

Title	ミミズ型レスキューロボットの開発に関する研究
Author(s)	原坂, 龍太
Citation	
Issue Date	2005-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1931
Rights	
Description	Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

ミニズ型レスキューロボットの
開発に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

原坂 龍太

2005年3月

修 士 論 文

ミニズ型レスキューロボットの
開発に関する研究

指導教官 丁洛榮 助教授

審査委員主査 丁洛榮 助教授

審査委員 松澤照男 教授

審査委員 小谷一孔 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

310089 原坂 龍太

提出年月: 2005 年 2 月

概要

1995年の阪神淡路大震災や2001年の米国同時多発テロ等の緊急災害では、人命救助、被災者探索は主に人間や救助犬に頼っていた。しかし、倒壊した建物の内部の検索を人間が探索するのは二次災害等があり非常に危険である。そこで本稿では、いままで人間が行っていた危険な場所の探索を代わりに行なう小型多自由度柔軟変形移動ロボットの開発を行なう。まず、高柔軟性、高伸縮率のエアーアクチュエータを開発、それに吸盤を装着することで急斜面を登ることの出来るミミズ型レスキューロボットを開発した。その結果、約70度の斜面を登り、受動的に約45度のカーブを曲ることが出来た。これにより、ミミズ型レスキューロボットの実現可能性を示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	4
1.3	本論文の構成	5
第2章	災害時における救助活動の実態と関連研究	6
2.1	災害時における救助活動の実態	6
2.2	レスキューロボット機器の関連研究と分類	8
2.2.1	被災者探索支援型	8
2.2.2	障害物除去支援型	10
2.3	瓦礫内探索用レスキューロボットの必要性	14
第3章	小型多自由度柔軟変形ロボット 通称ミミズ型レスキューロボットの提案	15
3.1	問題の定義	15
3.1.1	試作機による問題提起	16
3.1.2	目標	16
3.2	特徴	21
3.2.1	移動機構	25
3.2.2	コントロール方法	25
第4章	ミミズ型レスキューロボットの製作	34
4.1	機体仕様	34
4.1.1	本体部	34
4.1.2	コントローラ部	34
4.2	各部分の応力	34
4.2.1	ジャバラの設計	38
4.2.2	吸盤の設計	45
4.2.3	ロボットの動作時間	49
4.3	ロボットの設計図	51
4.4	評価実験	55
4.4.1	坂道実験	57
4.4.2	絨毯実験	57

4.4.3	カーブ実験	59
4.4.4	排気実験	64
4.5	考察	64
第5章	まとめ	66
5.1	結論	66
5.2	今後の課題	67

第1章 はじめに

1.1 背景

近年、建造物の巨大化や都市部の集中により災害が起きた場合の被害が大きくなる傾向がある。2001年9月11日にアメリカ ニューヨークにおいて発生した同時多発テロでは、高さ420mの世界貿易センタービルに二機の旅客機が激突し炎上、爆発により二棟とも崩壊した。またその崩壊の影響で隣接していたビル一棟も炎上し崩壊した。この災害での死者は2000以上に達した。この中に救助に向かった消防士が200以上含まれている。また、1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災においては、多くの建造物が全半壊しそれに巻き込まれて多くの人命が失われた[12]。(表1.1、表1.2、表1.3、表1.4)これらの災害により世界は防災システムやレスキュー機器の脆弱さを露呈する格好となった。なかでも阪神淡路大震災では死者6000人を超えるという大惨事となってしまったが、このなかにはレスキューシステムがこのような大規模災害に対して十分に機能していれば救えた命も少なくなかった。また、レスキューシステムが十分に機能しない状況下において瓦礫に埋まった人や、建物の中に閉じ込められた人を助けられるのは人間しかいなかったのである。そのため同時多発テロでは救出に向かった消防士らが二次災害の犠牲になった。また、阪神淡路大震災では交通の遮断により自衛隊や消防隊、レスキュー隊などの到着が遅れ、被災者自身が被災者を救助していた。その際に用いられていた道具は、のこぎりやバール、自動車用のジャッキなどの日常で使用される工具であり、レスキュー機器は存在しなかった。もし人間の作業を補完・支援することの出来るレスキュー機器が配備されていたならば救助活動に不慣れな人間でも、より迅速な救助活動が行え、多くの人命を救うことや、救助者の二次災害を防ぐことが出来るはずである。これらのことから、今後起こりうる災害に備えて、有効なレスキュー機器の開発が行われ、数多く配備される必要がある。さらに、近年多くの研究・開発が行われているロボット技術を取り入れれば、より一層効果的な救助活動を行うことが出来るだろう。

表 1.1: 低層建築物の被災と用途 建築研究所調査に基づく

建築物用途	全壊または大破	中程度の損傷
独立住宅	30361	29116
集合住宅	8930	5443
商業・業務施設	2090	1697
工業・流通施設	1319	962
その他	1286	983
用途分類なし	2036	4007
合計	46022	42208

表 1.2: 高層建築物の被災と用途 建築研究所調査に基づく

建築物用途	全壊または大破	中程度の損傷
独立住宅	656	688
集合住宅	1074	1192
商業・業務施設	689	671
工業・流通施設	334	283
その他	171	248
用途分類なし	157	191
合計	3081	3273

表 1.3: 死亡場所と原因

	総数	病院	診療所	自宅	その他
総数	5488	551	21	4330	586
窒息・圧死	4224	329	16	3415	464
焼死・熱傷	504	2	-	460	42
頭・頭部損傷	282	31	1	213	37
内臓損傷	98	39	-	51	8
外傷性ショック	68	29	1	33	5
全身座滅	45	31	-	11	3
座滅症候群	15	14	-	-	1
その他	128	51	3	61	13
不詳	124	25	-	86	13

表 1.4: 死亡場所と時間

	総数	1月17日	午前	午後	不詳	1月17日	1月18日	1月19日	不詳
総数	5488	5175	4451	440	274	185	29	97	2
窒息・圧死	4224	4059	3626	316	117	124	14	26	1
焼死・熱傷	504	488	307	62	119	15	1	-	-
頭・頭部損傷	282	256	236	7	13	7	1	17	1
内臓損傷	98	81	71	9	1	9	2	6	-
外傷性ショック	68	50	37	12	1	11	2	5	-
全身座滅	45	39	25	11	3	3	1	3	-
座滅症候群	15	-	-	-	-	-	3	12	-
その他	128	81	64	13	4	13	5	29	-
不詳	124	121	95	10	18	3	-	-	-

1.2 目的

本研究では、被災時に人間の進入が困難だったり、倒壊し危険な建物の内部を検索し、被災者の発見やサポート、内部の被害状況を調査する小型多自由度柔軟変形移動ロボット [1] [2][4][5] (ミミズ型レスキューロボット) の開発を行う。このロボットは空気圧を利用し、加圧、減圧により、ジャバラを伸縮させることで推進力を得るという形態をとる。一般的にこのような伸縮動作で推進力をえるロボットはジャバラと地面との摩擦が大きく影響する。従来研究では平地を前進するつもりでも「前進摩擦<後退摩擦」となると逆に後ろに進むなど、あまりうまく前進することが出来なかった。そこで、本研究では4足壁面移動ロボット [8][9][10][11] の技術である吸盤による吸着を取り入れる。これによりジャバラと地面との摩擦+吸着という方法をとることができ、前進方向とは逆の吸盤で吸い付くことにより必ず「前進摩擦>後退摩擦」にすることができる。こうようにして、従来難しかった平地をきちんと進むことの出来る小型多自由度柔軟変形移動ロボット (ミミズ型レスキューロボット) の開発を行う。

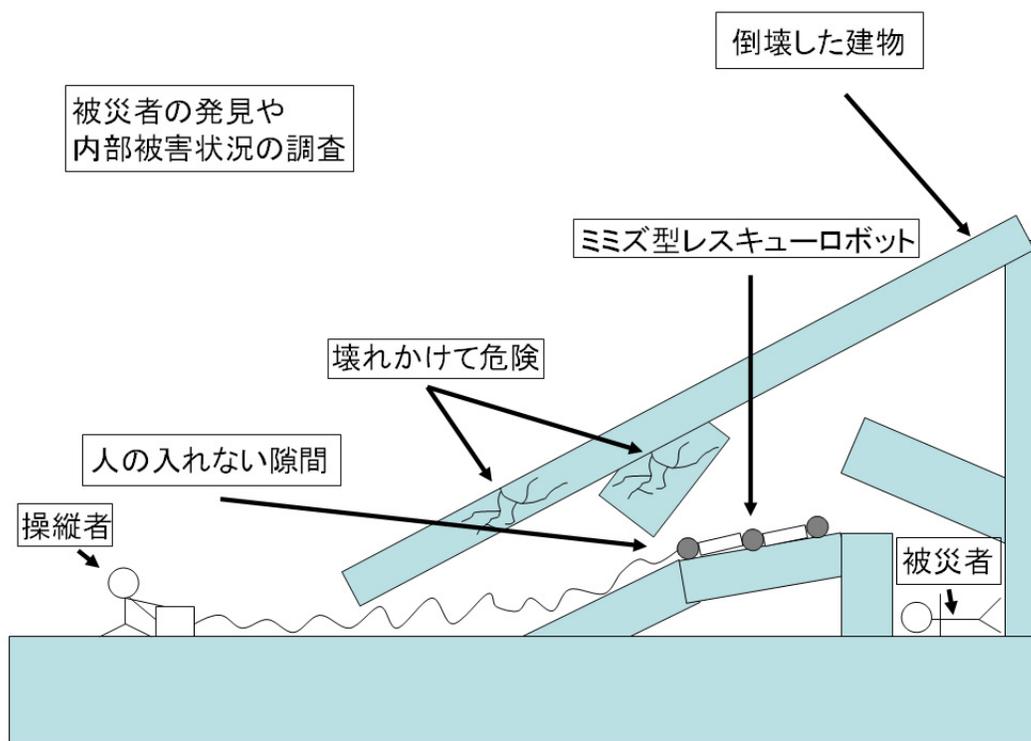


図 1.1: 倒壊した建物内を探索するミミズ型レスキューロボットの概念図

本研究における小型多自由度柔軟変形移動ロボット (ミミズ型レスキューロボット) の開発は、機能と操作方法の設定、コントローラと機体の設計、コントローラと機体の製作

の3つの過程からなる。

- 機能と操作方法の設定使用環境において操作の仕方を考慮してミミズ型レスキューロボットに持たせる機能およびその操作方法を設定する。
- コントローラと機体の設計機能や操作方法から、曲げ応力、座屈応力、動作時間、ミミズ型レスキューロボットの形状、構造、素材を考慮して各部品を選定する。
- コントローラと機体の作成選定した部品で作成する。

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含む全五章から構成される。第二章以降の概要を以下に示す。

- 第二章では、本研究の背景と、現在のレスキューロボット機器の現状、および本研究の必要性について述べる。
- 第三章では、ミミズ型レスキューロボットの本研究のアイデア、使用環境および機体構成について述べる。
- 第四章では、作成したミミズ型レスキューロボットの動作実験、実験の結果について述べる。
- 第五章では、本研究の結論および今後の課題について述べる。

第2章 災害時における救助活動の実態と 関連研究

本章では研究の背景となる災害時における救助活動の実態と、そこから得られたレスキュー機器に求められる仕様について述べ、現在研究が進められているレスキューロボット機器について用途、使用環境別の分類をする。

2.1 災害時における救助活動の実態

阪神淡路大震災では交通の遮断により、自衛隊や消防隊、レスキュー隊などの災害救助の専門家の到着がおくれ、なおかつ大規模な災害であったため圧倒的に人員不足という事態になった。そのような状況の中では被災者自身が瓦礫に埋もれた被災者を救出しようと試みた。しかし、彼らは専門家でもないうえ有効なレスキュー機器も不足していたために救助作業は難航した。それに伴い、時間の経過と共に救出されないまま命を落とす人の数も増えたはずである。もし救助活動が順調に進んでいたならば多くの被災者を救助できたであろう。また、アメリカでの同時多発テロではビル倒壊により、救助活動していた多くの消防士が犠牲となった。今後このような大規模な災害が起きる可能性を考えると、被災現場において有効なレスキュー機器を早急に開発し、数多く配備する必要がある。これらの災害における救助活動の方法と問題点を救助の基本的な手順である探索、堀削の各シーンごとにまとめる。

- 探索 瓦礫に埋もれた人を発見する。従来、瓦礫に埋もれた被災者を発見できたきっかけの多くは、被災者自身が発生させる声、腕が動かせる場合には物をたたき音、家族や隣人による情報であった。しかし、実際の災害現場では重機や緊急自動車、現場の声などがあまりにも大きく、被災者発見の妨げとなった。また、瓦礫の中の被災者の位置を特定する際には、声や音で判断したり、懐中電灯の光を当てて、その光が見えるかどうかを被災者に確認させることによって大まかな位置を判断していた。しかし、そのような方法でも被災者の正確な位置を割り出すことは難しく、被災者付近の瓦礫の状況がわからないため、少しずつゆっくり瓦礫を崩さないように取り除きながら同じような探索を繰り返し、徐々に位置を特定していくことしか出来なかった。速やかに被災者の埋まっている位置と周りの瓦礫の状態を把握出来れば、救助の時間が短縮され、より多くの被災者の命を救えたい。

- 掘削 瓦礫を取り除き、被災者を救助するための空間を確保する。フォークリフトやクレーンといった建設用機械は震災時の掘削に大きな威力を発揮すると考えられた。しかし、道路が倒壊した家屋によってせめられたため被災現場への大型重機の搬入が困難な場合が多かった。また、被災後 72 時間は被災者の生存率が高く最も急いで救助活動を行わなくてはならないときに、瓦礫の中に被災者がいる可能性がある場所では、重機を使うことは余りにも危険であった。このような理由から掘削には、のこぎり、金槌、バール、ジャッキ、スコップ、チェンブロックなど、日常使用される工具類が用いられた。これらの道具はある程度有効ではあったが、もともとレスキュー用として作られていないため、結局多くの作業は人間の手によって行われた。また要救助者が埋もれている場所を正確に特定できないために、かなり多くの瓦礫を取り除く必要があるにもかかわらず、瓦礫内部の状態もわからないため瓦礫除去が家屋を更に崩壊させる可能性もあり、作業は慎重に行わねばならなかった。そのような状況の中、作業の進行にしがたって救助者の疲労は極限に達した。加えて、余震による家屋のさらなる崩壊や、ガスの充満による爆発、火災、窒息などの二次災害の危険もあり、救助活動自体が非常に危険な作業であった。

以上のような状況から、瓦礫の中に進入して被災者の埋もれている場所を特定できるような機器や、瓦礫を効率よく取り除くことの出来る機器、人間の力を増幅させるような機器などが必要とされていることがわかる。これらのレスキューロボット機器に必要とされる主な仕様は以下のようなものである。

- 小型・軽量で人力で運搬可能、また大量運搬可能であること。災害時には人員数も少なく、交通の遮断で瓦礫の中を運んだり、ヘリコプターによる空輸等を考えると、小型・軽量で一度にたくさん運べるのが望ましい。
- 引火の危険性が無いこと災害時にはガスが噴出している場合もあるので、引火を引き起こすような構造の機器の使用は危険である。したがってガソリン駆動よりバッテリー駆動が適している。
- 不安定な場所でも設置が可能であること災害時には、瓦礫の散乱等により設置場所が不整地の状態になっている可能性が高い。そのためレスキュー機器は少々不安定な場所にも設置できる必要がある。
- 操作が容易で専門知識を必要としないことレスキュー隊が間に合わないような時、被災者自身が救助活動を行うことが考えられる。その場合、専門知識が無くても操作できるようにするのが望ましい。
- 安価で入手しやすいこと安価であれば多数配備できる。
- 天候に左右されず、昼夜を問わず使用可能であること。被災地の天候が雨や雪の時もあり、そのような場合も使用できる機器であることが必要である。

- 発見した被災者のサポート瓦礫深部で発見し、瓦礫の撤去に時間がかかる場合、レスキュー機器には被災者に水や酸素を供給することが出来る機構が備わっていることが望ましい。

以上の仕様を考慮した上で、レスキューロボット機器の開発を行う必要がある。

2.2 レスキューロボット機器の関連研究と分類

救助活動では前節で述べたように、探索と堀削の二つのプロセスに分けられる。本節ではこれらのプロセスを支援するためのレスキューロボットについて、関連研究について分類を行う。なお、ロボットによるレスキュー活動は、アメリカ同時多発テロにおいて、university of South Florid の Robin Murphu 博士らが最初である。

2.2.1 被災者探索支援型

救助活動におけるプロセスの”探索”を支援するレスキューロボット機器である。従来は瓦礫の上から探索するタイプと、瓦礫のなかに入って探索するタイプのレスキュー機器があったが、最近では瓦礫のなかに入って探索するタイプのレスキュー機器 [3] が主流となっている。高山らは、軽量小型で足場の悪い場所でも効率的に移動できる瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍 III 号機」[7] の開発をしている。(図 2.1、図 2.2) このロボットは 3 つのクローラ車体を姿勢変化が可能な能動関節で連結した連結クローラ走行車であり、瓦礫の上や中を移動しながら東部に搭載したカメラやマイクなどによって探索を行う。このロボットは瓦礫の上と中を移動するため、連結部が柔軟に動くようになっており瓦礫との設置をよくすることで瓦礫での走破性を高めている。また、瓦礫の上と中の両方の探索が可能のため非常に探索範囲が広く有効だと考えられている。

蒼龍三号機の特徴

- 従来のクローラ型と比べると柔軟である。
- 柔軟であるため走破性が高い。
- 安定性がある。
- モータや金属を数多く使うため重くなる。
- モータなどの動力部が本体にあるため故障時の対応がしにくい。

また、青木らは、細長い体幹を有する移動機械である多自由度柔軟変形ロボット「スライムロボット (Slime Robot)」[2] [4][5][6] の開発をしている。(図 2.3、図 2.4) 現在ロ



図 2.1: 蒼龍三号機の写真

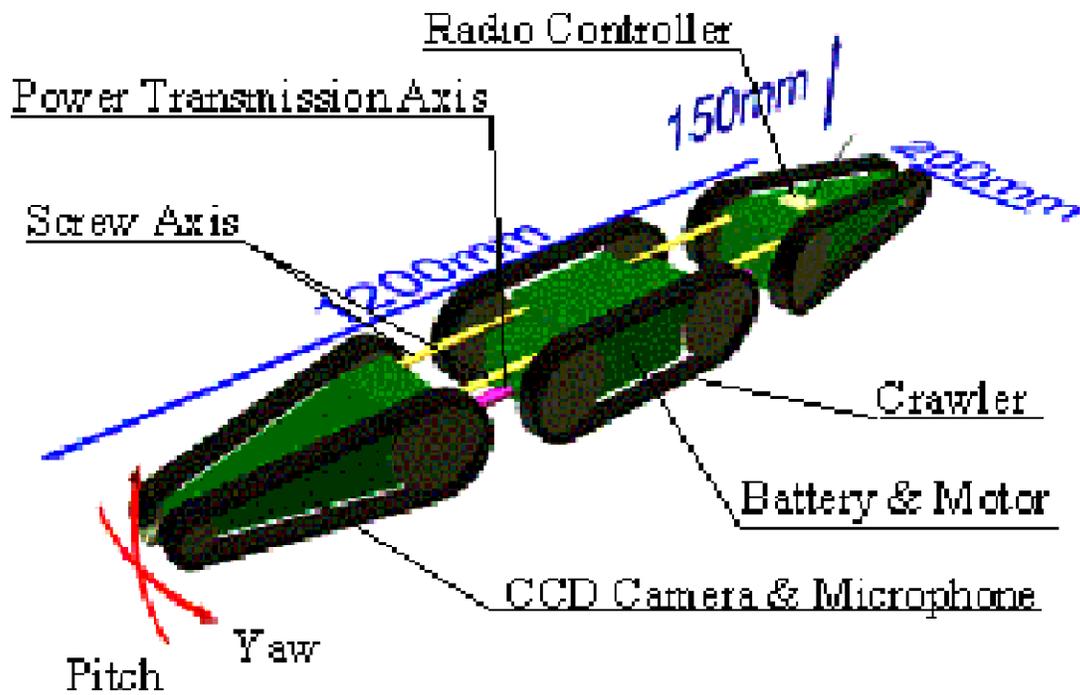


図 2.2: 蒼龍三号機のモデル

ボットの多くが屈曲自由度を有する単位節から構成されているのに対し、スライムロボットの最大の機構的特徴は、屈曲自由度のみならず伸縮自由度をも有する単位節から構成されている点である。これによりより複雑な瓦礫の中を柔軟に進むことを目的としている。しかし、スライムロボットは推進力を得る際にジャバラの中の空気を出し入れすることで伸縮運動をおこなうため、設置面との摩擦が大きく影響し、状況しだいでは前進することが出来ないなという欠点がある。

スライムロボットの特徴

- 柔軟であるため瓦礫内では最適。
- 軽量化しやすい。
- 圧縮空気を使用するため力が出る。
- 設置面しだいではうまく前進できない。
- 移動速度が極端に遅い。
- 安定しない。
- 構造が複雑。

2.2.2 障害物除去支援型

救助活動のプロセスの”掘削”を支援するレスキューロボット機器である。火災、地震およびそれによる二次災害をはじめとした様々な災害現場において、例えそれが人間の近付けないような危険地域であっても、人間の数倍の力でレスキュー活動を行えるロボットの実現。それが、株式会社テムザックが消防関係者・京都大学などを含めた産学官一体体制で開発したレスキューロボット「T-52 援竜 (エンリュウ)」[13]である。

援竜の特徴

- 全長約 3.5m、全幅約 2.4m、重量約 5t という世界最大級のサイズ。
- 状況に応じて選択可能な世界初の乗用操作 + 遠隔操作両用機能。
- 災害現場に応じて本格的な力を出せるように油圧駆動を採用した上半身。
- 手部入れて片腕 8 自由度の双腕。
- 従来の重機と同じく重すぎて運搬が困難。



図 2.3: スライムロボットの写真

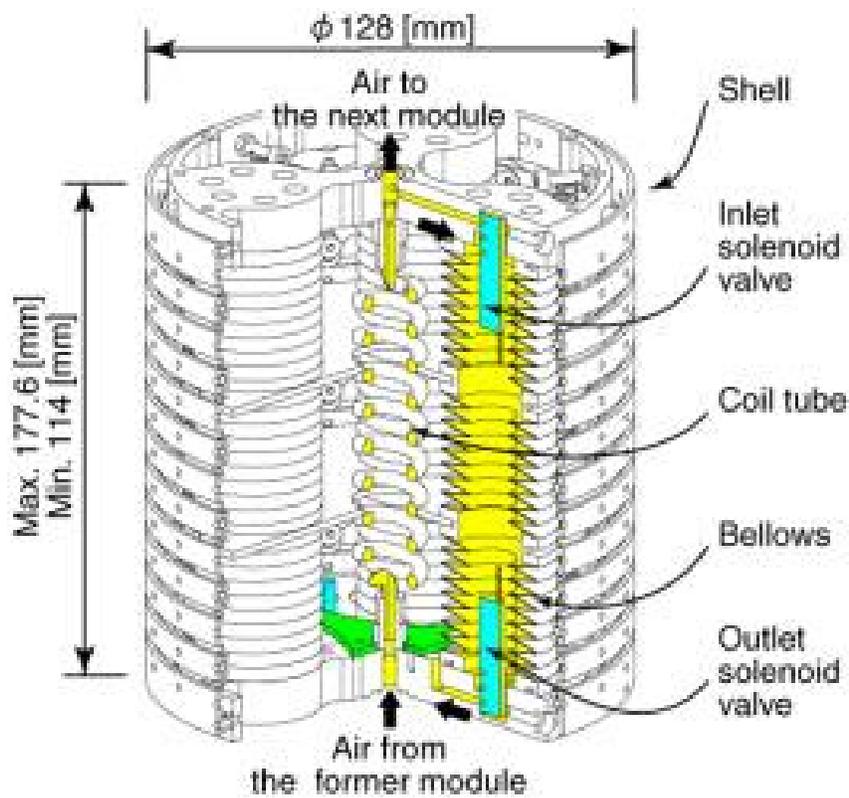


図 2.4: スライムロボットの構造図

T-52

Enryu | 援竜

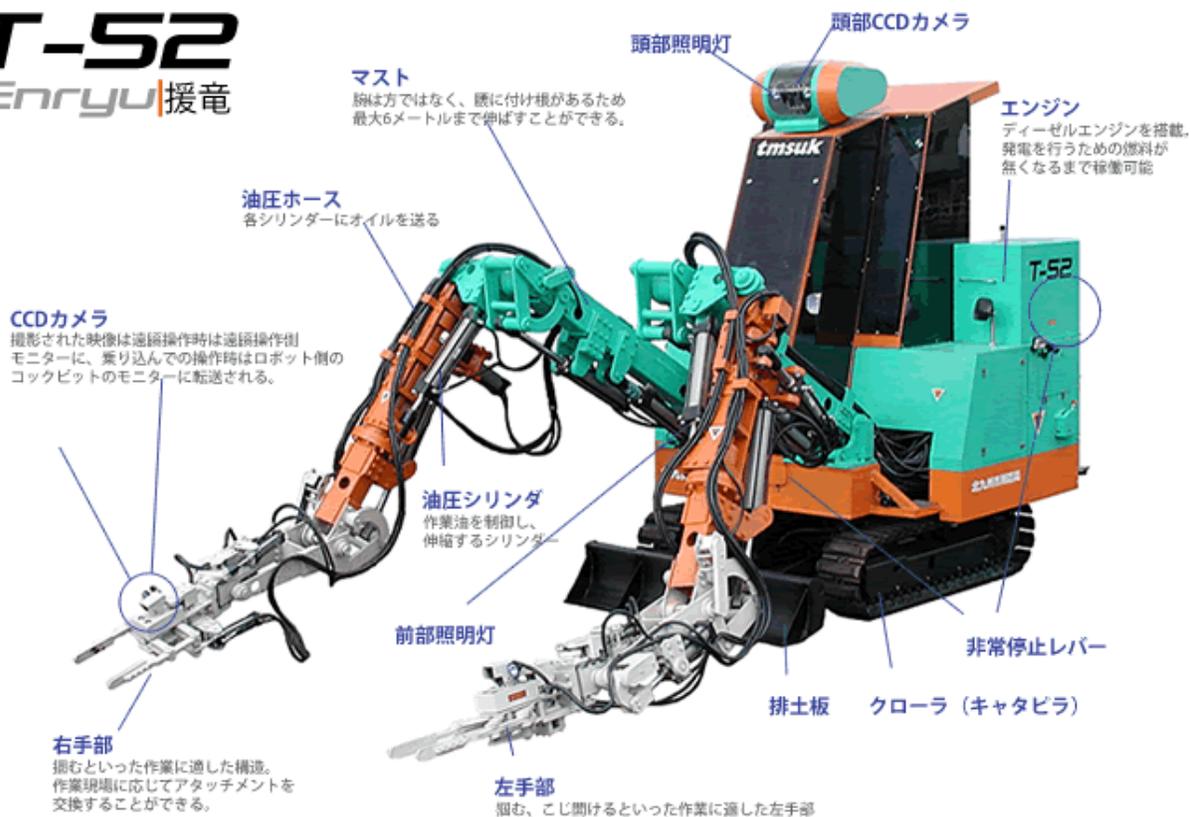


図 2.5: 援竜の写真

2.3 瓦礫内探索用レスキューロボットの必要性

本研究では災害時に最も重要とされているのは被災者の探索であると考えている。

被災者の探索が最も重要な理由

- 重機は被災者が瓦礫にいる可能性のあるところでは使えない。
- 瓦礫内部の状況が把握できなければ二次災害の危険が増す。

つまりこれは、いかに優れた瓦礫掘削機器が作られても内部状況がわからなくては使えないということである。このような理由から被災者の探索が最も重要であると考え。そこで本研究では瓦礫内の被災者探索支援レスキューロボット機器の開発を行う。2.2節でも述べたように瓦礫内に埋もれた被災者を探すロボットが現在多く考えられている。その中でも本研究で注目したのが多自由度柔軟変形ロボット、通称ミミズ型レスキューロボットの可能性である。次章ではミミズ型レスキューロボットの新しい移動メカニズムについての提案を行う。

第3章 小型多自由度柔軟変形ロボット 通称ミミズ型レスキューロボットの 提案

本章では、小型多自由度柔軟変形ロボット、(以降、ミミズ型レスキューロボット)の提案を行う。まず従来のミミズ型レスキューロボットの問題を定義する。次に実際に試作ミミズ型ロボットを製作することでどこにどのような問題が存在するのかをはっきりさせることで解決方法と目標を決定する。次に移動機構について説明し、最後に移動方法に基づいたコントロールについて述べる。

3.1 問題の定義

問題を定義するためにここでもう一度従来のミミズ型レスキューロボットの特徴を他の瓦礫内探索用ロボットと比べて有利な点、不利な点を挙げる。

有利な点

- 伸縮方向に自由度があるため柔軟で瓦礫内では最適。
- 本体の構成部品ゴムであるため軽量化しやすい。
- 動力に圧縮空気を使用するため力が出る。
- 動力部が剥き出しになっていないため故障性に強い。
- 伸縮方向に自由度が存在するため収納時場所をとらない。
- 軽量で小さくなるため大量運搬が可能。

不利な点

- 構造が複雑でコストがかかる。
- クローラタイプのロボットと比べると移動速度が遅い。

- 本体と設置面の摩擦を利用して進むため状況によっては平地ですら前進できない。
- 坂道や不正地などでは非常に進みにくい。
- 本体が筒状で設置面に置かれているだけなので非常に安定しない。

このようにミミズ型レスキューロボットには自由度や構造面で非常に有利な点と、移動に関する非常に不利な点を持っていることがわかる。そこで、本研究では非常に不利な点であるミミズ型レスキューロボットの移動と、柔軟性と剛性を両立できるジャバラフレームに関する研究を行う。

3.1.1 試作機による問題提起

前節で移動に対して難があるということは分かっているが、実際どのような問題が起こるのか分からない。さらに、今回は吸盤という新たな機構がついているためその吸盤が与える影響なども全く分からない。そこで試作機を作り実験を行うことでどのような問題が起こるのかを検証する。

製作した試作機

図 3.1 が今回製作したミミズ型ロボット試作機である。構造はいたって単純でジャバラの間に吸盤を取り付けそこからホースでポンプに繋いだものである。実際にこれを動かすことで問題を提起する。

以下が今回の実験で出て来た問題点である。

発覚した問題

- 予想以上に伸びる (図 3.2)。
- 伸びすぎること真直に伸びず曲がってしまう (図 3.2)。
- ホースの影響で伸縮時に吸盤が浮いてしまう (図 3.3)。
- ホースの影響でジャバラがねじれて倒れる (図 3.4)。

3.1.2 目標

前節で述べた問題点を解消することでコンクリートなどのツルツルした急な坂道での移動、絨毯など吸盤で吸着することの出来ない所での移動を可能とする。また従来のミミズ型レスキューロボットの長である自由度や構造面などを最大限生かしたミミズ型レスキューロボットの開発を目標とする。



図 3.1: 試作ミミズ型ロボット



図 3.2: 伸びすぎて曲がった図



図 3.3: 吸盤が浮いている図

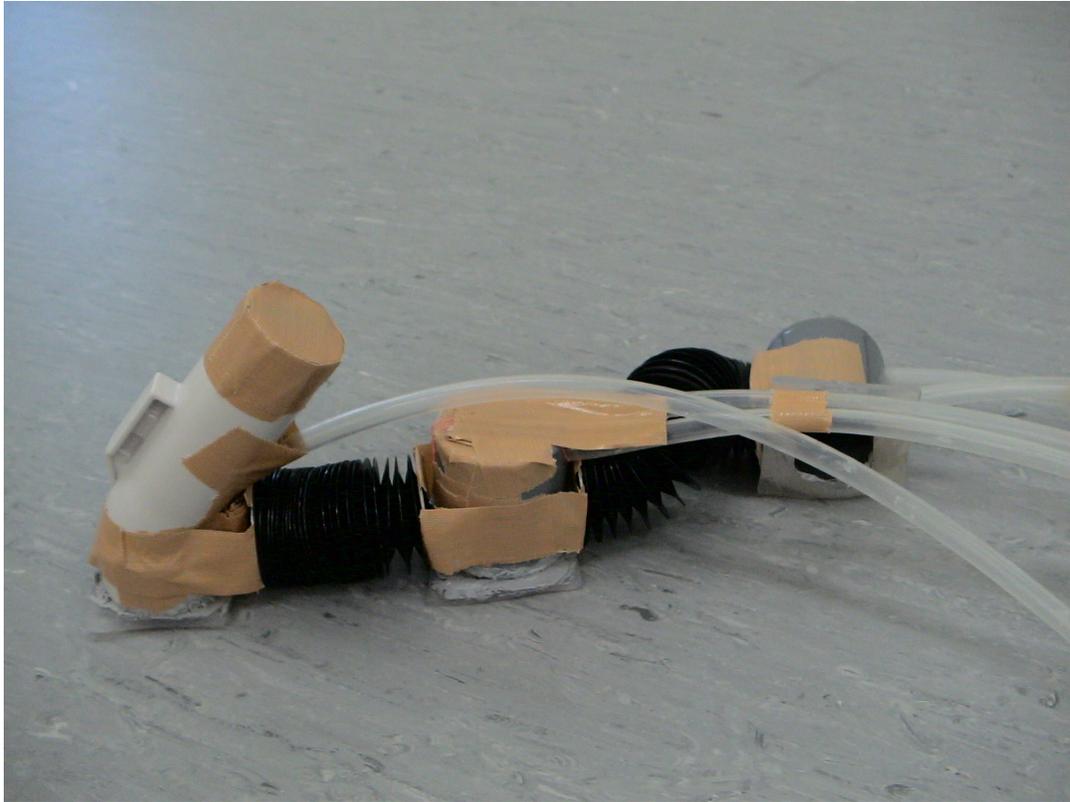


図 3.4: ホースによって倒された図

3.2 特徴

今回提案するミミズ型レスキューロボットの構造的長と主なアイデアを示す。

構造的長

- 伸縮ができ、膨らむことで高い剛性を獲得することの出来るオリジナルジャバラの開発。
- ジャバラの間とその両端に吸盤を用いる。
- 胴体は一本のジャバラで構成されている。
- 伸縮動作は従来通り圧縮空気を用いる。
- 軽量化を図るため全ての動力を本体外へ配置する。

ミミズ型レスキューロボットの構成は図 3.5 のような形態をとる。図中のポンプへ継る矢印は空気の流れを表す。

主なアイデア

- オリジナルジャバラの開発
従来のジャバラはジャバラ構造のため内圧をかけても剛性を獲得することが難しく前節でのような問題が起こった。そこで、今回開発するオリジナルジャバラ (図 3.6、3.7) はジャバラの周りに膜を張ることで圧力をかけた場合、膜面構造物と同じだけの剛性を獲得ができるようにした。また、従来の膜面構造物では収縮しようとしても膜が先に潰れてしまい、軸方向への収縮動作が行なえなかったが、オリジナルジャバラはジャバラを内蔵することで膜が先に潰れることを防ぎ、軸方向へ収縮することが可能となった。さらに、このオリジナルジャバラは空気を入れている途中、抜いている途中では指向性が無いため、受動的に環境にフィットすることが可能であり、従来のエアシリンダーと比較して 2~3 倍という高い伸縮率がある。
- 吸盤による吸着でツルツルした場所に対応させる。
従来のミミズ型レスキューロボットは設置面との摩擦だけで移動していたため、ツルツルした場所では動くことが出来なかったが吸着能力をつけることにより、ツルツルした場所でも移動できるようにする。
- 胴体に使用するジャバラは一本。
使用するジャバラの数を減らすことで、軽量化、単純化を計ることで、コストの削減、コントロールの容易性を目指す。

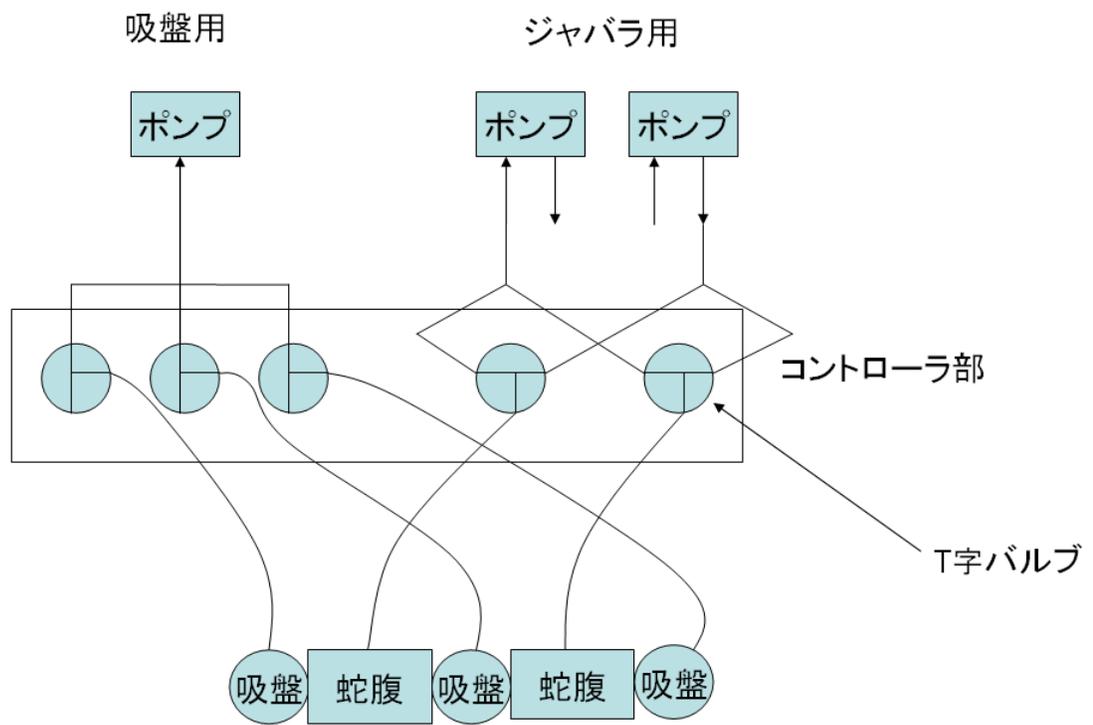


図 3.5: 機体構成

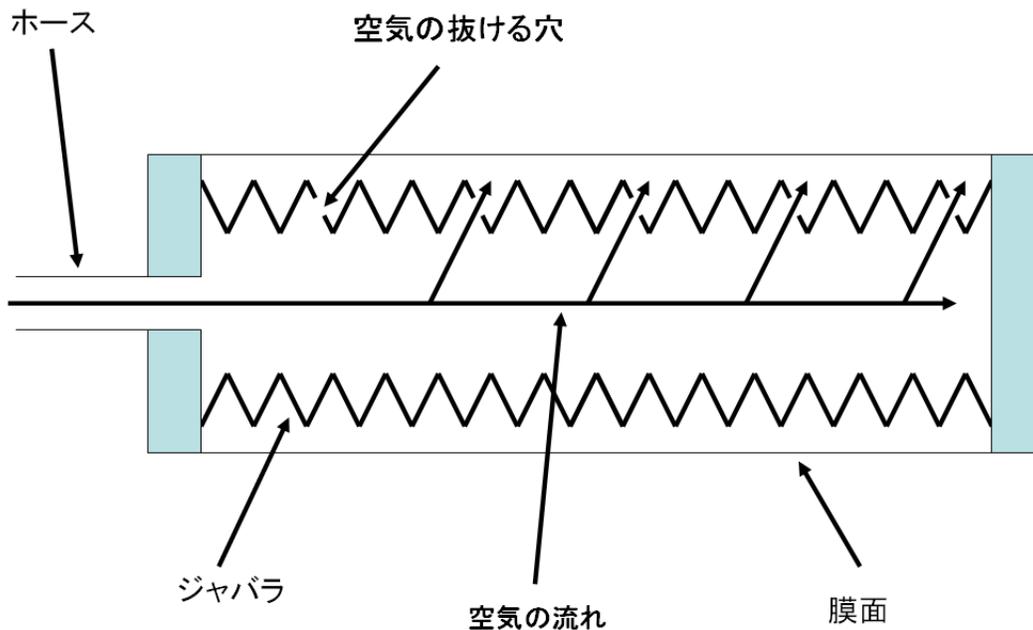
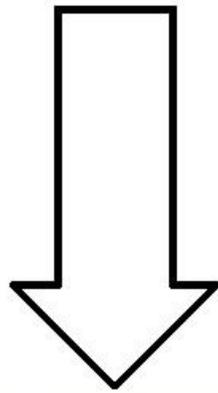


図 3.6: 膜付きジャバラの図

- 動力部（ポンプ、バルブ）をすべて本体の外、コントローラ側に置く。
すべての動力部を外につけることにより、故障時の対応がとりやすくなる。また重量物がすべて外にあるためより本体の軽量化ができ、瓦礫にダメージを与えない。それに加えて動力部がすべて外にあるのでより本体の小型化が出来る。
- 外部動力の特長を生かし被災者の発見時に水や酸素の供給を可能にする。
空気を送るポンプを変えることにより、水や流動食を発見した被災者へ届けることが可能になる。

しかし、以下のような問題点もある

- 動力部をすべて本体外に置くことでホースの引き回しが発生する。
従来はポンプ、バルブを内蔵していたため本体から出るコードはコントロール用コードだけであったが、本研究では軽量化、小型化を図ったため、本体からホースが数本出る。
- 従来の伸縮動作に加えて吸着動作もあるためコントロールが複雑になる。
伸縮動作だけだとシステムで単位時間ごとに空気の注入、抽出を行えばよかったが、



空気注入後



図 3.7: 膜付きジャバラの図

本研究では地面の変化に応じて吸盤の吸引の調整を人がしなくてはならずコントロールが複雑になる。

このような特徴と問題点の兼ね合いが開発のポイントである。

3.2.1 移動機構

このミミズ型レスキューロボットも圧縮空気を利用し伸縮運動を行う。その際に設置面が吸着可能であれば伸縮運動にあわせて吸盤用ポンプを動かすという方法をとる。以下に動作モデルを示し説明を行う。図 3.8、図 3.10、図 3.12、図 3.14 図中の矢印は空気の流れを表す。

3.2.2 コントロール方法

今回設計するコントローラは各吸盤とジャバラに手動 T 字バルブをつなげ、各パーツの吸気、排気をバルブを切替えることで行う。なおコントローラに書かれているアルファベットは前節のミミズ型レスキューロボットのモデルのアルファベットと対応している。図 3.9、図 3.11、図 3.13、図 3.15 図中の矢印は空気の流れを表す。

0. 初期状態と各部の名称を図 3.8、コントローラの状態を図 3.9 とし進行方向は前方とする。このとき全てのジャバラと吸盤は空気を吸い出している。

1.(図 3.10、図 3.11) 吸盤 c、b の空気を吸い出すことで吸着し、吸盤 a を開放状態にする。次に、ジャバラ Y の空気を吸い出すことでジャバラ Y が縮んだ状態を保ち、ジャバラ X に空気を送り込むことでジャバラ X は伸びる。これにより吸盤 a が前進する。

2.(図 3.12、図 3.13) 吸盤 a、c の空気を吸い出すことで吸着し、吸盤 b を開放状態にする。次に、ジャバラ Y に空気を送り込むことでジャバラ Y が伸び、同時にジャバラ X から空気を吸い出すことでジャバラ X は縮む。これにより吸盤 b が前進する。

3.(図 3.14、図 3.15) 吸盤 a、b の空気を吸い出すことで吸着し、吸盤 c を開放状態にする。次に、ジャバラ Y の空気を吸い出すことでジャバラ Y が縮み、ジャバラ X の空気を吸い出すことでジャバラ X は縮んだ状態を保つ。これにより吸盤 c が前進する。

この 1,2,3 の動作を繰り返すことにより前進動作を行う。

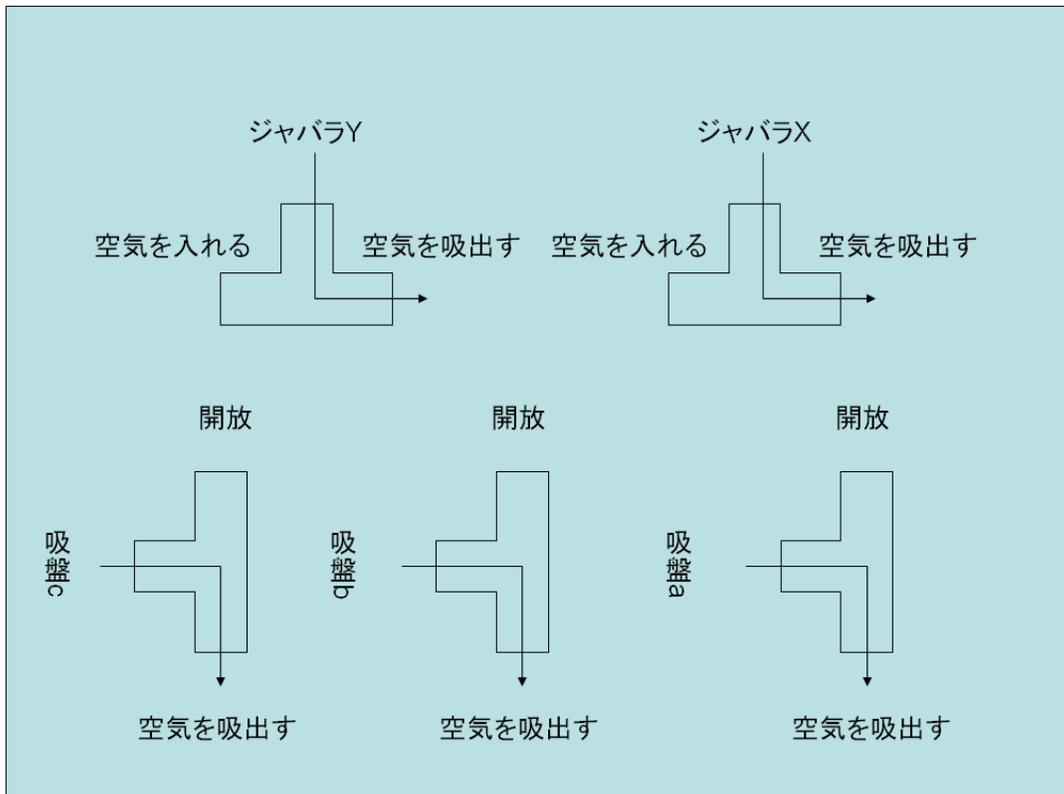


図 3.9: ミミズ型ロボットの初期状態

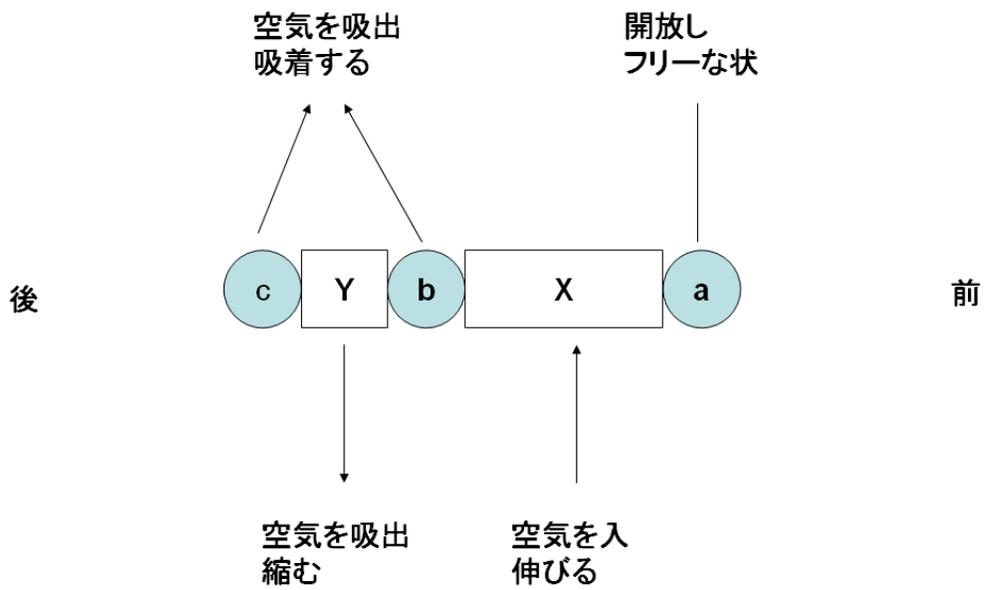


図 3.10: ミミズ型ロボットの動作方法 1

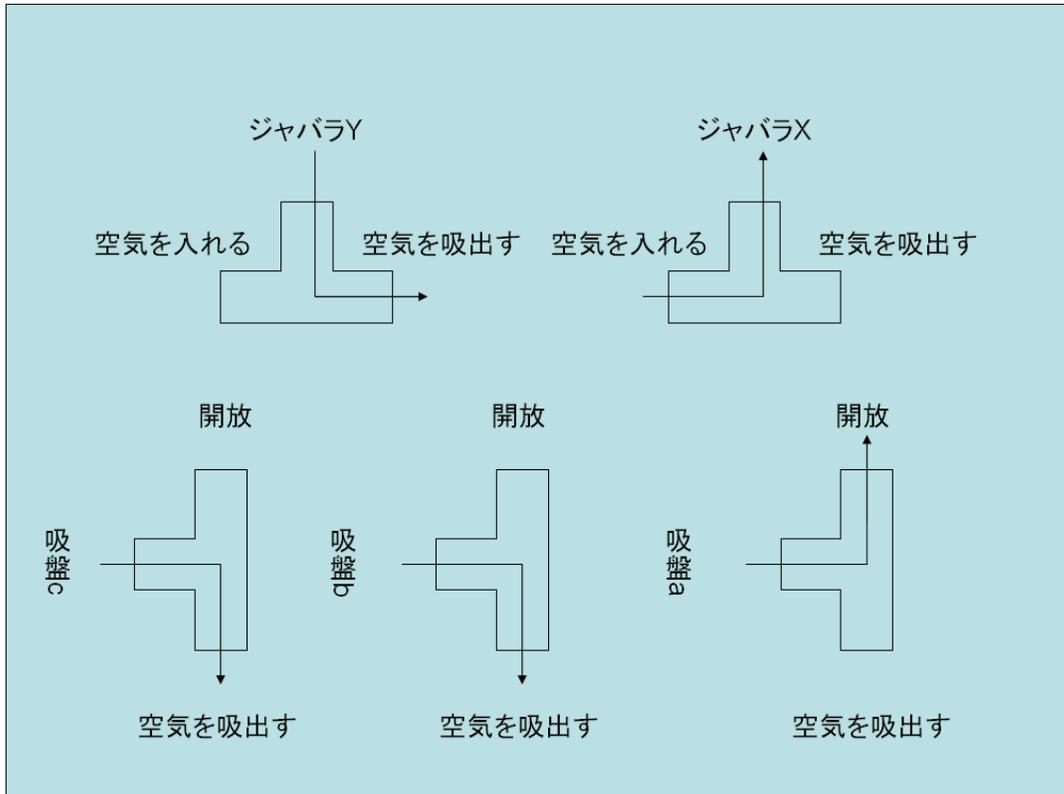


図 3.11: ミミズ型ロボットの動作方法 1

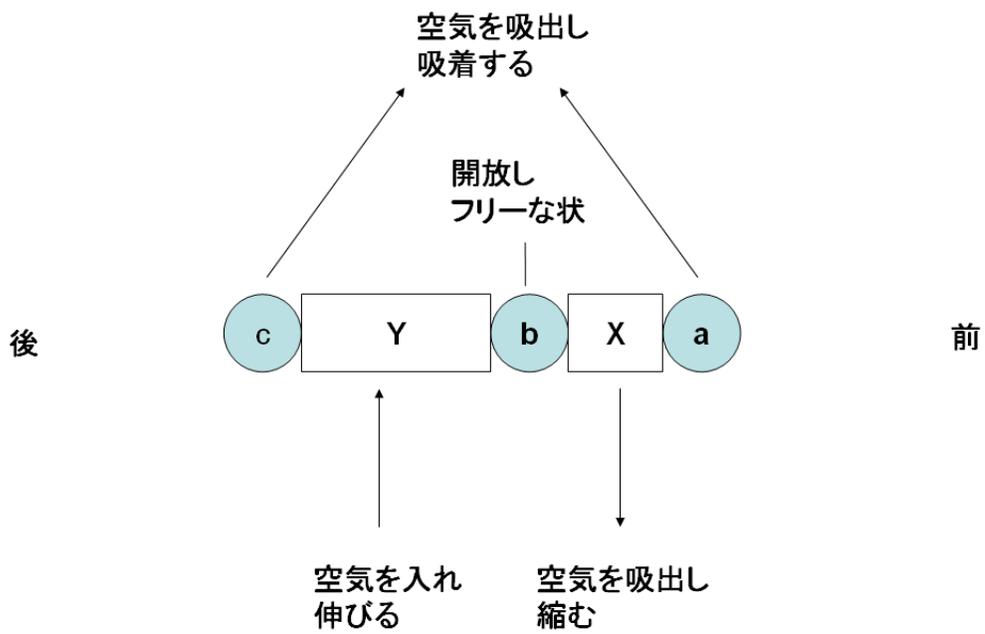


図 3.12: ミミズ型ロボットの動作方法 2

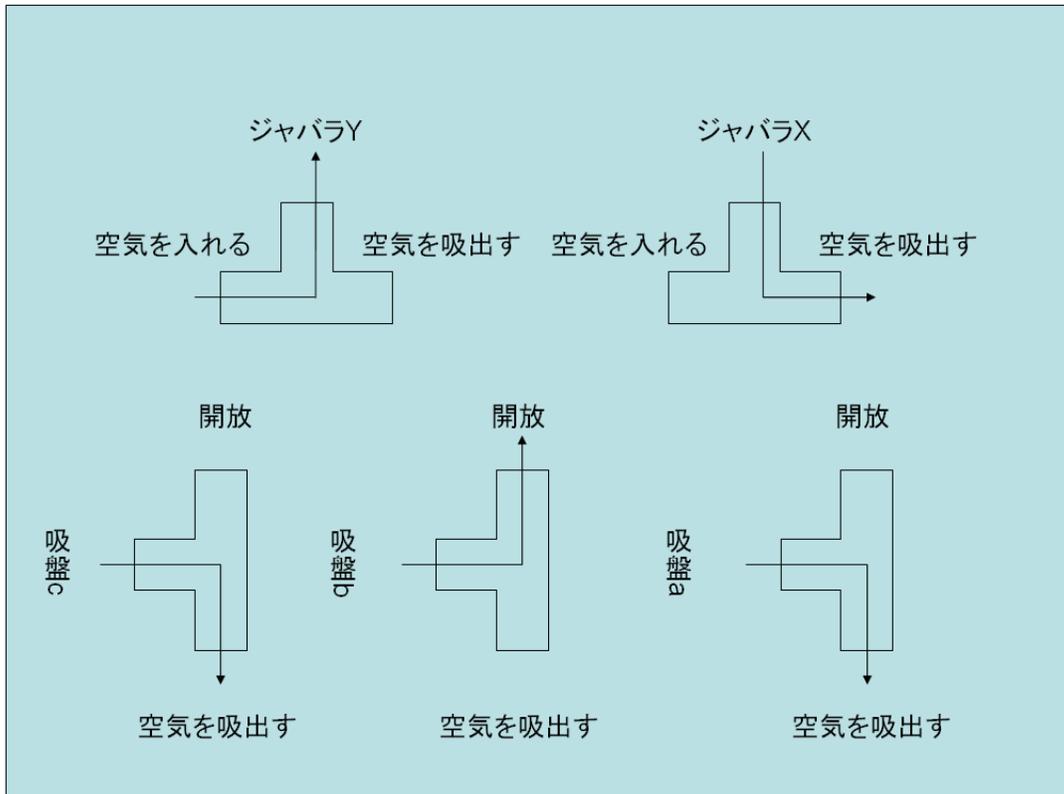


図 3.13: ミミズ型ロボットの動作方法 2

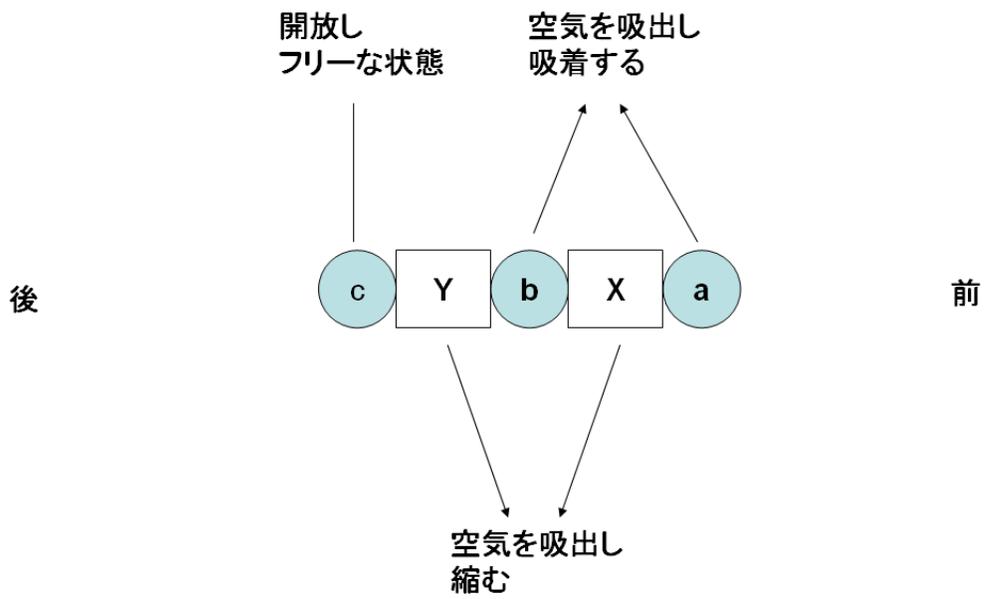


図 3.14: ミミズ型ロボットの動作方法 3

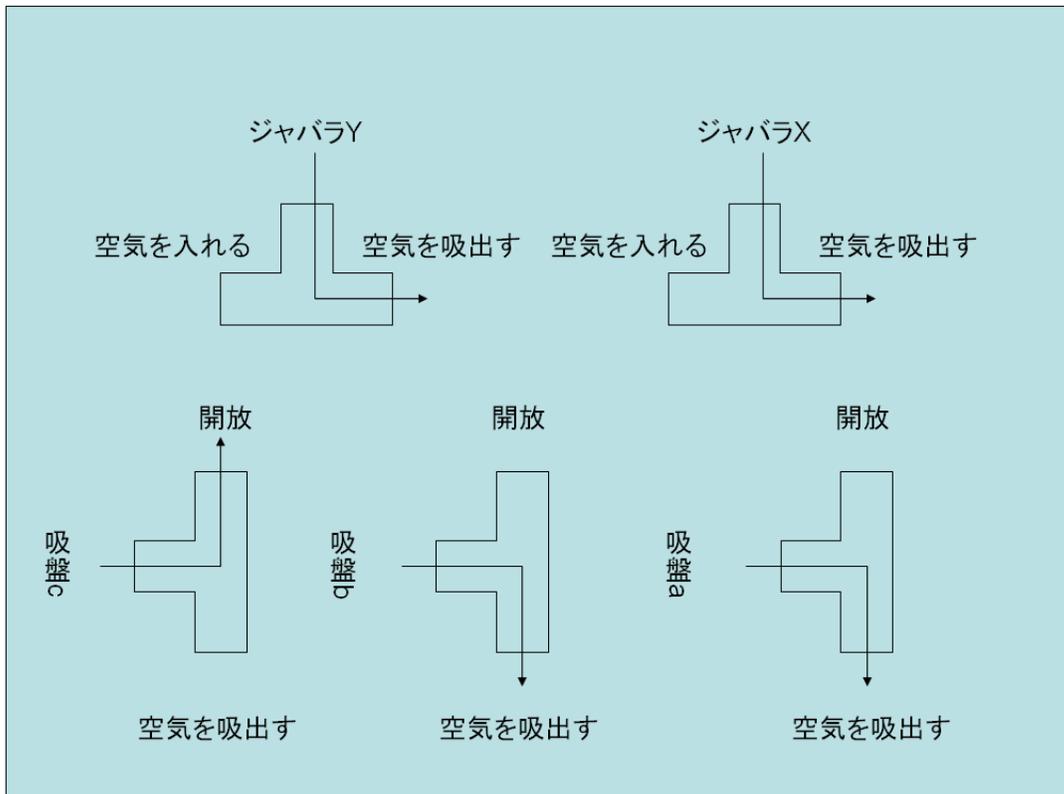


図 3.15: ミミズ型ロボットの動作方法 3

第4章 ミミズ型レスキューロボットの製作

本章では、前章で提案したミミズ型レスキューロボットの実機作成について述べる。まず機体構造、材質、機体の仕様について詳細に述べる。次にそれらを決定したジャバラや吸盤の応力を詳細に求め設計を行う。最後に製作したロボットによる走行実験について述べ、結果の考察、今後の展開を述べる。

4.1 機体仕様

4.1.1 本体部

ジャバラの材質は、軽量で柔軟性のあるナイロン系ジャバラである。形状は(図4.1)に示すような円筒形であり、周りにカプトンフィルム(株式会社 東レ)で覆っており、圧縮空気を出し入れすることでジャバラの特徴である伸縮動作と膜面構造物の特徴である高い剛性を得られる。吸盤部分は平面に吸いつけるように一般的なゴム製の吸盤(株式会社 日本ピスコ)を用いる(図4.2)。寸法は瓦礫のすき間を5~10cm程度と想定して、そこに入ることの出来るように寸法を決定した。ロボット本体の重量はホースを除いて約500gである。

4.1.2 コントローラ部

ミミズ型レスキューロボットの推進力はポンプからの圧縮空気を用い、各部位への圧縮空気を制御するバルブは手動バルブを用いる。ホースは軽くて丈夫なナイロン系の直径6(mm)のホースを用いる。コントロール用のバルブは手動T字バルブ(株式会社 日本ピスコ)を使用し、ポンプはDP-0140(株式会社 メドー産業)を使用する(図4.3)。

4.2 各部分の応力

ここではミミズ型ロボットのメインフレームであるジャバラや吸盤の寸法や素材を曲げや座屈における素材に対する力、伸縮力、吸盤の吸着力、動作時間などを求め決定する。



図 4.1: ジャバラの図

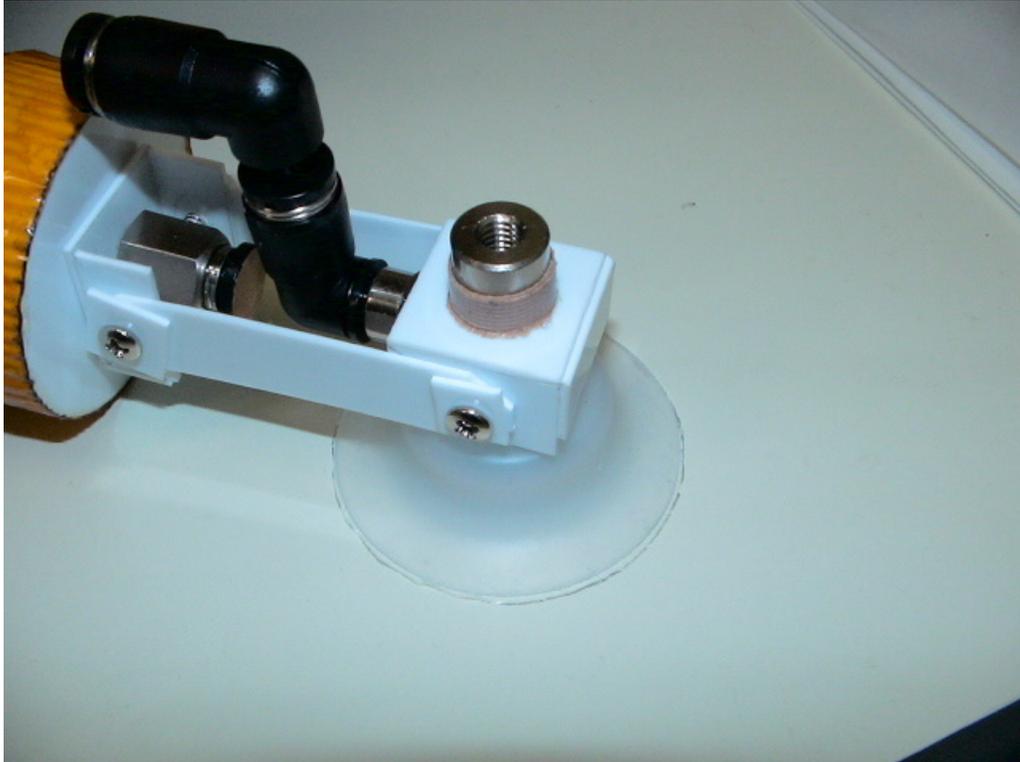


図 4.2: 吸盤の図

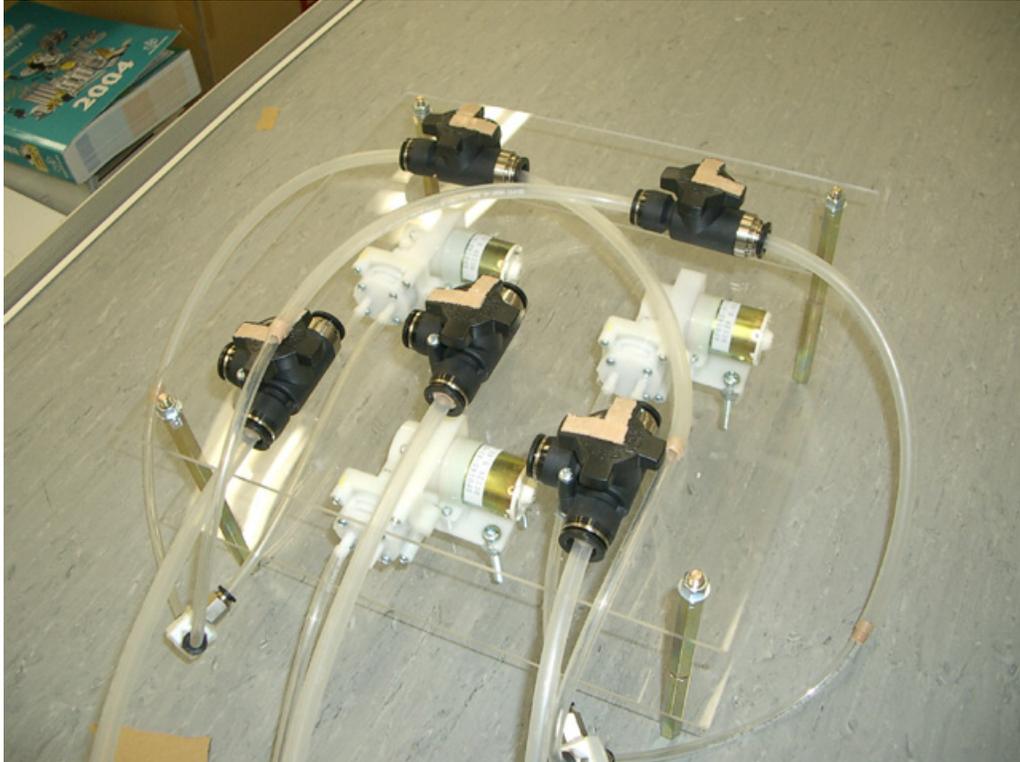


図 4.3: コントローラの図

4.2.1 ジャバラの設計

ミミズ型ロボットは空気圧により運動を行う。そのため空気の入り出るジャバラにかかる力を求める。まず内圧を受けるジャバラに座屈応力を求め、次にジャバラを曲げる際にかかる応力を求め、これらに耐えられるようにする。最後にジャバラの伸縮力を求めることでジャバラの設計を行う。

座屈応力

ここでは内圧のかかった座屈応力 $\sigma_{cr}(MPa)$ をジャバラの半径 $R(m)$ 、圧力 $p(MPa)$ と座屈応力の関係をグラフ 4.5 に表し、半径 $R(m)$ と許容座屈応力の関係をグラフ 4.6 に表すことで、適切なジャバラの設計を行う。

座屈応力の求め方

R : 筒半径 H : 板厚 E : ヤング率 p : 内圧 σ_y : 降伏応力

$$\sigma_{cr} = 0.6E \frac{H}{R} (1 - \alpha^2) \left(1 - \frac{1}{1.12 + \rho^{1.5}}\right) \left(\frac{\rho + \frac{\sigma_y}{250}}{\rho + 1}\right)$$

$$\alpha = \frac{pR}{\sigma_y H}$$

$$\rho = \frac{R}{400H}$$

許容座屈、曲げ応力の求め方

$$\sigma_a = \frac{1}{6} E \frac{H}{R}$$

これらのグラフから、瓦礫などのすき間などを考慮してジャバラの半径を $0.02(m)$ とする。このときの許容座屈応力は $0.7083(MPa)$ である。しかし、半径が $0.02(m)$ の時の座屈応力をグラフ 4.7 で見ると、今回使用を考えてる $0.01(MPa) \sim 0.1(MPa)$ の間では許容座屈応力の3倍に近い力がかかっていることが分かる。しかしながら今回はこれを許容範囲として設計を進める。

ジャバラにかかる曲げ応力

次にジャバラの長さを求める。これは伸びた状態において曲げようとするジャバラの根本にどのくらいの力がかかるかを求め、その力に対応できる素材を選ぶ。グラフ 4.8 はジャバラの長さ $l(m)$ 、曲げようとする力 $p(N)$ と曲げ応力 $\sigma(MPa)$ の関係を表したものである。

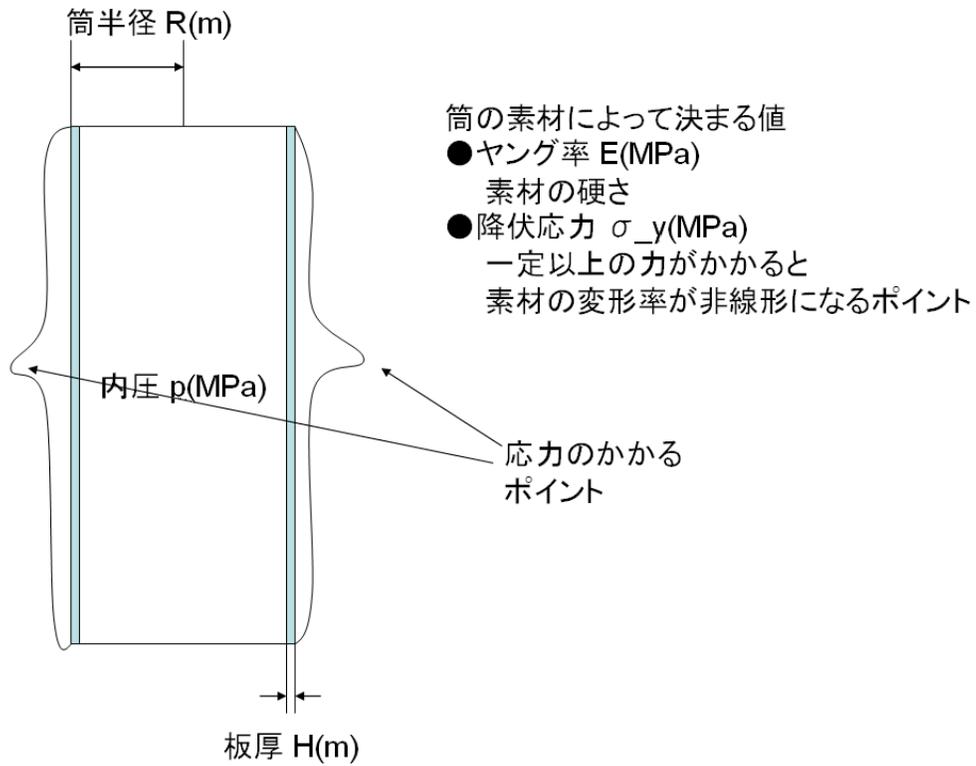


図 4.4: 座屈応力の分かりやすい図

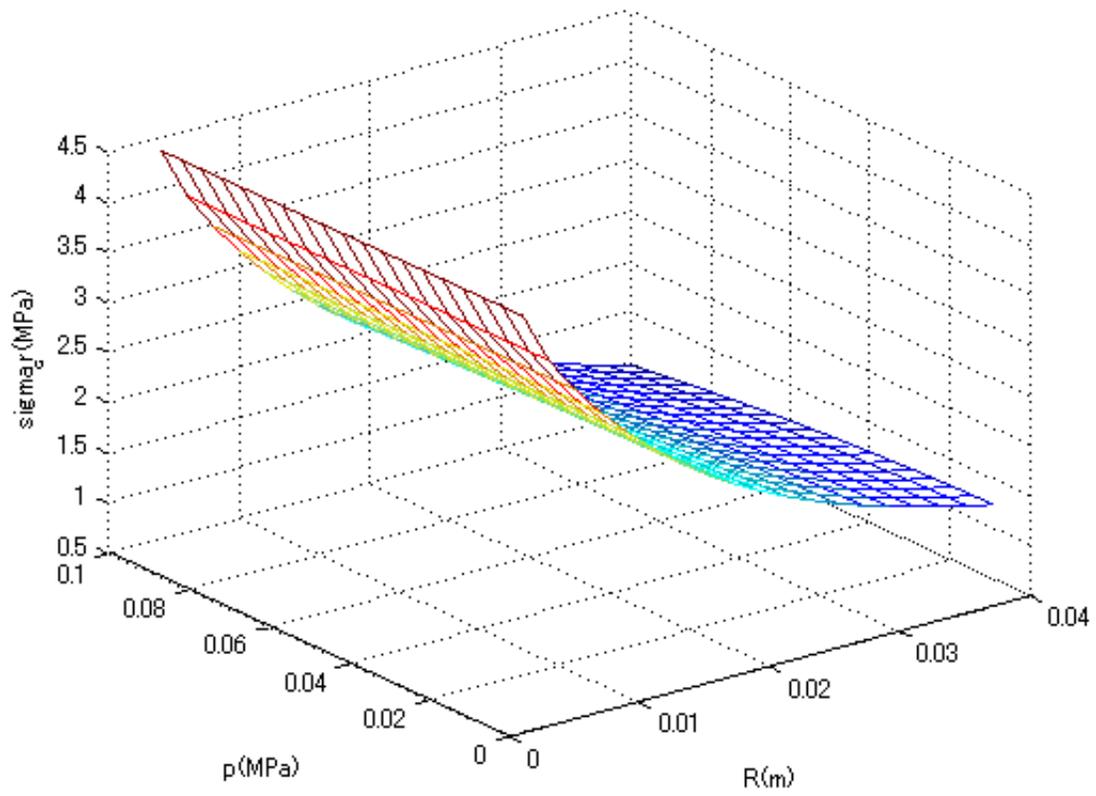


图 4.5: 座屈応力

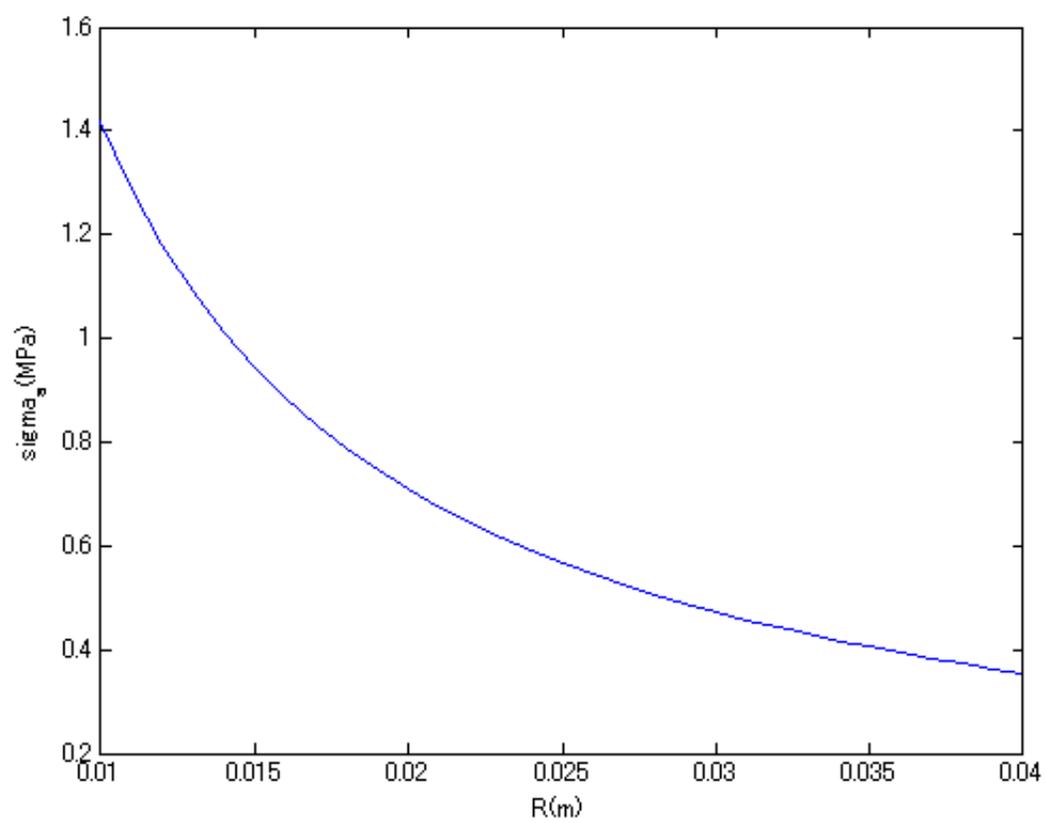


図 4.6: 許容座屈応力

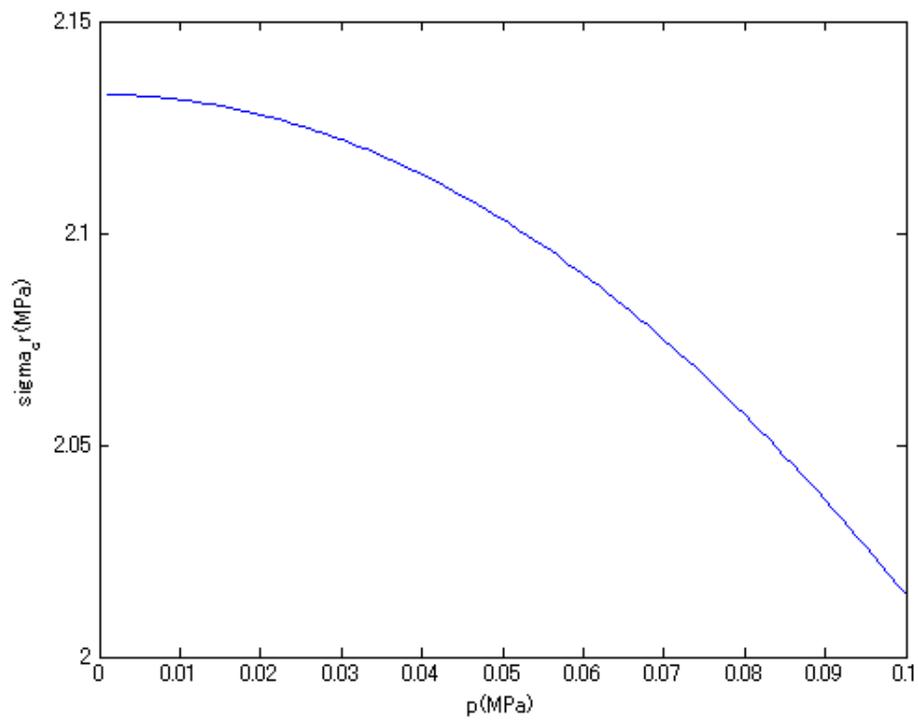


图 4.7: 屈服应力

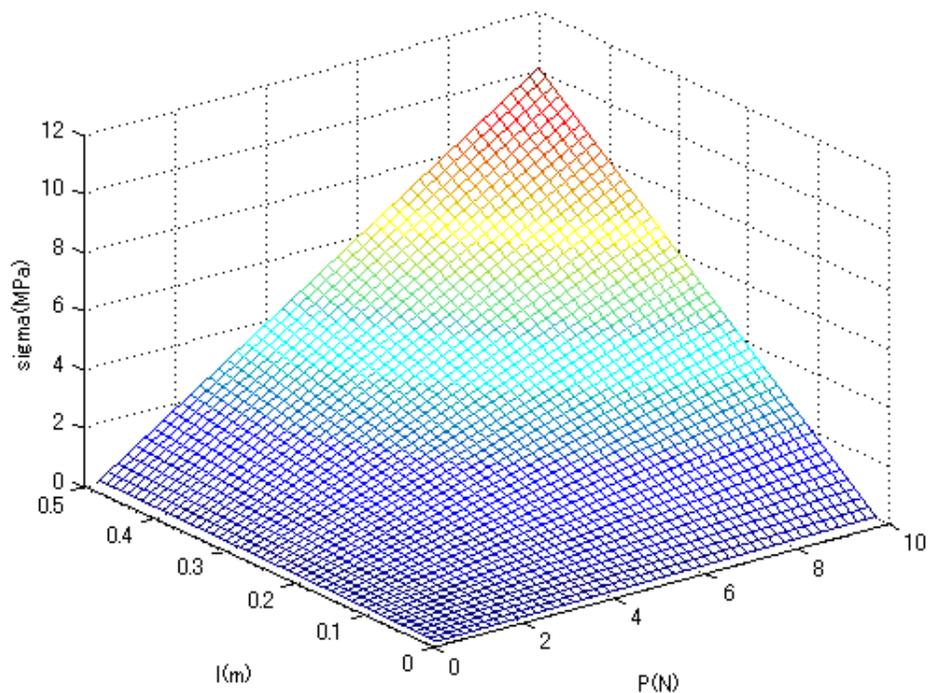


図 4.8: 曲げ応力

曲げ応力の求め方

P : 力 L : 長さ d_1 : 筒内径 d_2 : 筒外径

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

$$M = P \times L$$

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32 \times d_2}$$

グラフ 4.8 より、ジャバラの長さを長すぎない程度の $0.2(m)$ とし、このときのより詳しい曲げようとする力 $p(N)$ と曲げ応力 $\sigma(MPa)$ の関係をグラフ 4.9 に表す。

ジャバラの伸縮力

次に、決定したジャバラの寸法を基にジャバラの伸縮力を求める。ジャバラの筒半径 $R=0.02(m)$ とし、内圧 $p(MPa)$ による伸び縮み力 $k(MPa)$ の変化をグラフ 4.11、4.12 で表す。

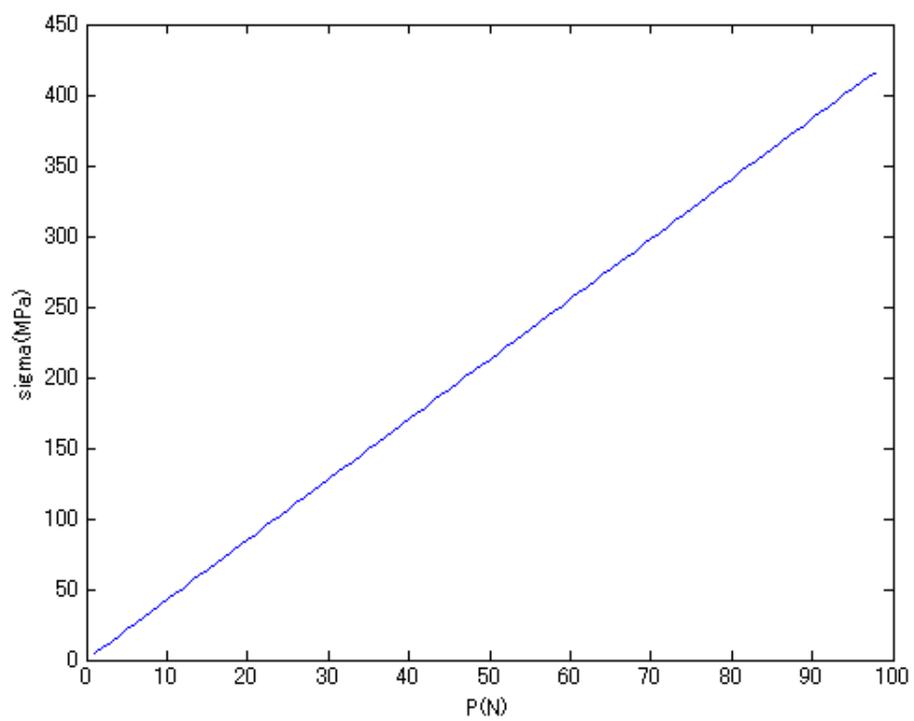


図 4.9: 曲げ応力

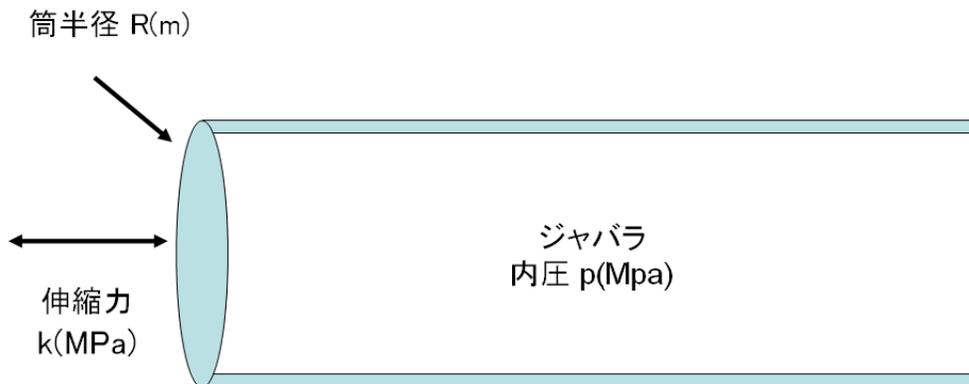


図 4.10: 伸縮力の分かりやすい図

伸縮力の求め方

R : 筒半径 p : 内圧

$$k = \pi p R^2$$

4.2.2 吸盤の設計

本研究のミミズ型ロボットの特徴である吸盤による吸着動作のための各数値を求める。まず吸盤の面積から吸着力 (kgf/m^2) を求めることで、吸盤にかけることのできる最大の力 (N) を求める。次に吸盤に対する曲げ応力 (MPa) を求めることで吸盤の支えられる重さを求める。

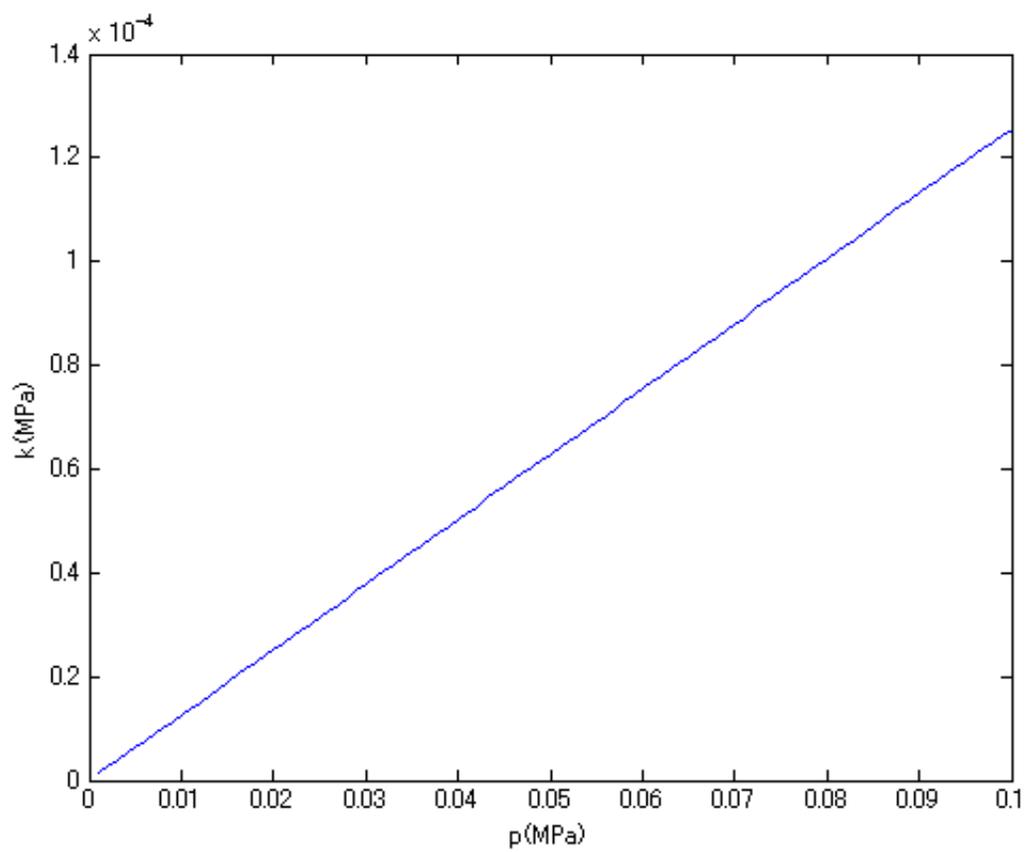


図 4.11: 伸び力

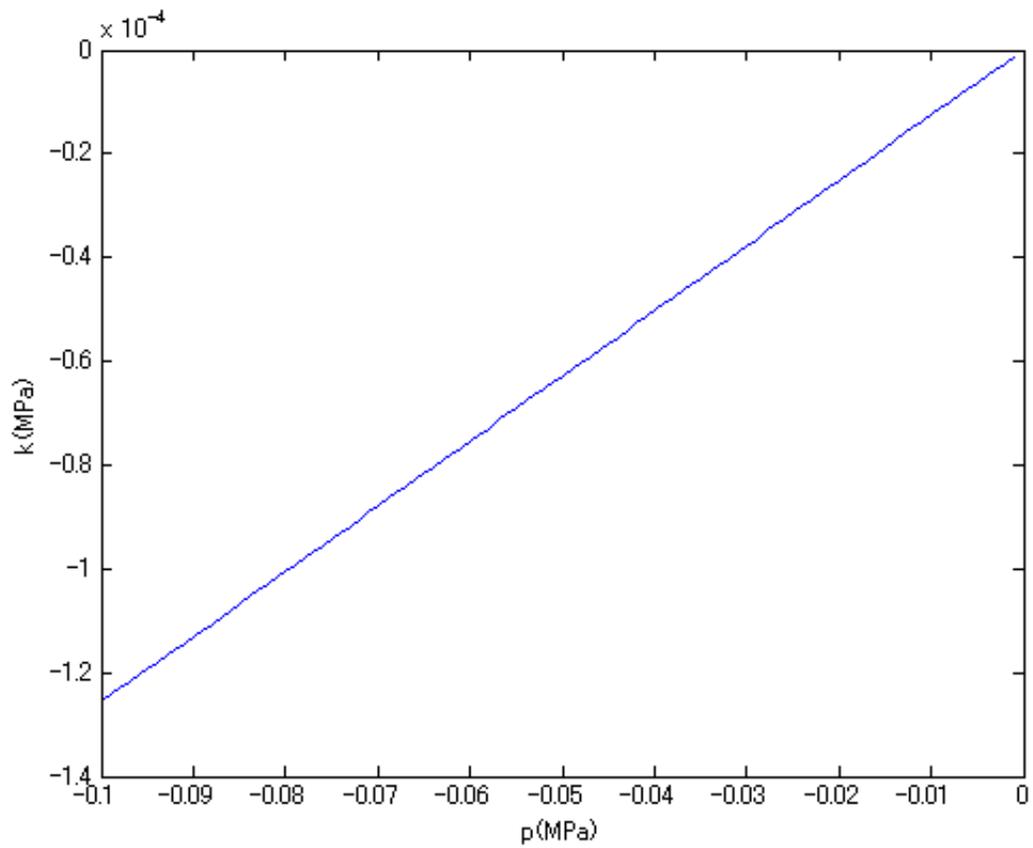


図 4.12: 縮み力

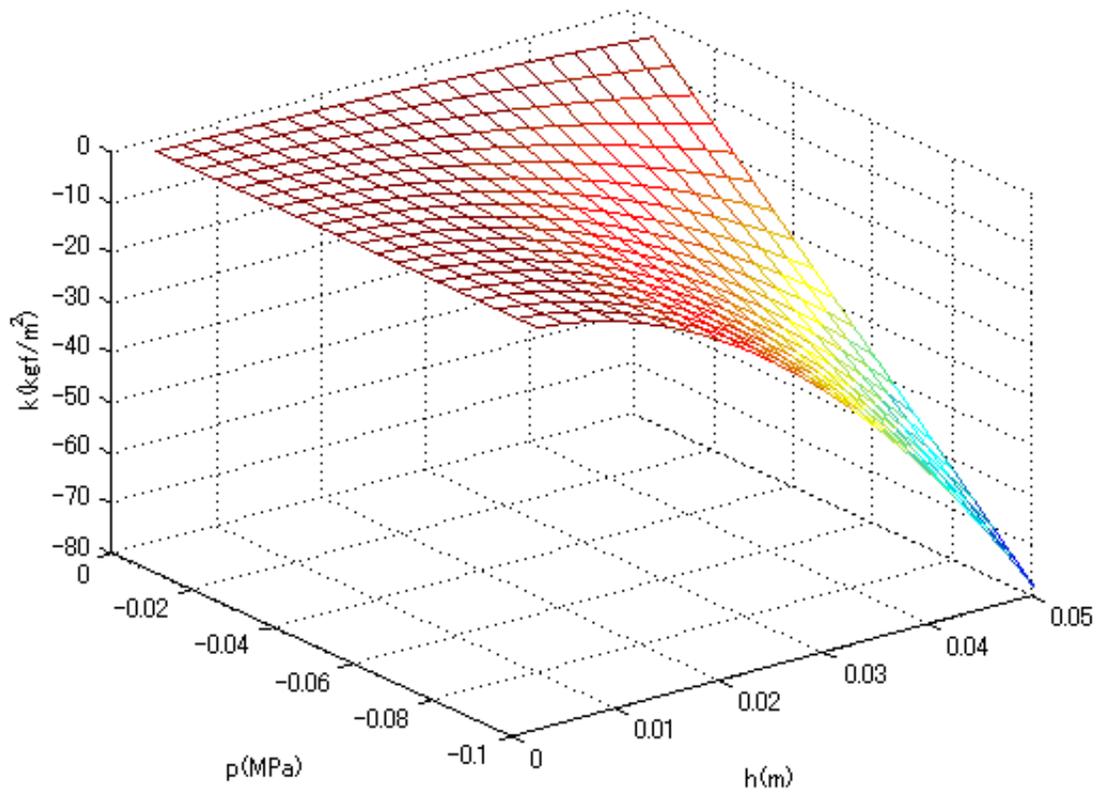


図 4.13: 吸着力

吸着力

前節でジャバラの筒半径を $0.02(m)$ としたので、吸盤の半径 $h(m)$ 、到達真空度 $p(MPa)$ 、との吸着力 $k(kgf/m^2)$ の関係をグラフ 4.13 に表す。

吸着力の求め方

h : 吸盤半径 p : 到達真空度

$$k = \pi p R^2$$

吸盤にかかる曲げ応力

前節でジャバラの筒半径を $0.02(m)$ としているため、吸盤の半径を $0.025(m)$ 、小型ポンプの関係から到達真空度を $-0.533(MPa)$ とすると吸着力 k は $1.0465 \times 10^{-4}(MPa)$ とな

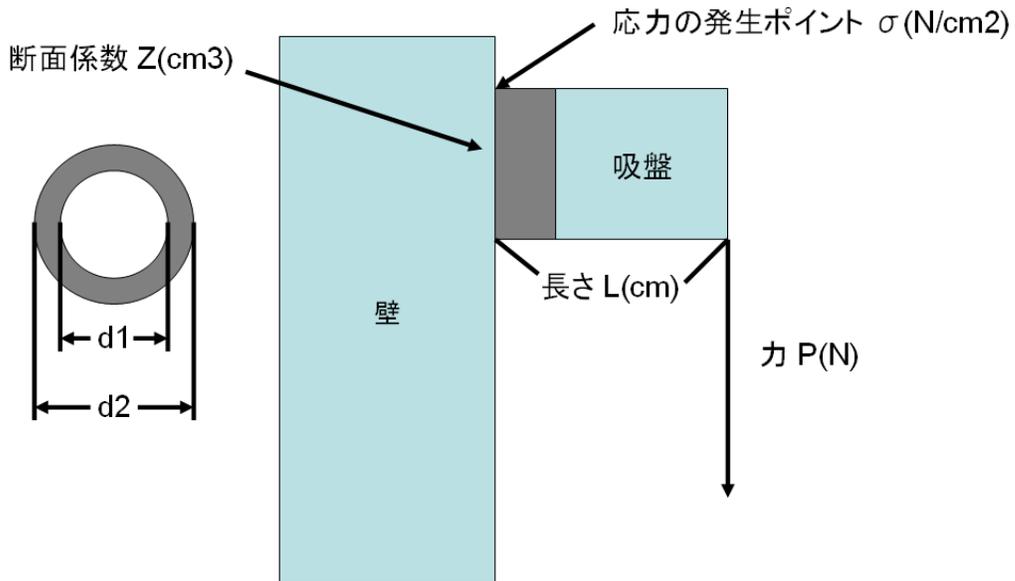


図 4.14: 曲げ応力の分かりやすい図

る。この時の曲げ応力 σ が吸着力を越えない範囲で、力のかかる高さ $h(m)$ とかける力 $p(N)$ との関係をグラフ 4.15 に表す。

許容力の求め方

Z : 断面係数 σ : 曲げ応力 h : 力のかかる高さ

$$p = \frac{\sigma \times Z}{h}$$

4.2.3 ロボットの動作時間

ここでは前節までに求めたジャバラの寸法から伸縮にかかる時間を求める。小型ポンプの関係から吐出空気量を $4000(ml/min)$ とし、内圧 $p(Mpa)$ 、体積 $v(ml)$ の変化における伸縮時間 $t(min)$ の関係をグラフ 4.16 に表す。

動作時間の求め方

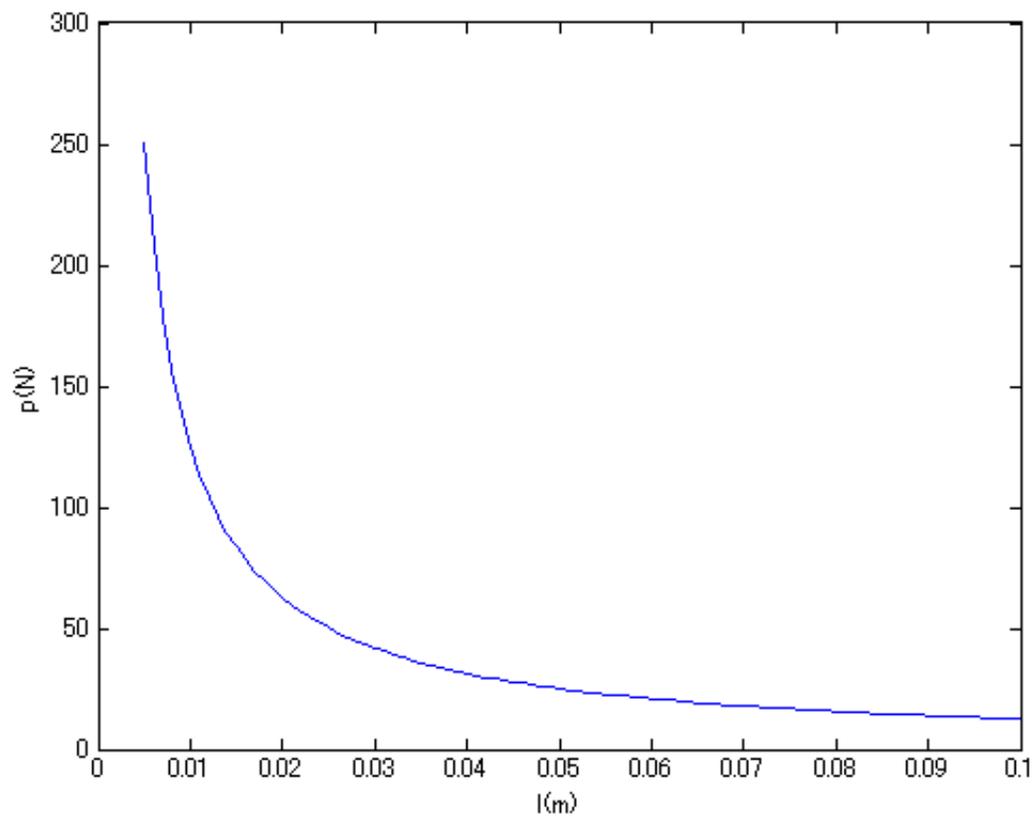


图 4.15: 吸着力

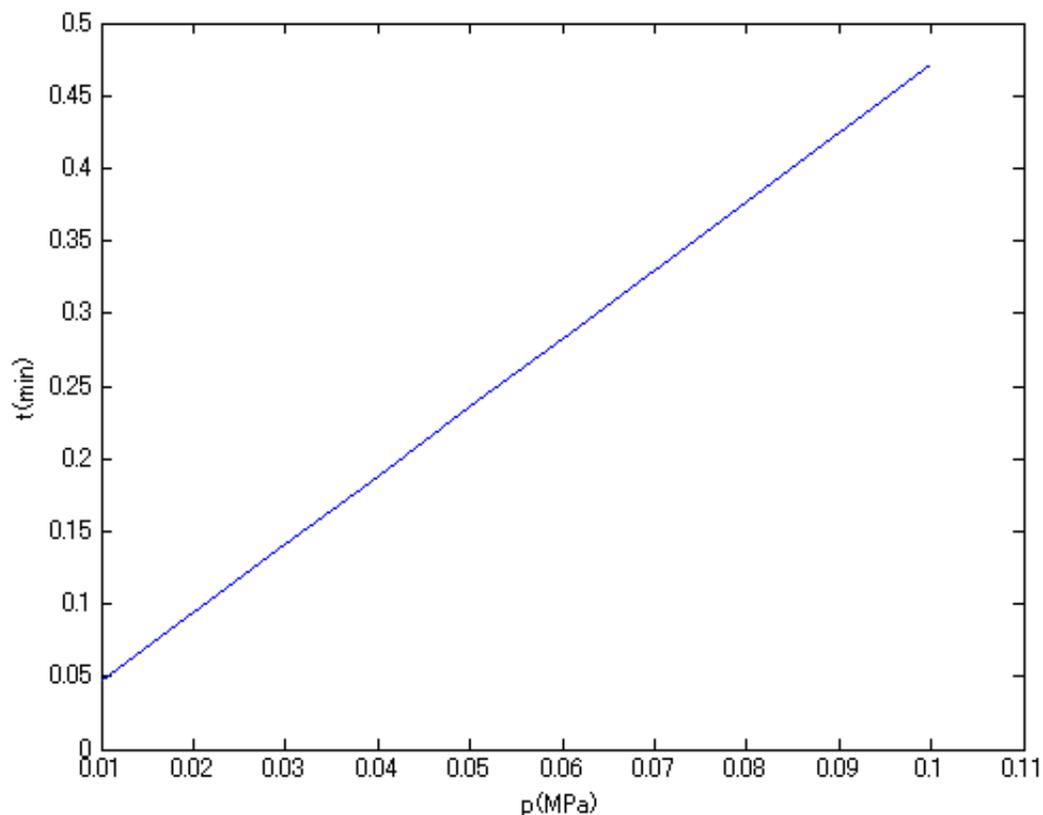


図 4.16: 動作時間のグラフ

v_0 : 圧力 p の時体積 v に入る量 p_0 : 大気圧 p : 圧力 v : 体積 x : 吐出空気量

$$v_0 = \frac{pv}{p_0}$$

$$t = \frac{v_0}{x}$$

4.3 ロボットの設計図

今までのデータを基にミミズ型ロボットの各値を表 4.1、4.2、4.3、4.4 に表し、各パーツを図 4.17、4.18 に。またそれらを併せて作成するロボットの完成予想を図 4.19 に表す。なお今回設計のために使用したソフトは SolidWorks2004((株)ソリッドワークス社)を使用した。

表 4.1: ロボットの寸法

	各数値
ジャバラの半径 (m)	0.02
ジャバラの長さ (m)	0.15
吸盤の半径 (m)	0.025
吸盤の梁の長さ (m)	0.05
ロボットの全長 (max)(m)	0.60
ロボットの全長 (min)(m)	0.32
ロボットの重量 (kg)	0.5

表 4.2: ロボットの花

	各数値
縮み力 (kgf)	6.829
伸び力 (kgf)	6.407
吸着力 (垂直)(kgf)	10.67
吸着力 (水平)(kgf)	2.619

表 4.3: 材質

	素材
ジャバラ	ナイロン
中間フレーム	アクリル樹脂
膜	カプトンフィルム
吸盤	パットゴム
ホース	ナイロン

表 4.4: その他

	各数値
吐出空気量 (ml)	4000
最高圧力 (MPa)	0.05
到達真空度 (MPa)	-0.0533
ロボットの1動作の時間 (sec)	45

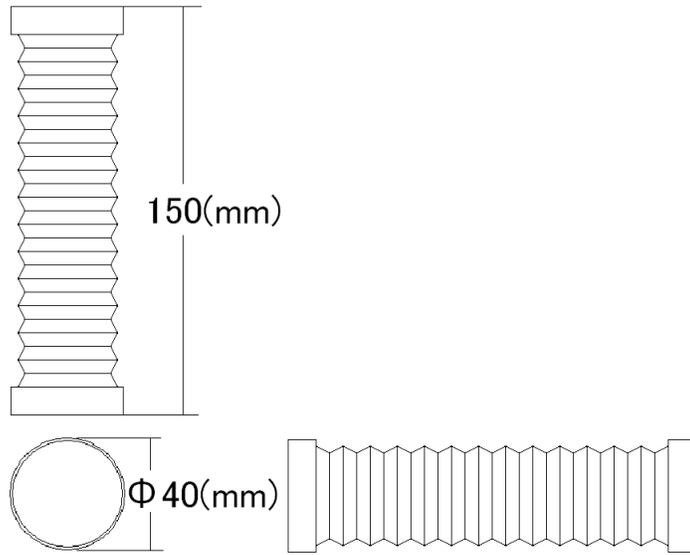


図 4.17: ジャバラの図

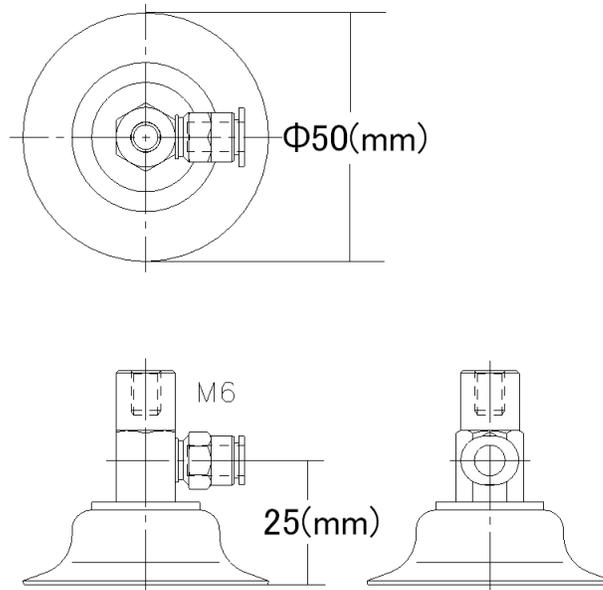


図 4.18: 吸盤の図

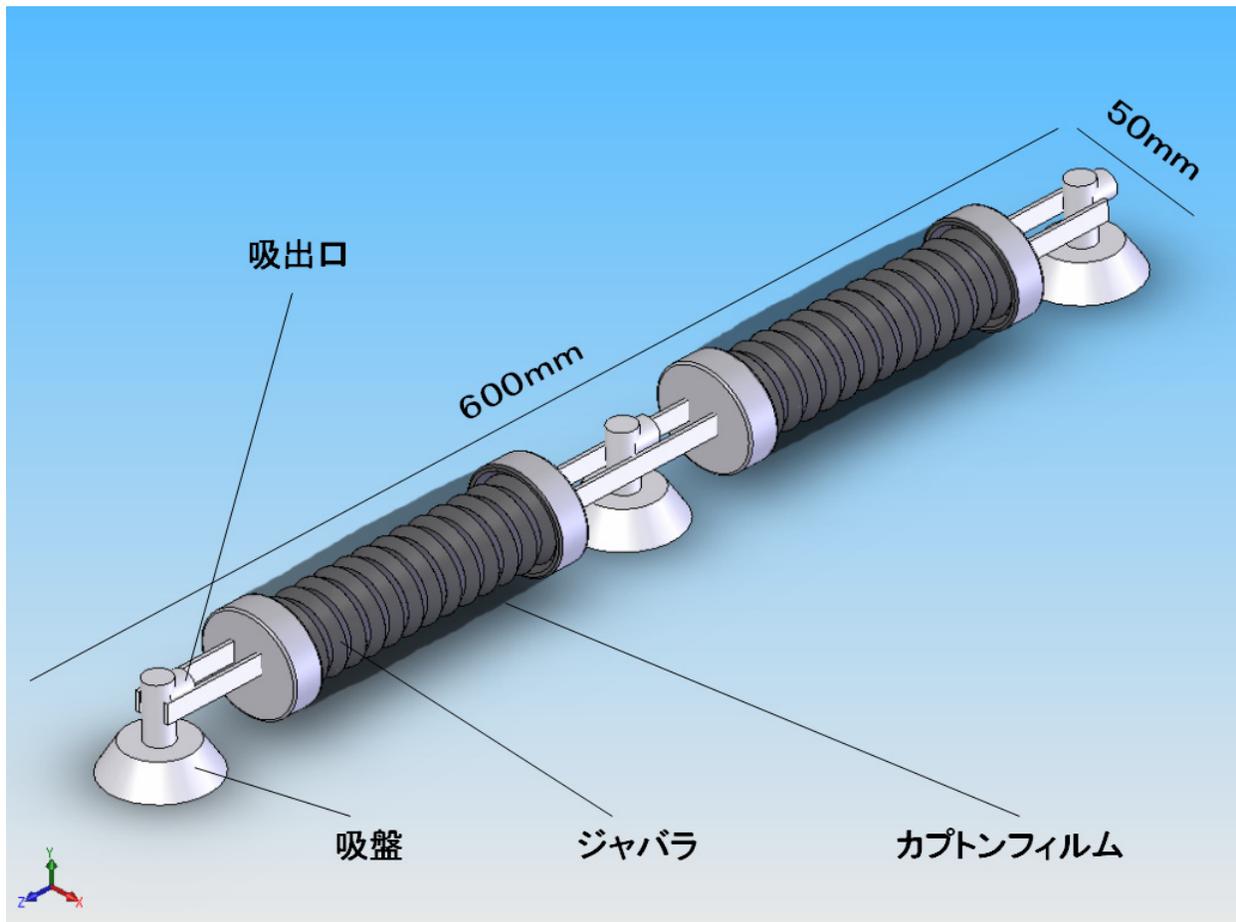


図 4.19: 全体完成予想図



図 4.20: 製作したミミズ型ロボットの伸びた状態

4.4 評価実験

本実験の目的は、ミミズ型ロボットの動作の評価である。そのためにミミズ型ロボットの整地、不整地での動作確認を行う。

吸盤使用による動作を評価するために、ミミズ型ロボットを整地された坂での動作実験を行うことで、吸盤を使用しない場合と比べてどのような違いが出るのか、また、今回製作したオリジナルジャバラの効果を検証する。また、吸盤を使用出来ない不整地(絨毯や凹凸のある地面)での動作実験を行うことで、吸盤を付けた影響や、オリジナルジャバラの影響を検証する。最後に、ミミズ型ロボットの特徴である柔軟性を活かし、カーブを曲がる実験を行う。図 4.20、4.21 が今回製作したミミズ型ロボットである。



図 4.21: 製作したミミズ型ロボットの縮んだ状態

表 4.5: 寸法

	各数値
全長 max(mm)	600
全長 min(mm)	360
重量 (g)	500
移動距離 1 サイクル (mm)	140
移動スピード (mm/s)	280



図 4.22: 坂を登る 1

4.4.1 坂道実験

この実験では本研究のポイントである吸盤による吸着動作によって従来のミミズ型ロボットでは進むことの出来ないような角度の付いた坂道での動作実験を行う。実験内容は最初吸盤による吸着動作をさせないで0度～90度までの坂道での動作実験を段階的に試す。次に吸盤による吸着動作させて同じ実験をすることで従来のミミズ型ロボットに対する優位性を証明する。図 4.22、図 4.23、図 4.24、図 4.25

今回の実験で吸盤による吸着動作をさせた場合、最大で約70度の坂を登り、吸着させなければ約30度であった。これにより吸盤の有利性が証明された。また、前節でのジャバラの問題であった伸びすぎによる曲がりや捻れは今回使用したオリジナルジャバラにより曲がりや捻れを起こすことなく真直に伸縮することが出来た。ただ、角度を70度以上にすると吸盤と設置面が並行にならず吸い付けなかった。原因は吸盤やジャバラをつなぐ際の若干の遊びがホースの重量の影響で後ろに反ってしまうことにあった。これを解決するためには専用パーツとして各部品を作ってもらふ必要があると考える。

4.4.2 絨毯実験

この実験では従来のミミズ型ロボットと同様に設置面との摩擦のみで前進する動作実験を行う。実験内容は吸盤は使わず、ジャバラの伸縮のみで前進させる方法を取り、絨毯や凸凹のある床で行うことで前進することが出来るのか実験を行う。また、吸盤やオリジナ



図 4.23: 坂を登る 2



図 4.24: 坂を登る 3



図 4.25: 坂を登る 4

ルジャバラが前進に与える影響を見る。図 4.26、図 4.27、図 4.28、図 4.29

今回の実験で従来のミミズ型ロボット同様に本研究のミミズ型ロボットも前進することが出来た。ただ、3mm 以上凸凹のある床では吸盤が凹凸に引っかかりスムーズに前進することが出来なかった。このことからオリジナルジャバラの影響はほとんどないものと考えられるが、吸盤に関しては多少の影響があることが分かった。これは吸盤にドーム状の殻を付けることでなんとかなると考えられる。

4.4.3 カーブ実験

この実験ではミミズ型ロボットの特徴である柔軟性を用いることで従来の金属フレームでは曲がることのできないようなカーブを曲がる動作の実験を行う。実験内容は従来の金属フレームではカーブがフレームと同じ大きさ以上でなければ曲がることのでない。そこでカーブがフレームの全長より狭い状況でミミズ型ロボットを動かすことで従来の金属フレームに対する優位性を実験により証明する。図 4.30、図 4.31、図 4.32

今回の実験でミミズ型ロボットの特徴である柔軟性を発揮することで、従来の金属フレームのミミズ型ロボットでは曲がることのできないようなカーブをジャバラに入れる空気を時間で調節することでカーブに沿うように受動的に曲がることが出来た(グラフ 4.33)。これは従来金属で周りを覆う事で柔軟性を犠牲にすることで剛性を高めていた方法に対して、本研究ではオリジナルジャバラを使うことで剛性を犠牲にせず柔軟性を高める事が出来たからだと考えられる。

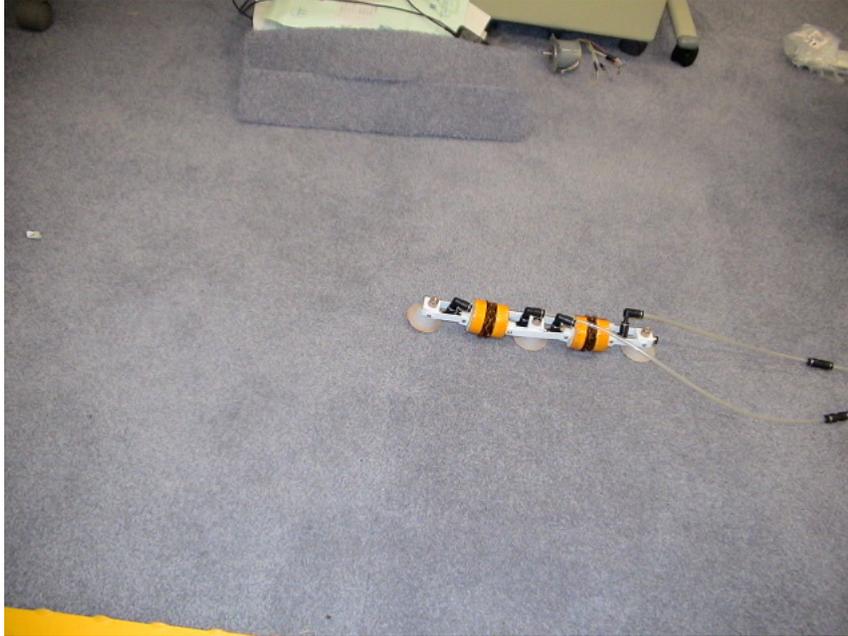


図 4.26: 絨毯を移動 1



図 4.27: 絨毯を移動 2



図 4.28: 絨毯を移動3



図 4.29: 凹凸を移動



図 4.30: カーブを移動 1

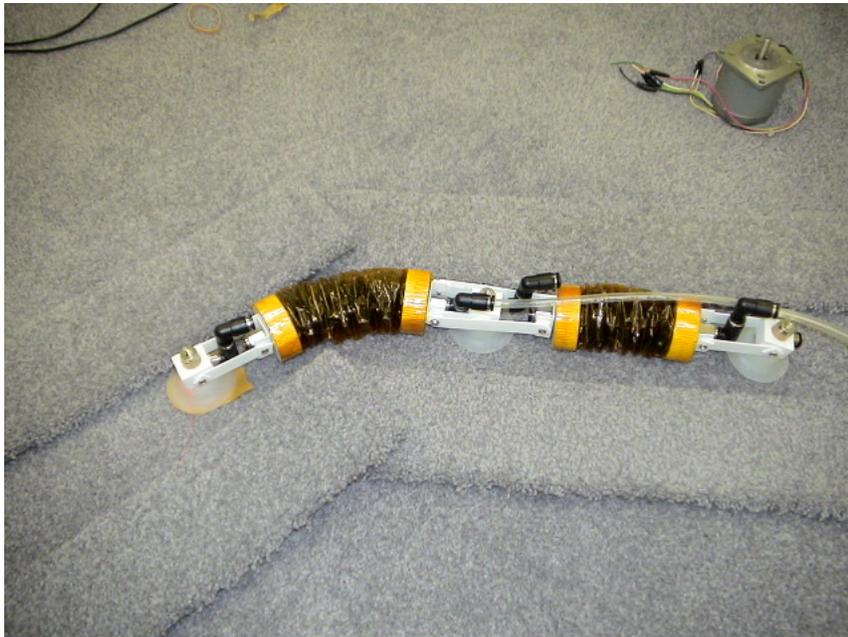


図 4.31: カーブを移動 2

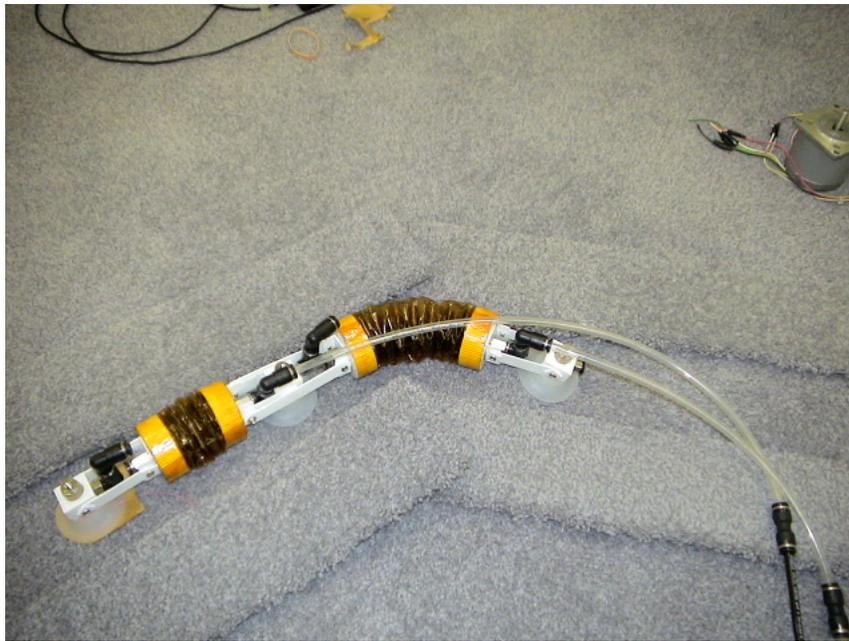


図 4.32: カーブを移動 3

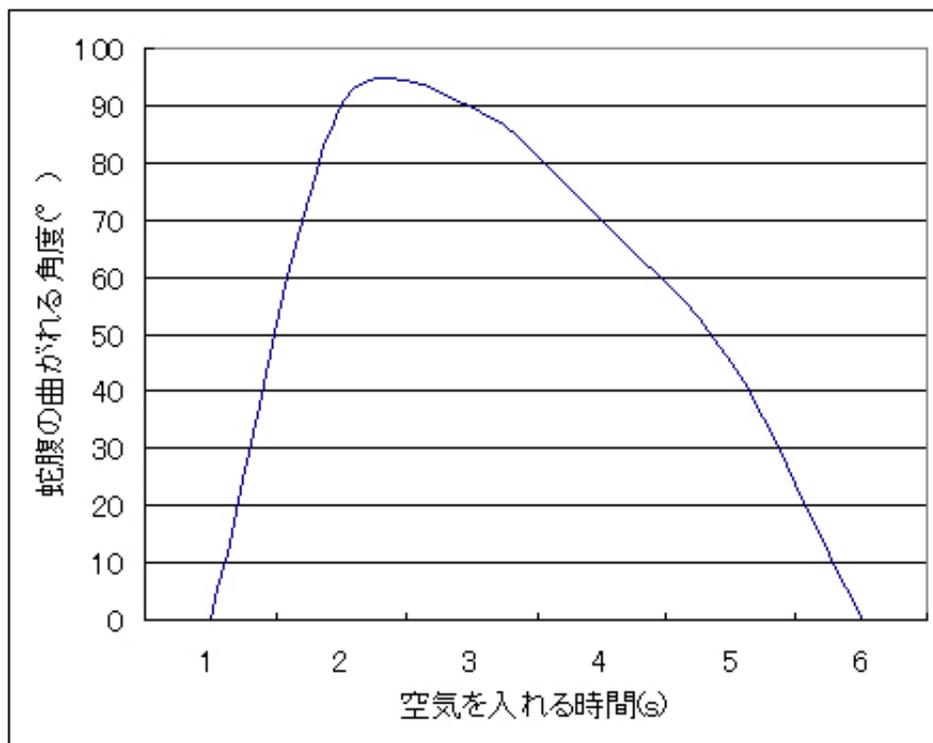


図 4.33: 空気を入れる時間とジャバラの曲がり方



図 4.34: 空気を出す前

4.4.4 排気実験

この実験では各部位から外部へつながるホースを利用して、吸盤から空気を吐きだす実験を行なう。これは倒壊した建物内部で被災者を発見した場合、空気や水分等の補給を目的とした実験である。図 4.34、図 4.35

今回の実験では外部までホースが伸びているため、簡単に吸盤から空気を吐きだすことができた。今回は水については実験をしなかったが、空気と同様に出来ると考えている。

4.5 考察

今回の実験結果から吸着動作を取り入れたことで滑りやすい場所や急な角度の付いた場所など移動できる範囲が広がったのを確認できた。また、今回製作したオリジナルジャバラを使用することで従来のミミズ型ロボットの問題点であった曲げや捻れなどを解決するとともに、金属を使用しないため軽量化にも成功したといえる。ただ、本研究では動力源を全てロボットの外に配置したため、動力を伝えるホースをロボットが引く必要があり、実用的に考えると多少無理があるように思えた。また、吸着動作を行いながらのロボット操作は多少複雑で操作を間違えることが多々あった。しかし、本研究のミミズ型ロボットは移動範囲や軽量化、オリジナルジャバラの開発など従来のミミズ型ロボットに対して十分なアドバンテージを確保することができたと考えられる。



図 4.35: 空気を出している最中

第5章 まとめ

本章では、本研究におけるミミズ型レスキューロボットの開発の成果についてまとめ、問題点と今後の課題を述べる。

5.1 結論

本研究では、災害時の建造物内で被災者を発見することを目的とするミミズ型レスキューロボットの開発を行った。以下に本研究の内容をまとめる。

各レスキューロボットの必要性、利点、使用環境を示し、従来のミミズ型レスキューロボットの基本的な枠組みや問題点を示した。さらに本研究でのミミズ型ロボットの試作機を作ることによってさらに問題を提起し、提起された問題を解決するべく、オリジナルジャバラを考え、設計し、製作を行った。オリジナルジャバラや吸盤を用い、ミミズ型ロボットの各部位の応力を求め、設計し、製作を行った。製作したミミズ型ロボットの評価をするためにおこなった実験内容を以下に示す。

- 吸盤を使用することで急な坂を上る実験。
- 吸盤を使用することのできない絨毯や凹凸のある場所での走行実験。
- ジャバラの柔軟性を活かして、狭いカーブを曲がる実験。
- 吸盤へつながるホースから新鮮な空気を送る排気実験。

実験結果から本研究での成果を以下に示す。

- 吸着動作によって約 70 度の斜面を登ることが可能となった。
- 凹凸のある床では 3mm 程度は引っかかりながらも動作することが出来た。
- オリジナルジャバラの柔軟性を活かすことで受動的に約 45 度のカーブを曲れた。
- オリジナルジャバラにより剛性を維持し、柔軟性を持った軽量化が可能となった。
- オリジナルジャバラのエアークチュエータとして使用例を示すことが出来た。

以上によって、本研究のミミズ型レスキューロボットの実現可能性を示した。

5.2 今後の課題

今後解決すべき課題を以下にまとめる。

- ロボット加工精度の問題

今回製作したロボットは手作りでおかつ自分自身が素人であったためジャバラからの空気洩れ、ネジ止めしている部分やジャバラと吸盤の接合点の遊びなどの問題があった。その結果坂が急になるとジャバラの吸引に時間がかかったり、吸盤がうまく吸着出来ないなどの問題が起こった。今後これらの問題を解決するためには素人が作るのではなく、メーカーに依頼することで加工精度の問題を解決することが必要であると考えます。

- ホースの引き回しの問題

本研究の目標として「出来るだけ軽く作る」という目標があった。そのため、動力部をロボット本体に搭載せず、ホースを使うことで動力を伝えるという方法を取った。そのため、ロボットからは多数のホースが出るという格好となった。しかし、ホースが重量や硬さなどが影響しロボットの移動の妨げになったのは事実である。これらのことから、多少の重量を増加させても、動力部をロボット本体に搭載したほうが移動に対して影響を少なくすることが出来ると思う。そのためにはバルブやコンプレッサの小型化が望まれる。また、ビデオカメラやマイク等の実装を考慮する必要がある。

- コントロールの問題

今回ロボットのコントロールを手動で行ったが、坂道を登るときなど吸着動作を行う場合コントロールが複雑になってしまい操縦者に負担がかかった。今後はさらなるコントロール実験を行い、より人間にとって扱いやすい良いコントロール方法を模索し、オートメーション化することで、操作者の負担を減らすことが必要である。

謝辞

本研究にあたり、ご指導、ご鞭撻をいただきました北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 丁洛榮助教授（独立行政法人産業技術総合研究所知識機能システム部門主任研究員）に深く御礼申し上げます。

最後に、日々のさまざまな面でアドバイスを下さった丁研究室の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 西山貴史, 後藤肇, 大坪義一, 山本昌彦, 小林滋, 高森年:“ 蛇型レスキューロボット (UMRS-V-SNK) の開発“ , 日本機会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2003)
- [2] 青木岳史, 大野英隆, 広瀬茂男:“ スライムロボットの研究“ , 日本ロボット学会学術講演会 (1037)(2001)
- [3] 北島寛, 大須賀公一:“ 4面クローラ機構を有するガレキ内探索レスキューロボット MOIRA 日本機会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2003)
- [4] 青木岳史, 広瀬茂男:“ スライムロボットの研究 - Bridle Bellows の試作と特性実験 “ 日本機会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2003)
- [5] 大野英隆, 広瀬茂男:“ スライムロボットの研究 - スリムスライムロボットの試作と 3D 歩容による走行実験“ ロボティクスメカトロニクス講演会 (2001)
- [6] 青木岳史, 大野英隆, 広瀬茂男:“ スライムロボットの研究 - Bridle Bellows の実現と歩容の検討“ ロボティクスメカトロニクス講演会 2002
- [7] 高山俊男, 広瀬茂男, 新井雅之:“ 瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍 III 号機」の開発“ 日本機会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2003)
- [8] Kan YONEDA, Yusuke OTA, Fumitoshi ITO and Shigeo Hirose: Construction of a Quadruped with Reduced Degrees of Freedom, Proc. of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000), pp.28-33 (2000)
- [9] Kan YONEDA, Yusuke OTA, Fumitoshi ITO and Shigeo HIROSE: Quadruped Walking Robot with Reduced Degrees of Freedom, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.13, No.2, pp.190-197(2001)
- [10] Shigeo Hirose, Akihiko Nagakubo, Ryosei Toyama; Machine that can Walk and Climb on Floors, Walls and Ceilings, Proc. 5th Int. Cof. Advanced Robotics, Pisa, Italy,, , pp.753-758 (1991)

- [11] Akihiko Nagakubo, Shigeo Hirose; Wall Gait: A Standard Gait for the Quadruped Wall-Climbing Robot, Proc. '93 Int. Conf. on Advanced Robotics, , pp.547-552 (1993)
- [12] 芦屋市消防本部 : <http://www.city.ashiya.hyogo.jp/shoubou/index.html>
- [13] 株式会社テムザック, 京都大学大学院 工学研究科 助教授 横小路泰義, 九州工業大学工学部 機械知能工学科 助教授 大屋勝敬, 助教授 黒木秀一, 助教授 相良慎一 : <http://www.enryu.jp/>