


図 3.11 : 左右片脚駆動による ON-OFF 信号 (振り子歩行)

(b) 両側駆動

ロボットは体を左右に揺らしながら前進する振り子ロボットと同じ原理であるため、ロボットの機体をアクチュエータの変位によって上下に大きく揺らすことにより、前進するスピードや距離を大きくすることができるのではなかと考えた。そこで、両側 TPP アクチュエータに同時に電圧印可して、機体の揺れの周期を大きくする実験を行い、片側駆動の場合との違いについて確認をした。

ロボットの移動距離を図 3.12 に示す。20 秒で約 40[mm]の移動距離が確認された。片側駆動と比較して約 1.5 倍の移動距離が確保できることがわかった。このように、ロボットは、ON-OFF タイミングの入出力の違いにより、歩行速度をコントロールすることが可能であるということが確認された。

両側駆動による ON-OFF 信号タイミングを図 3.13 に示す。両方の T 型 TPP アクチュエータに 1.5 秒間 ON した後に OFF、さらに 5 秒後また同様に ON する。この単純な周期を繰り返し行くとロボットはより向上された移動速度で歩行を実現する。図 3.14 に片脚駆動の実験結果(1)～(8)、図 3.15 に両脚駆動の結果(1)～(7)を示す。ロボットは安定した重心移動で前進していく様子が見える。FFP アクチュエータを利用して、柔軟歩行ロボットの歩行を達成することができると確認した。

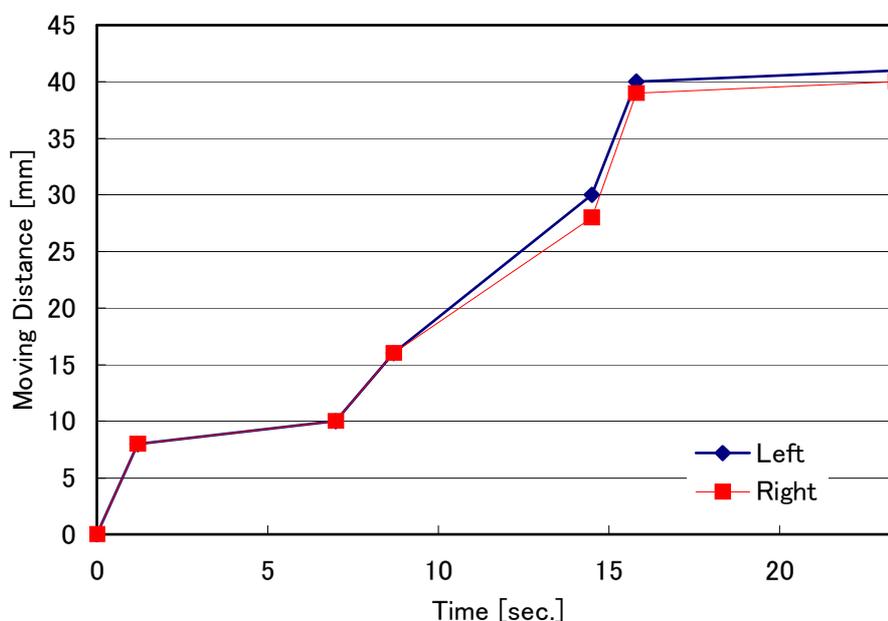
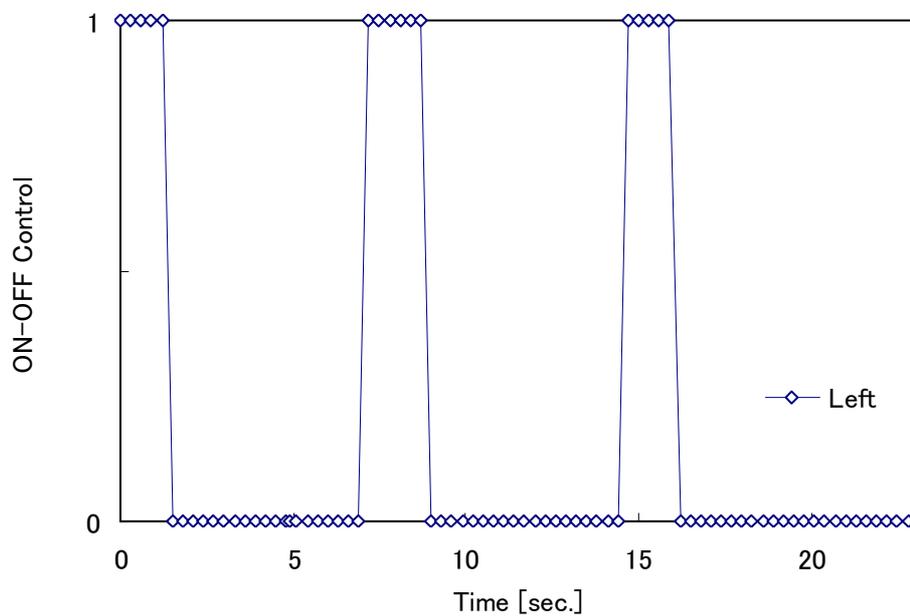


図 3.12 : 振り子歩行タイプの移動距離 (両脚駆動)

3.5[V]/0.7[A]



3.5[V]/0.7[A]

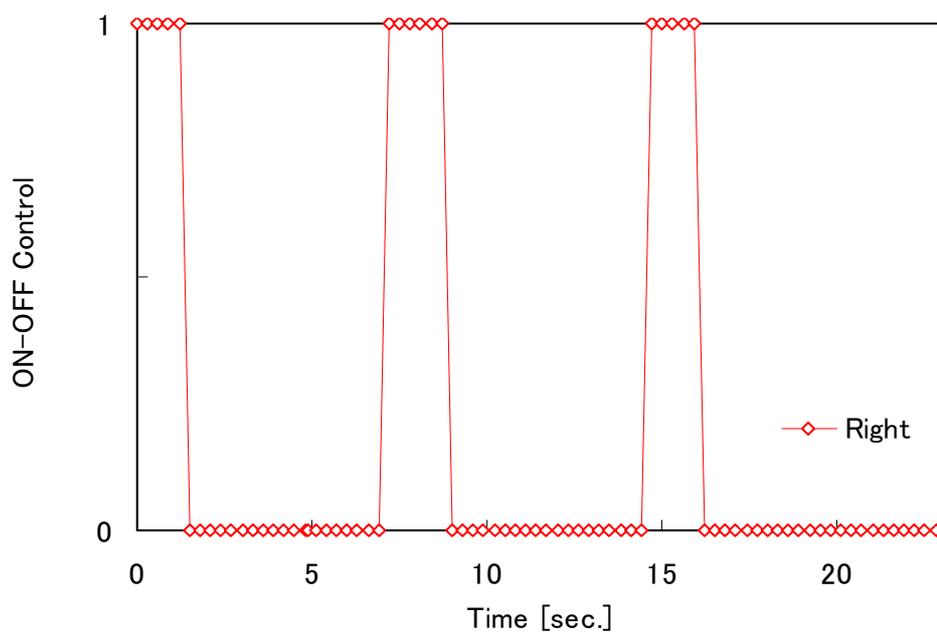


図 3.13 : 両脚駆動による ON-OFF 信号 (振り子歩行)

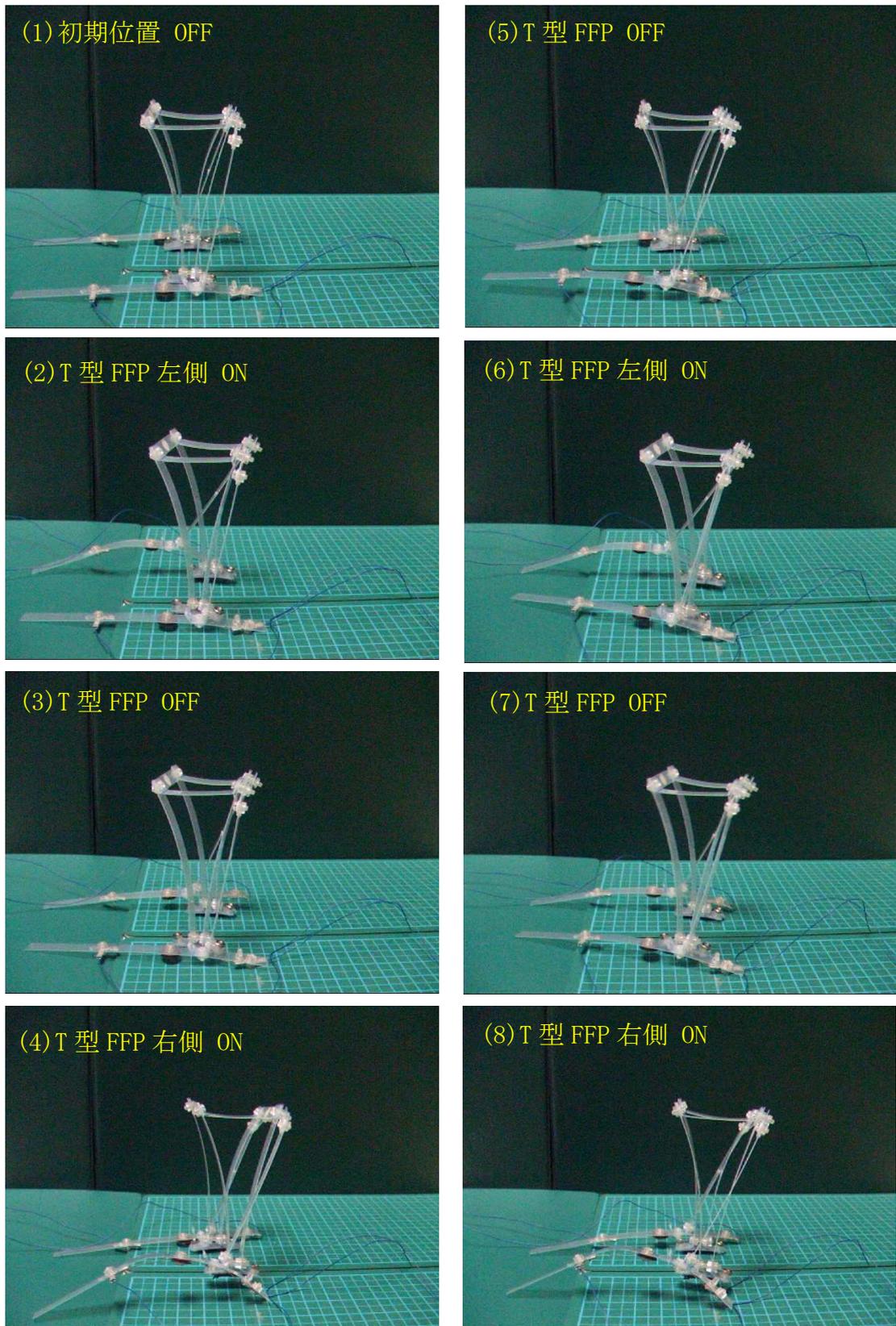


図 3.14 : 左右片脚駆動による柔軟ロボットの移動の様子

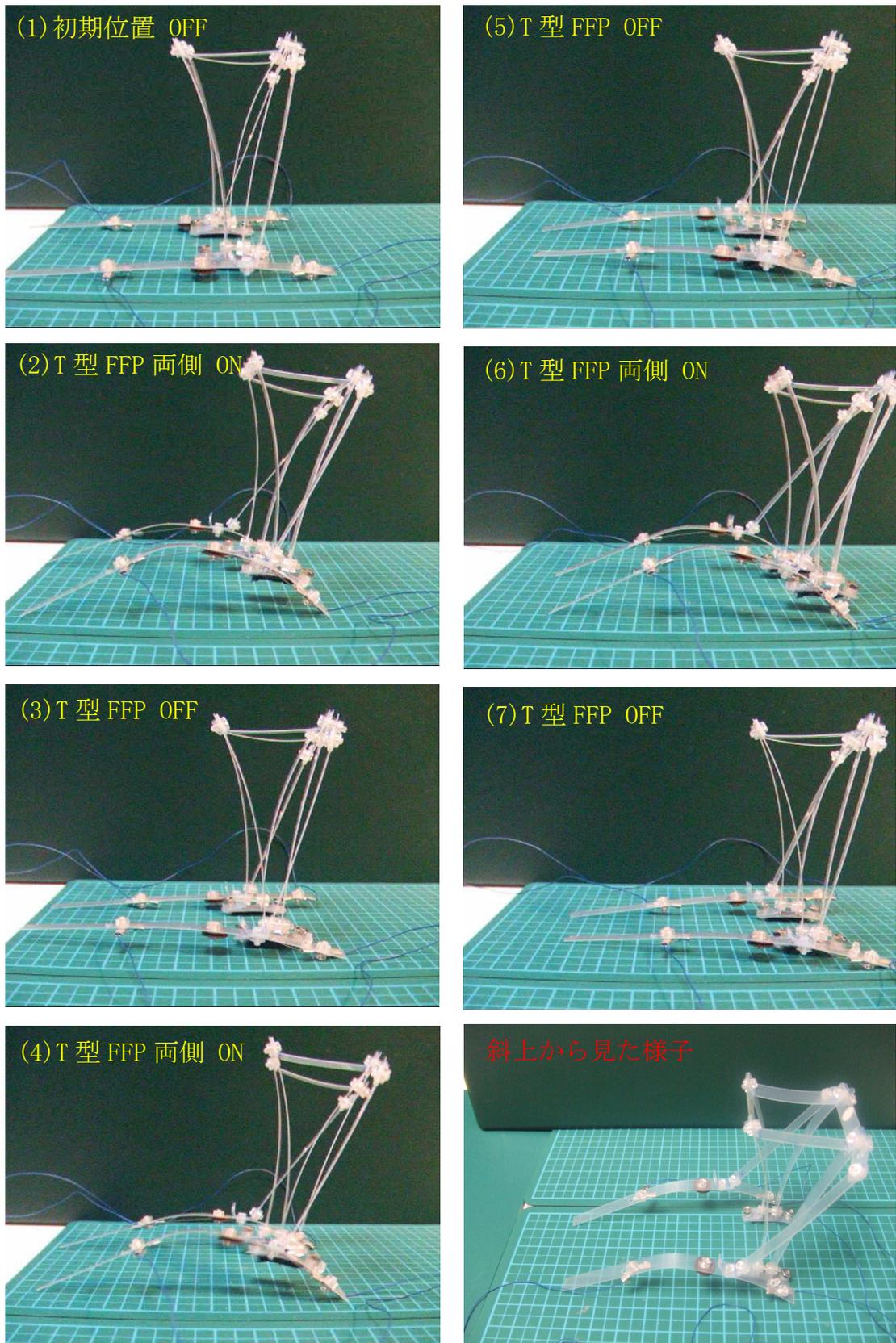


図 3.15 : 両脚駆動による柔軟ロボットの移動の様子

3.4.4 柔軟歩行ロボット (カニ歩行)

前節では、FFP アクチュエータの種類の中で、T型アクチュエータを実際に製作し、外部からロボットのボディをサポートしながら駆動させる柔軟歩行ロボットを確認した。柔軟な構造でできたロボットを転倒することなく、歩行させた成果は大きい。T型 FFP アクチュエータを用いた場合は、アクチュエータと接地面との接触面積が大きいため、転倒せずロボットの移動が可能である。しかしながら本ロボットは、スキー板とストックのような役割であり、あくまでもロボットの機体を外部から支持しているため、実際にロボットの脚を屈曲して歩行されているわけではない。このようなロボットは、安定的な歩行は確保されるものの、全体としては大きなスペースを有するロボットになってしまうため、狭いスペースでの旋回の歩行や小さな幅の段差越えが課題となる。そこで、ロボットの脚へ直接アクチュエータを配置した場合について実験を行う。

ロボットの構造と脚を一体化させるため、本節では、V型 FFP アクチュエータを製作した。このアクチュエータは、薄板と SMA が組み合わされた I 型-FFP アクチュエータに加え、SMA と逆の位置に誘導プレートを取り付けた構造をしている。このような構造にすることで、ロボットは、初期状態でしっかりと倒立することができる。図 3.16 製作した V 型 FFP アクチュエータとに動作原理を示す。アクチュエータの重量は約 $1.05[\text{g}]$ である。電圧を ON すると中央が湾曲し、ひずみ量 ξ を得る。その挙動に基づいて誘導プレートが押し出され移動量 ξ_{v-ffp} が得られこの運動を利用する。V 型 FFP アクチュエータは、ロボットの脚へ直接取り付けられ、小さいスペースで大きな移動量を確保できるように工夫した。そこで、V 型 FFP アクチュエータを用いたロボットの外観を図 3.17 に示す。全長 $75[\text{mm}]$ 、幅 $35[\text{mm}]$ 、奥行き $20[\text{mm}]$ 、総重量 $4.03[\text{g}]$ の柔軟歩行ロボットである。本ロボットの自由度は片脚が 1 で、合わせて 2 である。カニのように横に歩く歩行形態である。

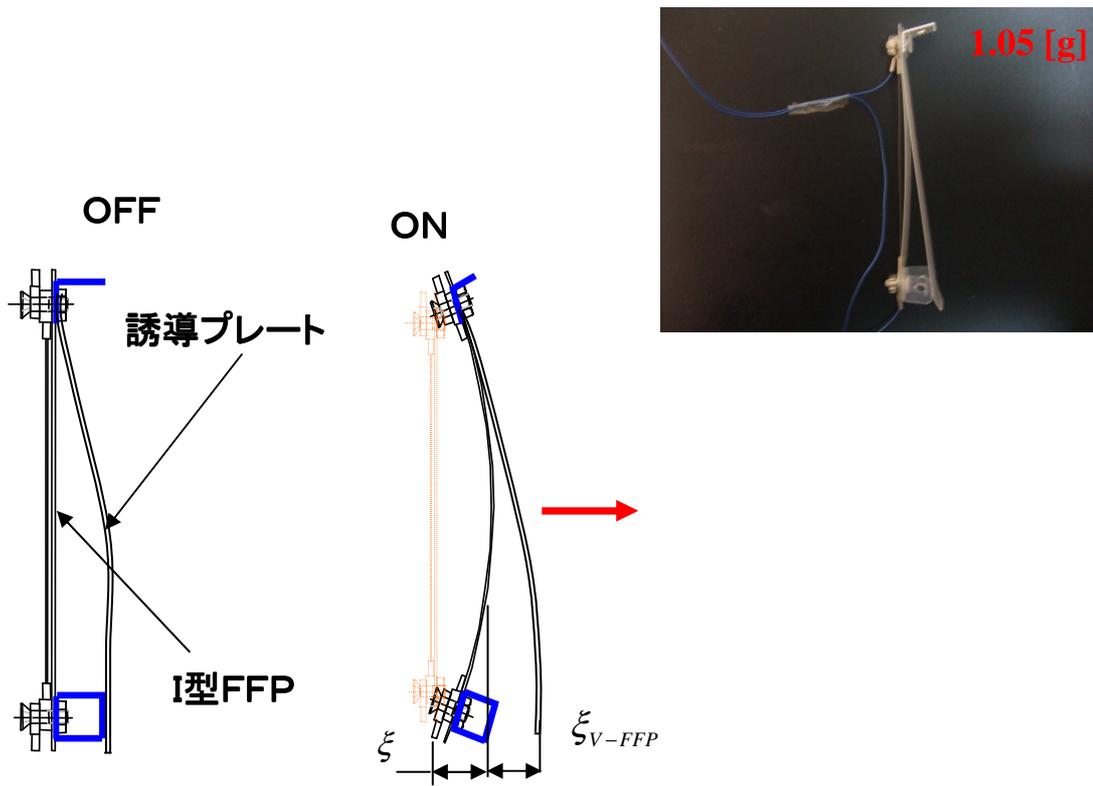


図 3.16 : 製作した V 型 FFP アクチュエータ

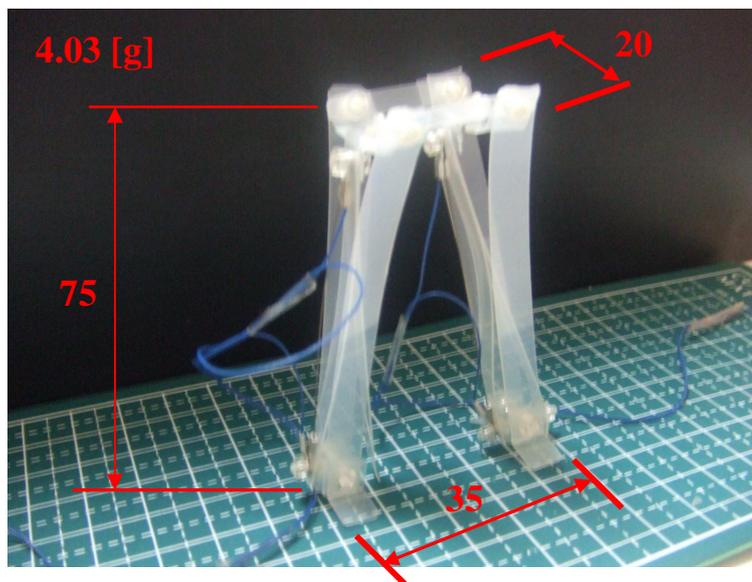


図 3.17 : 製作した柔軟歩行ロボット (カニ歩行)

3.4.5 柔軟歩行ロボット（カニ歩行）の歩行実験

ロボットの移動距離を図 3.18 に示す. V 型 FFP アクチュエータを用いた柔軟ロボットの移動距離は 30 秒で約 25[mm]と観測された. したがって, 歩行平均速度は 1.2mm/sec である. V 型 FFP ロボットの ON-OFF タイミングについて図 3.19 に, 図 3.20 に歩行実現を示す. 本ロボットは約 4[g]と非常に軽量の 2 足歩行である. しかしながら, サイドステップ歩行（カニ歩き）のため, 移動環境が限定されるという課題がある. 以上のように, FFP アクチュエータをロボットへ利用した場合の歩行を確認するため, プロトタイプの柔軟歩行ロボット開発し, 液体からの離脱と移動速度の課題をまずは克服し, その有効性を示した.

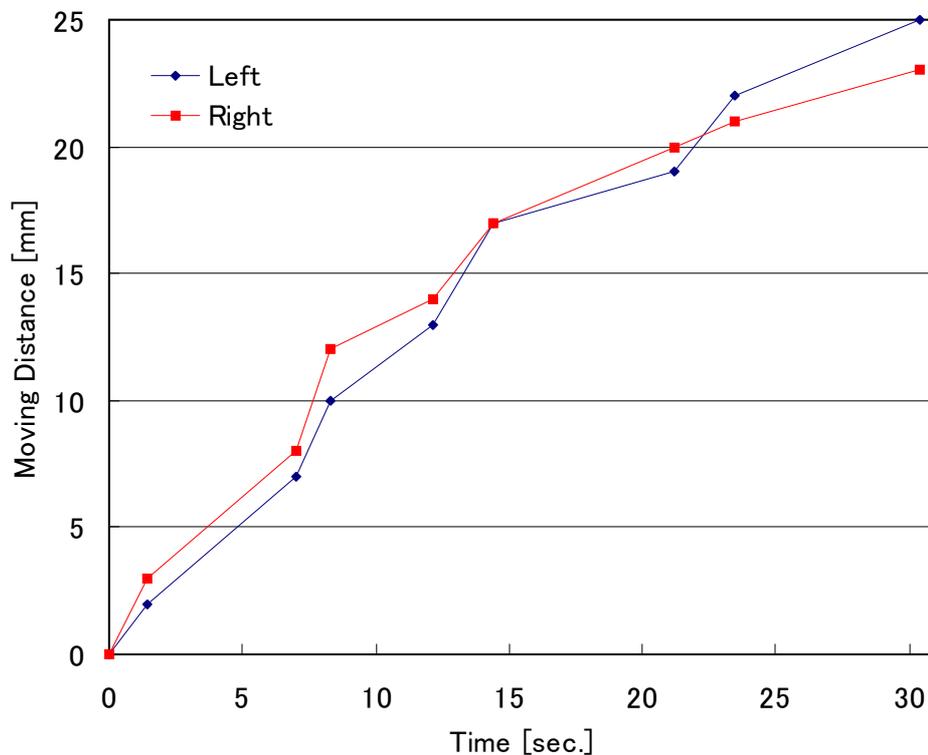


図 3.18 : 柔軟歩行ロボット（カニ歩行）の移動距離

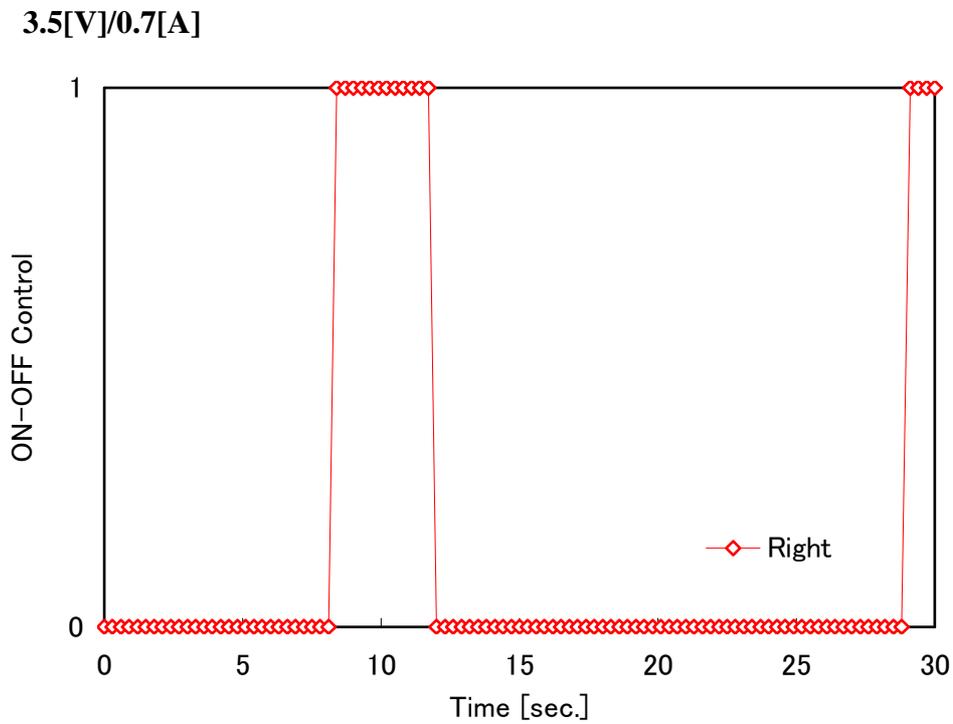
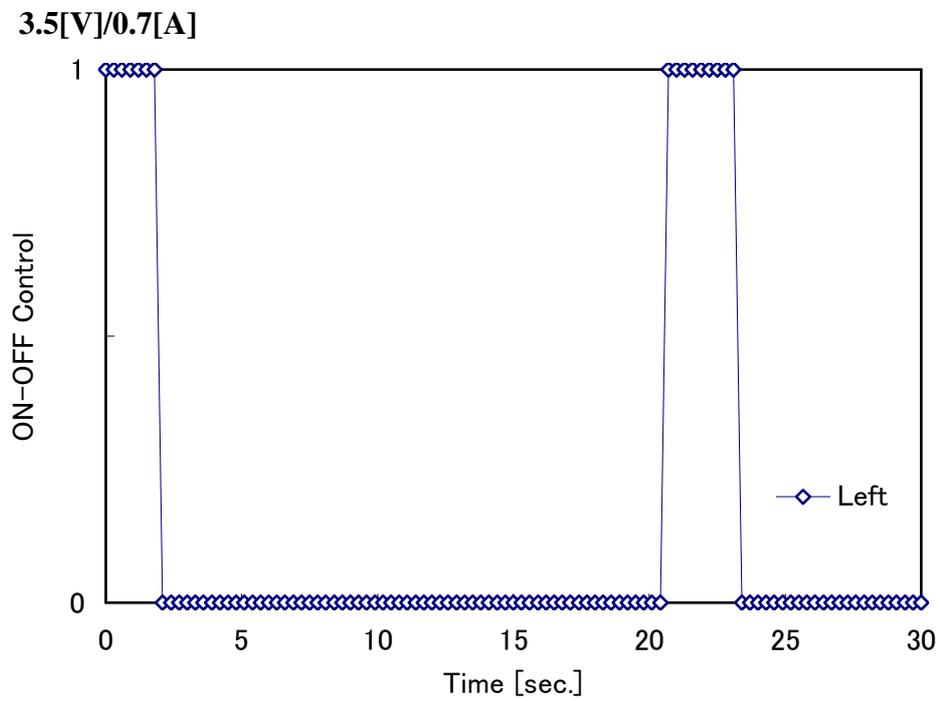


図 3.19 : ロボットの ON-OFF 信号 (カニ歩行タイプ)

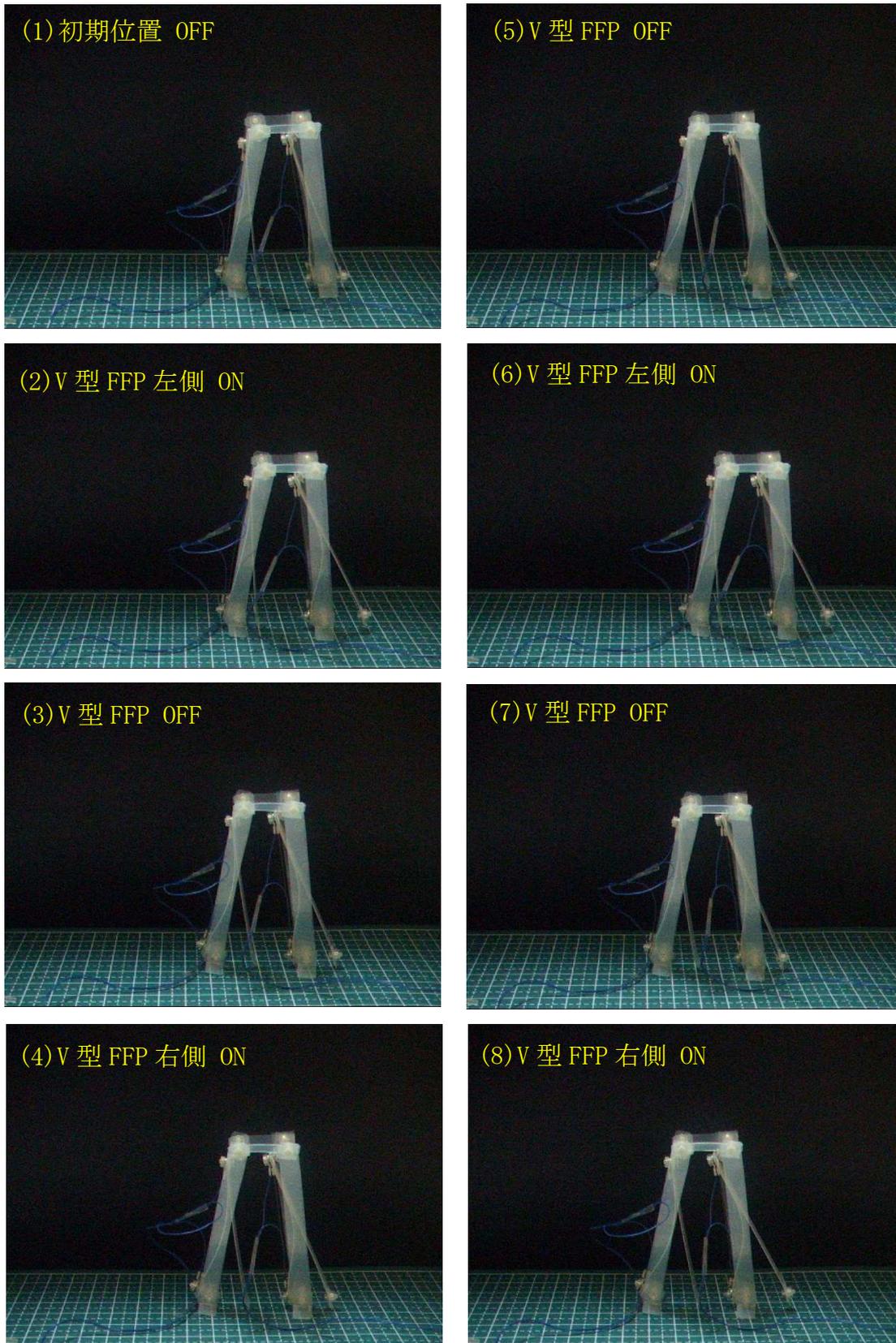


図 3.20 : カニ歩行タイプの柔軟歩行ロボット

3.5 まとめ

本章では、柔軟歩行ロボットの分野を拡大するために、FFP アクチュエータを柔軟歩行ロボットへと用いる場合の概念について述べ、可撓性材料を用いた柔軟歩行ロボットについて言及した。次に FFP アクチュエータの種類と柔軟歩行ロボットの移動形態について提案し、振り子歩行ロボットとカニ歩行ロボットを製作し、それぞれの立場から歩行を達成して、柔軟歩行ロボットの有効性について明らかにした。また、従来の課題であった液体からの離脱と移動速度を向上させた。これらの成果は、これまでに、研究開発が乏しかった柔軟歩行ロボット分野に大きな影響を与えるものと考えられる。以下に本章で得られた知見を挙げる。

- (1) 柔軟な材料を柔軟歩行ロボットへ用いる場合の基本概念について述べ、柔軟歩行ロボットの導入に当たり、具体的なコンセプトを示し、柔軟な素材の重要性を示唆した。
- (2) FFP アクチュエータは自由に加工できる形状で、ON-OFF 制御というシンプルなメカニズムで構成されている。したがって、加工や組み合わせによっては、簡単な制御で、複雑な動作が可能である。そこで、作業効率を向上させるため、FFP アクチュエータの種類を提案した。提案したアクチュエータは、アルファベットの形になぞり、C 型～V 型 FFP アクチュエータと命名した。
- (3) FFP アクチュエータは、ボディに対してサポート型と一体構造型の 2 タイプの使用が可能である。そこで、多くの環境で柔軟歩行ロボットを実現するために、ロボットの移動形態について提案し、振り子歩行ロボットとカニ歩行ロボットの柔軟歩行ロボットについて開発を行った。
- (4) 振り子歩行形態の柔軟歩行ロボットは、長さ 100[mm]、幅 6[mm]の薄板に約 50[mm]の SMA テンション保護機構を介した T 型 FFP アクチュエータを製作した。そして、このアクチュエータを利用し、総重量 5.5[g]の柔軟歩行ロボットを製作した。歩行実験では、左右片側駆動のロボットは約 20 秒で 26[mm]の移動距離が確認され、両側駆動では、20 秒で約 40[mm]の移動距離が確認された。片側駆動と比較して約 1.5 倍の移動距離が確保でき、速度制御を行えることがわかった。

- (5) カニ歩行形態の柔軟歩行ロボットでは、総重量は約 1.05[g]構造の V 型 FFP アクチュエータを製作し、V 型 FFP アクチュエータを用いた全長 75[mm], 幅 35[mm], 奥行き 20[mm], 総重量 4.03[g]のロボットを開発した。歩行実現の実験では、移動距離は 30 秒で約 25[mm]と観測された。したがって、歩行平均速度は 1.2mm/sec である。開発され FFP アクチュエータを利用して、柔軟歩行ロボットの有効性を明らかにした。

第 4 章

二足柔軟歩行ロボットの開発

4.1 はじめに

前章では、FFP アクチュエータをロボットの外部から支持し、歩行する振り子歩行タイプとロボットの機構の一部として利用し、歩行するカニ歩行タイプの2つの観点からロボットを製作し、柔軟歩行ロボットの課題の液体からの離脱と移動速度の向上を行った。FFP アクチュエータの長所は、組み立てや加工性がよく、直接ロボットの脚へと配置することで構造を簡素化できるというメリットがある。そこで、本章では、2章で評価した FFP アクチュエータ (70mm × 6mm × 0.35m) を用いて、単純な構成の二足柔軟歩行ロボットを開発し、小型・軽量化・単純化についての追求を試みる。

4.2 二足柔軟歩行ロボットの概要

剛体リンクと剛体アクチュエータで構成された脚式ロボットは、二脚、四脚、六脚、多脚と、多くの研究が行われている。二足（脚）歩行ロボットについては、1970年頃から人間の歩行のメカニズムを工学的観点から研究・解明する目的で開発が行われた。現在の二足歩行ロボットは、段差があるような人間の環境に近い場所で自由に移動でき、そして人間と協調しながら作業するロボットとして開発が行われている。図4.1はホンダ[60]の二足歩行ロボットにおける20年間の歴史をまとめたものである。今日では、高度な運動機能と視覚・触覚・聴覚などの感覚機能、さらには、学習・連想・記憶・推論などといった人間の頭脳の一部と同様の知的機能を備えられているため、複雑で柔軟な動作を行うことができる。このように、人間により近いロボットとして、長年の研究年月を経て開発が行われ、将来の活躍に期待されている。

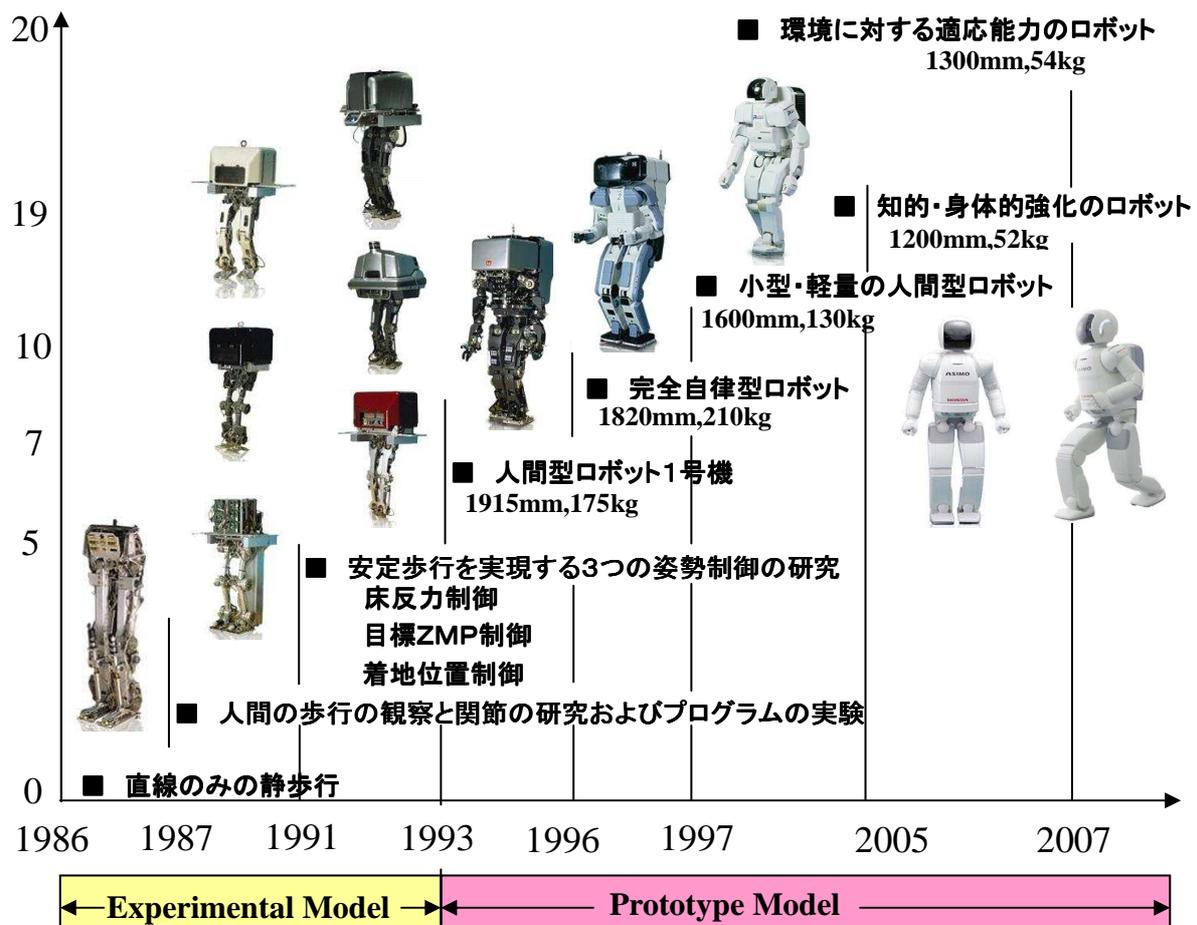


図 4.1: 従来の二足歩行ロボットの歴史 (出典:HONDA)

しかしながら、従来の二足歩行ロボットは、硬く、重いボディを有しているため、人間と共存するにはとても危険であり、一般家庭内に導入するにはまだまだ時間がかかると思われる。一方で、二足歩行ロボットとは、もともと人間の構造を反映したロボットである。そこで、人間の足構造に注目してみる。人間のメカニズムは、足の関節を曲げるために、主動筋と反対に伸ばす働きをする拮抗筋が対抗して働き、互いに反対の動きを同時に営むことで、屈曲・伸展を行っている(図4.2-(a))。このメカニズムにより、足をあげ、前へ蹴り出し、接地面に接触しながら歩行する。図からわかるように、屈曲点(関節)には機械的なネジやバネなどは一切用いておらず、構造自体は非常にシンプルな造りによって屈曲・伸展を達成している。そこで、FFPアクチュエータの足構成について考える。図4.2-(b)のようにFFPアクチュエータを柔軟なリンクで連結し、構成する。SMAは主動筋、薄板は拮抗筋としてそれぞれの役割を行う。SMAの収縮力と薄板の復元力を利用することで、屈曲部にジョイントがない関節レスの構造を持つシンプルな一脚が完成できる。

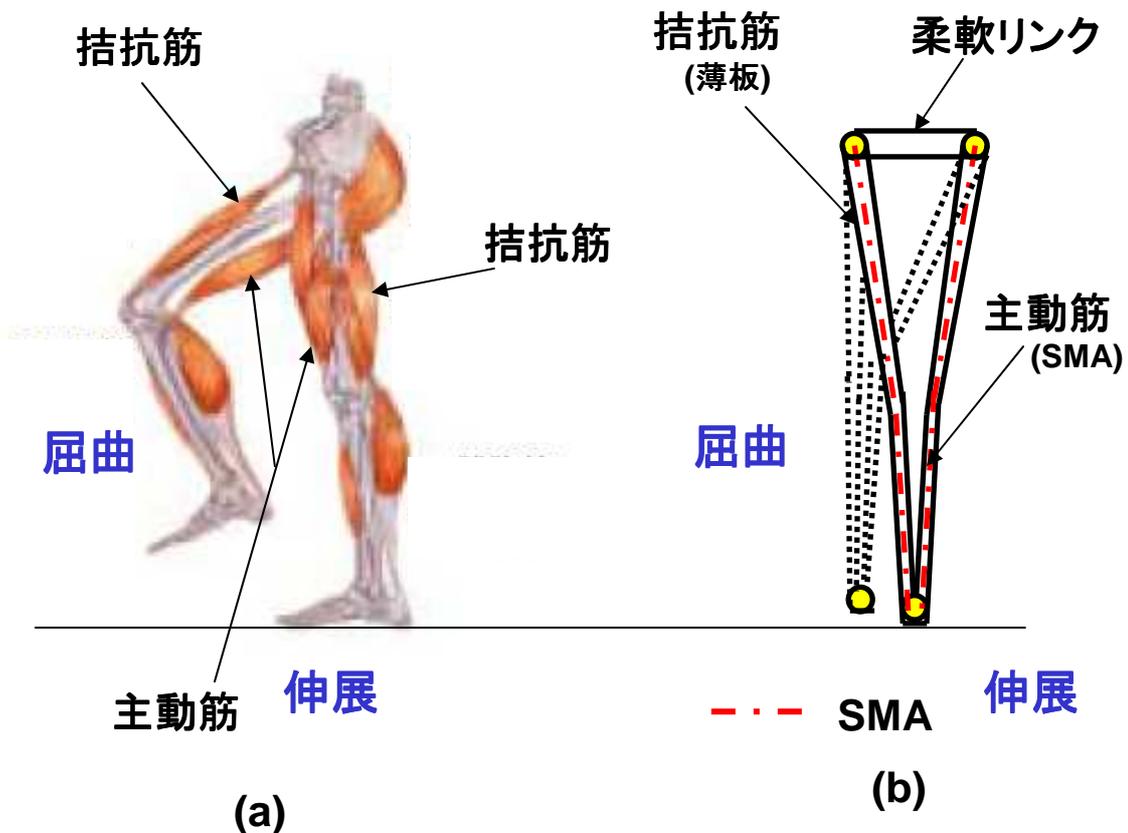


図 4.2 : 人間の足と二足柔軟歩行ロボット構造

4.3 二足柔軟歩行ロボットの試作

一般的に、構造物を形成する場合、その基本構造を三角形（三角トラスビーム）にすることで、軽量ながら、大きな強度を得られることが知られている[61]. 近年では、三角トラス構造を用いて、宇宙空間におけるロボットの体の一部として採用した例もある[62]. 開発する二足柔軟歩行ロボットでは、脚として高い強度と安定を得るために、片脚に二枚の FFP アクチュエータを逆三角形になるように構成している. これを一脚として平行に二つに並べ、屈曲、伸展を行って歩行させる. このように、屈曲部にジョイントがない関節レスの構造を持つ柔軟歩行ロボットによって、単純化・軽量化・小型化が可能となる.

図 4.3 に開発した柔軟二足歩行ロボットの外観を示す. ロボットの仕様は、全長=70[mm]、横幅=22[mm]、奥行き幅=22[mm]、脚先幅=2[mm]、総重量約 2.8[g] で 3.5[V]、0.7[A]によって駆動する片脚が 2 自由度のロボットである.



Size [mm]	L22 × W22 × H70
Weight [g]	2.8
Material	Polyethylene
D.O.F	4
Power Supply	3.5[V]/0.7[A]

図 4.3： 開発した二足柔軟歩行ロボット

柔軟歩行ロボットを設計する上で重要なことは、接地面と柔軟リンクの脚底の摩擦を考慮することである。仮に4枚のアクチュエータが同形（同摩擦抵抗）であれば同反力により相殺され、前進することができない。FFP アクチュエータのパラメータは薄板の幅、長さ、厚さ、SMA の線径、長さである。したがって、これらのいずれかを変更して接地面と各プレートの接触面とに摩擦力の差をつけなければ歩行は達成されない。そこで、歩行実現のために図 4.4 のようにプレート一枚の寸法変更した。製作した二足柔軟歩行ロボットは、左脚後のプレート幅を大にすることで摩擦力を大きくし、且つ全長を短くして、倒立時での摩擦力が零になるような構成にした。したがって、静止時では $L1$ 、 $L2$ 、 $L4$ の3点が床面と接触している。表 4.2 に $L1 \sim L4$ の寸法をそれぞれ示す。

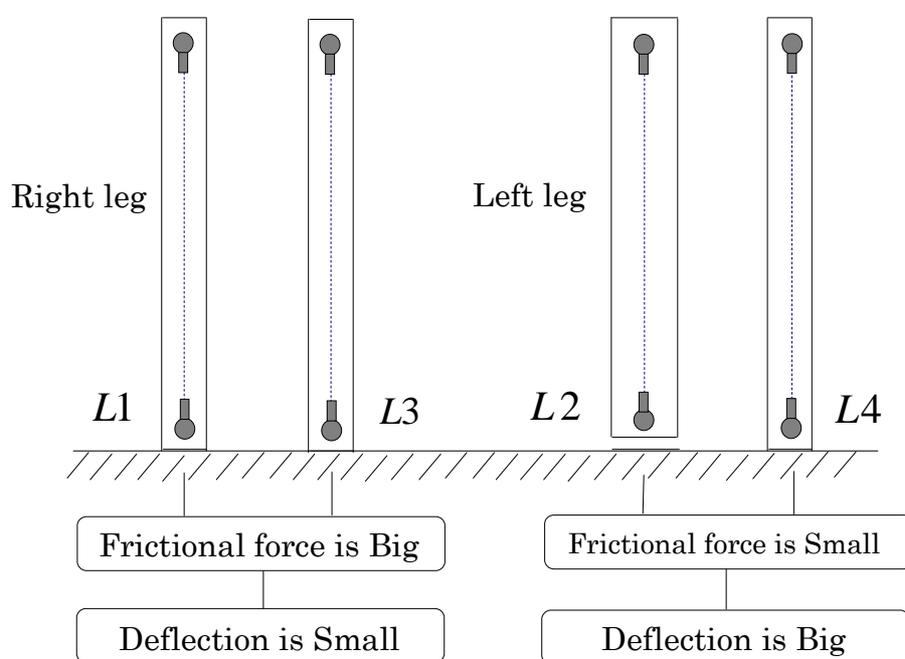


図 4.4： 二足柔軟歩行ロボットの足の詳細

表 4.2： FFP アクチュエータの仕様

No.	Leg mounting	Length[mm]	Width[mm]
L1	Right (Back)	70	6
L2	Left (Back)	69	6.5
L3	Right (Front)	70	6
L4	Left (Front)	70	6

ここで、製作した二足柔軟歩行ロボットの配線を図4.5に示す. それぞれを $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ の FFP アクチュエータと称する. $L1$ および $L3$ は右脚であり, $L2$ および $L4$ は左脚である. $L1$ を $L4$ に接続し, $L2$ を $L3$ に接続してそれぞれ ON-OFF の電圧印加を行う.

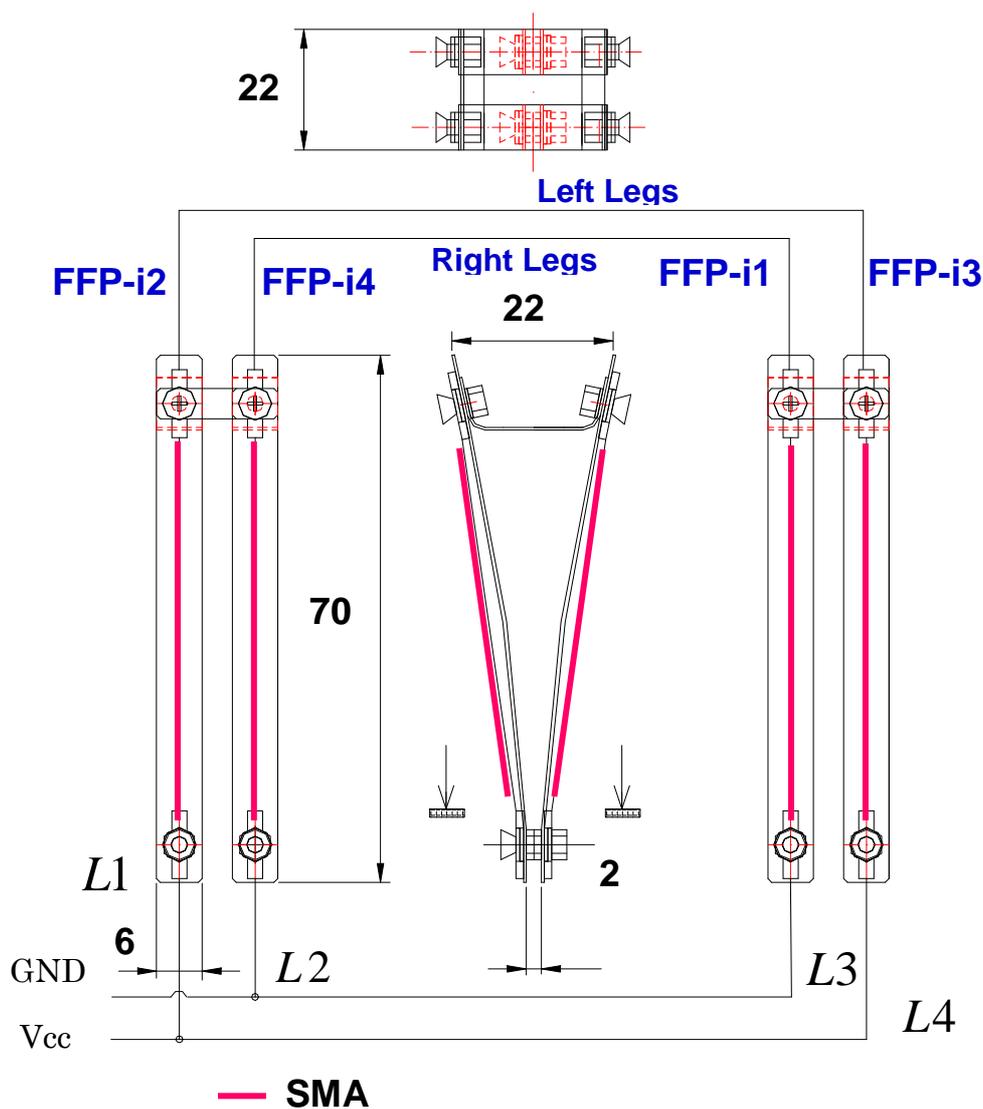


図 4.5 : 二足柔軟歩行ロボットの配線

一般的に、ロボットの製作に関しては、まず設計図を基にして、剛体材料を工作機械で形状加工し、加工された部品を調整しながら組み立てを行うという手順で行われる。このように、ロボットを1台製作するためには、多くの時間と手間がかかっている。一方で、開発した二足柔軟歩行ロボットは、一枚のプレートから、わずか10点の部品をカッターで切り出し、SMAアクチュエータを取り付けて組み立てているため、作業性から見ても、大量生産に向いているのではないかと考える。ここで、図4.6にロボットの組み立て手順を示す。2枚のFFPアクチュエータを1つのスペーサを介して固定する。次に、SMAが外側に向くように組み合わせる。最後に、柔軟プレートを用いて連結し、逆三角形の構造体の一脚が完成する。同様に、もう片脚を製作し、2枚の柔軟リンクプレートによって接合する。このように、可撓性材料を利用することで、部品点数が少ない、軽量小型のロボットが製作できる。

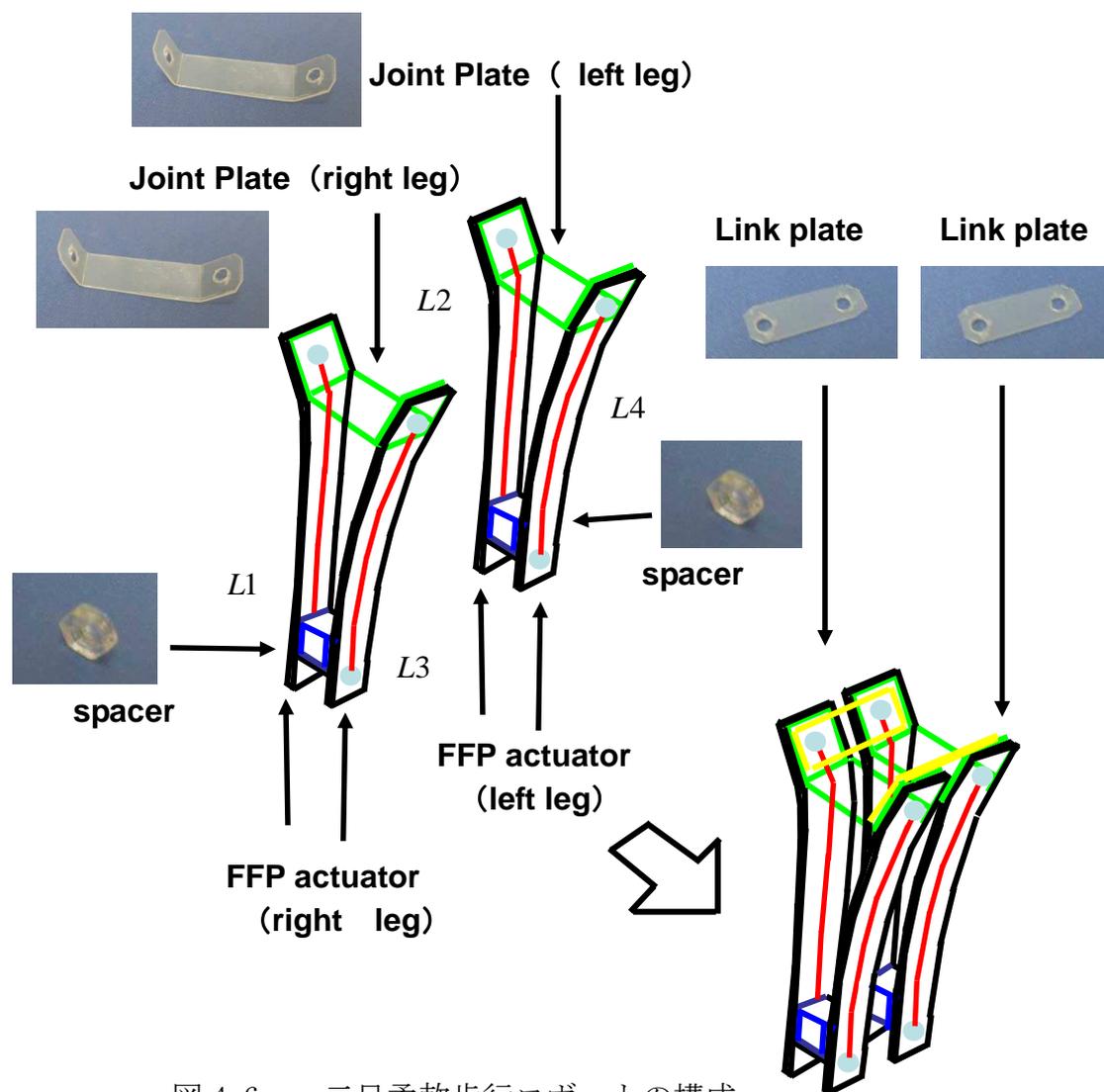


図 4.6 : 二足柔軟歩行ロボットの構成

4.4 二足柔軟歩行ロボットの脚の応答性

二足柔軟歩行ロボットのタイミング信号を決定するため、製作したロボットの1脚の特性について実験を行った。二足柔軟歩行ロボットの模式図を図4.7に示す。ロボットの脚先端部の幅を $S_1=2[\text{mm}]$ で固定する。次に $P-P'$ の長さを $P_1=22[\text{mm}]$ とする。仮に $P_1=22\text{mm}<$ のリンクに拡大すると、ロボットは静止時でバランスを崩し、倒立しなくなる。 $K-K'-y$ （初期位置）からの最大たわみをそれぞれ W_2 、 U_2 とする。 $L_s=60$ 、 $L_g=70$ 、 $P_1=22[\text{mm}]$ において $3.5[\text{V}]$ 、 $0.7[\text{A}]$ の電圧印加した場合の湾曲挙動を図4.8に示す。約2秒の電圧印加を行った直後、整定するまでに約8秒を要している。したがってOFF時から完全な状態に戻るまでの間、すなわち脚の位置が零（初期）になるまでには6秒を要することがわかる。これにより、片脚の一サイクルを8秒と設定し、両脚の信号タイミングを決定する。

次に、端部から x 方向の変位量（脚のたわみ特性）を図4.9に示す。ステップ応答に対して、最大たわみ約 $W_2=6.5[\text{mm}]$ 、 $U_2=$ 約 $1.2[\text{mm}]$ と確認した。図4.10に荷重曲線示す。最大たわみ約 $6.5[\text{mm}]$ 時では、約 $0.07[\text{N}]$ であった。また 10^2 回繰返し試験を行った結果、変位量の誤差は $\pm 5\%$ 以内であった。

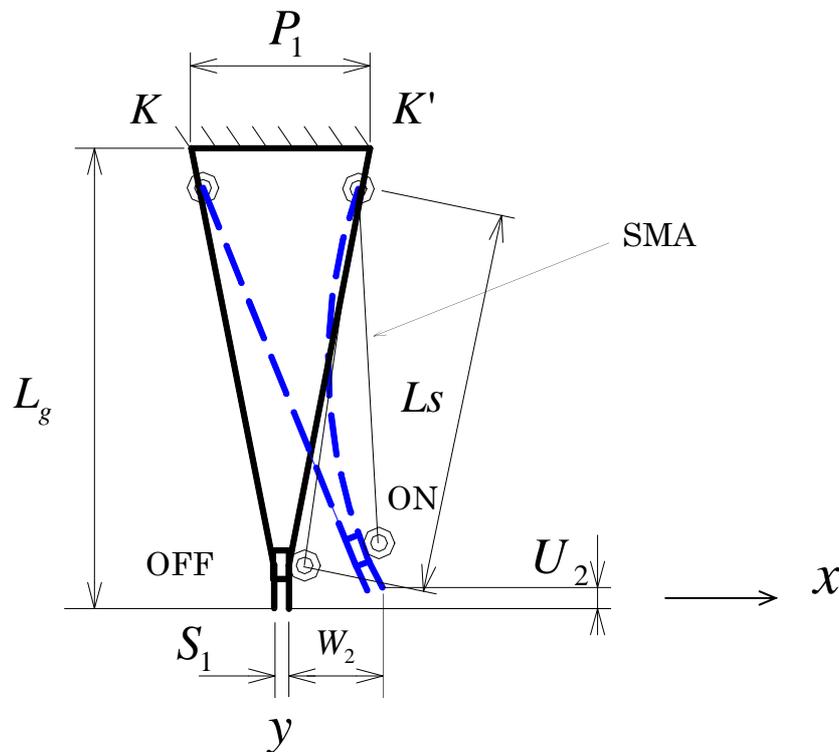


図4.7： 二足柔軟歩行ロボットの模式図

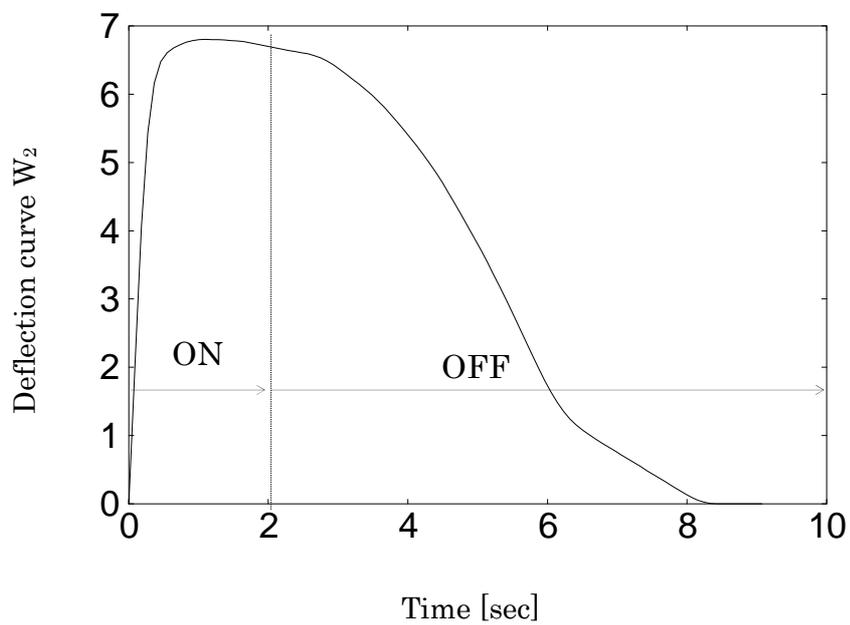
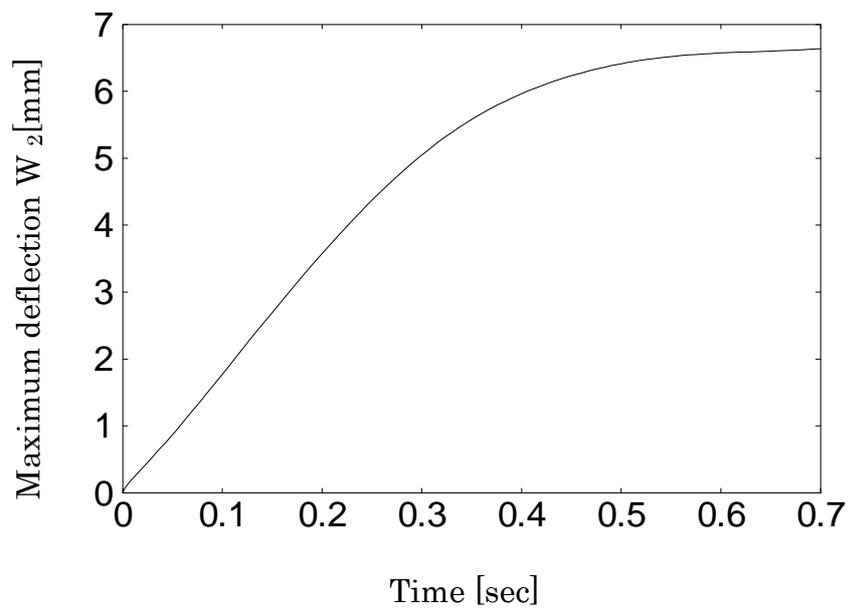
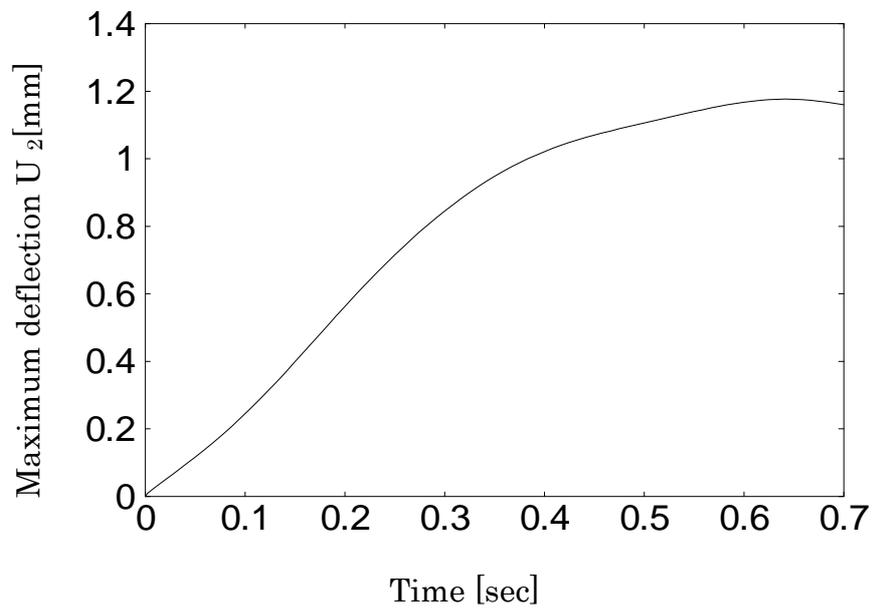


図 4.8 : 二足柔軟歩行ロボットの動特性 W_2 (ON signal→OFF signal).



(a) Time response of W_2 (ON signal).



(b) Time response of U_2 (ON signal)

図 4.9 : 二足柔軟ロボットのたわみ曲線 (ON signal→OFF signal).

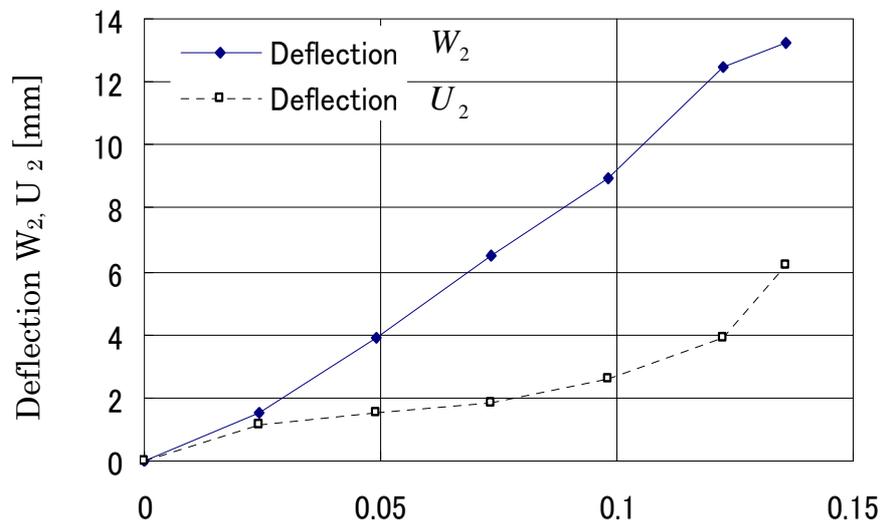


図 4.10 : 二足柔軟歩行ロボットの荷重曲線 (ON signal→OFF signal).

4.5 二足柔軟歩行ロボットの歩行実現

4.5.1 実験システム

二足柔軟歩行ロボットの実験システムの概要を図 4.11 に示す。パソコンから制御ユニットを介して、駆動回路から ON-OFF の入出力信号をロボットへ供給する。制御システムは、ワンチップマイクロコンピュータを用いた駆動回路およびパワー回路から構成される。L1-L4ペアを FFP 駆動^(a)とし、L2-L3ペアを FFP 駆動^(b)とする。L1-L4ペアおよびL2-L3ペアの両脚に交互に電圧印加が行われるようにオープンループによって ON-OFF 信号を連続的に繰り返す。

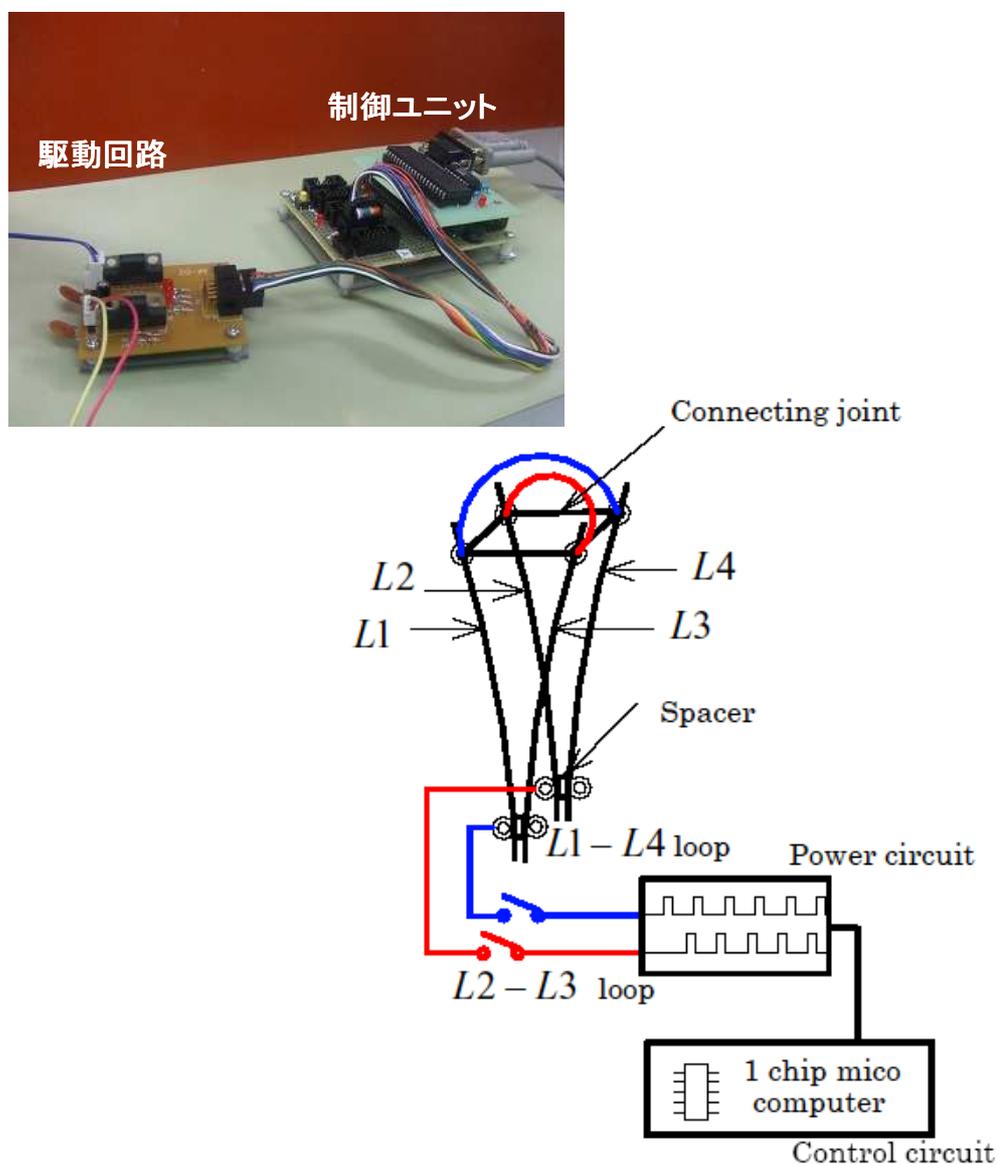


図 4.11： 二足柔軟歩行ロボットの実験システム

4.5.2 信号タイミング

駆動信号のタイミングチャートを図 4.12 に示す. 上段が $L1-L4$ ペア (FFP 駆動_(a)) の信号, 下段が $L2-L3$ ペア (FFP 駆動_(b)) の信号, T_s [s]=電圧印加時間, T_p [s]=電圧信号位相, 時間に対する振幅を A_a , A_b とする. 入力信号タイミングは, 前章の脚の応答実験で得られた結果を基に, 形式的に T_s を一定とする. 一方の脚を駆動させるまでの最小時間 (自然放冷により構造材が十分に復元された時の最小値) $T_p=6$ [s] とし, 3.5 [V], 0.7 [A] と設定する. ここで, 二足柔軟歩行ロボットの ON-OFF 信号を図 4.13 に示す.

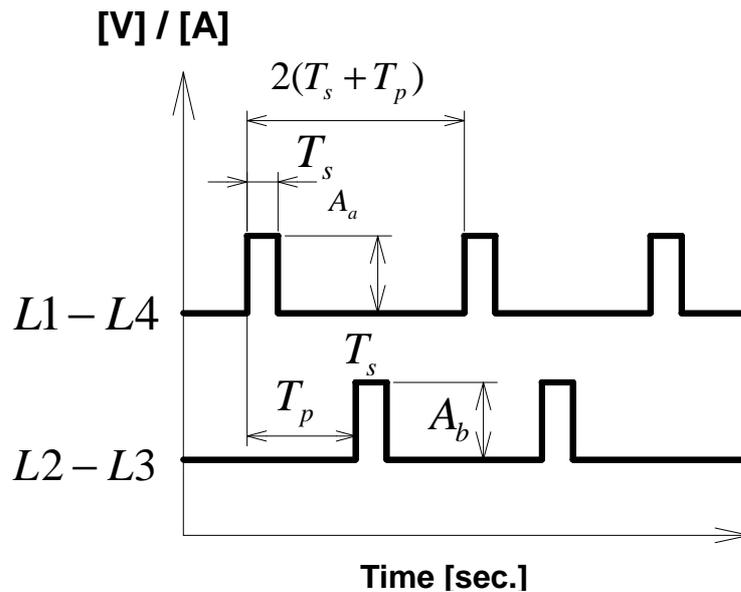
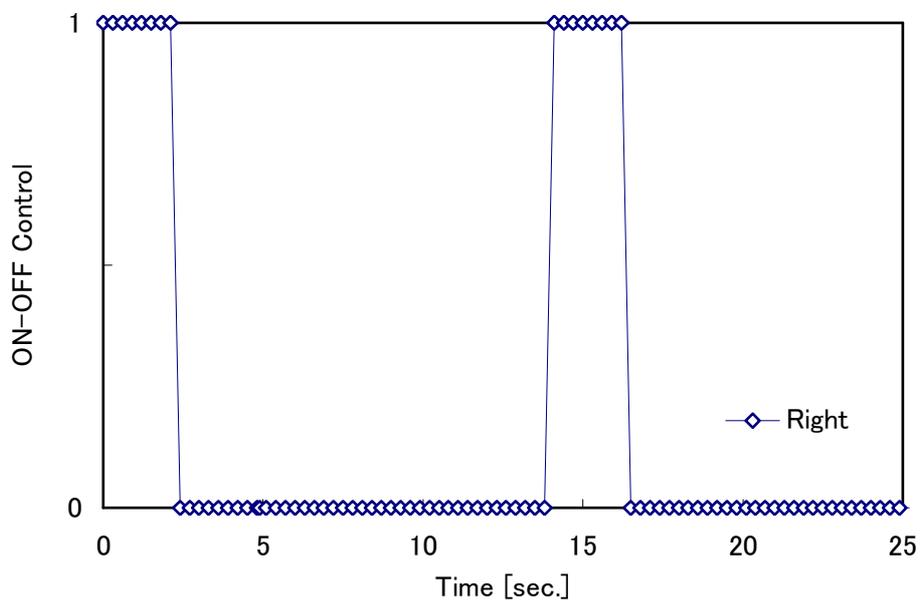


図 4.12 : 二足柔軟歩行ロボットのタイミングチャート

3.5[V] 0.7[A]



3.5[V] 0.7[A]

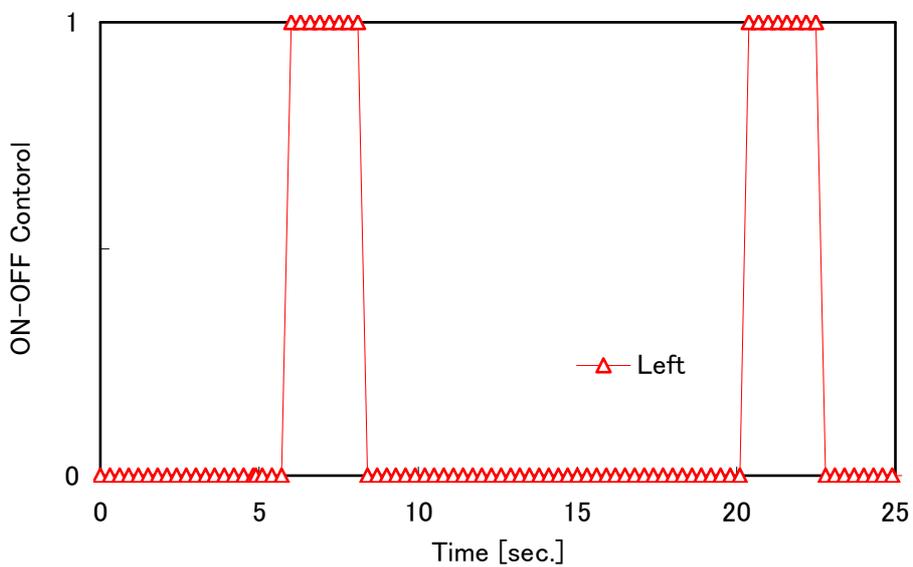


図 4.13 : 二足柔軟歩行ロボットの ON-OFF 信号

4.5.3 二足柔軟歩行ロボットの脚の運び方

FFP アクチュエータを直接脚へ用いた移動機構では、電圧印加によって薄板が湾曲し、電圧解除によって蓄積されたエネルギーを推進力に変換して移動する。そこで、図 4.14 において脚の運び方について説明する。

進行方向に向かって順に (a) 平面図、(b) 左脚側面図および脚先端の詳細図、(c) 右脚側面図および脚先端の詳細図と記す。ロボットの初期位置は (a) に示すように脚を前後に開いた状態で安定して静止している。また重心は機体の前方に位置している。まず初めに、左脚前プレート (L1) と右脚後プレート (L4) に 2 秒間の電圧印加を行う。前節で述べたように、接地面との摩擦を右脚>左脚および、板のたわみ量を右脚<左脚と設定しているため、摩擦力の大きい右脚が接地面で支持され、左脚が前へと出る。その後 6 秒間の電圧解除の間に、両プレートに蓄積されたプレートの復元力によってゆっくりと姿勢を元の状態へと戻す。この時右脚と左脚はつり合っていると考えられるため、前進する。次に、左脚後プレート (L3) と右脚前プレート (L2) に同様の電圧印加を行う。このように ON-OFF 信号を繰り返しながら本機は前へとずり脚で前進する。

柔軟アクチュエータとリンクを脚へ応用した場合、位置や姿勢精度を定量的に求めることが難しい。しかし、身近な柔軟材料を上手く組み合わせることによって、従来のように、複雑な構造や手法を用いて行うこともなく、脚ロボットとして幅広く応用できるものと期待できる。

一般的に脚式ロボットの場合、全体を支えている脚のうちの一部（例えば二本のうち的一本）から荷重を除き、その脚を進行方向に移動接地させた後、再び荷重させる動作、もしくは、その動作に伴って（同時に又は荷重後に）全体の重心を移動させながら歩行を達成する。本章で開発した二足柔軟歩行ロボットは以下の順で歩行実現する。

- (1) 右脚のつま先に重心を置く
- (2) 次に右脚はそのままの状態左脚を前へ滑らせていく
- (3) その左脚が微小に移動した段階で左脚のつま先に重心をおきかえ、右脚を前へと滑らせる。
- (4) この動作を継ぎ目のないように繰り返す。

したがって、前進方向にむけて、片脚が地面に垂直に等しく荷重がかかっている状態、すなわち、つま先の一点で全体重を支えており、地面を蹴って見えるほうの脚には、ほぼ体重がかかっていない状態であるため、上下に重心移動は行なわれない。つまり、ムーンウォークのような形態をもつ摺り足歩行により、擬似的な二足歩行を行っている。

近年では、榑原機械株式会社で開発された全高 3m40cm, 総重量 1000kgw の「LAND WALKER」[63]が、ずり足二足歩行（時速 1.5 k m/h）として製品化されている。しかし、ずり足歩行は、坂道や大きな段差のある場所では移動できないことや、重力ないしは慣性力の働いていない環境下や、それを打ち消せるほどの浮力がある環境下では利用できないという問題がある。特に、本機は小型軽量なため、少しでもブレやガタが生じるとバランス制御が困難となり転倒してしまう。したがって、複雑な状況に対応できるロボットとは言いがたい。このような問題を解決するために、ひざのまげ伸ばしが十分できるように、FPP アクチュエータの形状を変更する工夫も考えられるが、脚のひとつが接地面から離れても、体を支えられる構造に保つことが現状のロボットでは難しい。したがって、動的歩行としてのアプローチが今後の課題となる。

Direction of movement \longrightarrow

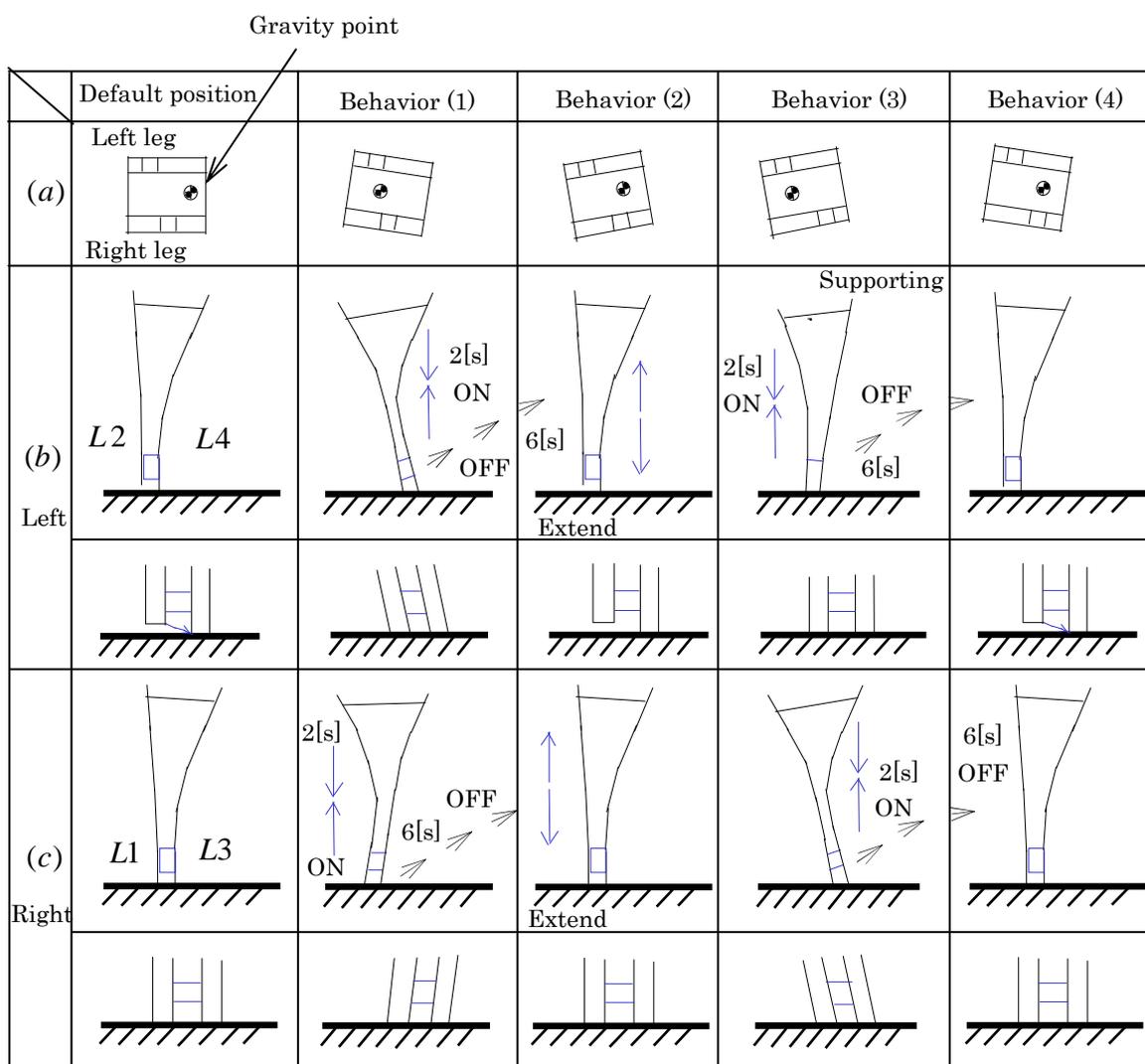


図 4.14： 二足柔軟歩行ロボットの歩行動作

4.5.4 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験

二足柔軟歩行ロボットの歩行軌跡と移動距離を図 4.15 に示す。ロボットは転倒することなく移動することが確認された。 $T_s=2[s]$, $T_p=6[s]$ 時では、60 秒で約 30[mm]の移動距離であり、歩行の平均速度は約 0.5mm/sec である。さらに、信号位相を $T_p=14[s]$ に変更した場合の歩行軌跡を図 4.16 に示す。同じ移動距離に対して約 100 秒 (1.7 倍) の時間を要していることがわかる。したがって、 T_p が小さい場合、歩行速度はより大きいことがわかる。このように ON-OFF 信号を切り替えることで、速度調整が可能であり、タイミング信号を変更してもロボットを転倒せずに前進させることが可能である。また左脚、右脚の 1 サイクルにおける移動距離にはそれぞれ約 5mm~10mm のばらつきが観察された。これは、ロボットの脚先周辺部の配線による影響が大と考えられ、今後の改善が望まれる。

次に、図 4.17 に側面時、図 4.18 に斜め正面時、図 4.19 に平面時でのそれぞれの歩行実現の様子を示す。図に示されるように、ロボットが歩行していく様子がわかる。以上のように、FFP アクチュエータを直接ロボットの脚に用いることで、単純な構造および制御の柔軟歩行ロボットが可能となり、本研究の適応範囲を拡大した。この結果は、柔軟歩行ロボットに関する研究分野のみならず、二足歩行ロボット分野にも大きく貢献したと考える。

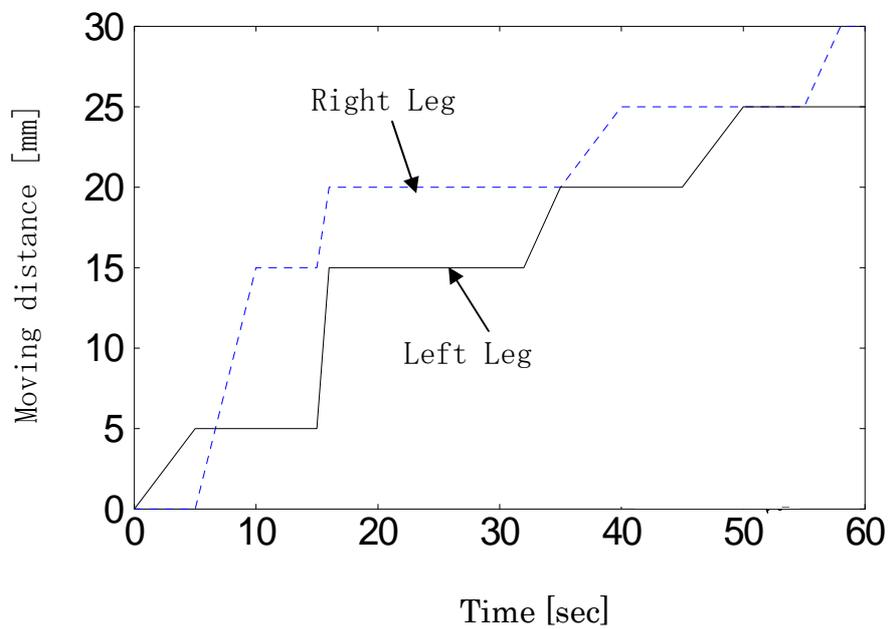


図 4.15 : 二足柔軟歩行ロボットの歩行軌跡
($T_s=2$ [sec] and $T_p=6$ [sec].)

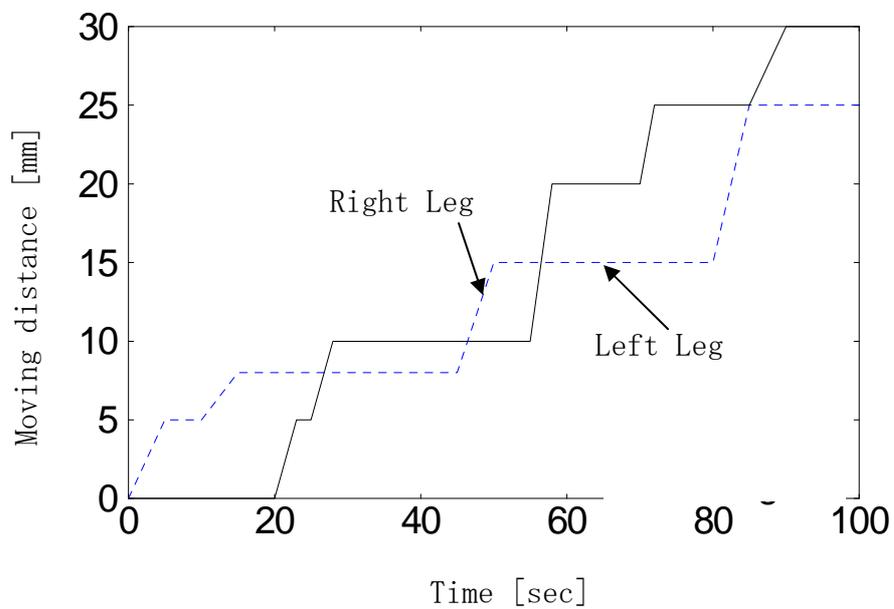


図 4.16 : 二足柔軟歩行ロボットの歩行軌跡
($T_s=2$ [sec] and $T_p=14$ [sec].)

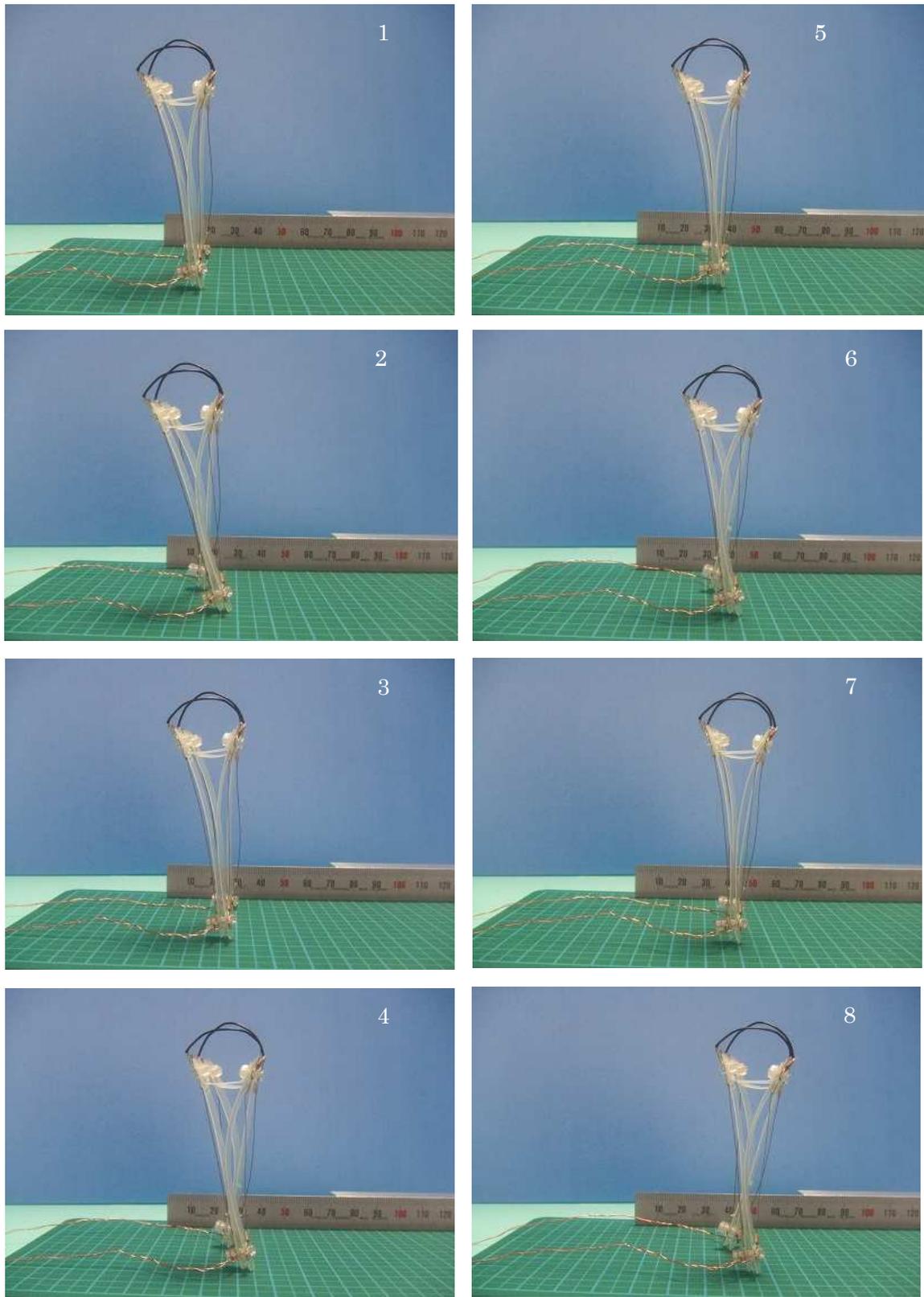


図 4. 17： 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験（側面時）

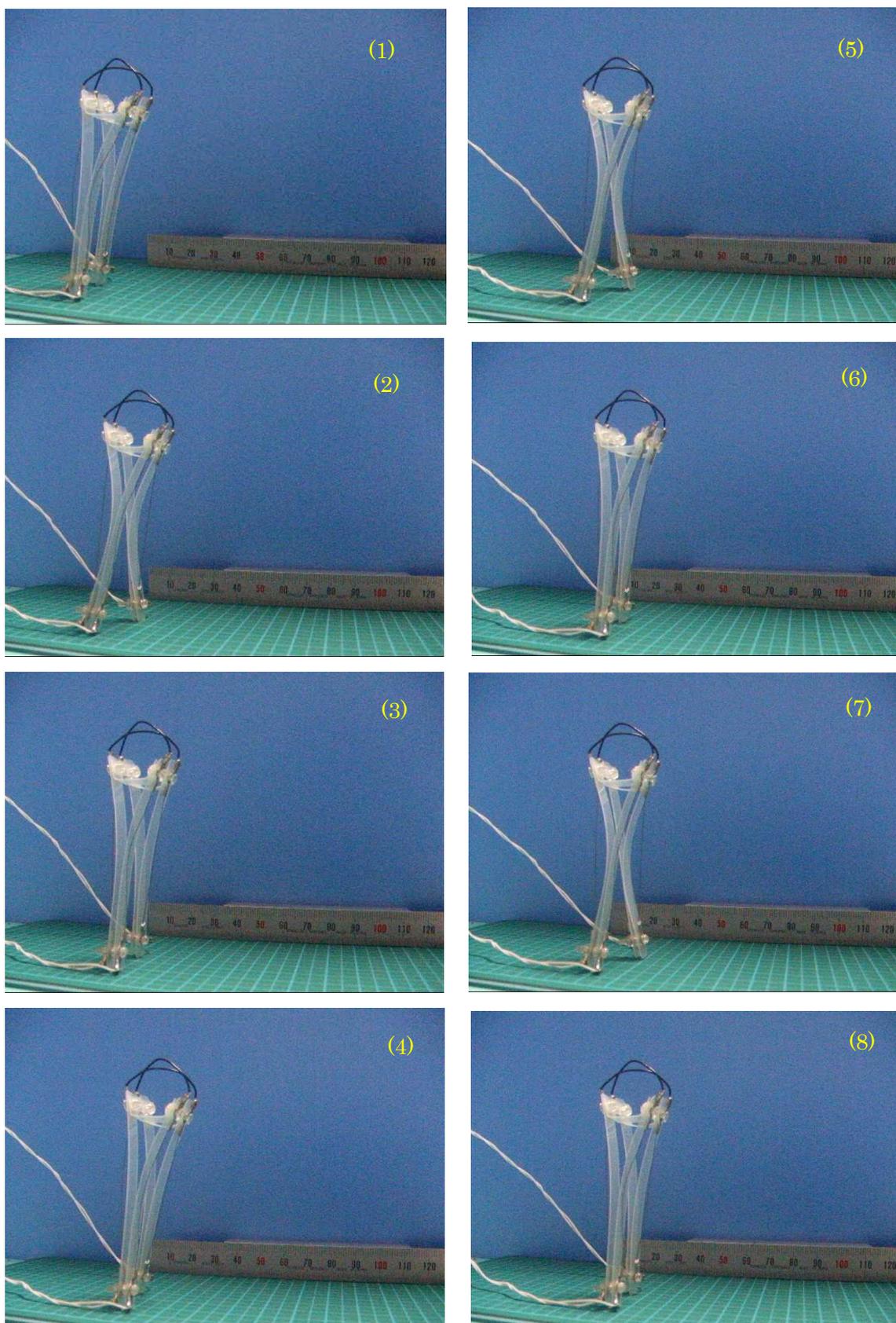


図 4.18 : 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験 (斜め正面時)

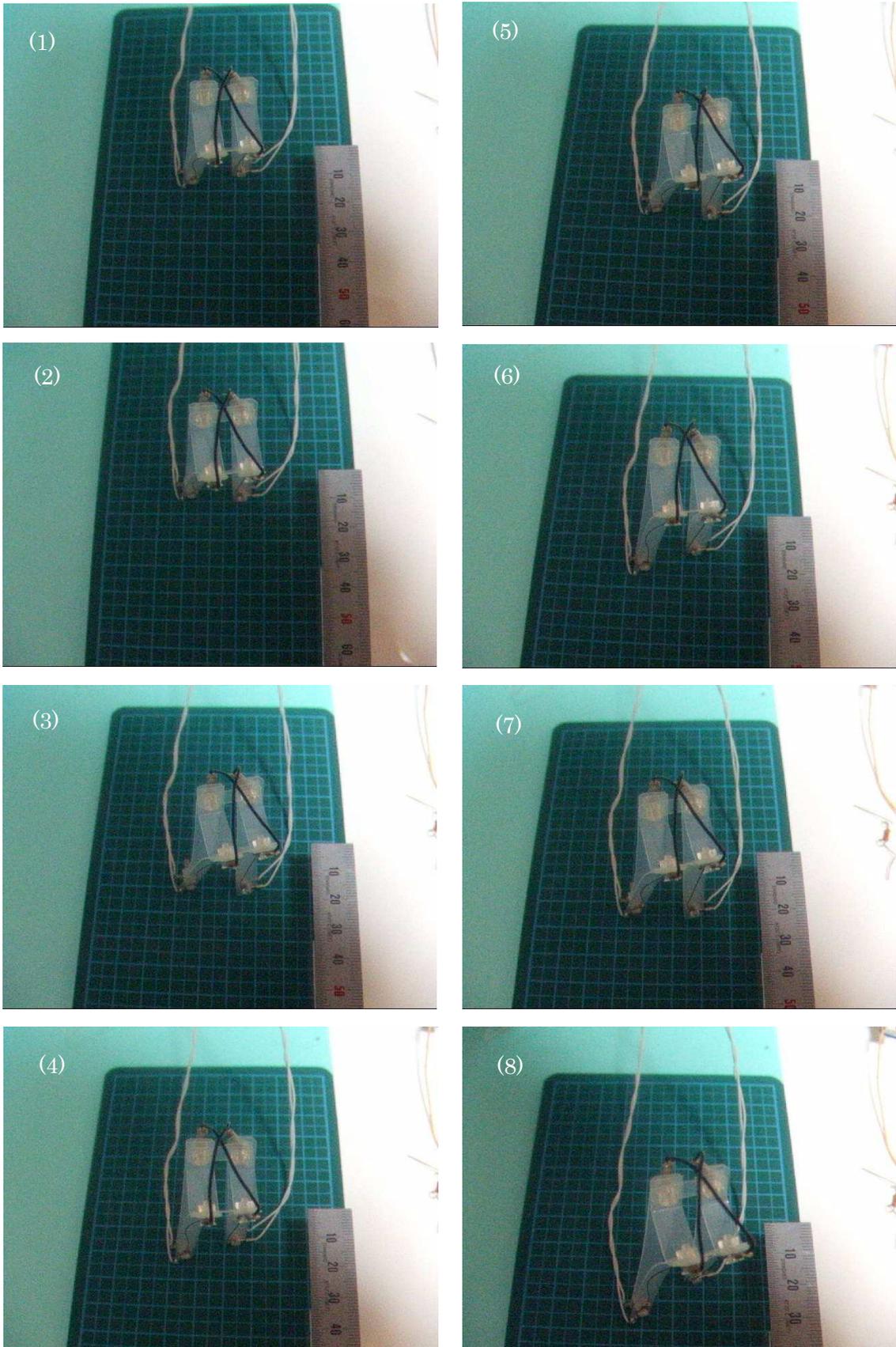


図 4.19： 二足柔軟歩行ロボットの歩行実験（平面時）

4.6 まとめ

本章では、柔軟歩行ロボットの分野を拡大し、柔軟歩行ロボットの作業効率の向上を図るため、軽量・小型・単純化の追求に向けて FFP アクチュエータを直接脚へと採用した立場から二足歩行ロボットについて検討を行った。主として得られた結果は以下の通りである。

- (1) 従来の二足歩行ロボットの動向を調査し、関節レス（脚に関節がない）の二足柔軟歩行ロボットの概要について述べ、FFP アクチュエータを直接脚へと配置した全長=70[mm]、横幅=22[mm]、奥行き幅=22[mm]、脚先幅=2[mm]、総重量約 2.8[g]、一脚が 2 自由度、二脚で 4 自由度の二足歩行ロボットを開発した。ロボットを設計する際、脚と接地面との微力な摩擦が推進力へと大きく影響する。したがって、これらのパラメータを変更して接地面と各プレートの接触面との摩擦力の差をつけて歩行実験を行った。柔軟アクチュエータとリンクでロボットを構成することで、部品点数が少なくなり、作業効率の向上を示唆した。
- (2) 二足柔軟歩行ロボットの脚の応答実験を行った。2 秒の電圧印加を行った後の OFF 時から完全な状態に戻るまでには 6 秒を必要とすることがわかった。また、脚のわたみ量は、最大たわみ $W_2=6$ [mm]、 $U_2=$ 約 1.7[mm]と示され、脚の荷重実験では、最大歩幅 6[mm]時では、約 0.07[N]になることが確認された。
- (3) ロボットの歩行実現で、本機は転倒せず前進することが確認された。この結果は、柔軟ロボットに関する研究分野へ大きく貢献したと考える。また ON 時間 $T_s=2$ [s]、OFF 時間 $T_p=6$ [s]時に 60 秒で約 30[mm]の移動が確認された。さらに、タイミング信号を変えても、ロボットは転倒することなく歩行し、速度制御できることを確認した。
- (4) 本章で開発したロボットは、ずり足歩行により、擬似的な二足歩行で静歩行を実現している。ずり足歩行は、坂道や大きな段差のある場所での移動、重力ないし慣性力の働いていない環境下などでは利用できないという問題がある。したがって、ひざのまげ伸ばしが十分に実現できるように、FFP アクチュエータを工夫し、脚のひとつが接地面から離れても、体を支えられる構造に改善することが今後の大きな課題である。

第 5 章

四脚柔軟歩行ロボットの開発

5.1 はじめに

本論文の目的は、柔軟歩行ロボットに関する分野を拡大するため、柔軟歩行ロボットを開発し、ロボットの有効性を示すことである。2章では、SMA と耐熱性・非導電性のポリエチレンプレートから構成される柔軟アクチュエータ (FFP アクチュエータ) を提案し製作した。3章では、柔軟なロボットの歩行形態を確認する立場から、FFP アクチュエータを外部から支持して歩行する振り子柔軟歩行ロボットとロボットの機構の一部として配置したカニ柔軟歩行ロボットを開発し、柔軟歩行ロボットの移動速度を向上させた。4章では、FFP アクチュエータは構造が単純であるという特徴があるため、屈曲部に関節を持たない二足柔軟歩行ロボット (2.8g) を開発し、単純化・軽量化・小型化について追求した。しかしながら、開発した二足歩行ロボットは、微小なガタやブレによってバランス制御が不可能となり、転倒してしまう。また、ずり脚歩行という擬似的な二足歩行のため、複雑な環境下の歩行は難しいと考える。そこで、本章では、床の摩擦や反力のばらつきに強い歩容を確保する四脚柔軟歩行ロボットを開発し、歩行パターン (前進・後退・旋回歩行) を実現することで柔軟歩行ロボットの方向性を示す。

5.2 四脚柔軟歩行ロボットの概要

前章では、FFP アクチュエータは構造が単純であるという特徴があるため、屈曲部に関節を持たない二足柔軟歩行ロボット(2.8g)を開発し、歩行を試みた。その結果、二足柔軟歩行ロボットは、微小なガタやブレによってバランス制御が不可能となり、転倒してしまうことがわかった。また、ずり脚歩行という擬似的な二足歩行のため、複雑な環境下の歩行は難しい。二足歩行は動的歩行を追及することもできるが、複雑な構造や制御となるため、本研究の主旨から外れる。そこで、二足以外のロボットについて考える。脚式歩行には、静歩行と動歩行がある。脚式ロボットは、多脚形式にすることで、静歩行のみを考慮すればよい。制御もより簡単になる。一般的に、四脚以上のロボットになると、重量物を運ぶには好都合だが自由度は増加され、機構が重く複雑になり、制御の煩雑化を招く。またアクチュエータが増えるにしたがって、エネルギー消費も大きくなる。そこで、本章では比較的脚総数が少なく、さらに安定的な歩容を確立している四脚歩行ロボットに焦点を当て、四脚柔軟歩行ロボットを開発する。

5.2.1 四脚柔軟歩行ロボットの動作領域

ロボットの開発にあたり、脚の先端の変位量と動作領域の関係からロボットの寸法を決定する。ロボットを正面から見たモデルを図 5.1 に示す。ロボットは、脚の付け根 $P1$ 点で支持され、曲率半径 R により $P2$ へ配置されている。SMA は L_s の長さによって、 $C1$ から $C2$ へ SMA のたわみが発生しないようにプーリを介して垂直に固定する。ここで SMA に入力信号 i を与えると、 W 方向に向かって脚はモーメント M を伴って湾曲する。

$$M = \sqrt{4(EI)^2 \left(\frac{\pi^2}{L^2} - \frac{i}{EI} \right)} \quad (5.1)$$

$$I = \frac{Et}{12(1-\nu)^2} \quad (5.2)$$

L は脚の高さ (付け根から接地点まで), E はヤング率, ν はポアソン比, t は薄板の厚みである. この時の脚先端の変位量を Q とすると,

$$Q = \sqrt{\left\{ h + \left(L - \frac{L}{\varphi} \sin \varphi \right) - h \cos \varphi \right\}} \quad (5.3)$$

で表される. φ は脚先端の法線となす角である.

脚先端の変位量 Q の先端から床へ直角な点 U と $P2$ の距離, すなわち, $P2-U$ が動作領域 τ である.

ここで, 2章で確認した FFP アクチュエータの動特性より, $L = 70[\text{mm}]$ の脚を持つロボットを製作するため, 両脚の動作領域 $\tau \times 2 + \alpha$ (α は, τ からロボット中心までの距離) より, $P1-P3$ を $23.5[\text{mm}]$ と決定し, 試作機を製作した.

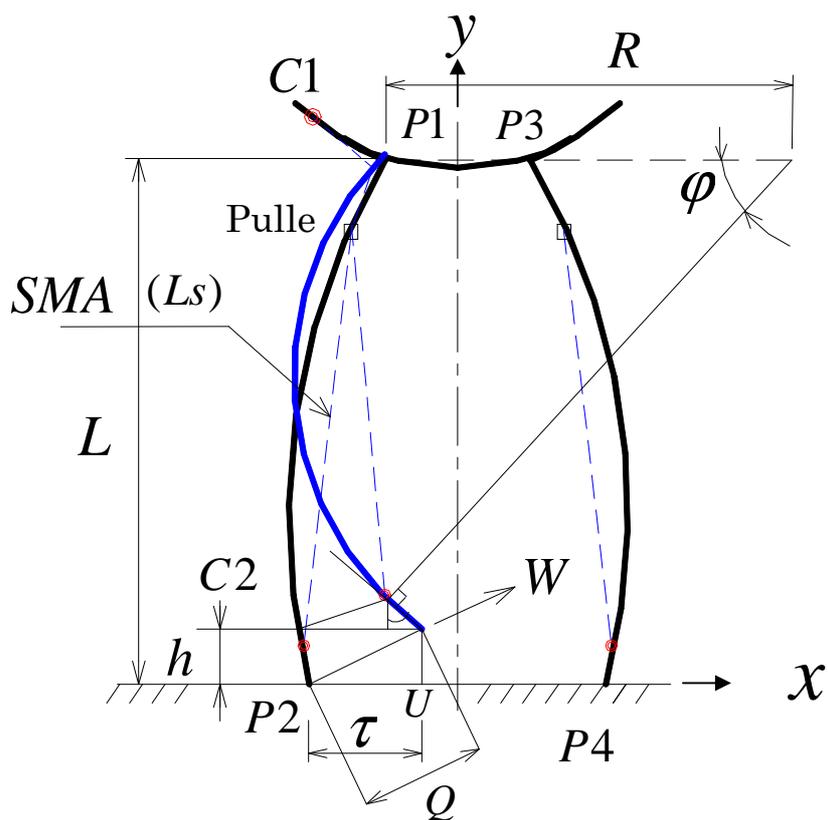


図 5.1 : 四脚柔軟歩行ロボットの変位と動作領域の関係

5.2.2 四脚柔軟歩行ロボットの構成

製作した四脚柔軟歩行ロボットを図 5.2 に示す. 本ロボットは, 全長=70[mm], 横幅=45[mm], 奥行き幅=50[mm], 総重量約 5.7[g]で 3.5[V], 0.7[A]で駆動する一脚が 1 自由度, 四脚で 4 自由度のロボットである. ロボットの組み立ては, 4 つの FFP アクチュエータの SMA が, それぞれロボットの内側を向くように並べ, テンションが緩まないように調整しながら固定した.

次に, 柔軟プレートおよびアクチュエータ部品を図 5.3 に示す. このように, 単純で少ない部品からロボットを構成することができる. SMA の配置は, 図 5.4 のように行った.

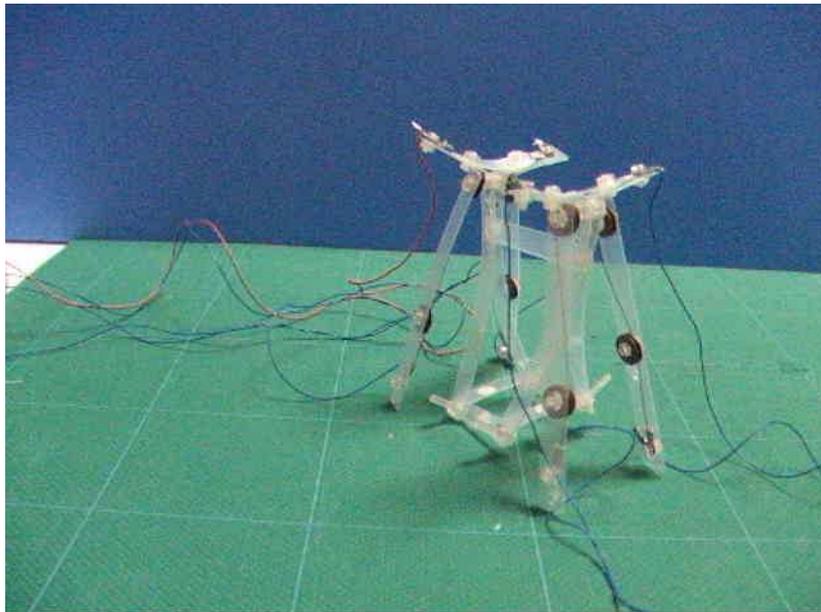


図 5.2 : 四脚柔軟歩行ロボット

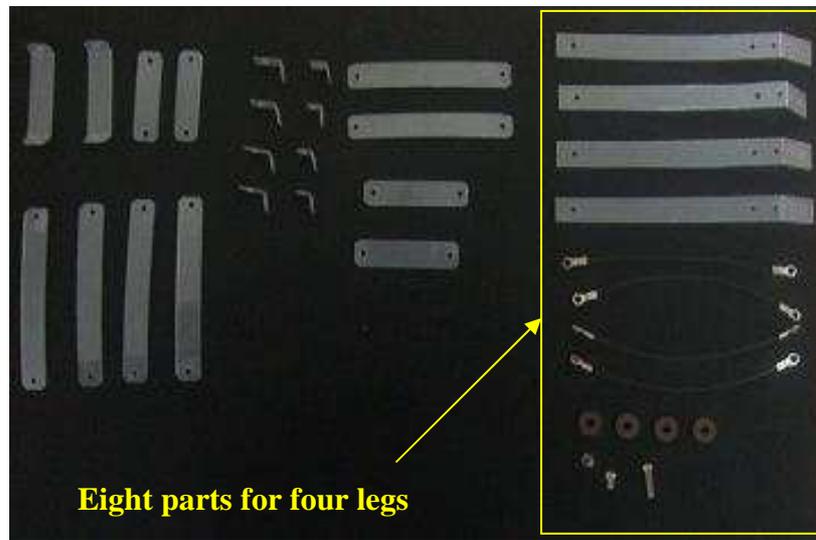


図 5.3 : 四脚柔軟歩行ロボットの構成部品

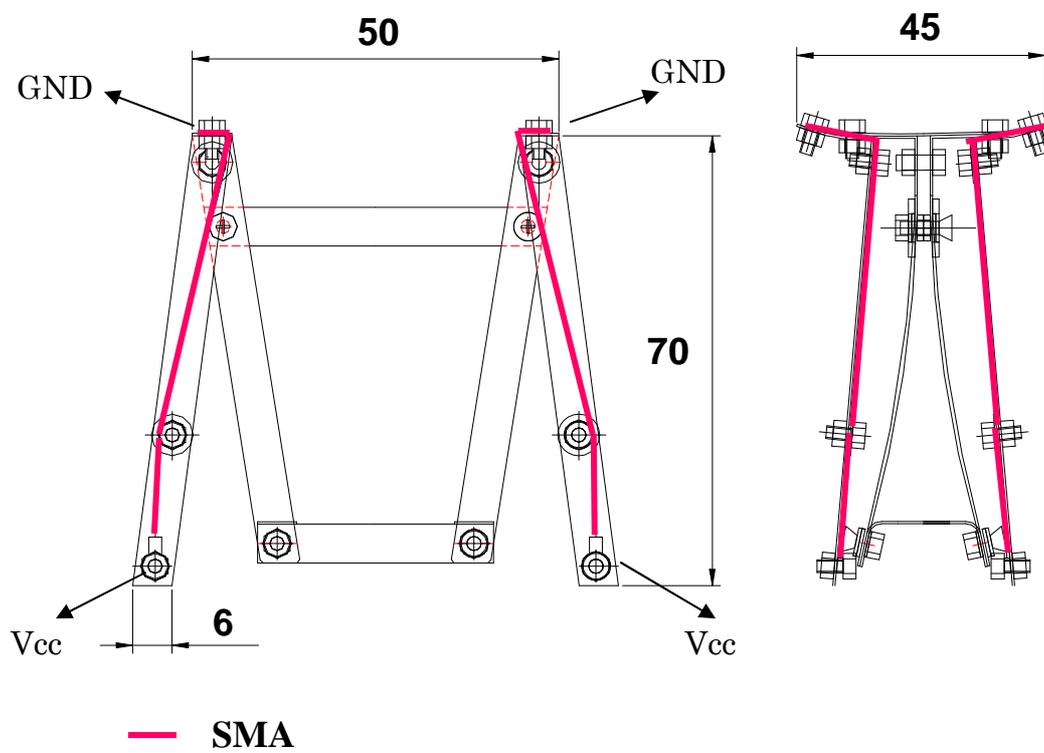


図 5.4 : 四脚柔軟歩行ロボットの SMA の取り付け方

5.2.3 四脚柔軟歩行ロボットの脚形状

製作したロボットで歩行実験を試みた結果、歩行をすることが確認された。しかしながら、ON-OFF 信号を繰り返し行っていくと、微小な構造上のガタや歩行時のブレなどによって、床と脚底の摩擦の影響が大きくなり、バランス制御が難しくなることがわかった(図 5.5)。したがって、ロボットの床面と脚との摩擦を小さくするため工夫が必要になる。そこで、脚形状について検討を行った。

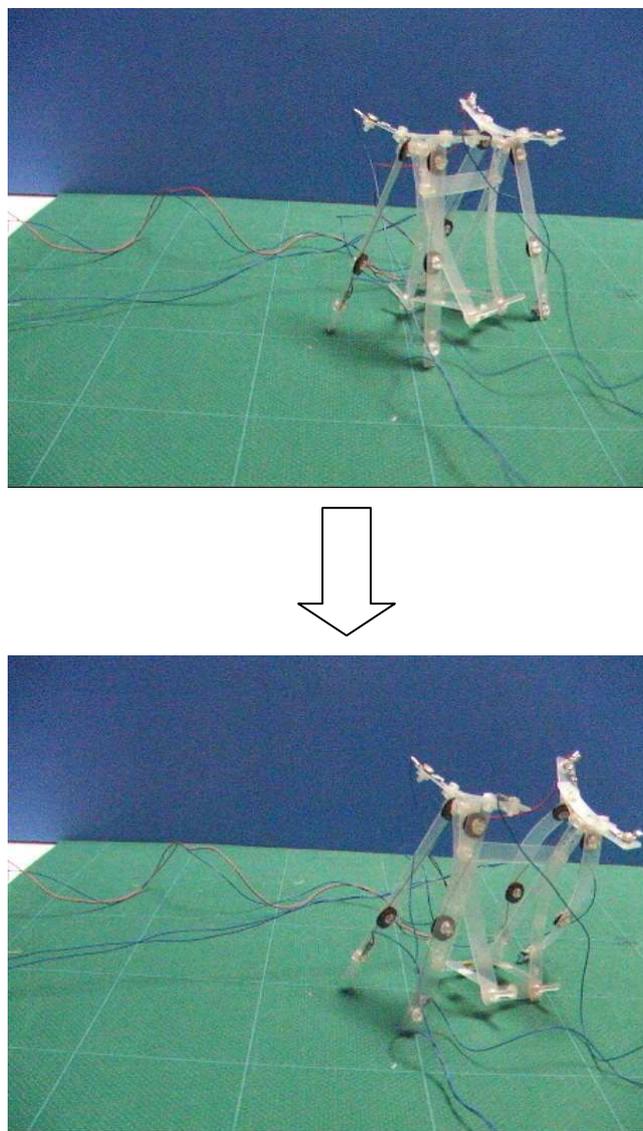


図 5.5 : 四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験

図 5.6 は、[a]～[c]の3つのパターンの脚形状（片側）について、比較したものである。（●）は一脚の初期位置の状態，（○）は駆動後の状態，青い破線は SMA である．基礎実験として用意したそれぞれの脚形状の動きをカメラで測定し，そのデータを基にしてプロットした結果を示している．ロボットの脚の付け根，すなわち，初期の支持点を P3 とおく．この時，[a]は P3 からゆるやかな曲率を持つ脚（弓形），[b]は P3 からフラットに近い曲率の脚（フラット形），[c]は P3 から外側へと膨らんだ脚（扇形）の形状である．それぞれの脚を駆動すると，[a]では，P3 が初期状態と駆動後に変化がなく，姿勢にふらつきがないことがわかった．[b]および[c]の脚は，P3 点からのふらつきが確認される．ここで，図 5.7 に[a]脚の ON-OFF 時での姿勢の状態を示す．上部におもりを載せて駆動した状態でも，姿勢に変化がみられない．すなわち，脚と床との摩擦が小さくなったと判断される．この実験結果により，図 5.8 および図 5.9 に示すようにロボットを改善し，ON-OFF タイミングによるバランス制御の向上を図った．

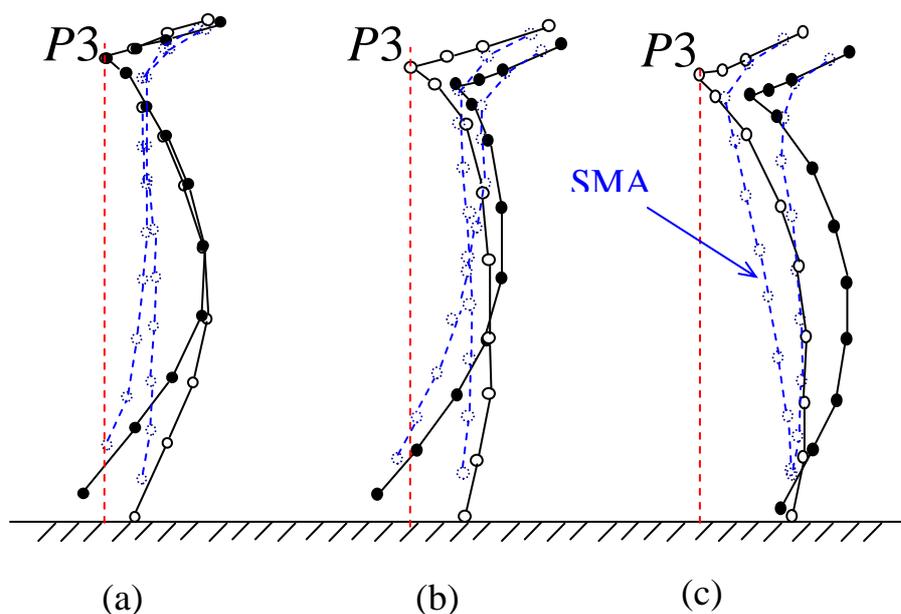


図 5.6： 脚形状の実験および結果



図 5.7 : ON 信号による姿勢変化の様子 ([a]タイプ)

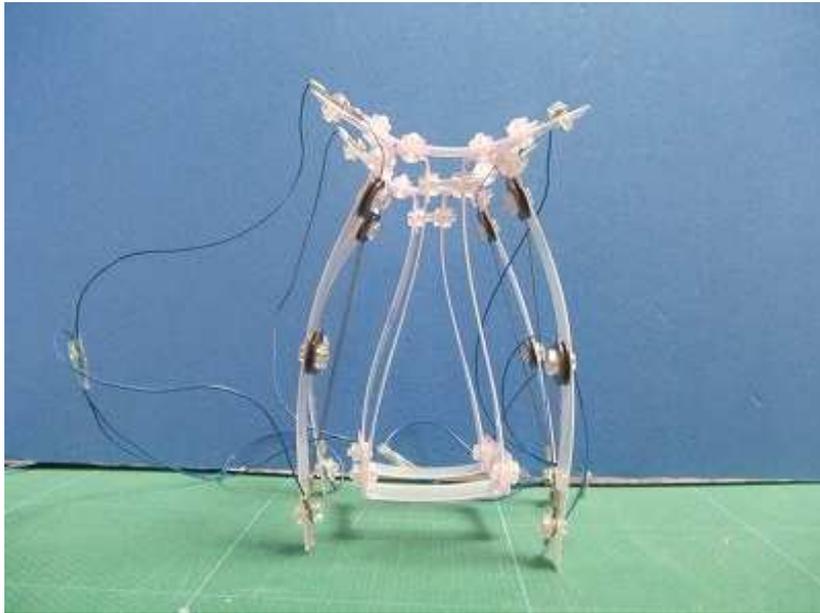


図 5.8 : 改善後の四脚柔軟歩行ロボット (正面図)



図 5.9 : 改善後の四脚柔軟歩行ロボット

5.3 四脚移動ロボットの歩容原理

5.3.1 歩容の決定

脚式ロボットの最初の取り組みにおいては、歩行実現するための歩容を決定することである。脚式歩行ロボットは、前後左右に進行を変換できる踏み換え歩容や旋回歩容などの歩行パターンが求められる。そこで、図 5.10 に、四脚柔軟歩行ロボットの歩容原理を示す。ここでは脚の質量を無視して、胴体の中心を重心とみなすことにする。重心を原点にとり、進行方向に X 軸、左右方向に Y 軸を定める。支持脚を●、遊脚を○で表し支持脚多角形を直線で結ぶ。四脚が接地面に支持しており、胴体中心は平行四辺形の中央に位置する。信号を ON すると、 X 軸に向かって前進する。ON-OFF の入出力は以下の手順で行う。

- 1) 信号を左後脚に ON すると、進行方向に向かって湾曲する。
- 2) 十分に左後脚が湾曲した所で左前脚に信号を ON し、脚を後方向きに湾曲させ、左後脚を接地面に接触させる。
- 3) 左後脚を OFF にすると薄板の反復力によって脚は伸び上がり、ON 状態の前右脚が遊脚となる。
- 4) 後左脚は支持されながら、反復力によって姿勢を元の状態に戻すと同時に左前脚を OFF にして前へ蹴り出す。右脚も同手順で繰り返す。

ロボットが歩容をする際には、支持脚三角が後ろから前へと切り替わる時点で安定余裕が著しく低下するという問題があるため、3脚のいずれかが機能しながら床面に接地している状態にある。また後進時には、前脚と後脚の手順を逆に変更すればよい。

具体的に四脚柔軟歩行ロボットの歩容について撮影した結果を図 5.11 に示す。黄色の○印は SMA であり、赤い○はロボットの形状である。ロボットの一脚の移動距離は平均で約 15[mm]と確認された。

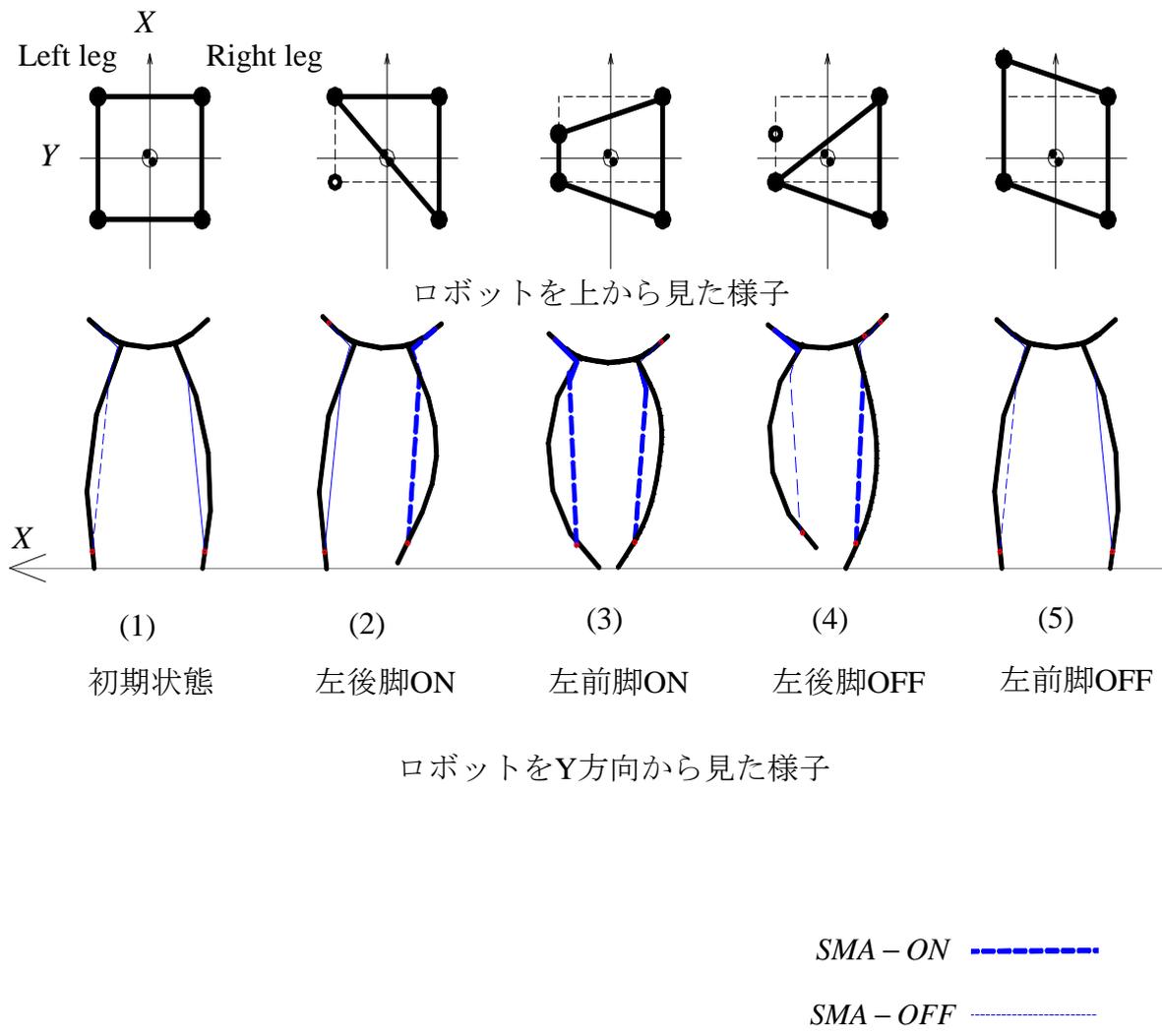


図 5.10: 四脚柔軟歩行ロボットの歩容原理

Y 方向から見た時の実験の様子

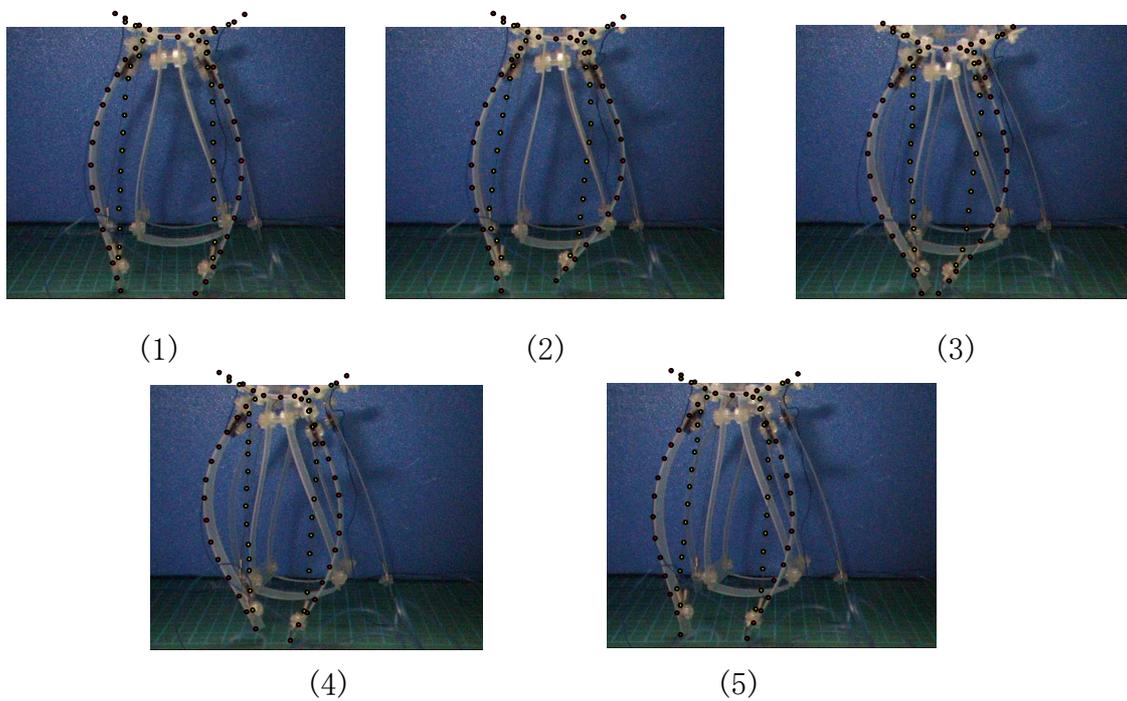


図 5.11 : 歩容実験

5.4 四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験

5.4.1 実験システム

実験制御システムを図 5.12 に示す。制御システムは、ワンチップマイクロコンピュータを用いた駆動回路およびパワー回路から構成される。図中の青い破線は SMA を表している。SMA に電圧印加すると 4 本の脚は、それぞれロボット機体の内側に湾曲するように構成されている。

進行方向に向けて、左後脚($E1$)→左前脚($E2$)→右後脚($E3$)→右前脚($E4$)の脚へ手順でオープンループによって $3.5[V]/0.7[A]$ の ON-OFF 信号を連続的に繰り返す。回路図を図 5.13 に示す。駆動には PIC12F675 を採用した。

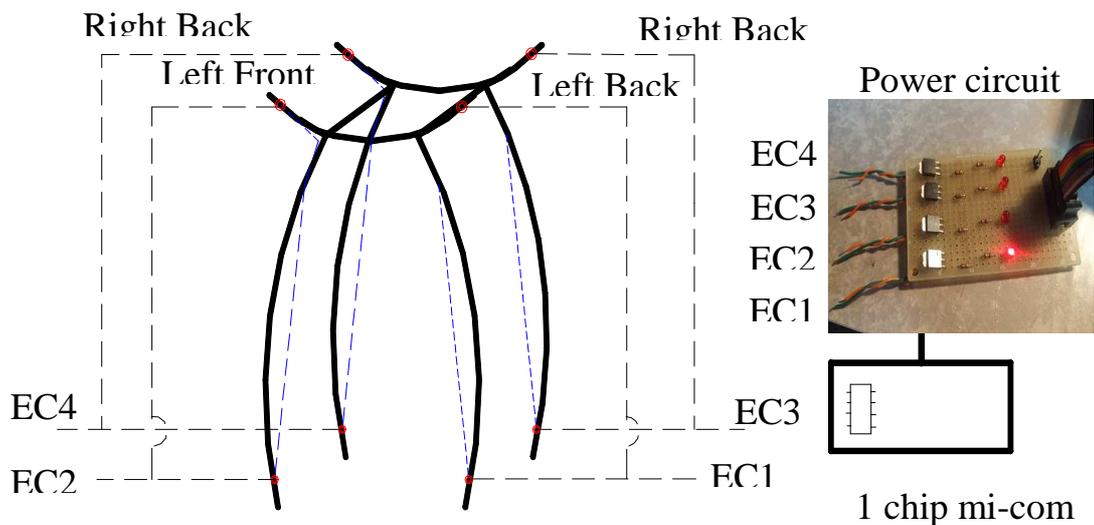


図 5.12： 四脚柔軟歩行ロボットの実験システム

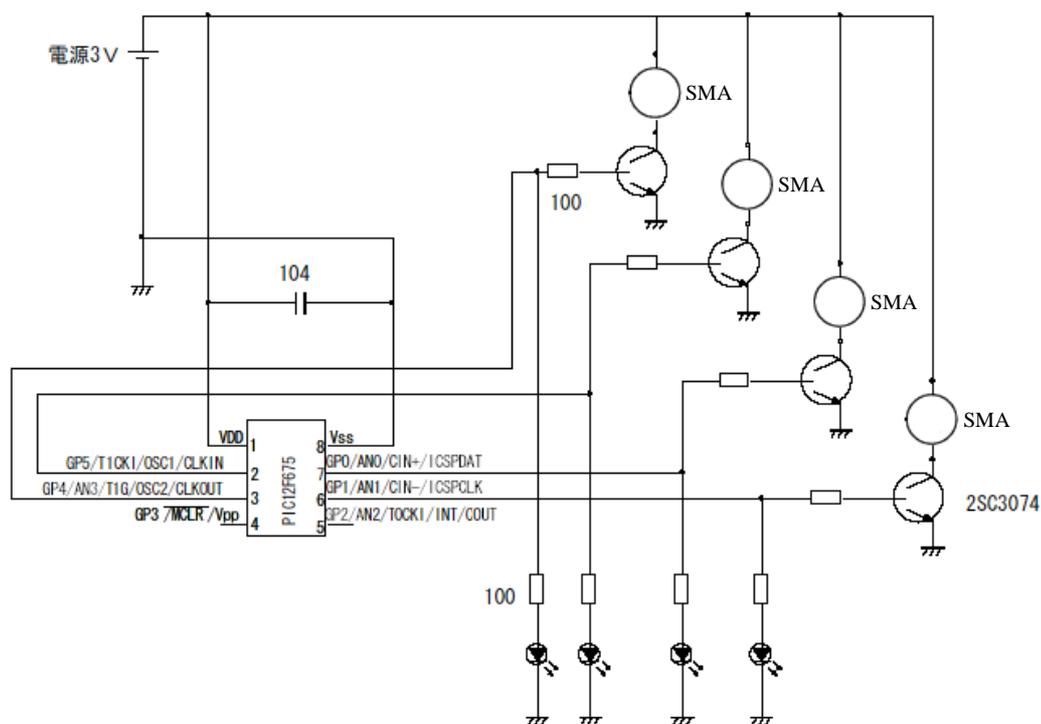


図 5.13 : 四脚柔軟歩行ロボットの駆動回路図

5.4.2 ON-OFF 信号タイミング

四脚柔軟歩行ロボットの ON-OFF 信号タイミングによる支持脚期間および遊脚期間を図 5.14 に示す。基本歩容では、ON-OFF 信号タイミングで、4 脚のうちの 3 脚は常に接地面に支持している。しかしながら、OFF 時でも接地面に支持をしていない期間がある。その理由として、ON-OFF 制御を続けていくと、柔軟な機構から発生する脚の着地位置の誤差や SMA によるヒステリシスが、ON-OFF タイミングに大きく影響し、安定した歩行が行えなくなる。前脚での OFF 状態と遊脚期間の位相をずらすことで、後脚が一定の変位量を確保し、着地での誤差が少なくなることが前章の実験にて確認されたため、歩行を連続的に行えるように、制御系で調節を行った。四脚柔軟歩行ロボットの ON-OFF 信号は図 5.15 に示す通りである。

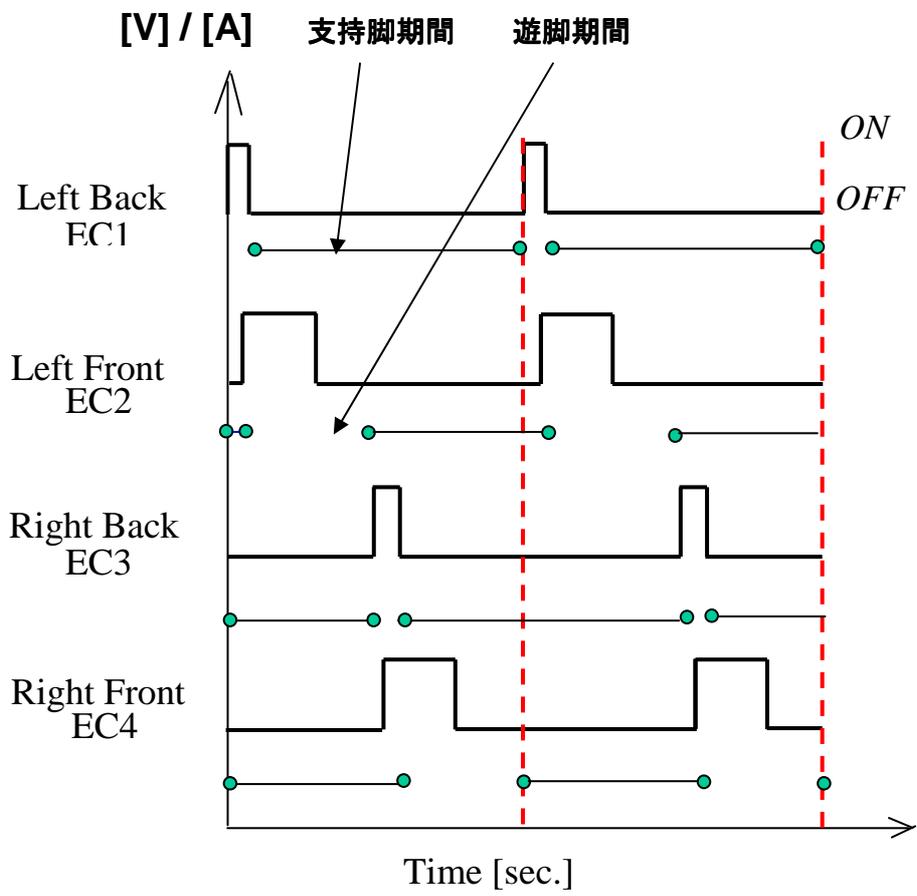
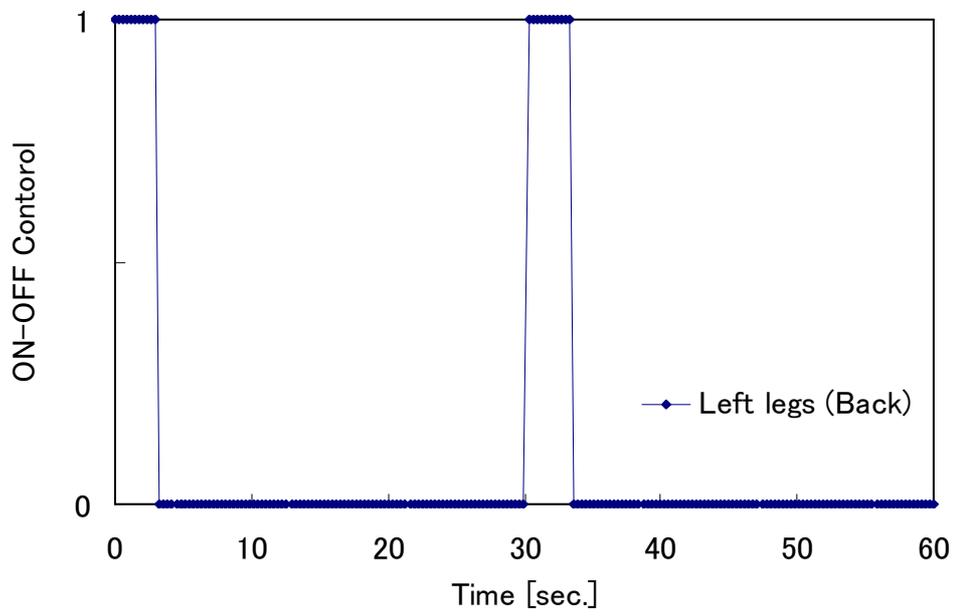
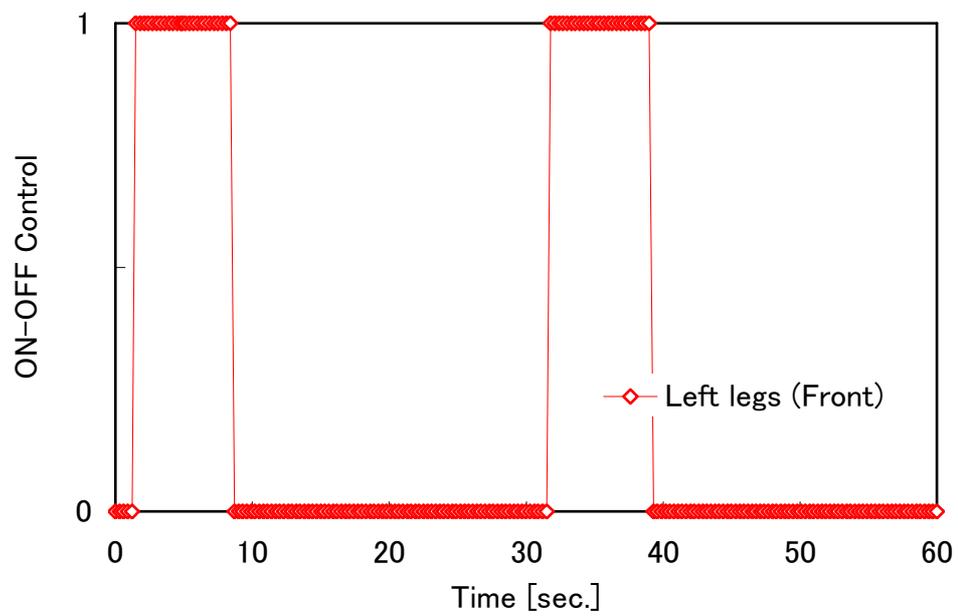


図 5.14 : 四脚柔軟歩行ロボットのタイミングチャート

3.5[V] 0.7[A]



3.5[V] 0.7[A]



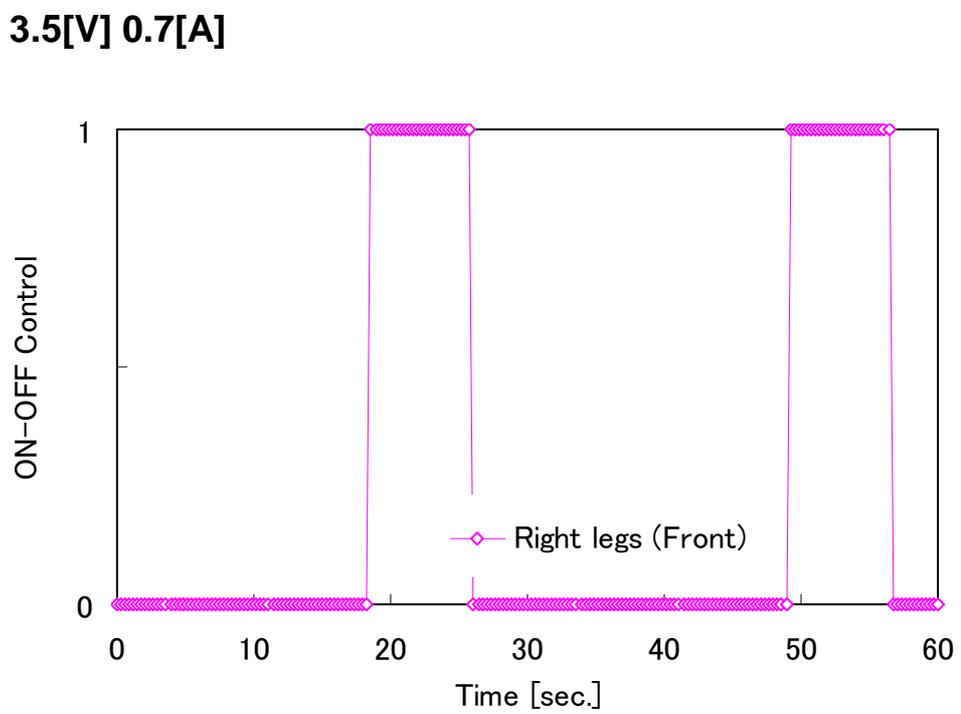
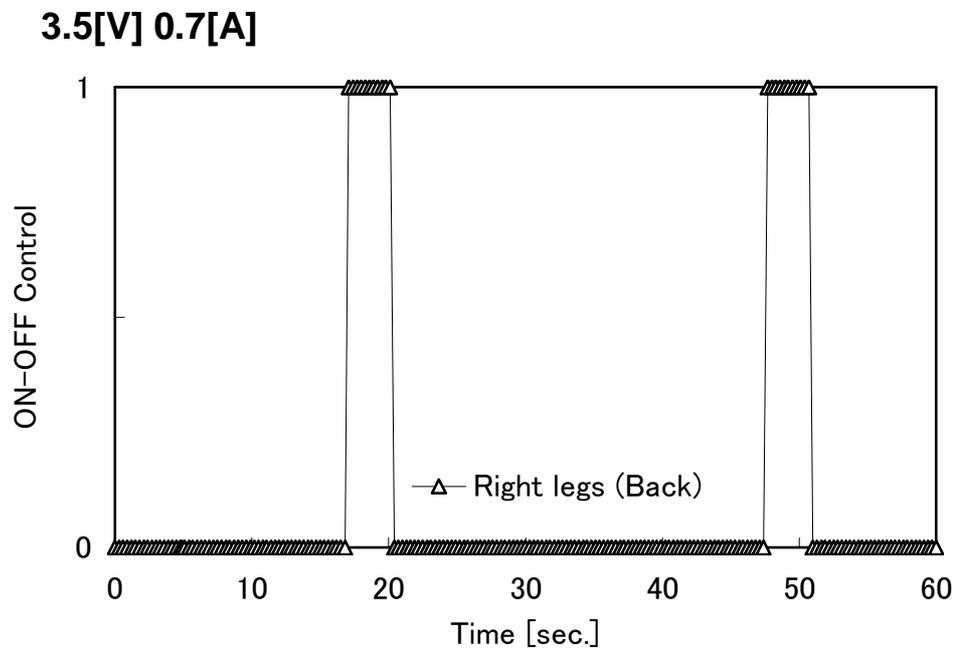


図 5.15 : 四脚柔軟歩行ロボットの ON-OFF 信号

5.4.3 四脚柔軟歩行ロボットの移動距離

図 5.16 は 3.5[V]/0.7[A]の ON-OFF 駆動による四脚柔軟歩行ロボットの脚先端の移動軌跡と移動距離である。ロボットは転倒することなく、安定して歩行を行うことが確認された。またロボットは、約 60 秒でおおよそ 25mm から 30mm の移動が確認された。したがって、平均 0.45[mm/s]の速度で歩行を達成する。次に、図 5.17 に歩行の様子を示す。このように、四脚柔軟歩行ロボットの歩行を達成することによって、柔軟ロボットの適応範囲を広げるものとしても高く評価でき、柔軟歩行ロボットの研究分野の拡大に向けて大きく貢献したものとする。

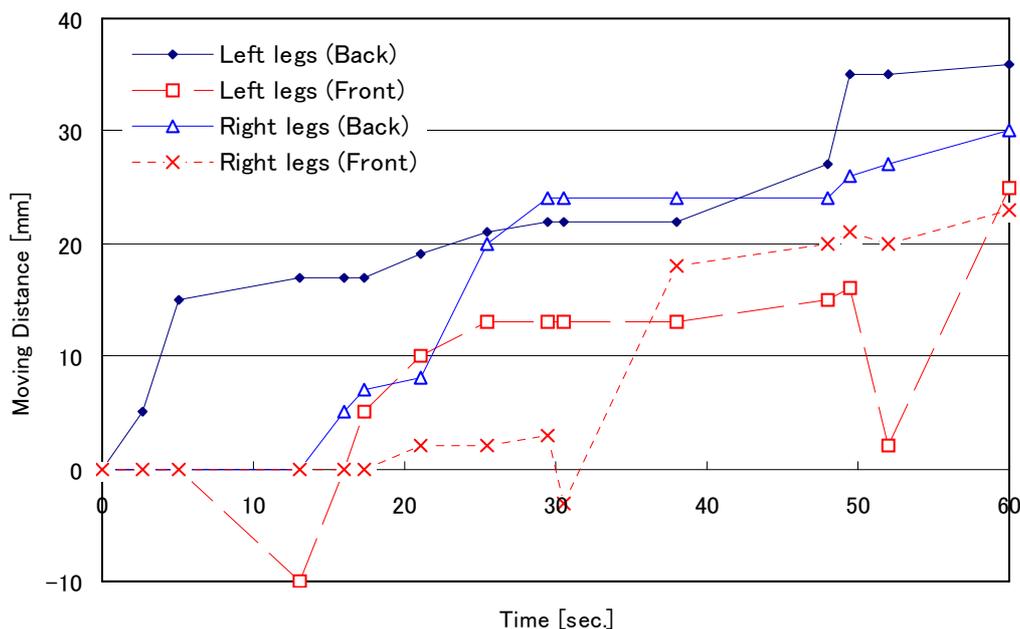


図 5.16 : 四脚移動ロボットの移動軌跡と移動距離

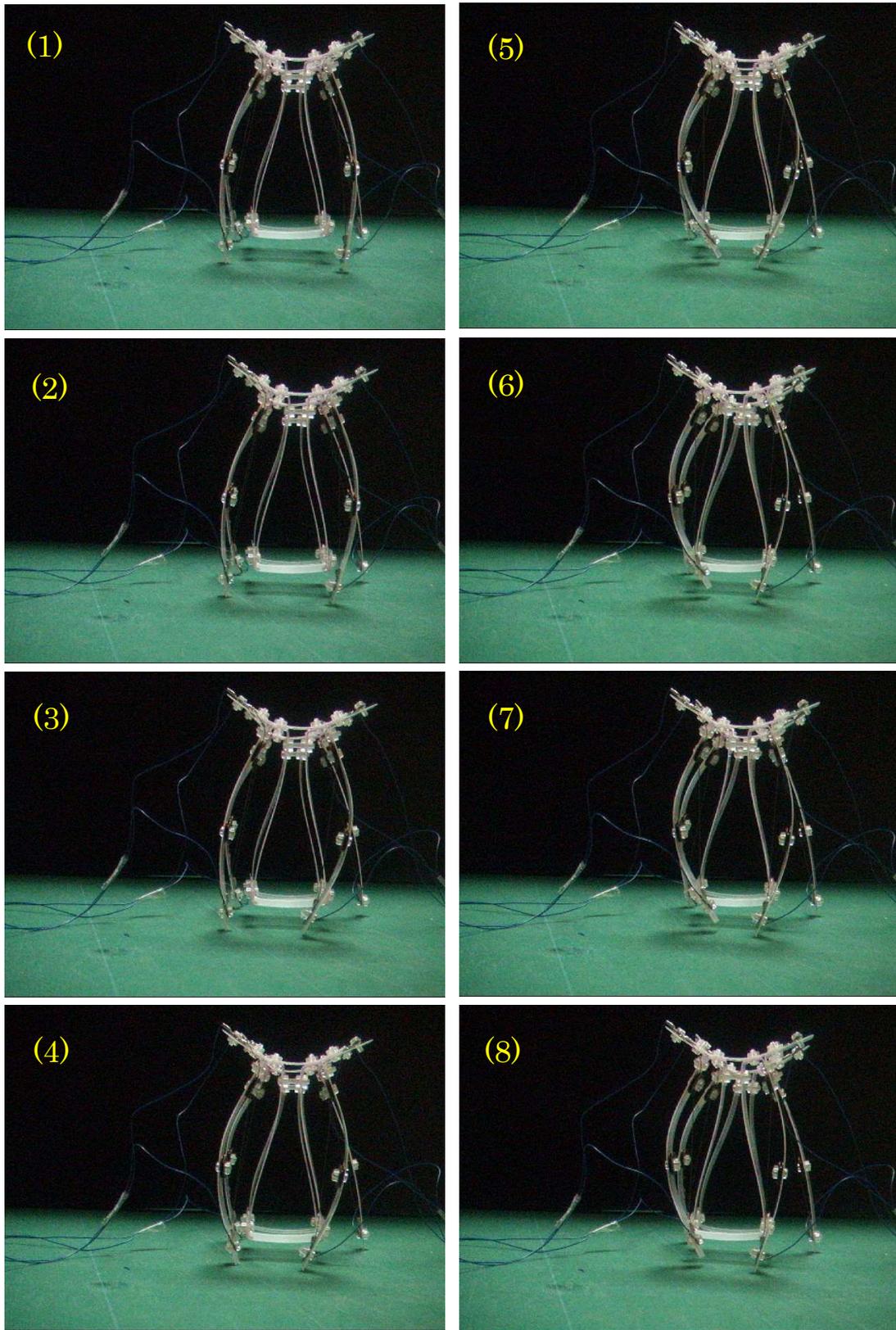


図 5.17 : 四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験

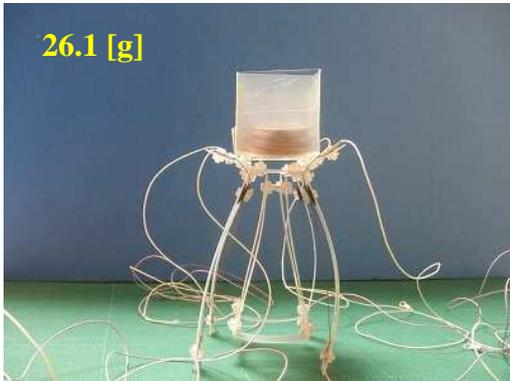
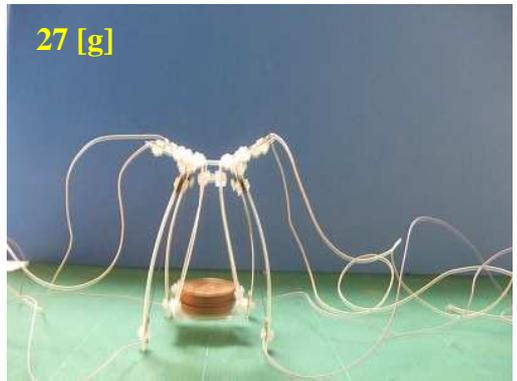
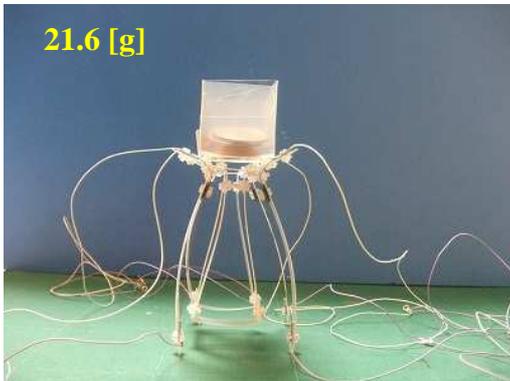
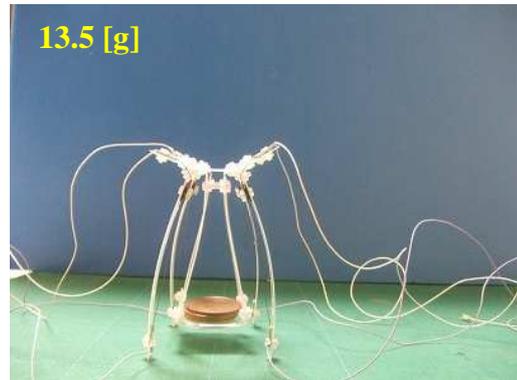
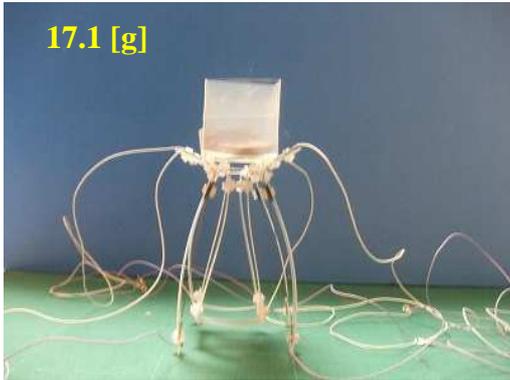
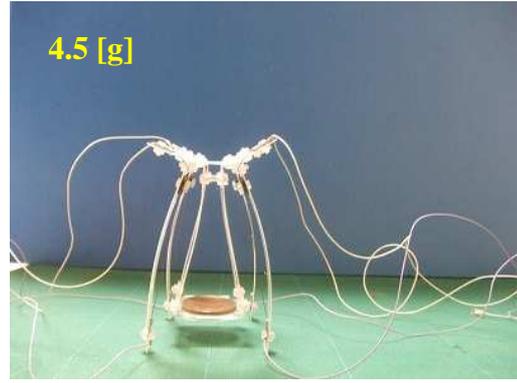
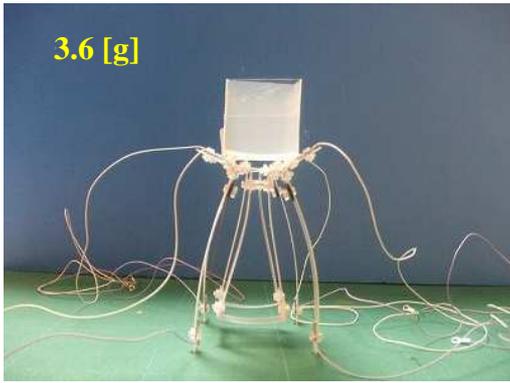
5.5 四脚柔軟歩行ロボットのペイロード

歩行（移動）ロボットは、転倒することなく目的地まで移動し、人間に代わってなんらかの仕事をすることを目的としている。そして、他から支持されることなく自由に動けること（歩容パターンの確立）、自重以外の重量物（ペイロード）を運搬できること、持続して歩行すること（自律）の 3 つの作業が移動ロボットに課せられる基本的項目である。これらの項目を達成するために、運搬可能な積荷重量(ペイロード)を確認する。

はじめに、ロボットの重量物を搭載するためのエリアについて実験を行う。ロボットの上部にケースを取り付け、そのケース内におもりを入れていきロボットの姿勢の安定を確認する。

3.6[g]のケースの中に、17.1[g], 21.6[g], 26.1[g]と順に荷重をかける。同様に、ロボット機体の下部に同様の荷重をかけ、負荷荷重を大きくしていく。

その結果を図 5.18 に示す。上部では、ロボットの機体は左右に揺れ、非常に不安定な状態が確認された。下部では、ロボットは安定した姿勢で倒立している。さらに、40.5[g]まで荷重をかけたところで、脚がふらつき出し、49.5[g]でロボットは荷重に耐えられずに転倒した。したがって、自重の約 6 倍の荷重で耐えることができる。以上の結果から、重量物を搭載するエリアは、機体の中央下部の位置へ配置する。



(上部エリア)

(下部エリア)

図 5.18 : 重量物エリアの確保に関する実験

次に、ペイロードおよび、運搬時での歩行の影響について歩行実験を行い、ロボットと塔載物の関係について確認する。まず荷重は、0[g], 1[g]と徐々に加えていった。ロボットの移動軌跡を計測するため、3次元カメラを用いてモーションキャプチャーを行った(図 5.19)。ペイロード実験の結果を以下に説明する。図 5.20 は 0g, 5g, 10g の荷重付加を与えた時の移動軌跡である。ロボットは転倒せずに進行方向に向かって歩行することがわかる。移動距離は 30 秒につき 0g = 38mm, 5g = 43mm, 10g = 48mm とそれぞれ観測された。したがって、平均速度は、約 1.6mm/sec である。また図 5.21 に 13g から 15g 以上の荷重付加を与えたときの移動軌跡を示す。その結果、歩行が不安定になり、前進することが不可能になった。この原因として、脚の発生力が接地面との摩擦力より小さくなったのではないかと思われる。したがって、10g 以上の搬送物を運搬させるには、アクチュエータの数を増し、脚に強い発生力を与えるなどの強化、改善が求められる。

以上により、約 10g の荷重付加、すなわち、自重のおよそ 1.5 倍のペイロードを確保できることを確認した。

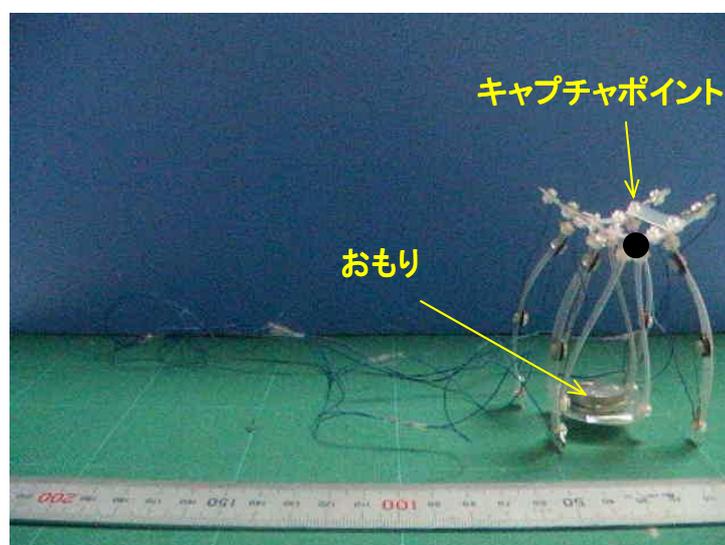


図 5.19 : ロボットのペイロード実験

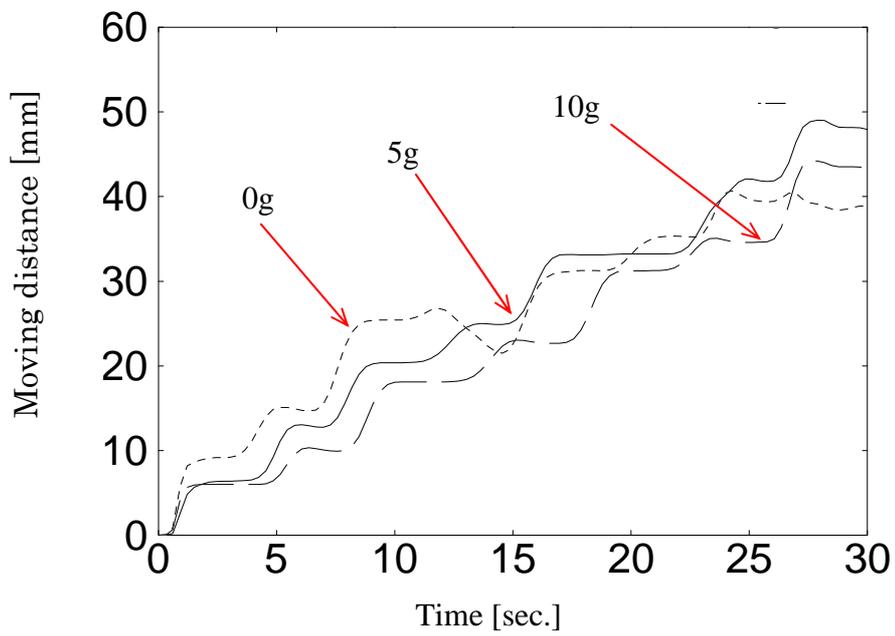


図 5.20 : ペイロードによるロボットの移動軌跡
(0[g], 5[g], 10[g])

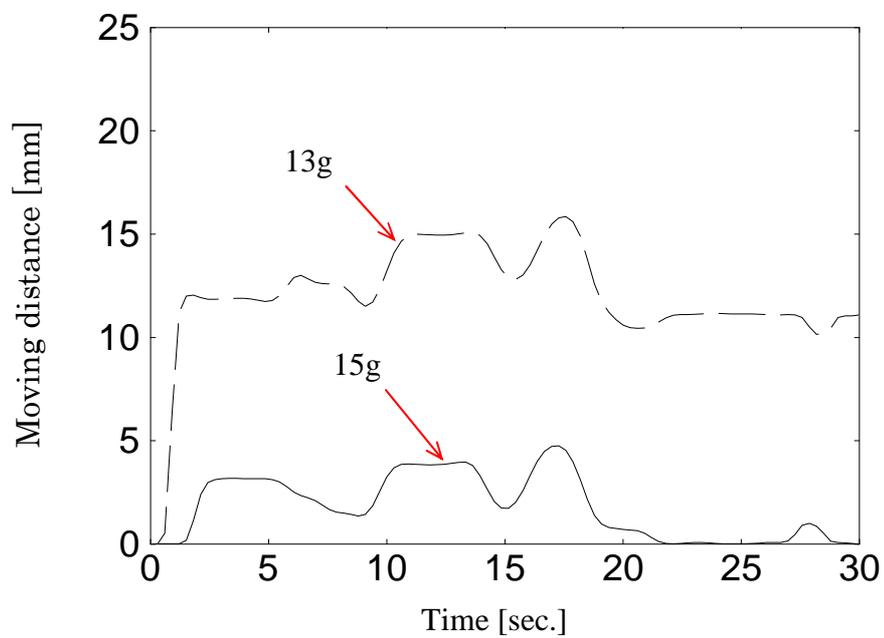


図 5.21 : ペイロードによるロボットの移動軌跡
(13[g], 15[g])

5.6 四脚柔軟歩行ロボットの巡回歩容

脚移動ロボットの特徴の一つは、優れた環境適応能力を持っていることである。しかしながら、この能力を十分に発揮するためには、環境やロボットの状態に応じて、歩容も柔軟に対応しなくてはならない。したがって、前進、後退運動に加えて、体の向きを変える、あるいは、そのままの姿勢で狭い空間から抜け出すような脚の踏み換え歩容が必要である。そこで、ロボットの脚に番号をつけて巡回歩容の実験を行った（図 5.22）。ロボットを巡回させるための ON-OFF 信号を図 5.23 に示す。L1=13.4s , L2=12.3s , R1=19s, R2=18s とこのように位相と変えることでロボットに回転トルクを発生させ、ロボットは巡回を行うことができた。

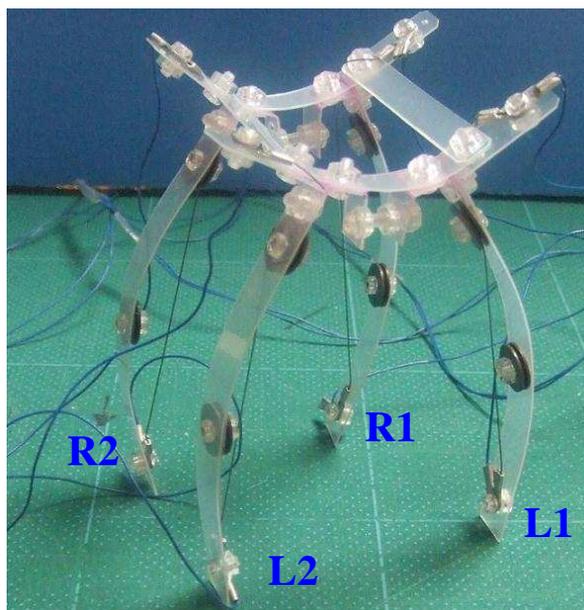
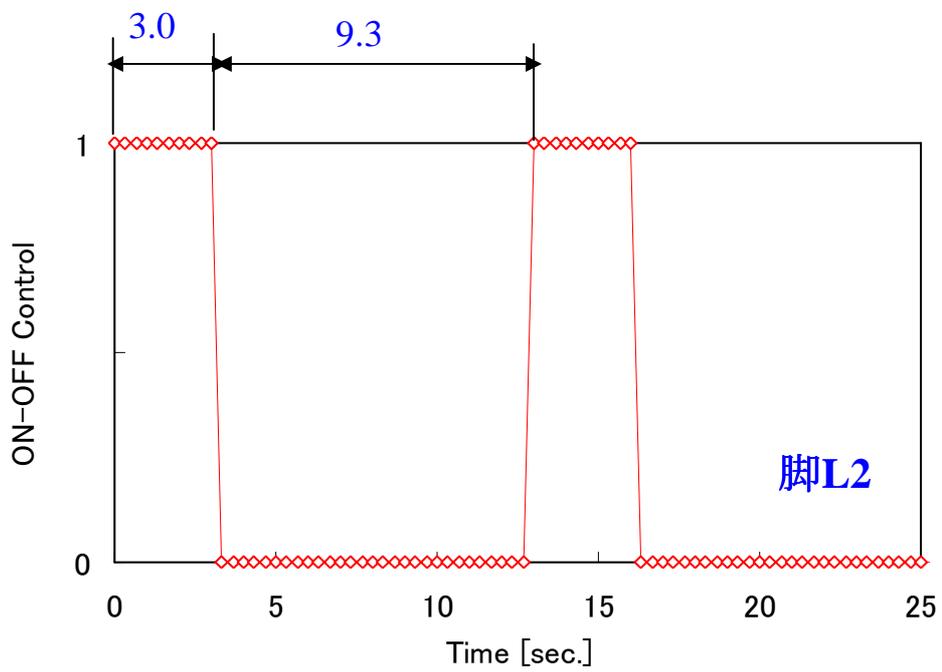
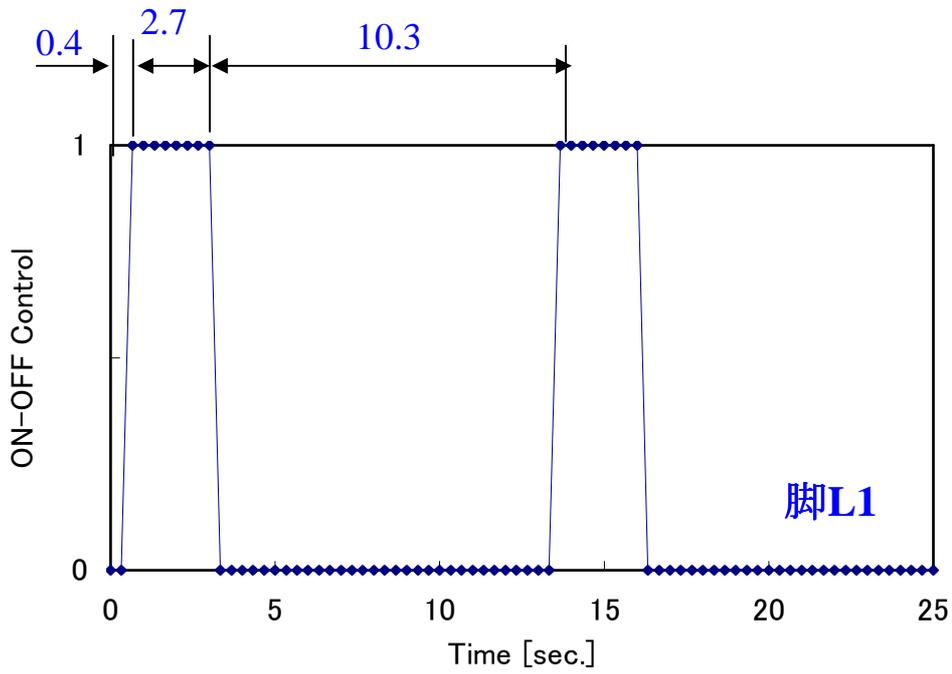


図 5.22 : 四脚柔軟歩行ロボットの巡回歩行の脚番号



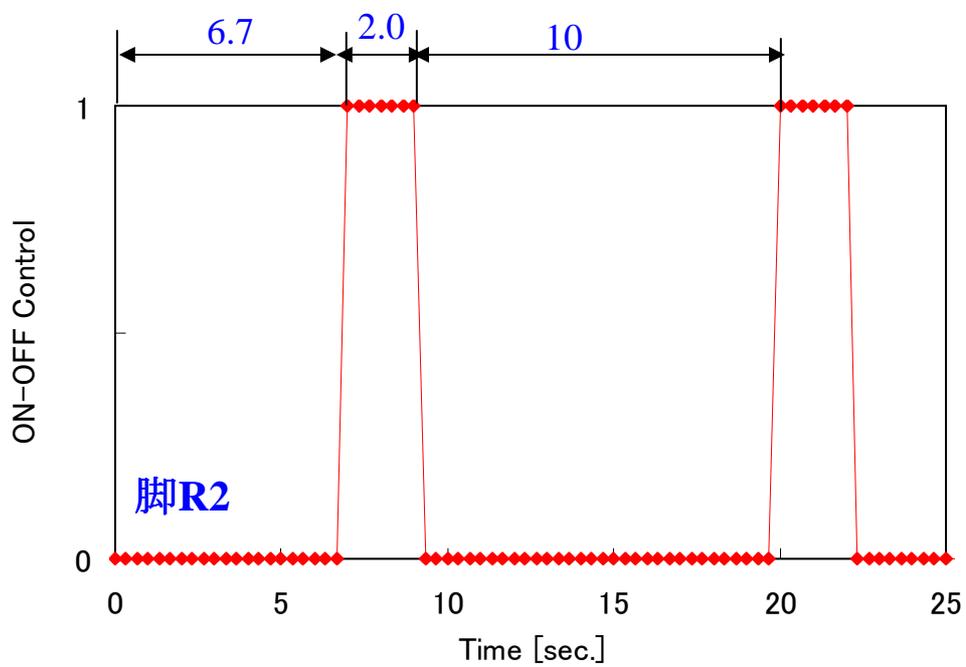
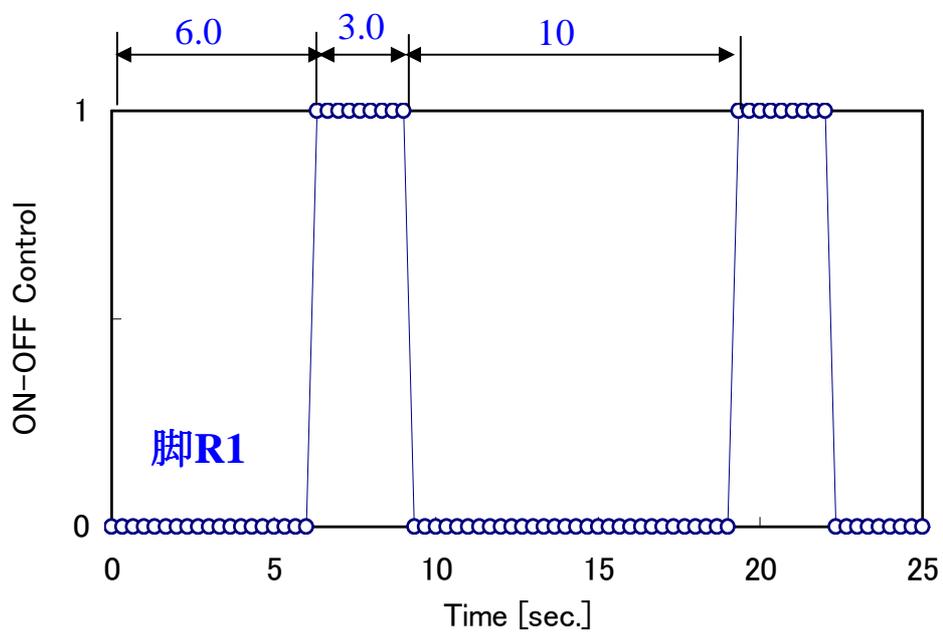


図 5.23 : 旋回歩容のための ON-OFF 信号

ここで、四脚柔軟歩行ロボットの旋回歩容の状態を明らかにするため、「歩容チャート」を製作した(図 5.24)。歩容チャートは帯グラフで示し、脚が浮いている状態を黒、接地している状態を白とする。さらに、L1, L2, R1, R2 それぞれの脚先の動きについて図 5.25 に示す。1~24 までがロボットが 90 度旋回した時の脚の運びである。ロボットはほぼ同じ位置で旋回していることがわかる。図 5.26 は旋回実験の様子である。5 サイクルの周期(約 80 秒)かけて右回りに回転させている。以上のように、大きな回転エリアを必要としない狭いスペースでの方向転換を行うことを確認した。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L1										
L2										
R1										
R2										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L1										
L2										
R1										
R2										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L1										
L2										
R1										
R2										
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
L1										
L2										
R1										
R2										

図 5.24 : 四脚柔軟歩行ロボットの旋回歩容チャート

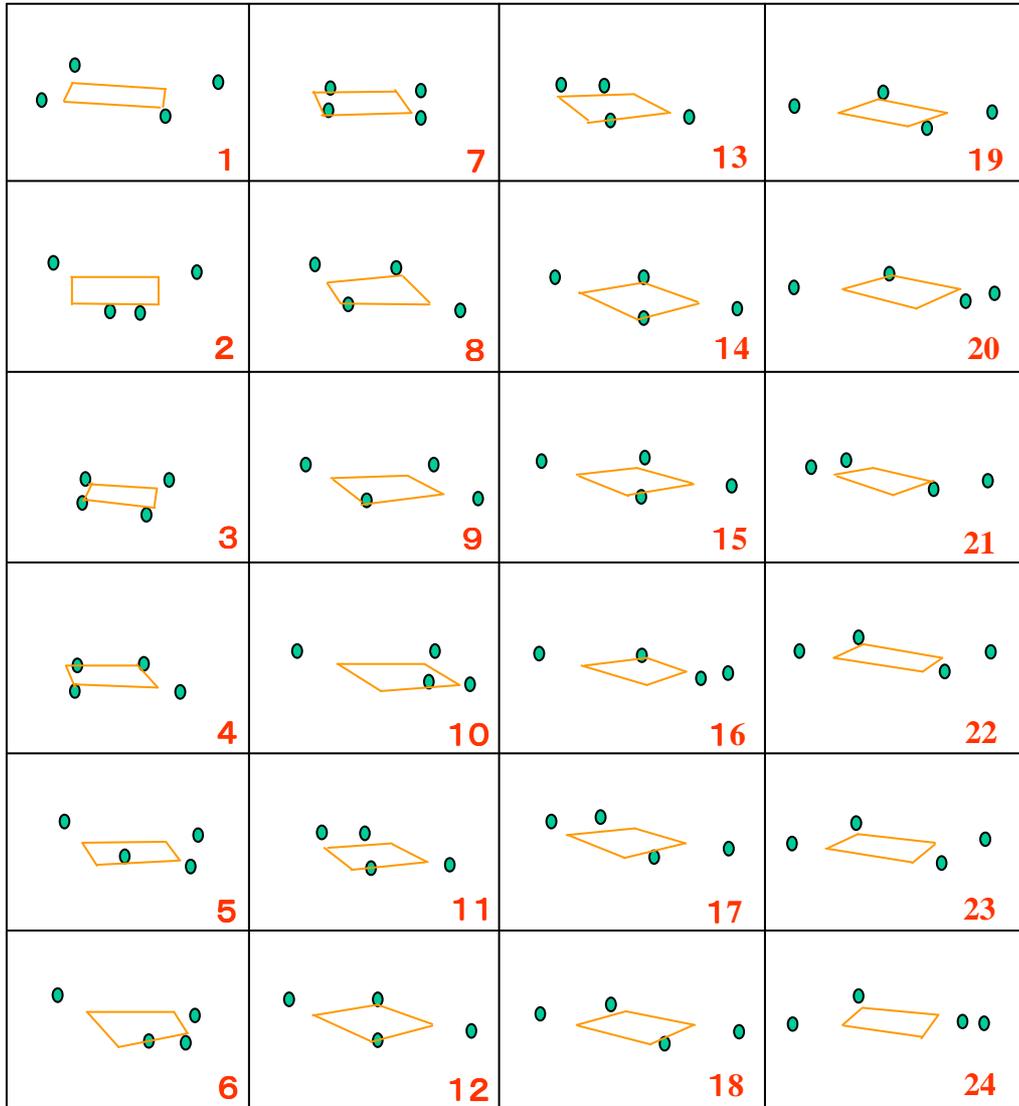


図 5.25 : 旋回歩行における脚先の運び

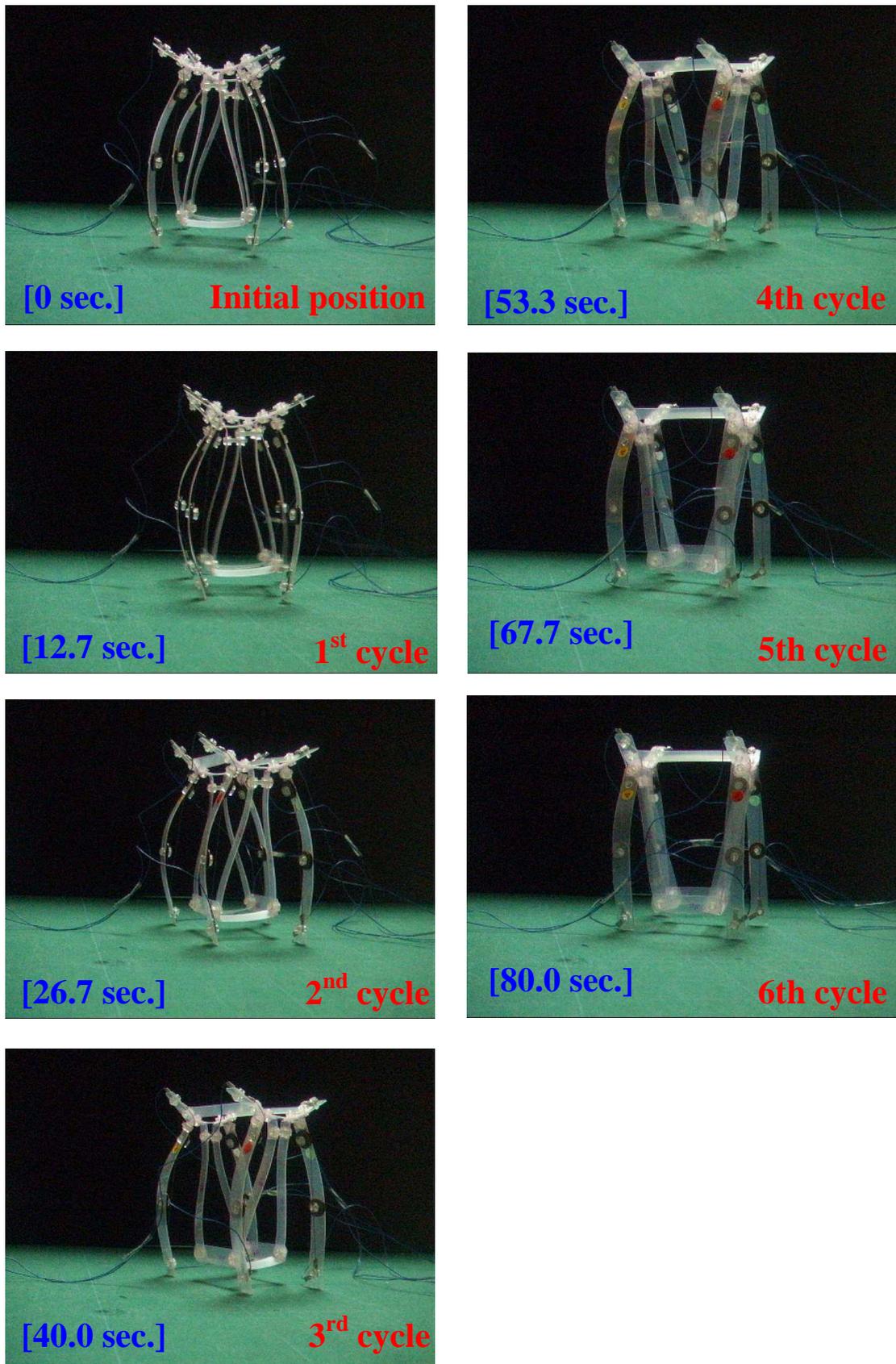


図 5.26 : 四脚柔軟歩行ロボットの旋回実験

5.7 まとめ

本章では、床の摩擦や反発のばらつきに強い歩容を確保するため、比較的脚総数が少なく、さらに安定な歩容を確立している四脚歩行ロボットに焦点を絞り、柔軟歩行ロボットの開発を行った。本研究の柔軟歩行ロボットは、全身が単一の柔軟な構成要素を持ち、小形軽量化へ向けた構造も可能としている。また ON-OFF 信号による単純な制御のみで歩行実現できるため、従来の脚式ロボットと比較して、エネルギー効率の向上も期待できる。そこで、FFP アクチュエータの特性を利用して、四脚柔軟歩行ロボットを製作し、ペイロードの確保、歩行パターン（前進・後退・旋回歩行）を実現することで、柔軟歩行ロボットに関する新しい方向性を示した。以下に本章で得られた結果を挙げる。

- (1) FFP アクチュエータを用いた四脚柔軟歩行ロボットを開発した。本ロボットは、全長=70[mm]、横幅=45[mm]、奥行き幅=50[mm]、総重量約 5.7[g]、一脚が 1 自由度、四脚で 4 自由度、3[V]、0.7[A] 駆動する。また、FFP アクチュエータを直接脚として配置する場合、柔軟リンクの強度を確保するとともに、床面との摩擦や微小のガタやブレによっても、制御系に影響しないようなハード的な工夫が要求される。そこで、床面と摩擦を低減するために、SMA でテンションを調整しながら弓形の脚を製作し、ON-OFF タイミングによるバランス制御の向上を図った。
- (2) 四脚柔軟歩行ロボットの歩容原理について提案し、ON-OFF 制御による信号タイミングを決定した。四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験では、ロボットは転倒することなく安定した姿勢で前進し、60 秒で約 25mm から 30mm の静歩行を確認した。したがって、本ロボットは平均 0.45[mm/s] の速度で歩行する。この結果は、柔軟歩行ロボットの適応範囲を広げるものとしても高く評価できる。
- (3) ロボットの重量物を搭載するためのエリアについて実験を行い、ペイロードの確保について確認した。ロボットの中央に 0g、5g、10g 荷重付加を与えた時、転倒せずに進行方向に向かって歩行する。移動距離は 30 秒につき 0g = 38mm、5g = 43mm、10g = 48mm である。13g から 15g 以上の荷重付加では、歩容にばらつきを見せた。したがって、約 10g の荷重付加、すなわち、自重のおよそ 1.5 倍のペイロードを確保できることを確認した。

(4) 旋回歩行実験では, $L1=13.4s$, $L2=12.3s$, $R1=19s$, $R2=18s$ の ON-OFF タイミングにおいて回転トルクを伴い, ロボットは約 80 秒で半回転することを示した. 単純な制御で, 狭いスペースでの方向転換を踏み変え歩容によって可能にすることで, 本研究の有効性を明らかにした. この成果は高く評価できるものと考ええる.

第 6 章

結論

6.1 本研究で得られた成果

人間と共存する環境において、生活を配慮したロボットの研究が求められている。人間の行動は極めて複雑なため、生活の場で活躍するロボットには安全性や柔軟性が不可欠である。またこうしたロボットには人間の生活環境を自由に移動できる能力が求められる。しかしながら、今日の歩行ロボットは一般的に大きく、重く、硬いボディ構造をしている。したがって、どのような状況においても相手を傷つけないという機構、つまり全身がフレキシビリティで包まれた歩行ロボットに期待が持てる。しかしながら、全身が柔軟であるロボットの研究は非常に少なく、特に、歩行ロボットになると開発段階の研究が 1～2 件である。さらにそれらのロボットは、移動速度、駆動空間の限定という問題や課題がある。一方で、柔軟ロボットはアクチュエータに大きく依存する。しかしながら、柔軟歩行ロボット用として柔らかさを十分に活用できるアクチュエータがない。そこで本研究では、可撓性材料の変位をロボットの歩行に利用しようと考えた。そして、SMA と高耐熱性・非導電性のポリエチレンプレートで構成された FFP アクチュエータを提案、試作し、評価した。次に、FFP アクチュエータを用いて、ON-OFF という単純な制御で歩行する柔軟歩行ロボットを開発し、歩行実験によって、移動速度、駆動空間などの従来の問題を克服した。さらに、柔軟ロボット分野を拡大するため、アクチュエータの種類や移動形態を提案し、振り子歩行ロボット、カニ歩行ロボットなどの柔軟歩行ロボットに加えて、軽量化・小型化・単純化を追求した二足柔軟歩行ロボットにより作業効率の向上を図った。しかしながら、柔軟歩行ロボットは、微小なガタやブレなどで、バランス制御ができなくなり転倒する。そこで、床の摩擦や反発のばらつきに強い歩容を確保するため、四脚柔軟歩行ロボットを開発した。そして、四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験により、歩容パターン（前進・後退・旋回）を確立し、柔軟歩行ロボットの研究の方向性を示した。

以上のように、研究における位置づけを定め、柔軟歩行ロボットに関する議論を行い、当研究分野の方向性を示唆した。

以下に、本論文で得られた成果を各章ごとに集約してまとめる。

2章では、まず従来の柔軟アクチュエータの動向について調査し、比較を行った。その結果、形状記憶合金(SMA)は機械的特性に優れており、幅広い分野で使用されているという実績がある。そこで、柔軟歩行ロボットの駆動源として、SMAを採用した。ついで、SMAと高耐熱性、非導電性の薄板を組み合わせた簡単な構造と制御で駆動される柔軟なアクチュエータを提案した。本論で、このアクチュエータをFlexible Flat Plateアクチュエータ(以下FFPアクチュエータと省略)と命名した。ロボットの歩行には、動作スピードとストロークが重要である。そこで、歩行を達成するために必要な信号タイミングの決定と移動速度を向上させるためのFFPアクチュエータの動特性について実験により評価した。以下に実験から得られた結果を示す。

既存のポリエチレンプレート板厚0.35[mm]に対して、幅6[mm]、全長70[mm]と、SMA直径0.25mm、長さ60[mm]の組み合わせによるものが大きな変位を得られるものと確認され、この時の最大変位量は、X軸方向では約23[mm]、Y軸方向へは約7[mm]であった。また、FFPアクチュエータを高速に駆動させるための電圧電流値は、3.5[V]、0.7[A]である。FFPアクチュエータの荷重と変位の関係を求めた結果、2.6[g]すなわち、0.025[N]の時、 W_1 (X方向)では最大20[mm]、 U_1 (Y方向)では最大6[mm]の変位が確認された。また、ポリエチレン以外の材料と機械的特性について比較し、ポリエチレンプレートの優位性について言及した。

3章では、柔軟歩行ロボットの分野を拡大するために、可撓性材料を柔軟歩行ロボットへと利用する場合の導入について述べ、柔軟歩行ロボットの素材の重要性について議論した。FFPアクチュエータは、自由に加工でき、ON-OFF制御というシンプルな方式で駆動される。したがって、加工や組み合わせによっては、簡単な制御で、複雑な動作が可能である。そこで、FFPアクチュエータの種類を提案した。提案したアクチュエータは、アルファベットの名になぞり、C型～V型FFPアクチュエータと命名した。さらに、柔軟歩行ロボットの移動形態について説明し、簡単な構成と制御の振り子歩行とカニ歩行ロボットについて製作を行い、それぞれの立場から歩行の様子を確認した。その結果、従来の課題の液体から離脱したロボットが可能になり、同時に移動速度を向上させることができた。

4 章では、FFP アクチュエータの長所を生かして、軽量・小型・単純化の追求をした二足歩行ロボットについて検討を行った。まずは、従来の二足歩行ロボットの動向を調査し、関節レス（屈曲部に関節がない）の二足柔軟歩行ロボットの概要について述べた。次に、二足柔軟歩行ロボットの概念について説明し、全長=70[mm]、横幅=22[mm]、奥行き幅=22[mm]、脚先幅=2[mm]、総重量約 2.8[g]、一脚が 2 自由度、二脚で 4 自由度の二足歩行ロボットを開発した。ロボットを設計する際は、脚と接地面との微力な摩擦が推進力へと大きく影響する。したがって、これらのパラメータを変更して接地面と各プレートの接触面との摩擦力の差をつけることが歩行を達成するために重要である。二足柔軟歩行ロボットの脚の応答実験では、2 秒の電圧印加を行った後の OFF 時から完全な状態に戻るまでには 6 秒を必要とすることがわかった。また、最大たわみ $W_2=6$ [mm]、 U_2 約 1.7[mm] と示され、脚の荷重実験では、最大歩幅 6[mm] 時では、約 0.07[N] になることが確認された。この実験を基にロボットの信号タイミングを決定した。さらに、歩行実験では、本機は転倒せず前進し、ON 時間 $T_s=2$ [s]、OFF 時間 $T_p=6$ [s] 時に 60 秒で約 30[mm] の移動が確認された。タイミング信号を変えても、ロボットは転倒することなく歩行し、速度制御が可能である。しかしながら、本章で開発したロボットは、ずり足歩行により、擬似的な二足歩行で静歩行を実現している。ずり足歩行は、坂道や大きな段差のある場所での移動、重力ないし慣性力の働いていない環境下などでは利用できないという問題がある。したがって、まずは、ひざのまげ伸ばしが十分に行えるように、FFP アクチュエータを工夫するなどして、脚のひとつが接地面から離れても、体を支えられる構造に改善することが望まれる。

5 章では、床の摩擦や反発のばらつきに強い歩容を確保するため、比較的脚総数が少なく、さらに安定な歩容を確立している四脚歩行ロボットに焦点を当て、柔軟歩行ロボットの開発を行った。本章で開発した四脚柔軟歩行ロボットは、全長=70[mm]、横幅=45[mm]、奥行き幅=50[mm]、総重量約 5.7[g]、一脚が 1 自由度、四脚で 4 自由度、3[V]、0.7[A] 駆動する。また、FFP アクチュエータを直接脚として配置する場合、柔軟リンクの強度を確保するとともに、床面との摩擦や微小のガタやブレによっても、制御系に影響しないようなハード的な工夫が要求される。そこで、床面と摩擦を低減するために、SMA のテンションを調整しながら弓形の脚になるように製作し、ON-OFF タイミングによるバランス制御の向上を図った。次に、四脚柔軟歩行ロボットの歩容原理について述べ、ON-OFF 制御による信号タイミングについて説明した。四脚柔軟歩行ロボットの歩行実験では、ロボットは転倒することなく安定した姿勢で前進し、60 秒で約 25mm か

ら 30mm の静歩行を確認した。したがって、本ロボットは平均 0.45[mm/s]の速度で歩行する。

従来の四脚歩行ロボットは、数グラムから数十キロの積載物を運ぶために、同じロボットを使って移動を行っている。つまりこれは、エネルギー効率の劣化を招いており、結果的に不経済であると考えられる。一方で、開発する四脚柔軟歩行ロボットは、全身が単一の柔軟な構成要素を持ち、大きさ、形状を自由に換えられるという特徴がある。また ON-OFF 信号による単純な制御のみで歩行するため、エネルギー効率の向上が期待できる。そこで、ロボットの重量物を搭載するためのエリアについて実験を行い、ペイロードの確保について確認した。ロボットの中央に 0g, 5g, 10g 荷重付加を与えた時、転倒せずに進行方向に向かって歩行する。移動距離は 30 秒につき 0 g = 38mm, 5g=43mm, 10g=48mm である。13g から 15g 以上の荷重付加では、歩容にばらつきを見せた。したがって、約 10 g の荷重付加、すなわち、自重のおよそ 1.5 倍のペイロードを確保できることを確認した。旋回歩行実験では、L1=13.4s, L2=12.3s, R1=19s, R2=18s の ON-OFF タイミングにおいて回転トルクを伴い、ロボットは約 80 秒で半回転することを示した。

単純な制御で、狭いスペースでの方向転換を踏み変え歩容によって実践することで、本研究の有効性を具体的に明らかにした。この成果は高く評価できるものと考えられる。

6.2 今後の展望と課題

近年では、ロボットが高性能・高機能化し、ネットワーク技術と人工知能技術の発達に伴って、様々な環境下で人間と協調しながら作業するロボットの関心が高まっている。同時に、手段や状況に応じて、人間をサポートする移動ロボットにかかる期待が大きい。しかしながら、従来のロボットは、安全性や柔軟性などの課題があり、未だにロボットと人間との間に高い壁が立ちはだかっている。一方で、フレキシビリティなボディを持つ歩行ロボットは、全身が柔らかく物理的に安全であるにもかかわらず、この研究分野に関する関心がほとんどない。したがって、柔軟歩行ロボットに関する材料の概念や構造、制御に関する議論がなされていないのが現状である。

そこで、本研究では、可撓性材料をロボットの歩行へ利用するという角度から、柔軟材料をロボットの課題や問題に取り組み、SMA と高耐熱性・非導電性のポリエチレンプレートで構成された FFP アクチュエータを提案、製作して、歩行を達成させた。従来のメカニズムと異なる移動手法で、環境に応じて形状を簡単に変化させることのできるロボットを開発した結果は、今後大きな発展に繋がるものと考えられる。しかしながら、柔軟歩行ロボットは、微小なガタやブレによってバランス制御が不可能となり、転倒してしまうという問題がある。そこで、床の摩擦や反発のばらつきに強い安定した歩容を確保するために、四脚柔軟歩行ロボットを開発し、ハード的に解決しようと試みた。しかしながら、柔軟ロボットは、アクチュエータに大きく依存する。すなわち、現状として、SMA が持つヒステリシス、応答速度などの問題について、ハード的に解決することは難しい。したがって、ロボットの歩行時に見られる大きなガタやブレ、バラツキの誤差に対して、SMA の特性を考慮した制御手法、すなわち、ソフト的にどう修正していくかが今後の課題となる。

最後に、柔軟歩行ロボットを社会に普及させることで、機械と人間の間に新しい共存関係が構築されるものと予想される。本ロボットのアプリケーションとしては、無音で軽量小型、単純な制御という特徴があるため、生物に近寄り、生体を観測する探査ロボットなどが考えられる。また、採用したポリエチレン材料およびSMAは耐熱性に優れており、さらにアセトンやベンゼンのような強化学薬品にも対応できるため、例えば、金属の剛体で構成されたロボットでは介入できないガスや液体が発生している特殊な環境内や腐食に厳しい場所で働く歩行ロボットとしても期待がもてる。

以上によって、今後はハードとソフトの両面より、問題を改善すると同時に、当該分野の発展に少しでも貢献するよう努力することを約束し、本論文の結びとする。

参考文献

- [1]S.MURATA,et al.,"Hardware Design of Modular Robotic System, Proc.IEEE IROS,2210/2217(2000).
- [2]杉山勇太, 平井慎一, 柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.378-387, April, 2006.
- [3]李清華, 高西淳夫, 加藤一郎, "ZPM を安定規範とした 2 足歩行ロボットの上体補償運動の学習制御", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 4, pp557-563, 1993.
- [4]山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, "路面形状に偏差のある環境における 2 足歩行制御—未知の凸凹路面に対する適応歩行の実現—", 日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 7, pp1030-1037, 1995.
- [5]「今年のロボット」大賞 2006” 審査員特別賞 食事支援ロボット『マイスプーン』セコム(株)
- [6]大都市大震災軽減化特別プロジェクト, レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 H14~17 報告書, 国際レスキューシステム研究機構, 2003—2006.
- [7]AIBO Official Site. <http://www.jp.aibo.com/>.
- [8]介護ロボット 株式会社テムザック
Official Site. <http://www.tmsuk.co.jp/>
- [9]岡田, 冬野, 木野, 小倉, 稲葉, 井上, 超小型プロセッサを用いたサーボユニットによる小型ヒューマノイドの実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 03 講演論文集 1P1-3F-G2
- [10]黒木義博他, 「高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X, 日本ロボット学会第 20 回学術講演会予稿集, 1C-17, 2002.

- [11]広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, ”人間型ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 7, pp983-985, 1997.
- [12]牧田忍, 西村大輔, 古荘純二, ”馬型4足歩行ロボットの開発(第1報)”, 日本機械学会論文集(C編) 69巻 677号, pp148-154, 2003-1.
- [13]福岡康宏, 木村浩, ”四足ロボットの生物軌範型不整地適応歩行”, 日本ロボット学会誌, vol. 21, no. 5, pp1-12, 2003.
- [14]綿貫啓一, 新村弘樹, ”昆虫規範型多足歩行ロボットの歩容生成” 日本設計工学会誌, vol. 38, no11, pp36-42, 2003.
- [15]Shin-Min Song , Kenneth J. Waldron, “Machines That Walk : The Adaptive Suspension Vehicle, ” The MIT Press, (1988).
- [16]P. Gonzalez de Santos, E. Garcia, J. Estremera and M. A. Armada, "DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location", The International Journal of System Science, Vol. 36, No. 9, pp : 545-558, 2005
- [17]喜田和夫, 前泰志, 新井健生, 井上健司 : 腕脚統合型ロボットの肢先センサによる人体探査, 第20回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1J17, 2002.
- [18]Shigeo Hirose, Kan Yoneda, Kazuhiro Arai, Tomoyoshi Ibe : Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI, Proc. 5th ICAR, Pisa, Italy, 723-728(1991) .
- [19]池田・高尾・美多 可変拘束制御を用いたネコ型4足ロボット Runbot2Cの歩容生成, 55/60, 第8回ロボティクスシンポジア(2003).
- [20]池田, 巢瀬, 岩谷, 美多 : 可変拘束制御による走行ロボットの實現, システム制御情報学会誌, Vol. 45, No. 5, p233-243 (2001).

- [21]H. TAKEUCHI : Development of MEL HORSE, IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings, Detroit, 1999, pp. 1057-1062.
- [22]木村, 秋山, 桜間 : 神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行,日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1138{1145, 1998.
- [23]日本機械学会宇宙工学部門, スマート構造物と材料の研究分科会研究成果報告書, P-SC294, 2001.
- [24]特集 : スマート構造, 日本機械学会誌, Vol. 102, No. 963, 1999.
- [25]大武美保子. 電場応答性高分子ゲルを用いた柔軟ロボットの形状設計と制御. 東大機械工学研究報告(平成 12 年大学院論文概要集), 第 35 巻, pp. 231-232, 2000.
- [26]釜道紀浩, 山北昌毅, 安積欣志, 羅志偉 : “直動人工筋アクチュエータの開発と歩行ロボットへの応用”, 第 45 回自動制御連合講演会講演論文集, 仙台, 2002, 11.
- [27]実吉敬二, 菊地正芳, 鳥居毅, 松田一彦 : ” 2 本のリボン状電極による積層型静電アクチュエータ” 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp179-180, (2000)
- [28]田所諭 : “柔らかいアクチュエータ”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 3, pp. 318-322, 1997
- [29]古屋泰文 他, ” 未来型アクチュエータ材料・デバイス ” Next-Generation Actuator Materials and Devices (株)シーエムシー出版
- [30]橋本稔, 佐藤公子他, ” 形状記憶アクチュエータとその 2 足歩行ロボットへの応用”, 第 1 回日本ロボット学会講演会予稿集, Vol. 4, No. 2, pp. 89-100, 1986.

- [31]Akiya Kamimura, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Kohji Tomita, Shigeru Kokaji : 「Self-Reconfigurable Modular Robot - Experiments on Reconfiguration and Locomotion」, Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2001), 606-612, (2001) .
- [32]宇野元雄：“ゴム人工筋とロボットへの応用”，日本油空圧学会誌，17-3, pp.175-180, 1986.
- [33]鈴森康一：“フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究”，日本機械学会誌（C 編），56-527, pp.1887-1892, 1990.
- [34]川村，清水，玉井，早川：“Hexahedron Rubber Actuator（HRA）の開発”，日本ロボット学会誌，vol.16, no.3, pp.369-375, 1998.
- [35]宇野元雄：ゴム人工筋とロボットへの応用，油圧と空気圧，vol.17, no.3, pp.175-180, 1985
- [36]山下，武内，奥野，相良：“拮抗駆動関節による剛性とトルクの制御：空気圧アクチュエータによる実験的検討”日本ロボット学会誌，vol. 13, No. 5, pp666-673, 1995
- [37]則次俊郎，和田力：ゴム人工筋のロボット制御への応用，日本ロボット学会誌，vol.9, no.4,pp.502-506, 1991
- [38]山藤和男：空気圧アクチュエータのロボット制御への応用，日本ロボット学会誌，Vol.9, No.4, pp.98-101.1991
- [39]Mihoko Otake, Modeling, Design and Control of Electroactive Polymer Gel Robots(電場応答性高分子ゲルロボットのモデリング・設計・制御)，東京大学大学院工学系研究科学位論文，2003.
- [40]中井博之，星野由紀子，稲葉雅幸，井上博充，“軟化変形ロボットの研究－低融点合金の相変化を用いた形状適応変形ロボットの実現－，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.6, pp.625-630, 2002.

- [41]特許庁, 形状記憶合金とその応用 <http://www.jpo.go.jp/index.Htm>
- [42]三輪敬之, 本間大他, ”形状記憶効果を利用した軟体・生物機械”機械学会講演論文集(山梨地方講演会), pp. 96-98, 1980
- [43]橋本稔, 奥井勝他, ”形状記憶アクチュエータとその二足歩行ロボットへの応用”, 第一回日本ロボット学会学術講演会 pp. 207-208, 1983
- [44]石田章, 佐藤守夫, 田畑修(京大)独立行政法人 物質・材料研究機構, 「形状記憶合金を用いた MEMS 用大変位強力アクチュエータの開発」 NIMAS NOW 2005. Vol. 5 No. 7 July.
- [45]Toshiyuki. H, Takashi. M, 「Development of Miniature Robot Finger with a Variable Stiffness Mechanism using Shape Memory Alloy」 International Symposium on Robotics and Automation, 25-27, 2004 August.
- [46]日立製作所 機械研究所 日立のロボット開発と歴史 <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/merl/robot/robot2.cfm>
- [47]吉田他, 「SMA を用いた小型ユニット式自己組織ロボット」, ロボティクス・メカトロニクス講演会99, 1P2-29-03(1999)
- [48]トキ・コーポレーション
<http://www.toki.co.jp/BIOMETAL/HomePage/WhatsBM.Html>
- [49]杉山勇太, 平井慎一, 「SMA ファイバを用いた柔軟円形ロボットの変形移動」第4回システムインテグレーション部門学術講演会[SI2003] (2003. 12)
- [50] K. Gabriel, W. Trimmer and J. Walker, A micro rotary actuator using Shape memory alloys, Sensors Actuat. , vol. 15, no. 1, pp. 95-102, 1988.

- [51]J. Harrison and D. Hodgson, Use of TiNi in mechanical and electrical connectors, in Proc. Symp. Shape Memory Effects and Application, pp. 517-523, 1975.
- [52]J. Kudva, B. Sanders, J. Pinkerton-Florance, and E. Garcia, Overview of the DARPA/AFRL/NASA smart wing Phase 2 program, in Proc. SPLE, vol. 4, 332, pp. 383-389, 2001.
- [53]杉本誠司, 他「超弾性材を用いた高知能建築構造システムに関する研究」, 第 11 回日本地震シンポジウム概要集, pp1935-1940, (2002. 11)
- [54]H. Tamai and Y. Kitagawa, Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building, IWCMM10, Aug, 2000.
- [55]M. Ikuta, M Tsukamoto and S. Hirose, Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 1, pp. 427-430 1988.
- [56]M. Bergamasco, F. Salsedo and P. Dario, Shape memory alloy micromotors for direct-drive actuation of dexterous artificial hands, Sensors Actuat., vol. 7, No. 1. pp. 115-119, 1989.
- [57]A. Baz, S. Poh, J. Ro et Al. : Active Control of NitiNol-Reinforced Composite Beam, Intelligent Structure System, Solid Mechanics and its Applications, Vol. 13, Kluwer Academic Publisher, pp169-212, 1992, 7
- [58]Yoshio Aoki, Yasuyoshi Iwase and Goichi Ben:“Vibration Monitoring and Vibration Suppression for FRP Structure by Using SMA/GF Hybrid Laminates”, Proceedings of Third Japan-Korea Joint Symposium on Composite Materials, Oct. 2002.

- [59]折紙のホームページ, NIWA NO IKIMONO SESSOKU DOUBUTU :www.geocities.co.jp/HeartLand-Oak/5487
- [60]本田技研工業(株) 人間型ロボット ASIMO
<http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [61]Council of Forest Industries Canada URL :http://www.cofi.or.jp/wstr004_01.html
- [62]F. Inoue, K. Kurita, R. Moroto et al “Development of Adaptive Structure by Variable Geometry Truss”, Proc. of 22th International Symposium on Automation and Robotics in Construction”, pp. 63-68, (2006)
- [63]榭原機械株式会社 : 「LAND WALKER」
<http://www.sakakibara-kikai.co.jp/>

謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜りました電気通信大学知能工学研究科 田中一男教授に謹んで感謝の意を表します。

また，本研究の遂行にあたり，多大なる御指導と有益なる御討論ならびに御助言を頂きました電気通信大学知能工学研究科 大竹助教授に謹んで感謝の意を表します。国際学会にあたり，多大な御支援ならびに後助言を頂きましたボストン大学のWang教授に謹んで感謝の意を表します。また，各方面で多大な御支援ならびに御助言を賜りました元芝浦工業大学大学院 機械工学研究科の舟橋宏明教授に深く感謝の意を表します。さらに，本研究の新しい展開について有益な御助言を賜りました元芝浦工業大学大学院 機械工学研究科後輩の小山峰乙君に感謝の意を表します。本研究の遂行と社会人としての仕事の両立にあたり，御協力頂いた各企業の方々に，ご理解頂いた事を深く感謝いたします。なお，一部の国際学会発表について，情報科学国際交流財団様の寄付金の援助によって行われたことを付記し，関係者各位に謝意を表します。

最後に，これまで心の支えとなってくれた最愛の両親に深く感謝します。

本研究にあたって，多くの方々に価値のあるご協力を頂いた事を忘れず，本研究を通して得た貴重な経験を活かし，より一層の努力を積み重ねていきたいと思えます。

発表論文

学術雑誌

- [1] M.Nishida, K. Tanaka and H. O.Wang: "Development and Control of Small Biped Walking Robot using Shape Memory Alloy," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20,No.5,pp.793-800.2008.

国際学会(査読付き)

- [1] M.Nishida, K. Tanaka and H. O.Wang: "Development and Control of Micro Biped Walking Robot using Shape Memory Alloys", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1604-1609, 2006.
- [2] M.Nishida, K.Tanaka: "Application of FFP-Actuators to Legged Locomotion Robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2993-2998, 2007.
- [3] M.Nishida, K.Tanaka: "The Quadruped Locomotion Robot with Flexible Materials ", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems ,pp.2649-2654, 2008. .