

|                     |                                                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>        | 膜面構造インフレーターブルフレームを有する変形ロボットの開発                                                  |
| <b>Author(s)</b>    | 前田, 裕司                                                                          |
| <b>Citation</b>     |                                                                                 |
| <b>Issue Date</b>   | 2005-06                                                                         |
| <b>Type</b>         | Thesis or Dissertation                                                          |
| <b>Text version</b> | author                                                                          |
| <b>URL</b>          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/1980">http://hdl.handle.net/10119/1980</a> |
| <b>Rights</b>       |                                                                                 |
| <b>Description</b>  | Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士                                                   |

修 士 論 文

# 膜面構造インフレータブルフレームを有する変形 ロボットの開発

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

前田 裕司

2005 年 6 月

修 士 論 文

# 膜面構造インフレータブルフレームを有する変形 ロボットの開発

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

310100 前田 裕司

提出年月: 2005 年 5 月

## 概要

昨今、新潟県中越地震やイラン地震、スマトラ島沖地震による津波災害など、被災者が数十万人にも上る自然災害が頻発している。また2001年には、アメリカ合衆国における9・11同時多発テロ事件という人為的な都市型災害がもたらされた。そして今後30年以内には、日本の東京から西日本にかけての太平洋海岸広域に対して、南海地震、東南海地震がマグニチュード7～8の規模で発生する確率は40～50%と言われており、その場合の予測死亡者は7400名であるとされている。発生時刻によっては、予測値がこの数倍に膨れ上がる可能性もあり、そういった都市型災害に対する防災・人命救助システムの確立が切望されている。

本研究ではそれら災害に対して開発されているレスキューロボットについて研究を行った。レスキューロボットによる救助活動を行う際には、被災地に多くのロボットを輸送する必要があるため、決められた容積内により多くのロボットを収納して被災地へ輸送する技術が必要となる。そこで、本研究では移動ロボットへのインフレータブル構造物の適用について検討した。インフレータブル構造物とは、風船のように膜面内に空気等のガスを充填することによって膨張展開し、機能する展開構造物の一種で、展開前の体積が展開後の体積に比べて非常に小さく、伸縮率が非常に高いという特徴がある。このインフレータブル構造物を移動ロボットのフレームに適用することにより、展開前の移動ロボットの収納容積を大幅に削減することが可能となり、ロボットの収納効率を向上させることができる。これにより、収縮状態のレスキューロボットを被災地へ大量輸送し、被災地にてフレームを膨張展開することにより、ロボットとして稼動するというシステムが実現可能となる。また本研究は家庭内ロボットのように狭い空間内で使用が想定される場合の収納容積の削減へも適用することができる。

本稿では、従来のインフレータブル構造物では実現不可能であった、展開前形状への復元が可能なインフレータブルアクチュエータ (FSB:Film Surfaced Bellows, 以下FSB) を同研究室の原坂と共同開発し、製作および移動ロボットへ適用することによって、全長1000[mm]から770[mm]へと収納容積を削減し、展開後に移動ロボットとして稼動するシステムを実現したことを示した。

また、移動ロボットをレスキューロボットとして使用することを想定した場合、瓦礫などを乗り越えて移動するための悪路走破システムが必要である。そこで本稿では、この収縮可能なインフレータブル構造物であるFSBの特徴を生かして、シャーシ下に収縮状態で配置された空圧ジャッキ部と、ロボットの重心位置を前後にスライドさせることができる伸展レール部を組み合わせることによって、FSBと重心移動を利用した障害物乗り越え機構を提案した。本稿では、FSBを適用した空圧ジャッキと伸展レールを利用した障害物乗り越え機構を移動ロボットへと実装し、障害物乗り越え実験を行うことにより、高さ170[mm]の障害物を10分で乗り越えられることを示した。そして本障害物乗り越え機構による障害物乗り越え時間の短縮手法と、本機構の有効性および実現可能性を示した。



# 目次

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>第1章 序論</b>                    | <b>1</b>  |
| 1.1 背景                           | 1         |
| 1.2 レスキュー工学研究について                | 1         |
| 1.3 本研究が目指すレスキュープロジェクト           | 3         |
| 1.4 障害物乗り越え機構を有するインフレータブルロボットの開発 | 5         |
| <b>第2章 レスキューロボット</b>             | <b>10</b> |
| 2.1 レスキューロボットの種類                 | 10        |
| 2.1.1 探索支援型ロボット                  | 10        |
| 2.1.2 障害物除去支援型ロボット               | 11        |
| 2.1.3 情報収集型ロボット                  | 13        |
| 2.2 レスキューロボットの移動機構               | 13        |
| 2.2.1 地上および瓦礫下における移動機構           | 14        |
| 2.2.2 空中における移動機構                 | 16        |
| 2.2.3 その他の移動機構                   | 17        |
| <b>第3章 展開構造物</b>                 | <b>25</b> |
| 3.1 展開構造物の特徴                     | 25        |
| 3.2 機械式展開構造物                     | 27        |
| 3.3 インフレータブル構造物                  | 28        |
| 3.4 本研究室にて開発したインフレータブル構造物        | 28        |
| <b>第4章 障害物乗り越え機構</b>             | <b>38</b> |
| 4.1 従来の障害物乗り越え機構                 | 38        |
| 4.2 重心位置の移動を利用した障害物乗り越え機構        | 39        |
| <b>第5章 実験</b>                    | <b>43</b> |
| 5.1 開発した移動ロボットの構成                | 43        |
| 5.1.1 ジャッキ部                      | 45        |
| 5.1.2 レール部                       | 45        |
| 5.1.3 空気圧回路                      | 48        |

|              |                                                   |           |
|--------------|---------------------------------------------------|-----------|
| 5.2          | 収納効率実験結果 . . . . .                                | 52        |
| 5.3          | 障害物乗り越え実験 . . . . .                               | 56        |
| <b>第 6 章</b> | <b>考察</b>                                         | <b>62</b> |
| 6.1          | エアジャッキ . . . . .                                  | 62        |
| 6.2          | 収納効率向上実験結果 . . . . .                              | 62        |
| 6.3          | 障害物乗り越え実験結果 . . . . .                             | 63        |
| 6.3.1        | FSB の空気密閉精度による出力低下および操縦性悪化によるタイムロス . . . . .      | 63        |
| 6.3.2        | ロボット部材の剛性不足によるエネルギーロスに起因した操縦性悪化によるタイムロス . . . . . | 64        |
| 6.3.3        | FSB とコンプレッサ送吸気能力のバランスによって増減する展開時間                 | 65        |
| 6.4          | 本障害物乗り越え機構 . . . . .                              | 66        |
| <b>第 7 章</b> | <b>結論</b>                                         | <b>69</b> |
| <b>第 8 章</b> | <b>今後の展望</b>                                      | <b>70</b> |
| <b>参考文献</b>  |                                                   | <b>71</b> |

# 第1章 序論

## 1.1 背景

昨今、新潟県中越地震やイラン地震、スマトラ島沖地震による津波災害など、被災者が数十万人にも上る自然災害が頻発している。また2001年には、アメリカ合衆国における9・11同時多発テロ事件という人為的な都市型災害がもたらされた。そして今後30年以内には、日本の東京から西日本にかけての太平洋海岸広域に対して、南海地震、東南海地震がマグニチュード7～8の規模で発生する確率は40～50%と言われており、その場合の予測死亡者は7400名であるとされている。発生時刻によっては、予測値がこの数倍に膨れ上がる可能性もあり、そういった都市型災害に対する防災・人命救助システムの確立が切望されている。

日本では阪神淡路大震災を機に、それら都市型大災害に対する人命救助システムについて着目し始め、現在は特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構 (IRS:International Rescue System Institute, 2002年4月発足) を中心として人命救助システムに関する研究がなされている [1], [2]。これらの研究で最も期待されているものに、「ロボットを利用した人命救助システム」がある [3]。これは、9・11同時多発テロ事件において (図1.1), アメリカのロボット研究者達が、レスキュー隊とともにチームを編成して移動ロボット (図1.2) による人命探査活動を行い、複数の遺体をガレキ下等から発見したという成果事例を発端としている [4]。この事例は、生存者こそ発見できなかったが、実際のレスキュー現場において初めて公式にロボットが採用され、人間とロボットが協調した救助活動の有用性を世界的に知らしめる出来事となった。その後、日本国内においても急速にレスキューロボットに関する研究が始まり、2002年には、文部科学省都市再生プロジェクト「大都市大震災軽減化特別プロジェクト (通称：大大特プロジェクト)」の一部として、空中移動グループ、環境モデリング・グループ、移動機構グループ、情報収集グループ、センシンググループ、ヒューマン・インターフェース・グループという6つのグループに分かれて、ロボットやその関連技術を活用することによる災害対応技術についての開発がなされている。

## 1.2 レスキュー工学研究について

阪神淡路大震災から10年を経た現在でも続けざまに都市型大災害が発生している [5]。これらに対して2005年4月末に発生したJR福知山線事故では、阪神淡路大震災のとき



(a) 炎上する WTC



(b) パンケーキ崩壊後の WTC 付近

図 1.1: 頻発する都市型大災害：9・11 同時多発テロ事件 (WTC：World Trade Center)

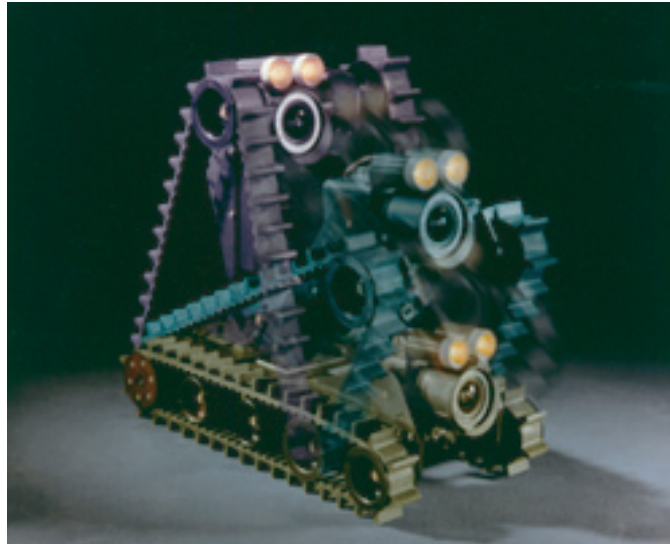


図 1.2: 9・11 同時多発テロ事件の際に人命探査に使用されたロボット：Inuktun 社製 micro-VGTV

の教訓を生かし、緊急時の医療システムについて少しずつ成果が見え始めている。それに対し、現段階におけるロボットによるレスキューシステムの成果は依然目立った形で挙げられていない。図 1.3 に示すように大災害はいつか来るという概念のものではなく、毎年発生していることがわかる。IRS が提唱するように、これらに対してレスキュー工学の研究とは少しずつでも成果を挙げていけるものでなければならない。これは、あるときを境に急に使えるようになるロボットというものは到底作りえないためである。本研究では、この概念を目指すべく移動ロボットを製作した。

### 1.3 本研究が目指すレスキュープロジェクト

前節のような情勢のなか、本研究では移動ロボットへのインフレータブル構造物の適用について検討した。インフレータブル構造物とは、風船のように膜面内に空気等のガスを充填することによって膨張展開し、機能する展開構造物の一種で、展開前の体積が展開後の体積に比べて非常に小さく、伸縮率が非常に高いことが特徴である。このインフレータブル構造物を移動ロボットのフレームに適用すれば、その高い伸縮率により、伸縮自在なロボットのフレームを実現することができる。このことにより、展開前の移動ロボットの収納容積を大幅に削減することが可能となり、ロボットの収納効率を向上させることができる。これはレスキューロボットのように被災地に多くのロボットを輸送する必要がある場合に、決められた容積内により多くのロボットを収納して被災地へ輸送し、被災地でフレームを膨張展開することにより、ロボットとして稼働&探索活動を開始するというシステムが実現可能となることを意味する。

救急時におけるレスキュー活動には大きく分けて 5 つの工程があり、「被災地の情報収集」、「被災者の探索」、「被災者の救助及び確保」、「被災者の搬送及び救護」に分けられる。

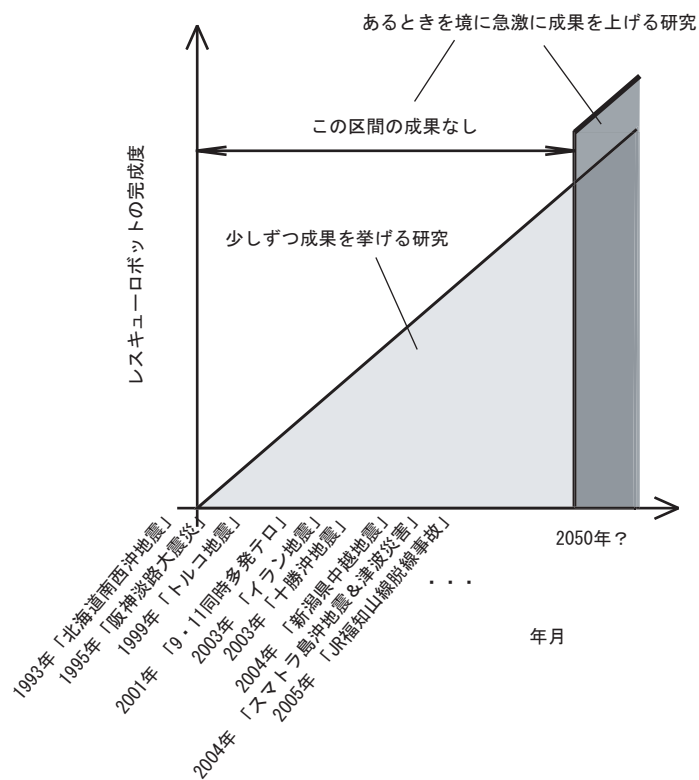


図 1.3: レスキュー工学研究の進むべき道

本研究が目指すレスキュープロジェクトとは、以上の工程における被災者の探索に関して提案するものであり、具体的には図 1.4～1.5 に示したレスキューロボットの搬送から被災者発見までの 5 段階に分けたロボットによる探索支援計画を提案する。まず第一段階においてヘリコプターのようなもので交通網の麻痺した被災地へとレスキューロボットを搬送する。このときにロボットにはインフレーターブル構造物が適用されているため、従来のレスキューロボットのサイズに較べて収納効率が高く、一度に大量のレスキューロボットを搬送することが出来る。次に第二段階において被災地でレスキューロボットを膨張展開させ、障害物乗り越え可能なレスキューロボットを被災地にいる人々が獲得する。第三段階に障害物乗り越え機構を用いて障害物を乗り越えて、被災者のいる可能性がある場所へロボットを移動させる。そして第四段階において障害物乗り越え機構を有する移動親ロボットから子ロボットを膨張展開させ、一斉に周辺の探索活動を開始する。そして最終ステップにおいて被災者を発見するという流れである。これらを実現するためには実に多くの問題を解決しなければならないが、その中でも特に重要度の高い、伸縮率の高いインフレーターブルロボットという点と、障害物乗り越え機構について目標をしぼり、本研究を行った。図 1.6, 図 1.7 に膨張展開機能を有するロボットのシステム構成とデータフローを示す。

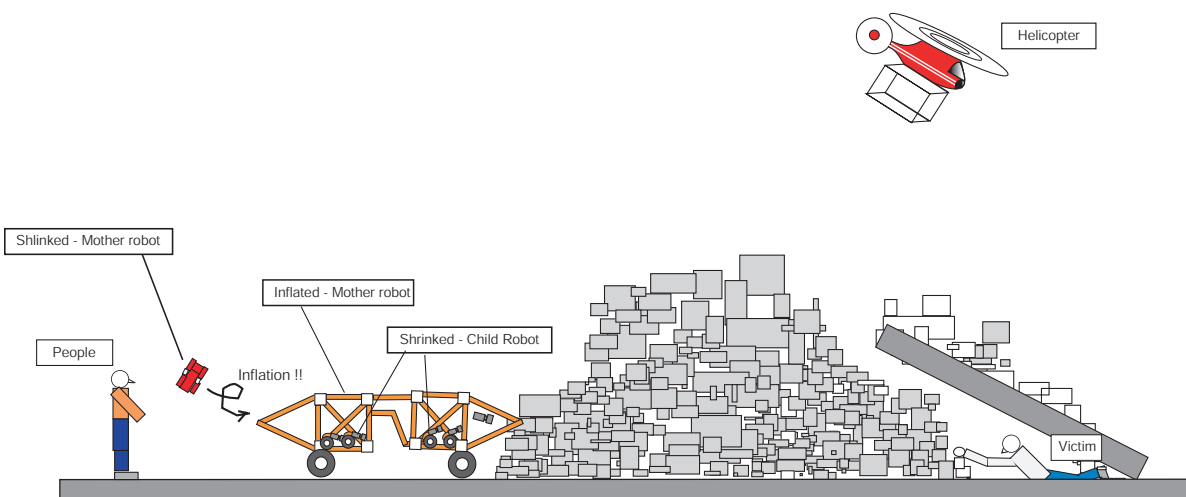
## 1.4 障害物乗り越え機構を有するインフレーターブルロボットの開発

前節の被災者探索支援プロジェクトを実現するため、本稿ではインフレーターブル構造物を適用した伸縮可能な移動ロボットと、障害物乗り越え機構を有する移動ロボットについての研究を行った。本研究では従来のインフレーターブル構造物では実現不可能であった、展開前形状への復元が可能なインフレーターブルアクチュエータ (FSB: Film Surfaced Bellows, 以下 FSB) を同研究室の原坂と共同開発、製作および移動ロボットへ適用することによって、全長 1000 [mm] から 770 [mm] へと伸縮可能な移動ロボットを実現したことを収納効率向上実験から示した。本稿ではレスキューロボットに関する最近の研究を第 2 章で紹介し、展開構造物の紹介および FSB についての説明を第 3 章で述べる。そして収納効率向上実験結果を第 5 章第 5.2 節で示し、考察を第 6 章第 6.2 節において述べる。

また本稿では、この収縮可能なインフレーターブル構造物である FSB の特徴を生かして、シャーシ下に収縮した状態で配置されたジャッキ部と、ロボットの重心位置が前後にスライドする伸展レール部を組み合わせることによって実現可能となる障害物乗り越え機構を提案する。本障害物乗り越え機構は、移動ロボット自身が空気によって膨張展開する FSB を有することから、同様に空圧を障害物乗り越え機構にも利用することにより、シャーシ下に空圧ジャッキを有する移動ロボットを実現する。この空圧ジャッキは、FSB を適用することによって従来の送りねじや油空圧シリンダによる展開に比べて大きな収縮率を実現する。本稿では、FSB を適用した空圧ジャッキと伸展レールを利用した障害物乗り越え機構を移動ロボットへと実装し、障害物乗り越え実験を行うことにより、高さ 170 [mm]



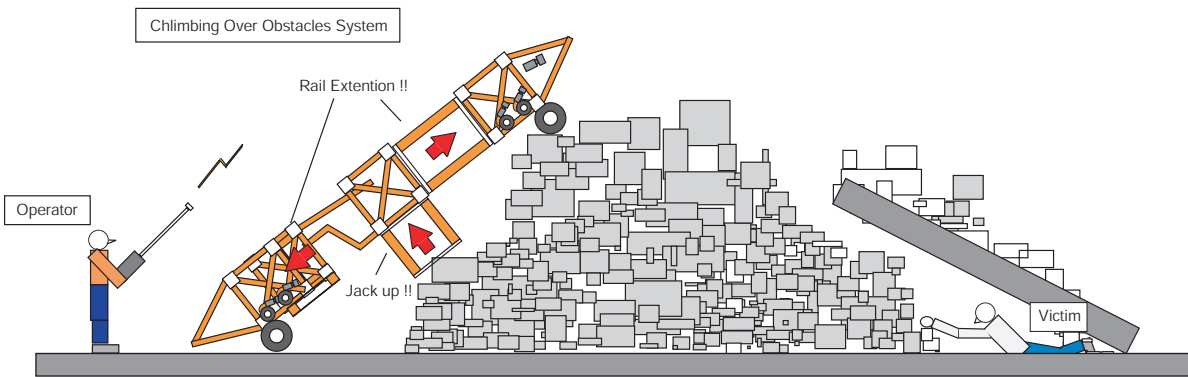
(a) Step 1: 被災地へ収縮状態のレスキューロボットを搬送



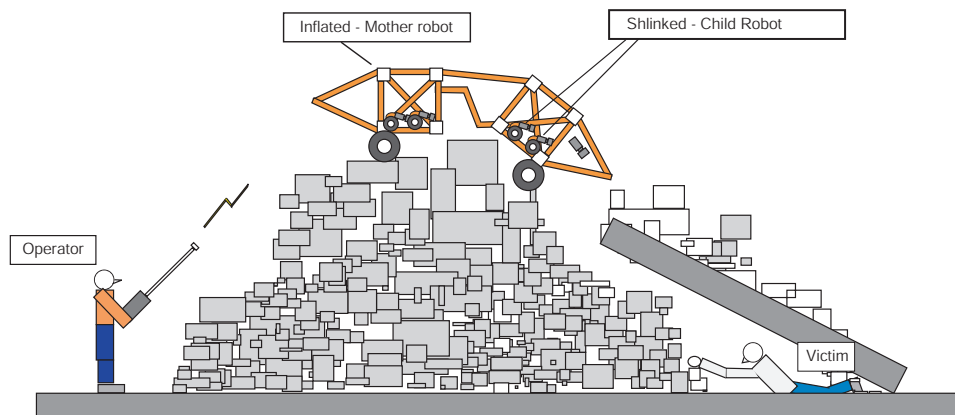
(b) Step 2: レスキューロボットを膨張展開！

図 1.4: 本研究のレスキュープロジェクト： 1～2 / 5

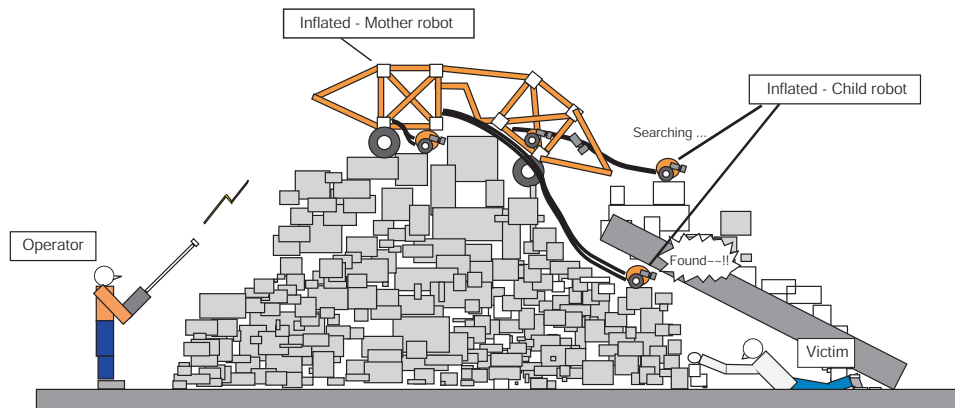




(a) Step 3 : 障害物乗り越え機構を使い、瓦礫を登る



(b) Step 4 : 子供ロボットを膨張展開 & 探索開始！



(c) Step 5 : 瓦礫下の被災者を発見！

図 1.5: 本研究のレスキュープロジェクト： 3～5 / 5

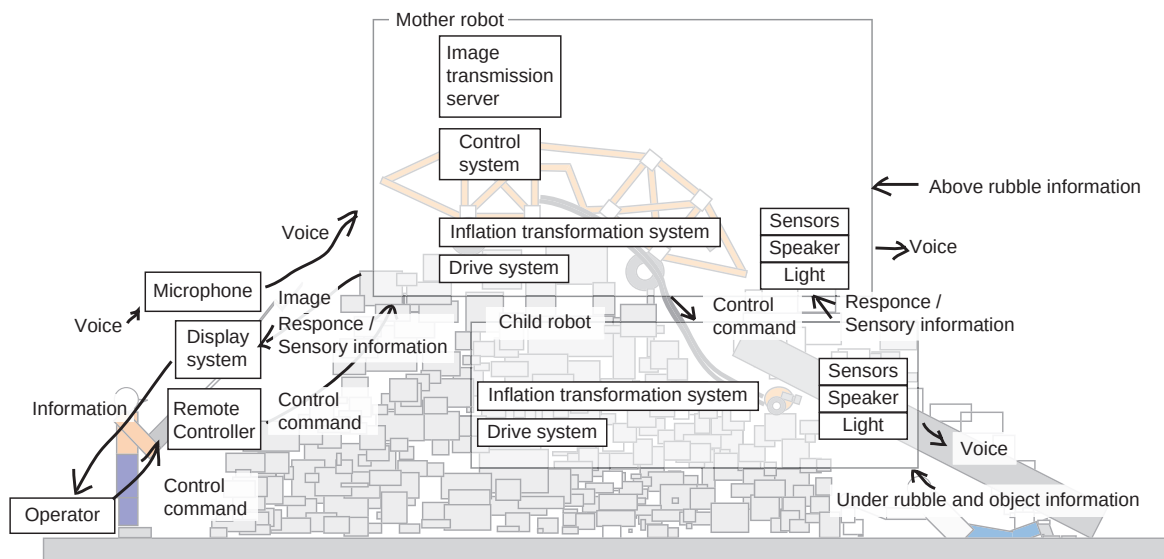


図 1.6: 本研究のレスキュープロジェクト：システム構成

の障害物を乗り越えられることを示した. 本障害物乗り越え機構を第 4 章において提案し, 障害物乗り越え実験結果を第 5 章 5.3 節において示し, その考察を第 6 章 6.3 節において述べる.

本稿は以上のような構成で, 移動ロボットへのインフレータブル構造物の適用に関する有効性と実現可能性を示す.

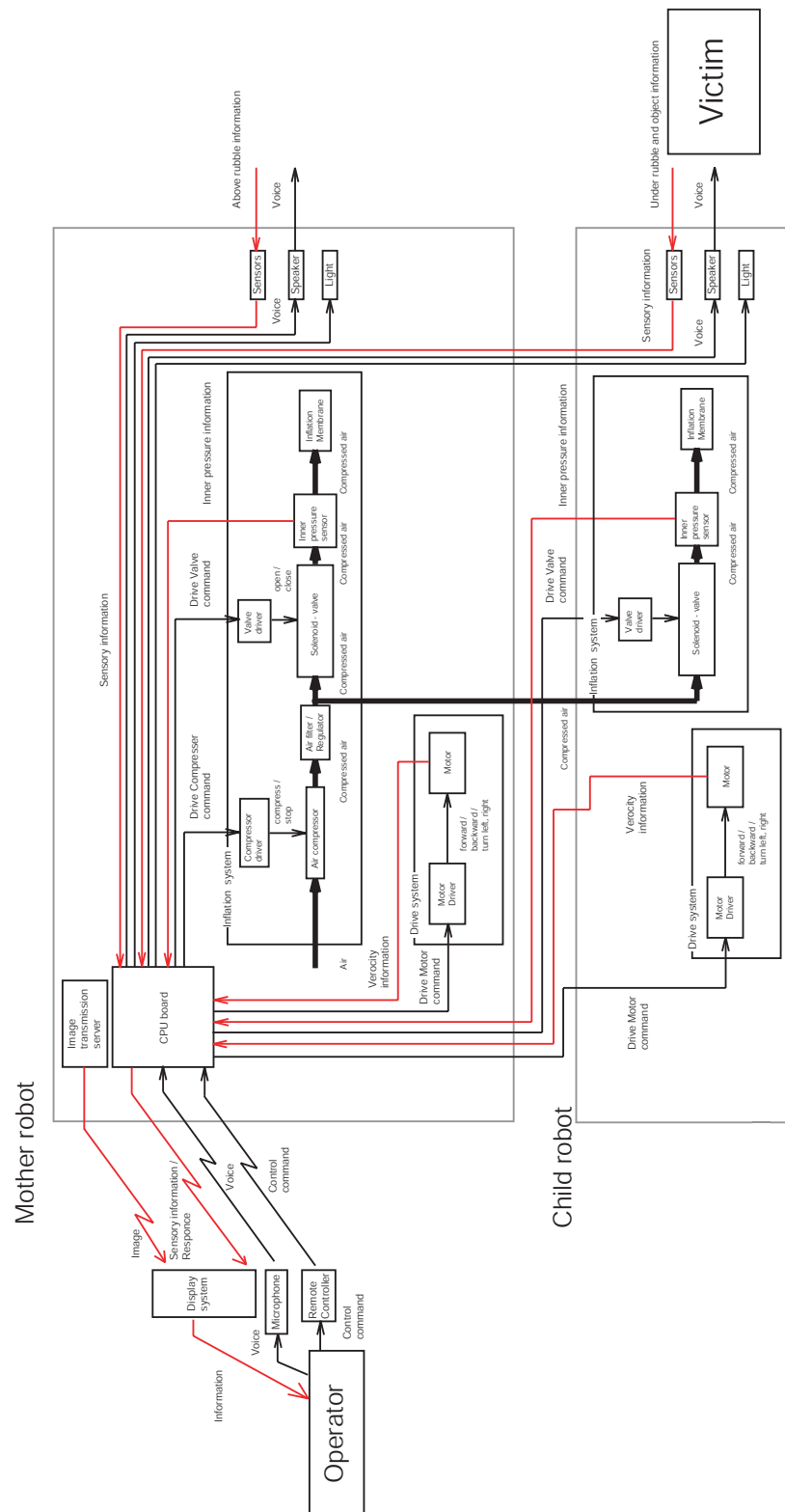


図 1.7: 本研究のレスキュープロジェクト：データフロー

## 第2章 レスキューロボット

本章では、都市型大災害が発生した際に今後の救助システムの要となる「人間とロボットの協調による救助システム」に向けて研究されているレスキューロボットについて紹介する。

### 2.1 レスキューロボットの種類

レスキューロボットには大きく分類すると3種類の仕事がある。それは、「探索支援」と「障害物除去支援」、そして「情報収集」である。これらの仕事を全て実現するロボットを製作することは、製造コストもメンテナンスコストも高価になってしまい、社会に普及させることを考えた場合、現実的ではない。そこで、現在は各仕事に特化したロボットが多く研究されている。また社会にレスキューロボットを普及させるという目的で、救命活動以外にシロアリ駆除の床下点検用途や配管点検といった機能を持たせるレスキューロボットや、一般家庭の庭先にある散水ホースや物干し竿を改良したレスキュー機器についての研究もされている。以下では、レスキューロボットの各仕事についてとその目的の下に開発されているレスキューロボットについて紹介する [6][7][8]。

#### 2.1.1 探索支援型ロボット

探索支援ロボットに与えられる仕事は、瓦礫の下や崩壊しつつある建築物内といった人や救助犬が容易に入り込めない場所にいる要救助者を発見することである。特に崩壊しつつある建築物内に進入して救助活動を行っている際に、天井の崩落等によって犠牲者を増やすことを二次災害と言い、二次災害は被災者だけでなく救助者にとっても最大の脅威となる。これは9・11同時多発テロ事件によって失われた犠牲者2000人以上のうちの200人が人命救助のためにWTCエリアに踏み込んだ消防士たちであることから明らかである。探索支援型ロボットはこれら二次災害を防止し、要救助者が存在していないことがわかるだけでも確認できれば良いということから、最も現場にとって必要とされているロボットである。これら探索支援ロボットは主に瓦礫等の人間が踏めば崩れそうな、または狭くすぎて入り込めない等という非常にデリケートな足場上を移動することが想定されており、そのためには人間よりも重量が軽いことを要求されたり、狭い空間にセンサを通して人間がいる情報を収集できる事が望まれる。そのような状況では自ずとセンサの数

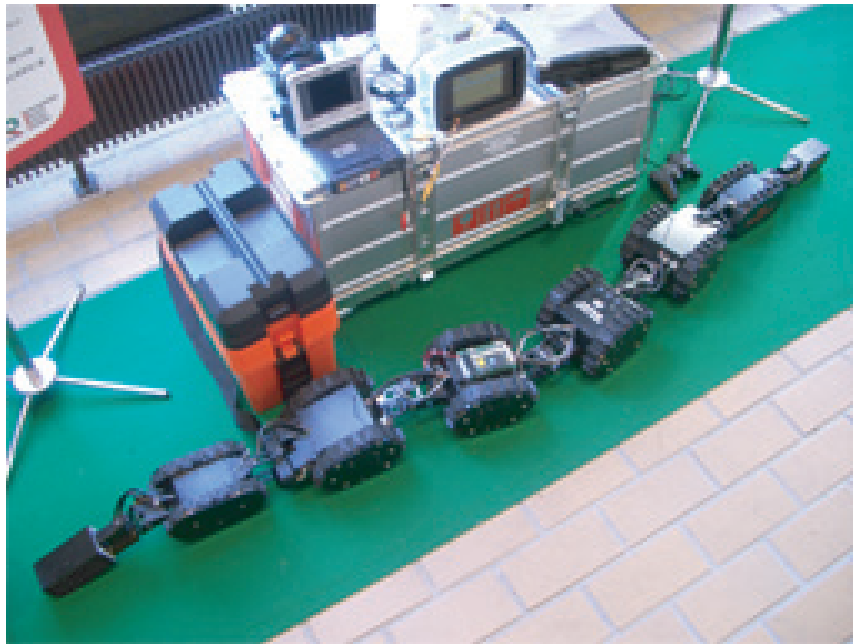
や機能は制限され、一つの活動について特化したロボットが有望である。主に瓦礫上での移動に関してはあらゆる体勢を可能とするヘビ型移動機構や、容易な操縦性と高い悪路走破性を有するクローラ型などの移動機構が採用されている。図 2.1 に探索支援型ロボットの例として、電気通信大学の松野研究室が開発した KOHGA と呼ばれるヘビ型移動ロボットと、MA-1 と呼ばれるクローラ型移動ロボットを示す。この MA-1 は、ケースにコントロールユニットと共にパッケージングすることまで考えられており、このケースを被災地へ持って行くことで、被災地での救助活動を可能とするというコンセプトのもと設計されている。

また、探索支援型ロボットには被災時に新たに開発されたセンサユニットを採用しての探索活動も頻繁に行われるため、なるべくそれらを装備して使用できるようなアタッチメントを有することが探索支援型ロボットには求められている。また狭いポイントや電波の届かなくなるポイントでの探索活動となることもしばしば多く、無線操縦よりも敢えて有線操縦が求められることが多いということが探索支援型ロボットの特徴である。

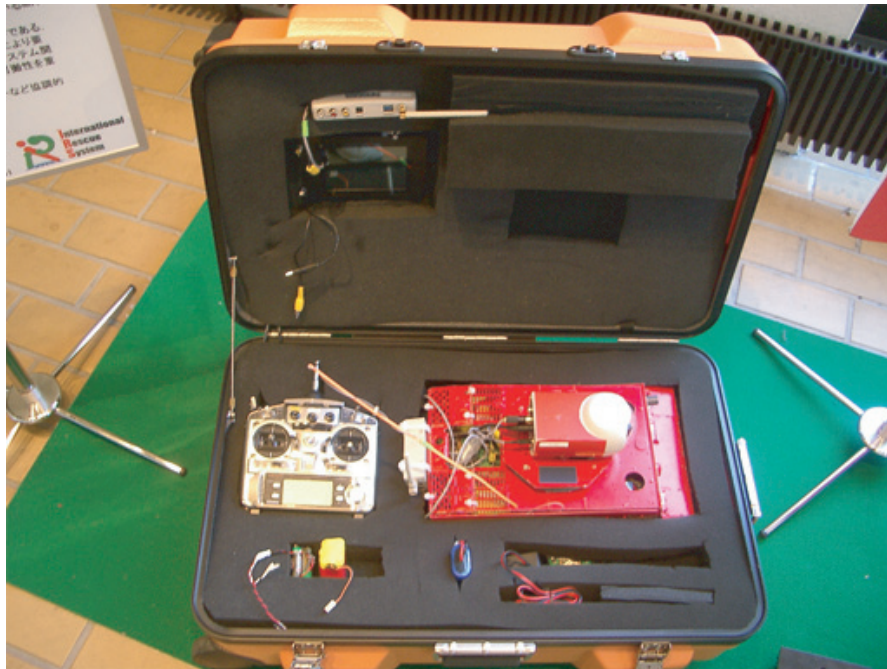
本研究では、この探索支援型ロボットを開発した。

### 2.1.2 障害物除去支援型ロボット

障害物除去支援ロボットに与えられた仕事は、発見した要救助者や、または被災者が存在するであろうと思われる地点までの経路を確保するための障害物を除去することである。これらの障害物は、主に瓦礫やコンクリートブロック等、重量物が主な対象であり、それらを除去支援するロボットはパワーショベルのような大型重機が多い。これら大型障害物除去支援型ロボットは、これまで建築機械として用いてきた重機に改造を施し、比較の実用レベルに達しているものが多い。だが実際はそのロボットを被災地へと迅速に搬送する技術にはいまだ確立されておらず、実際の現場で利用され成果を挙げたという話はまだない。特に阪神淡路大震災や 9・11 同時多発テロの際もそうであったが、道路上が瓦礫で封鎖され、瓦礫下に要救助者がいる可能性がある場合、これら大型救助ロボットは被災地への侵入さえ許可されない。これら障害物除去支援型ロボットが真価を発揮するためには、要救助者の位置同定ができないとしても、瓦礫下に人間が確実にいないということがわかる情報収集技術が必要不可欠である。現在は重機のような大型除去支援ロボットのほかに、圧縮空気を地面に噴出して土砂を噴き分け、地面に穴をアクティブに空けていく技術が研究されている。図 2.2 に (株) テムザックが開発した障害物除去支援型ロボット援竜 T-52 を示す。このロボットは油圧駆動のマスタースレーブ方式による双腕マニピュレータで障害物除去を行うロボットで、水冷三気筒直噴式エンジンで稼動し、エンジンによって同時に発電を行うため燃料がなくなるまで稼動可能である。また夜間における救助活動も想定されており、ズーム機能付暗視カメラも搭載している。操縦は乗用操縦または遠隔操縦が可能であり、車両を掴んで移動させることも出来る総重量 5 [t] の超重量級レスキューロボットである。援竜は消防訓練にも使用され、すぐにでも実用可能なレスキューロボットとして注目を集めている [9][10]。



(a) KOHGA



(b) MA-1

図 2.1: 探索支援型ロボット：電気通信大学 松野研究室

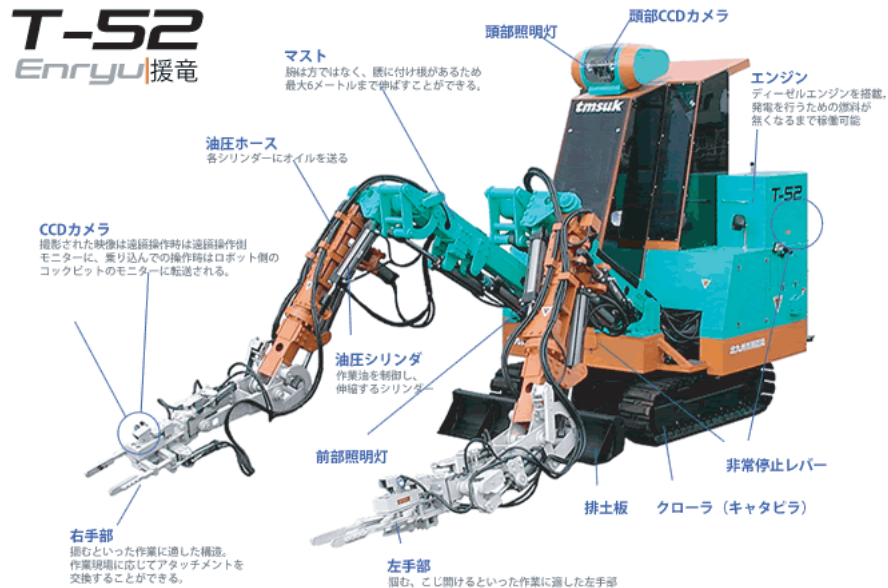


図 2.2: 障害物除去支援型ロボット：援竜 T-52 (株) テムザック

### 2.1.3 情報収集型ロボット

情報収集型ロボットの仕事は、やはり情報を収集することが仕事である。だが具体的には被災者がどこにいるかという情報よりも、道路交通網の情報や建築物の倒壊状況、避難者数や工場等からの危険物質流出など、救助システム全体が行動計画を立てるために必要であるものが多く、情報収集のスピードこそが、救助活動を如何に素早く有効に展開し、成功を収めるかを決定づける鍵である。そのため被災時にもっとも早急に広範囲の被災地情報を収集できると言われているヘリコプター型の情報収集支援型ロボットがこれらの役割を担っている。このヘリコプター型ロボットは、火山の噴火活動等の調査にも用いられており(図2.9)、被災時以外にも用途が多いことから既に実用レベルに達している[11][12]。また筑波大学の野波研究室ではヘリコプター上方から瓦礫等の障害物が降ってきた際に回避するアクロバット飛行制御についての研究もしている。また、被災してから長期的または詳細な情報収集に当たるために気球型ロボットとRF-ID タグを利用してネットワークを形成する研究や Info-Balloon と呼ばれる風船に信号機の機能や情報処理機能を与え、学校や市役所等に配置しておき被災時にはそれらを浮かべることによって、移動することなく情報収集中継地点としての役割を果たすロボットについての研究もされている。

## 2.2 レスキューロボットの移動機構

前節ではレスキューロボットに与えられる大まかな仕事3種類について述べたが、各仕事それぞれには仕事の種類を細分化していかない限り、最適であるという移動機構は決定づけられてはいない。本節ではそれらレスキューロボットに採用されている多様な移動機構について紹介する。



### 2.2.1 地上および瓦礫下における移動機構

レスキューロボットにおいて、地上及び瓦礫内を移動する機構は最も被災者探索に重要とされているものである。それは、自力で脱出することが出来ずに生存している被災者は、瓦礫下に出来た空間に存在することが大変多いからである。だがしかし、そういう被災地はあまりにアンバランスな瓦礫状況である場合が多く、容易に救助隊も入り込めないことが多い。このような場合、安全を確保しながら少しずつ要救助者に近づいていくことになる、入り込めないような場所については瓦礫を切断するなどして経路を確保する必要もある。これまでの人命探索活動に多く用いられていたものに棒カメと呼ばれる棒の先端にカメラがついたものやファイバースコープが用いられてきたが、それらは2[m]ほどの深さまでしか進入できない、または複雑な経路に合わせて変形することが出来ないなど多くの問題があり、より深部まで観測可能な機器を現場は必要としている。これらの機器を有効に使用するためにも瓦礫上、または瓦礫下を、瓦礫にダメージを与えず、それでいてスピーディに複雑な経路に対応できて進行できる機構が求められている。そのような要望に対してクローラ型、車輪型、ヘビ型、脚型など多種多様な移動機構が存在しているが、どのような環境に対しても有効であるという移動機構は存在しておらずより有効であると考えられる方法を模索している最中である。また転倒するという概念も存在するためそれらの影響を無くすための復帰機能等も求められる。ここでは、昨今開発されているレスキューロボットを例にいくつか代表的な移動機構を紹介する。

#### クローラ型移動機構

クローラ型移動機構は、昔から戦車などにも用いられ、悪路走破性が高く、操作も容易であると言われている移動機構である。ベルトやキャタピラを使用するため設置面積が広く、車輪型よりもスタックしにくいという特徴がある。また、悪路上での移動速度も高速である。だが移動中にクローラに異物が詰まったり、ベルトが外れてしまうと、著しく走行制御が困難になり、それだけで走行不能にもなるという欠点がある。図 2.3 に神戸大学の高森・田所研究室の UMRS シリーズを紹介する。この UMRS はクローラで駆動し、UMRS-M1 は上下に駆動可能なクローラアームを用いて障害物の走破を行い、上部に設置されたエスパーアンテナを用いて人命探査活動を行うロボットである。また、UMRS-M2 はロボット本体とほぼ同等程度の谷間をおもりを用いたロボットの重心位置移動を利用して走破を可能とするロボットで、通常の重心位置の移動しないロボットでは谷間の半分まで行かないうちにバランスを崩して谷底に落下してしまうのだが、このロボットは絶えず足場上に重心を配置するようにおもりを移動させるスライド機構を有しているため、そのような谷間でも走破を可能とする [13][14],[15]。

本研究で開発した障害物移動機構にはこの重心移動の原理を利用して障害物移動を行っている。その際のおもりの役目はロボット重量に対して多くを占めているハイトルクなモータが果たしている。



## 車輪型移動機構

車輪型移動機構は、自動車などでなじみがある移動機構で主に4輪で移動する物が多い。車輪型移動機構はクローラ型に比べて設置面積が少ないため、スタックしやすく、悪路走破のためにはシャーシ下から地上までの最低地上高というものが重視され、この隙間が大きく、車輪径が大きいものほどスタックしにくく悪路走破性が高い。またこの機構は平地での移動速度が最も高速である。図2.4に岐阜高専で開発された車輪型移動ロボットBABY-IIを示す。このロボットは上下に駆動するアームを持ち、悪路走破性の向上のみならず、転倒時の自己復帰機能も有する(図2.5)。また、実装されている針金によるスケルトンホイールは、隙間に異物が入ると走行不可能となるが、瓦礫をしっかりと掴んで進行するため非常に悪路走破性の高い仕組みである[16]。また図2.6に示したレスキューロボットは東工大の広瀬・米田研究室において開発された玄武と呼ばれるレスキューロボットで、中心軸に水の入った重い散水ホースを有し、車輪内に配置された低速ハイトルクな水圧駆動モータによって移動する。主に火災現場へと進行してホース経路を確保することを目的として開発された消防用ロボットで、目視せずとも自動スタック検知機能を有する。

## 多足型移動機構

多足型移動機構は移動速度は車輪等を用いたときに較べて劣るとされるが、細かな障害物状況の反力を検知しながら、瓦礫が崩れないように走行可能であるという利点を有する。また精密な作業を行う上で足場を安定させやすいといわれている移動機構である。ただし、脚数が多くなると一般ユーザにとって操縦性が困難になるという問題があり、ユーザインターフェースの改良が操作性の鍵を握る。図2.7に大阪大学のリムメカニズムロボットASTERISKを示す。このロボットは6本の脚を有し、各足先にはセンサユニットが設置されている。基本は4本の脚で移動を行い、残りの2本の脚先に設置されたセンサユニットを用いて探索活動を行う。各脚はワイヤとウィンチで駆動し、どう研究室で開発されているマルチセンサユニットと連携して人命探査を行うことを目的としている。またこのロボットは天地対称構造となっているため、転倒するという概念がない。

## 蛇型移動機構

ヘビ型移動機構はサイナスリフティング運動と呼ばれる蛇が移動する際に生成する独特の曲線を描くことによって進行を可能とする移動機構で、進行方向への駆動用モータを持たずとも姿勢制御用モータで各関節に関節トルクをかけるタイミングを制御するだけで進行を可能とするロボットである。このロボットは関節数が多いため、瓦礫の複雑な形状に適応しやすいという利点を有するが、現状では関節一つに対してモータを配置することになるため、重量はかなりのものになってしまうという問題がある。この移動機構は蛇という自然界の移動法則を模したものであるため、特に狭いポイントへの進入や水上移動以外にも、蛇の行動にある体幹を巻きつけることによって樹を登ったり、枝から枝へ伝うこ

と等が可能となると考えられており、非常に興味深い移動機構である。図 2.8 に東工大広瀬・米田研究室の ACM-R3 と呼ばれる 3 次元方向にも体幹をくねらせることのできる蛇型ロボットを紹介する。このロボットは各関節ごとにモジュール化されており、各関節には 4 輪の車輪が 2 対で進行方向に対して垂直に平行に配置されている。これは蛇の鱗が進行方向に対して摩擦が発生しないのに対し、円周方向には滑りが発生しないことを車輪で実現するためである。この各車輪は受動的にしか駆動せず、各関節には姿勢制御用のモータしか配置されていない [17][18][19][20]。

## 2.2.2 空中における移動機構

### ヘリコプター型

ヘリコプター型移動機構は移動速度が速く高速情報収集に適している。しかし、ローターを傷つけると墜落の危険があり、またローターによる下方向への風圧は瓦礫に荷重を与えることが予想されるため、あまり低高度での探査目的での使用には向いていない。だがホバリングや情報収集、被災地への物資搬入など、交通網が麻痺していることが想定されている都市型大災害においては最も有効な移動機構といえるかもしれない。ただし、操縦は非常に困難であり、墜落による二次災害の併発も懸念されるため、指令が届かない高度に達した場合、自動で着陸するといったようなユーザインターフェース等を含めた制御手法の開発に神経を使う分野でもある。また多くは広範囲における早期の情報収集が大きな目的であるため、飛行経路を与えるだけでそれらの画像情報等を伝送する自立型無人飛行を目的として研究されている。図 2.9 に京都大学の中西研究室で開発されたエアロロボットを示す。このロボットは自律で飛行して静止画像及び動画像をベースポイントに伝送し、それらから飛行経路の三次元地図を生成するシステムを有するロボットである。

### 飛行船型

飛行船型はヘリコプター型に対して移動速度は遅く、地上から吹き上げてくる上昇気流や隙間を通る突風などに弱いという弱点を持つが、ヘリのローターのように下方向に吹き付ける圧力がかかることも無いため、瓦礫に触れることなく低空を移動することが可能である。また静穏性に優れているため人命探査における音声の聞き取りを邪魔する可能性も低く、空中からの地表面に現れている人命探査用移動機構として最適である。また建物内における地面にもダメージを与えることなく情報収集が出来るという利点を有し、大きな飛行船になれば長期にわたる低速高高度航行も可能となるため、地上から送られてきた情報を処理するエージェントとしての機能を与えることも可能である。このような仕事を割り与えられているのが図??に示す飛行船エージェントである [21]。

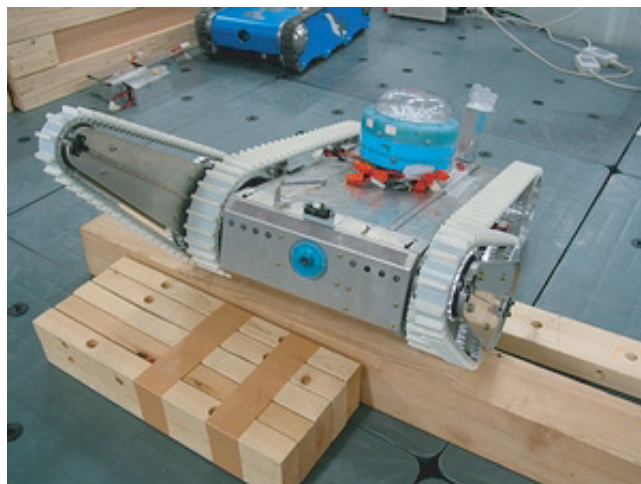
### 2.2.3 その他の移動機構

図 2.11 は神戸大学の高も利他どころ研究室で開発されたポータブルケーブルロボットである。このロボットはワイヤーを高さのある瓦礫上数箇所を設置し、そのワイヤーを手繰ることによってワイヤーの張り巡らされた空間上を移動することが出来るロボットである。しかし、ワイヤーの張り巡らせ型によって自由度が大きく変化することや、いかにワイヤーを張り巡らせるかなどの問題があり、今後が気になる研究である。図 2.12 に示したロボットは神戸大学の大須賀研究室が開発した MOIRA と呼ばれるヘビ型ロボットで、移動機構には多関節の各関節 4 面に進行方向に対して前後に駆動するクローラユニットを全面に張り巡らせた物を採用しており、関節内にある一つのモータの駆動力を 4 面に伝達するギアユニットを有しており、このクローラを用いて瓦礫下に潜り込み、情報収集することを目的として開発されている [22]。

図 2.13 に示したロボットは電気通信大学松野研究室で開発されたネジ型推進ヘビロボットで、体幹部に設置されたネジ機構を回転させることにより、体をくねらさずとも前後進および水平横移動等が可能なロボットで非常に不思議で魅力的な移動をするロボットである。

また、図 2.14 に示したロボットは東工大の北川・塚越研究室で開発された Leg-in-rotorIV と呼ばれるロボットで、通常は車輪による回転移動をし、障害物に差し掛かると、車輪内に配置された空圧ジャンピングユニットで障害物を跳躍して回避するアクロバティックなロボットである (図 2.15)[23]。

また、図 2.16 に示したロボットは東工大の広瀬・米田研究室で開発された SlimSlime というロボットで、ミミズのように体幹をくねらせることによって移動可能なロボットである。



(a) UMRS-M1 (エスパーアンテナ装備)



(b) UMRS-M2 (おもりによる重心移動を利用した瓦礫踏破機構装備)

図 2.3: 神戸大学 高森・田所研究室 クローラ型ロボット UMRS シリーズ

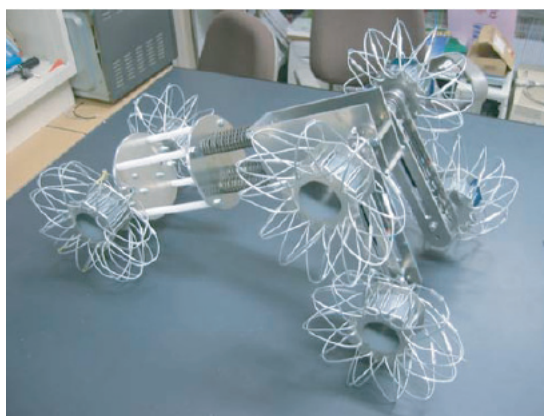
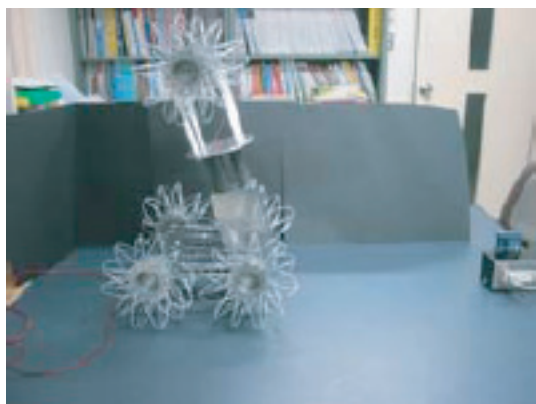
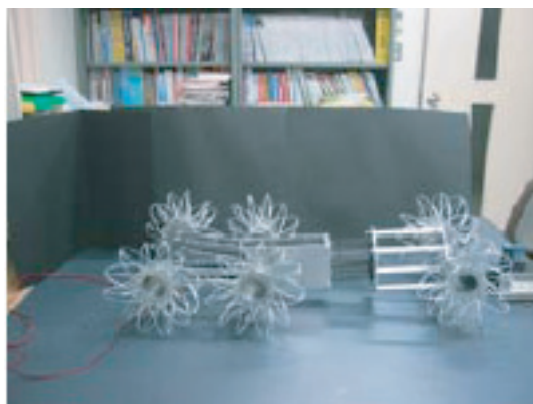


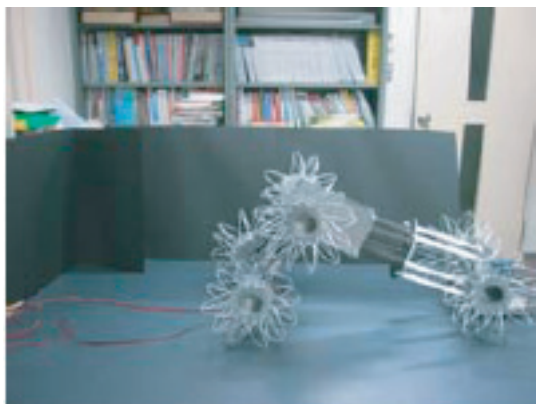
図 2.4: 岐阜工業高等専門学校 奥川研究室 BABY-II



(a) 転倒状態



(b) アームを下げて、ボディを持ち上げる



(c) 自己復帰完了



(d) 探索再開

図 2.5: BABY-II 自己復帰システム



図 2.6: 東京工業大学 広瀬・米田研究室 玄武

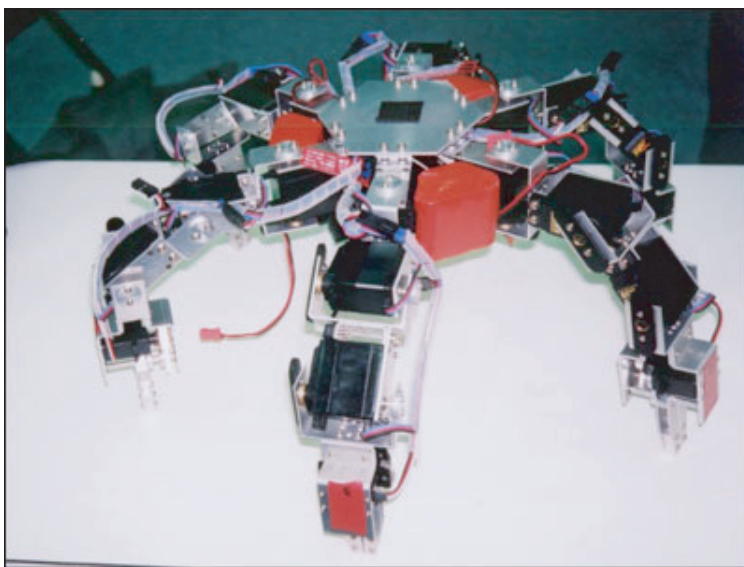


図 2.7: 大阪大学 新井研究室 リムメカニズムロボット





図 2.8: 東京工業大学 広瀬・米田研究室 ACM-R3



図 2.9: 京都大学 中西研究室 エアロボット

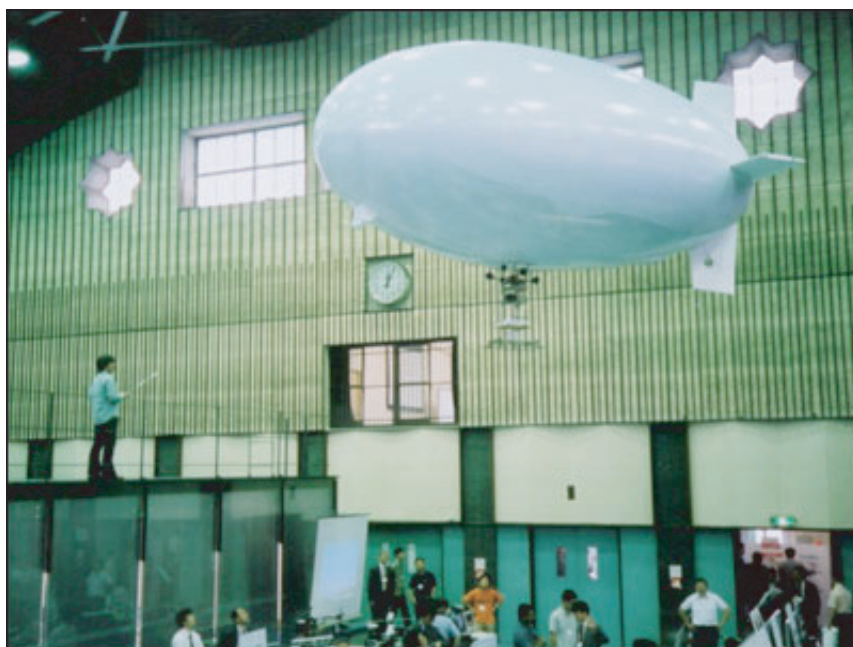


図 2.10: 理化学研究所 飛行船エージェント

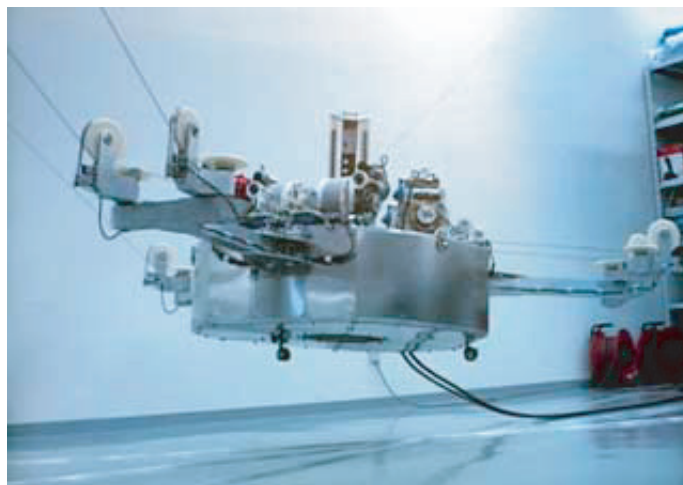


図 2.11: 神戸大学 高森・田所研究室 ポータブルケーブルロボット





図 2.12: 神戸大学 大須賀研究室 MOIRA



図 2.13: 電気通信大学 松野研究室 ねじ推進蛇型ロボット

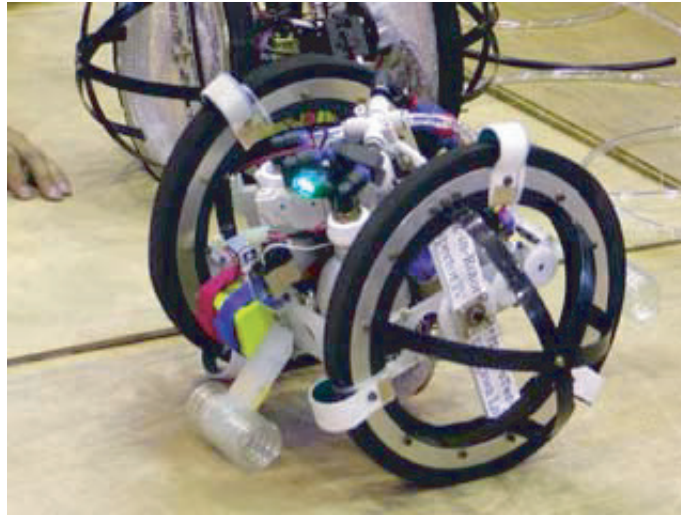
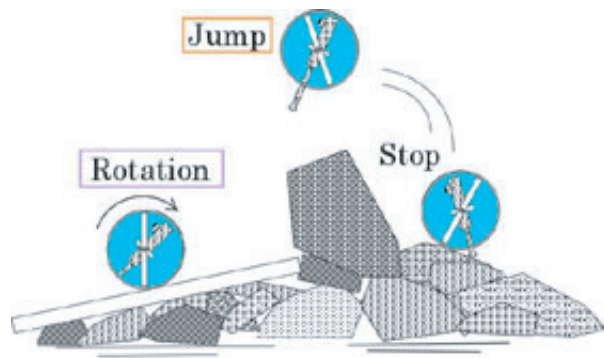


図 2.14: 東京工業大学 北川・塚越研究室 Leg-in-rotor-IV



(a) 写真



(b) 概念図

図 2.15: 東京工業大学 塚越研究室 ジャンピングメカニズム

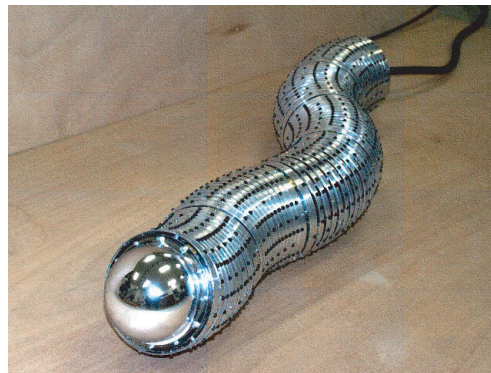


図 2.16: 東京工業大学 広瀬・米田研究室 Slim Slime

## 第3章 展開構造物

展開構造物とは、構造物自身が持つ展開機構を用いることによって、自身の形態を変形させ、機能する構造物のことである。この形態変形には可逆的なもののほかに、一度展開したら形態を凝固させ、構造物として永続的に用いることを目的とした不可逆的なものもある。本章では展開構造物の特徴について述べ、展開構造物の種類と応用例、ならびに本研究で開発した収縮状態へと復元可能なインフレータブルアクチュエータ FSB(Film Surfaced Bellos) について述べる。

### 3.1 展開構造物の特徴

展開構造物の身近な例には、折りたたみ機構を有する傘や、伸縮機構を有する梯子 (はしご)、膜面内に空気を封入することにより膨張展開する風船や浮き輪、ボートなどがある (図 3.1)[24][25][26]。これら展開構造物は、展開後に対して展開前の容積が非常に小さいという特徴がある。この特徴を利用することにより、傘のように必要なときには展開して構造物を機能させ、不要なときは折りたたんで携帯輸送や収納スペースのコンパクト化を実現することができる [28]。また、展開構造物はスペースシャトルを用いた宇宙空間への宇宙構造材料の輸送のように、輸送コストが非常に高い状況に対しても、限られた収納スペースへ機能的に格納することが可能であるため、収納による無駄なスペースの発生を極力抑えることができ、非常に有効である。また展開構造物は、宇宙空間におけるモジュールの組み立て工程においても、展開機構を機能させるだけで大型構造物へと変形することできるため、モジュールの大型化が可能となり、人間が容易に作業できない場所での作業量を大幅に削減することができる。そして展開構造物はその展開機構により、容易に数百 [m] または数 [km] スケールの大型構造物を形成することができるため、特に重力の影響を考慮しないですむ宇宙構造材料として注目を集めている。その場合の大型宇宙構造物は軽長薄大となるため、振動制御が重要な問題となっている。

このように展開構造物は、高い収納効率を持ち、容易に大型構造物を形成できるという利点を有する。

だが展開構造物は構造材料として以外に展開機構を必要とするため、展開前や展開過程、そして展開後を含めた構造物設計が必要となり、従来の単体の構造物設計よりも困難な物となる。また特に大きな問題としては、展開機構における展開不良の問題がある。展開不良はヒンジやレール部のたわみ等による精度不良や、磨耗や金属疲労、または膜面が破損したことによる空気漏れ等によって発生する。



本研究では、展開構造物の中でも風船膜面による膨張展開を利用したインフレータブル構造物を主に扱う。インフレータブル構造物は、先に例に挙げた浮き輪やボートのように、機械式展開機構を持たないため、フレームのたわみ等による展開不良を起こさない。また機械式展開機構はレールなどを稼働するために、モータなどのアクチュエータを別に必要とするが、インフレータブル構造物はアクチュエータそのものが構造物となるため機構が単純になり、軽量化が望めるという利点がある。



(a) 傘



(b) 梯子



(c) エアバッグ



(d) インフレータブルカヌー

図 3.1: 展開構造物の紹介

## 3.2 機械式展開構造物

展開構造物の例としてよく挙げられるものに大型宇宙構造物がある．図 3.2 国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station) を示す．この ISS にも展開構造物が適用されており，伸展マストや太陽電池パドルに用いられている展開トラス構造物や，太陽電池パドル部に適用されている屏風状に折りたたみ，レールで展開する屏風式展開構造物がある (図 3.3) ．これらの展開構造物は機械式展開構造物と呼ばれ，機械的なヒンジやレールなどを組み合わせることによって展開する．本研究ではそれら機械式展開機構には本来頼らないインフレータブル構造物についての研究を行うが，本研究の設計段階ではインフレータブル構造物の剛性やロボット部材に使用する材料剛性等の情報不足状態での設計を行うこととなったため，各所に剛性強化を目的とした機械式展開機構を配置している．

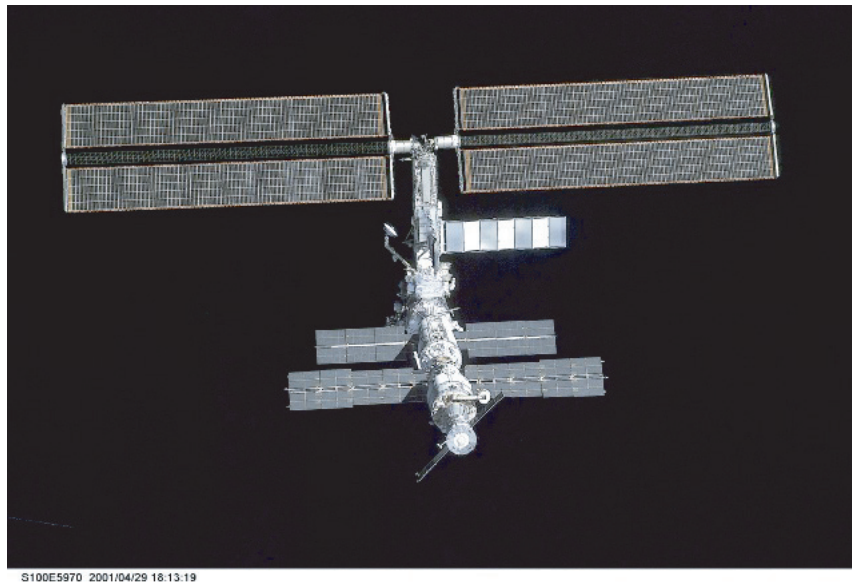


図 3.2: 国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station)

### 3.3 インフレーターブル構造物

インフレーターブル構造物とは、膜面内に空気等のガスを充填して内圧を発生させ、膜面に張力をかけることによって膨張展開して機能する構造物のことで、展開前は非常に容積が小さく、気体を充填するだけで展開が可能であるため、機械式展開構造物に較べてヒンジの製作精度や使用回数による磨耗および金属疲労などによる展開不良が起こりにくいという利点を有する。その反面、膜面を使用しているため、膜面が破れてしまうと能力が激減し、機能しなくなることがあることが欠点としてあげられる。また、インフレーターブル構造物には安定した形態が展開前と展開後の二状態しかなく、機械式展開構造物と違って展開過程においては不安定状態であり、形状が一意に定まらないという特徴がある。図 3.4 に米ジェット推進研究所 (JPL : Jet Propulsion Laboratory) で開発されたインフレーターブルローバーと図 3.5, 3.6 に同 JPL で開発され、火星探査機の軟着陸用に用いられたエアバッグを示す。インフレーターブルローバーは見ての通り骨組みとタイヤしかない外観であるが、人の肩の高さほどまである大型インフレーターブルタイヤ内に送受信ユニットなどが組みこれており、水上移動も可能な 3 輪ローバーである [27]。

### 3.4 本研究室にて開発したインフレーターブル構造物

本研究室で開発したインフレーターブルアクチュエータ FSB(Film Surfaed Bellows) を図 3.9 に示す。直径は 70[mm] で展開時の全長が 300[mm]、収縮時には全長 70[mm] へと変形し、従来の油空圧シリンダに較べて 3~4 倍のストローク幅を持つ。本アクチュエータは展開前と展開後という 2 状態と、外力に応じて受動変形しながら駆動する展開収縮過程という計 3 状態を有する。図 3.7 3.8 にソリッドワークスで作成したモデルを示す。構成は両端部パーツと寸法安定性の高い膜面及び収縮率の高いジャバラによって構成されている。膜面にはポリイミドフィルム (株) 東レ・デュポン社のものを適用しており、このフィルムは厚さが 0.025[mm] で、耐熱性や絶縁性また強度に優れ、特に寸法安定性が高いことが本 FSB の性能を実現している特長である。本 FSB の使用圧力は 0.1 [MPa] であり、0.2 [MPa] 付近の圧力で使用すると破裂する。ポリイミドフィルムを基材としたカプトン両面接着テープを膜面全体に張り巡らせれば、0.2[MPa] 程度の圧力でも膜面が破裂しなくなるが、カプトン両面テープが高価であり、また膜面接着時の製作難易度が高く、接着面にしわが発生するとそのしわを通じて空気漏れが発生することから、本研究では円筒膜面端部のみに安価な強力両面接着テープを用いて FSB を製作し、使用に耐えうることを確認したためそれらを適用した。またカプトン両面接着テープに用いられているシリコーン系接着剤を塗布して FSB を製作する方法についても研究中であるが、均一に薄く塗布しなければ厚みで展開方向に方向性が現れたり、凝固したシリコーンが伸縮時に支障をきたしたり、シリコーン剤の薄い点から破裂するなどの問題が起こるため、シリコーン系接着剤を用いて製作する方法に対しても高い製作技術が求められる。今後は熱融着等を利用して製作し、端部パーツとの接着箇所もゴムパッキン等で密閉精度を高める設計を行えば、

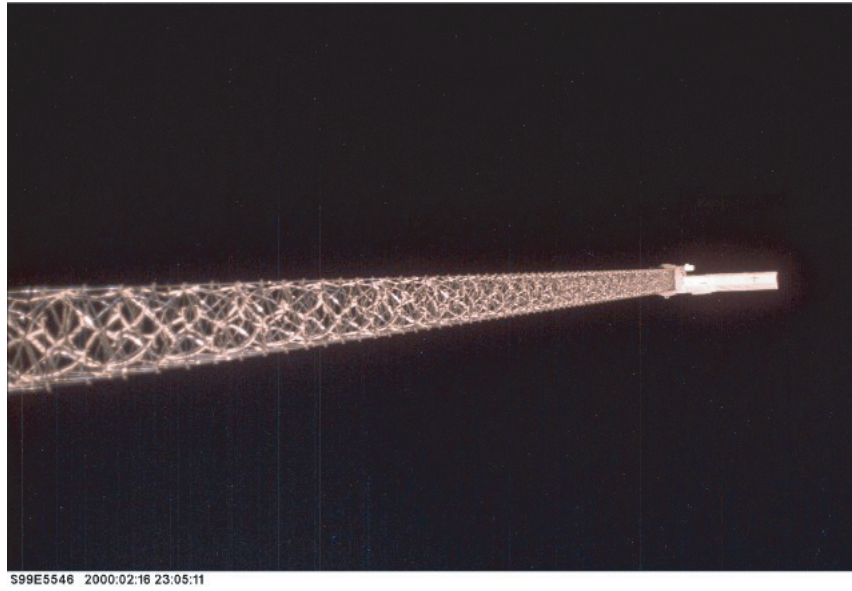
表 3.1: FSB(Film Surfaced Bellows) 仕様

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| 全長 (展開時)                | 300 [mm]       |
| 全長 (収縮時)                | 70 [mm]        |
| 外径寸法                    | $\phi$ 70 [mm] |
| 出力 (展開時：膜面内圧 0.1[MPa])  | 1540 [N]       |
| 出力 (収縮時：膜面内圧 0.05[MPa]) | 770 [N]        |
| 使用圧力                    | 0.1 [MPa]      |
| 限界圧力                    | 0.15 [MPa]     |
| 重量                      | 110 [g]        |

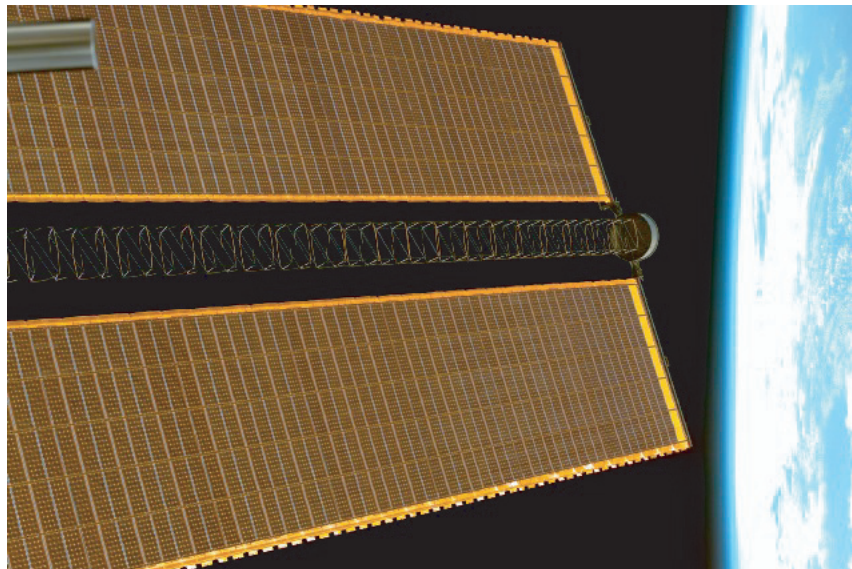
より高圧での使用が可能となり高出力を出せるアクチュエータになると考えられる．本 FSB の仕様を表 3.4 に示す．本 FSB の重量は 110 [g] と軽量であり，それでいて出力は展開時 1540[N] (0.1[MPa] 使用時)，収縮時 770[N] と大きな値であるが，空気漏れのためこの値よりも実際はかなり低い (本 FSB にかかる膜面内圧は送気側と吸気側で異なるため，モータ等のアクチュエータとは違って展開出力と収縮出力に違いが発生することに注意が必要である．) [29][?].

また，本 FSB に用いている伸縮ジャバラは高速伸縮展開を可能とするためにジャバラの各所に空気抜きのための穴が開いている．本 FSB はその穴を使用してジャバラ内を通した空気を膜面内へと送気している．また伸縮ジャバラの使用範囲は 720 [mm] ～ 250 [mm] であるが，実際は 400 [mm] 付近まで優に延び，本研究では高速伸縮展開することも無いので，少々無理をして 300 [mm] まで展開可能な FSB のジャバラとして使用している．





(a) 伸展マスト

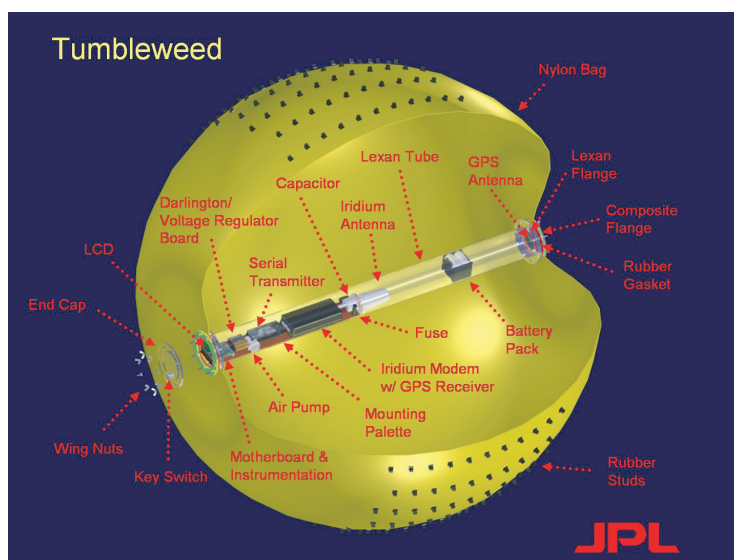


(b) 太陽電池パドル

図 3.3: ISS の機械式展開構造物

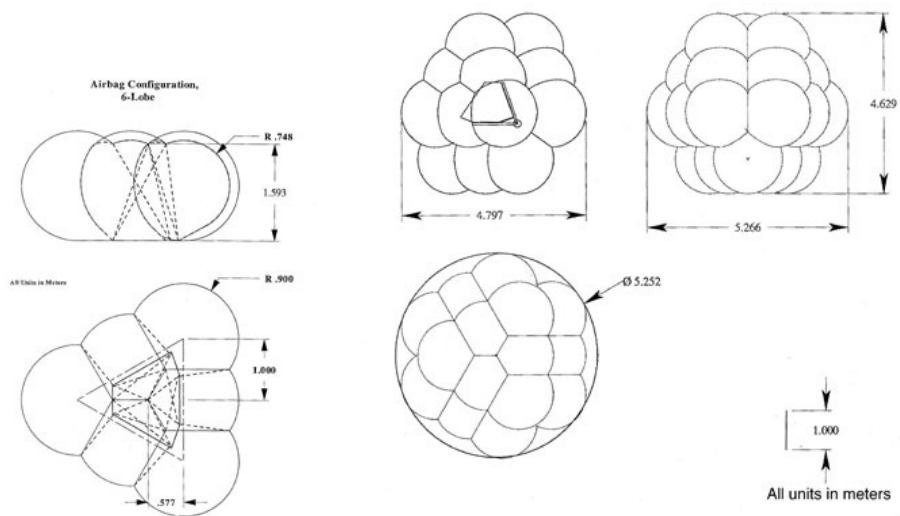


(a) インフレーターブローバー (スケール)



(b) インフレータータイヤ (内装)

図 3.4: インフレーターブローバー



(a) 1 ブロック展開図

(b) 全ブロック展開図

図 3.5: 火星探査機 着陸用エアバッグ (図面)

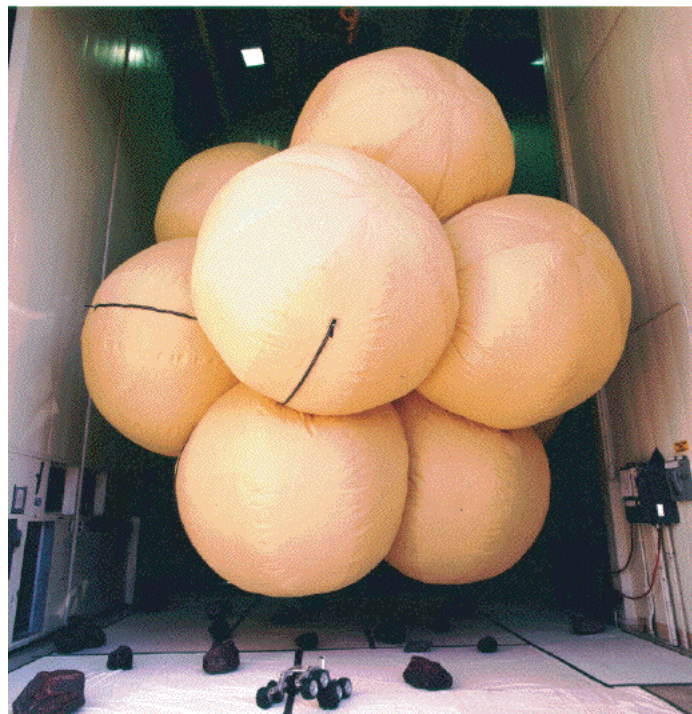
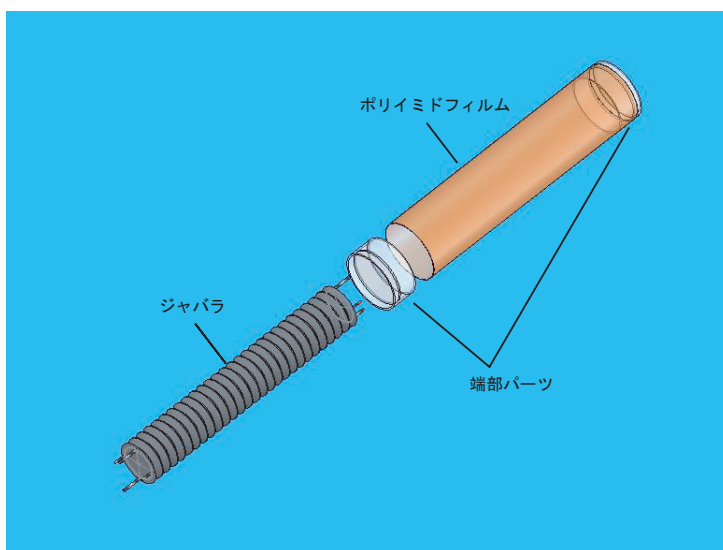


図 3.6: 火星探査機 着陸用エアバッグ (写真)

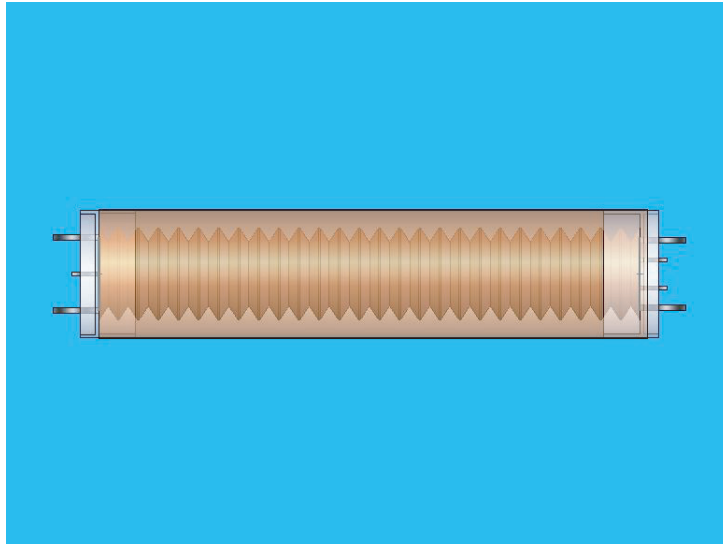


(a) 3D モデル

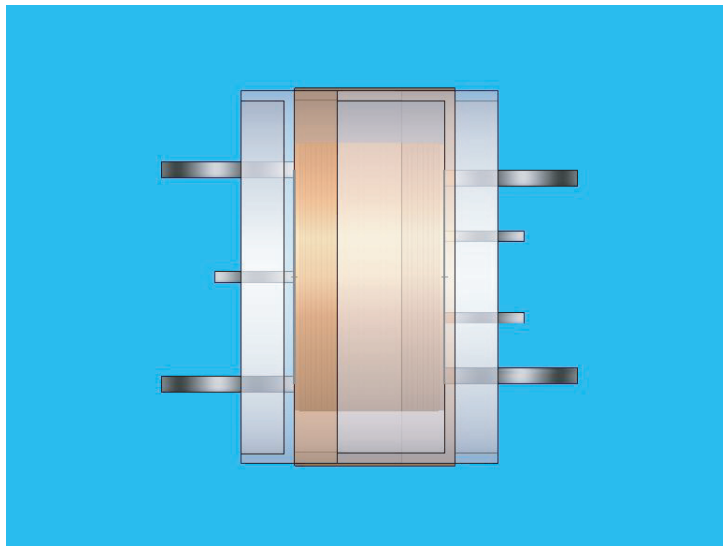


(b) 分解図

図 3.7: FSB (Film Surfaced Bellows) : drawn by Solid Works



(a) 側面（展開時）



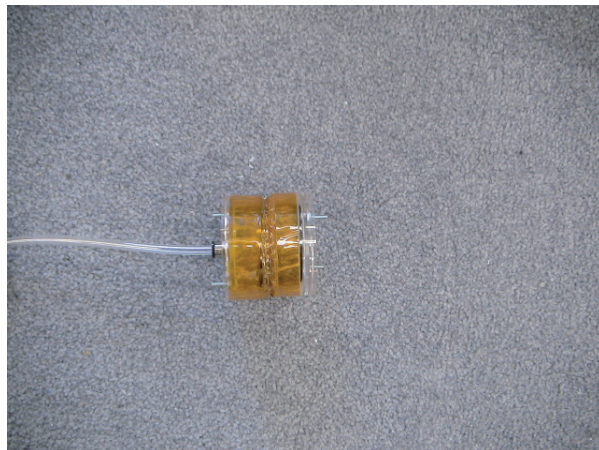
(b) 側面（収縮時）

図 3.8: FSB (Film Surfaced Bellows) : drawn by Solid Works





(a) 正面



(b) 側面（収縮時）



(c) 側面（展開時）



(d) 側面（展開収縮過程）

図 3.9: FSB (Film Surfaced Bellows) : 写真

表 3.2: FSB 構成材料

|                                         |                                         |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 膜面材料                                    |                                         |
| ポリイミドフィルム (カプトンフィルム)                    | 東レ・デュポン株式会社                             |
| タイプ                                     | 100V                                    |
| 厚さ                                      | 0.025 [mm]                              |
| 強度                                      | 340 [MPa]                               |
| 伸度                                      | 80 [%]                                  |
| ヤング率                                    | 3.4 [GPa]                               |
| 絶縁破壊電圧                                  | 400 [kV / mm]                           |
| 熱収縮率                                    | 0.04 [%]                                |
| 熱膨張係数                                   | 27 [ppm / °C]                           |
| 湿度膨張係数                                  | 24 [ppm / % RH]                         |
| 吸水率                                     | 2.9 [%]                                 |
| 熱伝導率                                    | 0.15 [w / m · °C]                       |
| 対折回数                                    | ≥ 20,000 [Cycle]                        |
| 体積低効率                                   | $1 \times 10^{15}$ [ $\Omega \cdot m$ ] |
| ジャバラ                                    |                                         |
| 丸ジャバラ                                   | 株式会社 ナベル                                |
| 長さ                                      | 72 [mm] ~ 250 [mm]                      |
| 外径寸法                                    | $\phi 50$ [mm]                          |
| オプション                                   | 空気穴 有                                   |
| 固定方式                                    | フランジ方式                                  |
| 端部パーツ                                   |                                         |
| プラスチック ラウンドケース                          | 2 [個]                                   |
| 長さ                                      | 35 [mm]                                 |
| 外径寸法                                    | $\phi 70$ [mm]                          |
| 内径寸法                                    | $\phi 64$ [mm]                          |
| 膜面接着剤                                   |                                         |
| 強力両面テープ                                 |                                         |
| 固定用ネジ                                   |                                         |
| 精密ネジ $\phi 2$ [mm] $\times 15$ (L) [mm] | 4 [本]                                   |
| 精密ねじ用ナット                                | 4 [個]                                   |
| なべ小ネジ $\phi 3 \times 20$ (L) [mm]       | 4 [本]                                   |
| ナット $\phi 3$                            | 4 [個]                                   |

(カプトンフィルム： <http://www.td-net.co.jp/Kapton/>)

(丸ジャバラ： <http://www.bellows.co.jp/>)



表 3.3: 膜面接着剤

|                  |                |
|------------------|----------------|
| 高耐熱シリコン用カプトンフィルム |                |
| シリコン両面粘着テープ 4390 | 住友スリーエム株式会社    |
| 厚さ               | 0.130 [mm]     |
| 引張り強度            | 51 [ N / cm ]  |
| 伸び               | 70 [ % ]       |
| 粘着力 (180 度方向)    | 4.5 [ N / cm ] |
| 保持力              | 0 [ mm ]       |

※粘着テープ試験について

引張り強さ：テープを引っ張り，切断したときの力を測定した値.

伸び：テープを長さ方向に引っ張り，曲面，凹凸面に順応する応力を数値化したもの. % 表示され，100% の場合，10 [cm] のテープが 20 [cm] まで伸びることを意味する.

粘着力：ステンレス板にテープを貼り，180 [ ° ] に折り曲げるか，直角に剥がしたときにどれ位の力に耐えられるか試験した値. 数値が大きいほど粘着力が強い.

保持力：段ボール等にテープを垂直に貼り，1 [kg] のおもりをつけ，1 時間後にずれた長さを測定した値. 数値が小さいほどずれにくい.

(メーカー仕様より. <http://www.mmm.co.jp/tape-adh/bonding/filmbasis/4390/index.html>)

## 第4章 障害物乗り越え機構

移動ロボットをレスキューロボットとして使用することを想定した場合、瓦礫などを乗り越えて移動する悪路走破システムが必要となる。本章では、FSB を適用した障害物乗り越え機構について述べる。

### 4.1 従来の障害物乗り越え機構

障害物乗り越え機構には、ロボット自身が有する移動機構を利用してアームを付加したものと、その移動機構のみでは走破不可能である障害物に対して用いるものがあり、前者は上下に駆動可能なクローラアームが (図 2.3)、後者には投擲テザーを打ち出してウィンチのような巻取り機構をによって障害物走破を実現する研究が知られている (図??)。駆動クローラアーム型は、その名の通り駆動するクローラ部が上下に稼動するアームになっており、神戸大学の UMRS シリーズが代表的な例である。この機構は、障害物に相対したときに通常のクローラ部として使用している部分を肩として、肩を中心にアームを持ち上げることで、障害物にアームを引っ掛けて障害物の走破を行う。この機構は操作も容易で、移動速度を落とすことなく障害物乗り越えていくことが出来るが、クローラ型の弱点であるクローラが外れてしまった場合の障害物乗り越え効果が激減してしまうことと、走破可能な障害物の高さがクローラの長さによって予め決定されていることが弱点として挙げられる。またクローラ駆動機構以外にアーム上げ下げ用の駆動機構が必要となり、肩部は両機構が密接、またはリンクする箇所のため機構が複雑になりがちであるという問題がある。

そこで、駆動クローラアームのように従来の移動ロボットが持っている移動機構では走破出来ないような障害物に対して走破を可能とする目的で研究されているものに、東京工業大学広瀬研究室の投擲ハイパーテザーがある。この研究は、先端に手錠機構のついた棒 (ロッド) をロボットが対象に向かって撃ち出し、何らかの自重を支えられるものに先端アーム部を引っ掛け、ロボットに搭載されたウィンチを用いてロッドにつながるワイヤを巻取り、障害物走破を可能とする機構である。この機構はテザーのワイヤ長さと、飛距離で走破可能な障害物の高さが決定される。しかし撃ち出すという機構が障害物にダメージを与える可能性があるため、アンバランスな瓦礫が再び崩壊する危険のある場所では使用できない。そこで、本研究ではそれらロボット自体が有している移動機構では容易に走破できない障害物に対して走破を可能とするような障害物移動機構について検討していく。次節では、本研究で提案する障害物乗り越え機構について述べる。

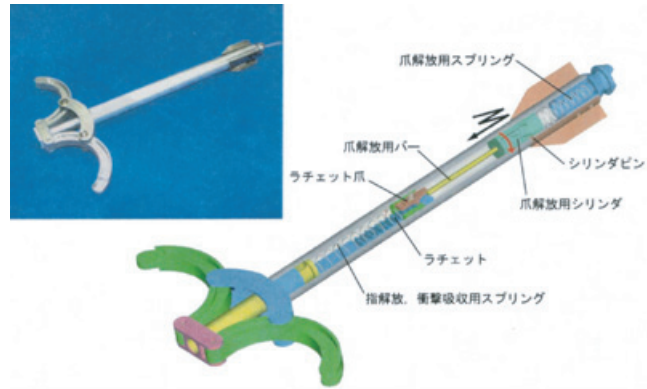


図 4.1: 東京工業大学 広瀬研究室 レスキュー用投擲ハイパーテザー

## 4.2 重心位置の移動を利用した障害物乗り越え機構

本研究で提案する障害物乗り越え機構は、神戸大学の高森・田所研究室で開発された UMRS-M2 という重心位置移動を利用してロボット全長とほぼ同等の隙間を越えていくという研究コンセプトを参考に考えた。

本研究における障害物乗り越え機構は、ジャッキ部とテレスコピック機構による伸展レール部を用いることによって、ロボットの重心位置を上下前後方向に移動可能とし、障害物乗り越えを実現する機構である。

本ロボットの前後部の重心位置はそれぞれ駆動部付近に存在している。ジャッキ部はロボット前後部のシャーシ下に配置し、重心位置を上下に移動させる。また伸展レール部は、ロボット駆動部とジャッキ部の上下2箇所を前後スライドさせる機構が前駆動部と後駆動部の2箇所の計4箇所に配置され、それぞれ重心位置の存在する駆動部およびジャッキ部を前方へ移動することが可能である。本研究では、ジャッキ部およびレール部のアクチュエータにインフレーターブルアクチュエータを適用することにより、従来のエアシリンダと較べて伸縮時はコンパクトな収納スペースを、展開時には十分な伸展距離を実現する。

本障害物乗り越え機構の手順を図 4.2 に示す。移動ロボットが障害物に遭遇した場合、ロボット前部のジャッキを展開し、ロボット前部の重心位置をジャッキアップする。次に前部のレールを展開することにより、ロボット前部の重心位置を障害物上へと移動させる。これによりロボット前部の重心が障害物を乗り越えたため、ロボット後部から前部の姿勢を支えながら、重量の軽いジャッキ部を収縮させ、レール部のアクチュエータを収縮させることにより、ロボット前部が障害物の乗り越えを完了する。同様にロボット後部についても重心位置のジャッキアップ、レール伸展、ロボット重心の障害物乗り越え完了、ジャッキ部収縮、レール部収縮という手順で、ロボットの障害物乗り越えを完了する。

このとき、伸展レールによって重心位置がどれだけ移動するかを以下に算出した. 図 4.3 に駆動部前部の左側のみを抽出した図を示す. 本移動ロボットは進行方向の中心軸に対して線対称となっている. このため、質量分布を一定とした場合、ロボットの重心位置は必ず進行方向の中心軸上に存在する. そのため以下の計算式において必要となるのは図における重心位置の進行方向成分のみである. レールの質量を  $m_1$ 、レール幅を  $t$ 、モータ質量を  $m_2$ 、モータの重心位置を  $(b_x/2, b_y/2)$  とするとき、重心位置は  $r_1, r_2$  を用いて、以下のようにあらわされる.

$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2 \quad (4.1)$$

$$r_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot r_1 \quad (4.2)$$

$$r_1 \cos \theta + r_2 \cos \theta = \frac{L}{2} - \frac{b_x}{2} \quad (4.3)$$

ここで、必要となるのは進行方向成分のみであるので  $x$  成分のみを計算する. 式 4.3 に式 4.2 を代入して、

$$r_1 \cos \theta = \left( \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{L - b_x}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$r_2 \cos \theta = \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{L - b_x}{2} \right) \quad (4.5)$$

を得る. 同様にレールが  $\Delta L$  伸展した場合についても考えると、 $r_1'$

$$m_1 \cdot r_1' = m_2 \cdot r_2' \quad (4.6)$$

$$r_2' = \frac{m_1}{m_2} \cdot r_1' \quad (4.7)$$

$$r_1' \cos \theta' + r_2' \cos \theta' = \frac{L}{2} - \frac{b_x}{2} \quad (4.8)$$

式 4.8 に式 4.7 を代入して、

$$r_1' \cos \theta' = \left( \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{L - b_x}{2} \right) \quad (4.9)$$

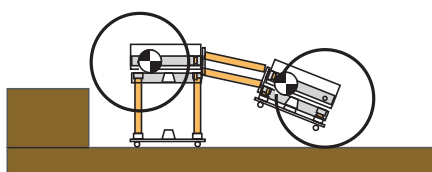
$$r_2' \cos \theta' = \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{L - b_x}{2} \right) \quad (4.10)$$

以上より、式 4.9 - 式 4.4 により、重心位置の移動距離  $\Delta x$  を得る.

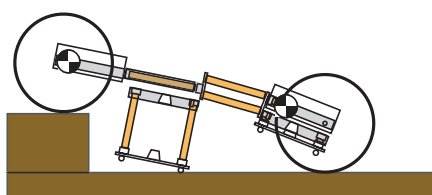
$$\Delta x = \left( \frac{L + \Delta L}{2} + r_1' \cos \theta' \right) - \left( \frac{L}{2} + r_1 \cos \theta \right) \quad (4.11)$$

$$= \left( 1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \cdot \frac{\Delta L}{2} \quad (4.12)$$

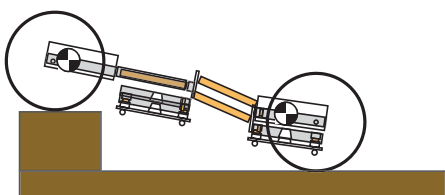
Step 1 : フロントジャッキ展開



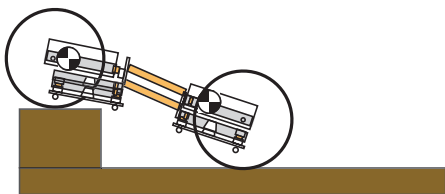
Step 2 : フロントレール展開



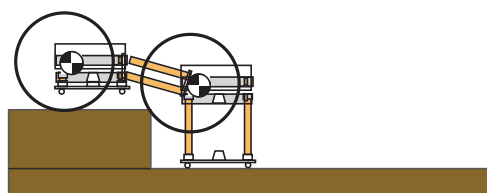
Step 3 : フロントジャッキ収縮



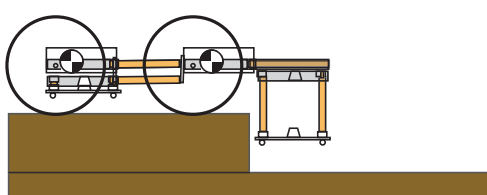
Step 4 : フロントレール収縮



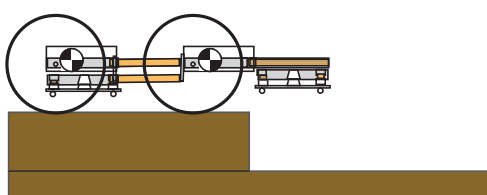
Step 5 : リアジャッキ展開



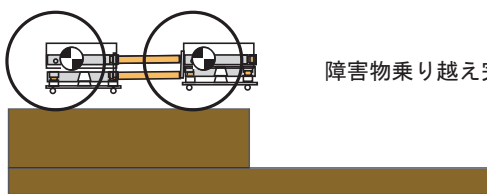
Step 6 : リアレール展開



Step 7 : リアジャッキ収縮



Step 8 : リアレール収縮



障害物乗り越え完了！

● : ロボット前後部の重心位置

図 4.2: 障害物乗り越え機構コンセプト

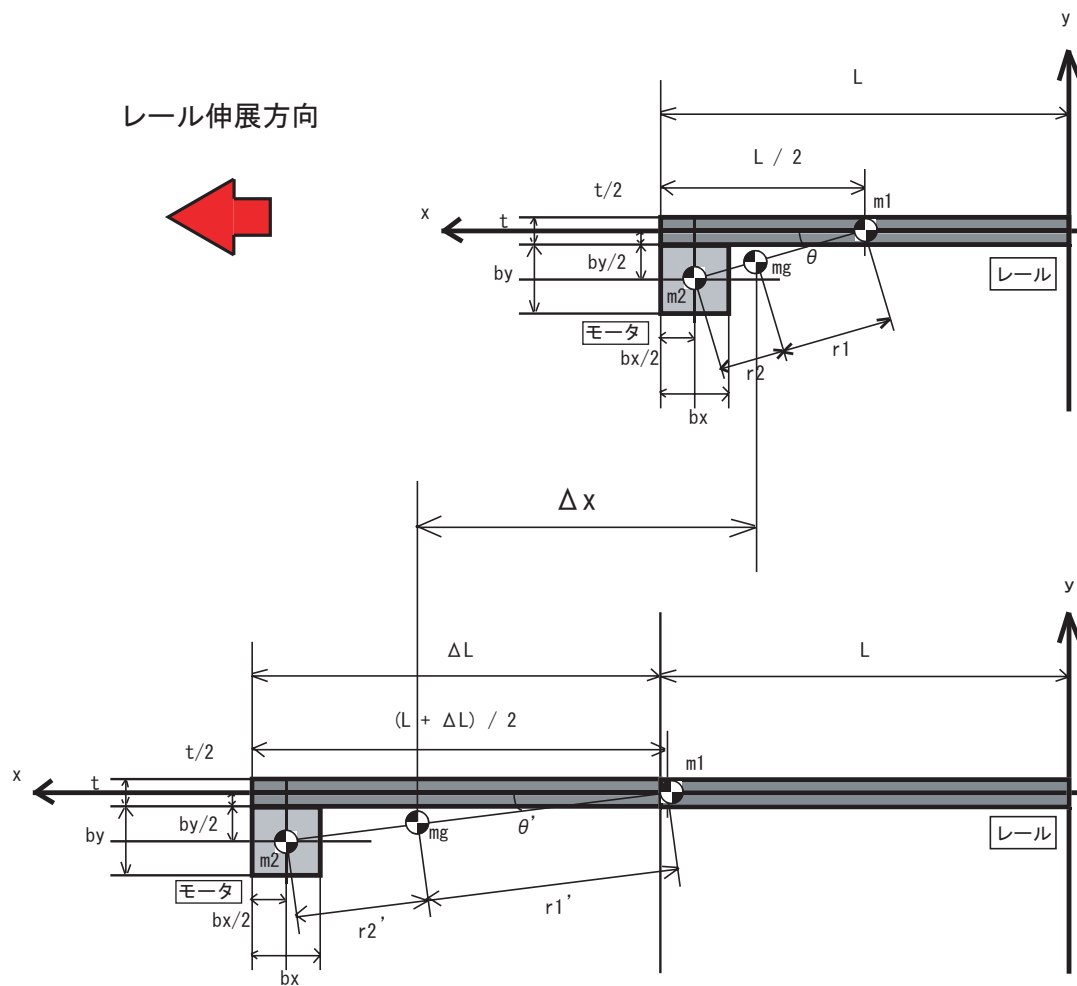


図 4.3: 左前駆動部のレール伸展前後による重心移動 (上：伸展前, 下：伸展後)



# 第5章 実験

## 5.1 開発した移動ロボットの構成

本研究で開発したFSBによる伸縮展開および障害物乗り越え機構を有するインフレーターブル移動ロボット「JAI-Rover-I」を図5.1に示す。本ロボットJAI-Rover-Iは、前駆動部と後駆動部とFSBによって構成された中間部の3つ部分によって構成されている。FSBによる障害物乗り越え機構は、前駆動部と後駆動部に組み込まれている。

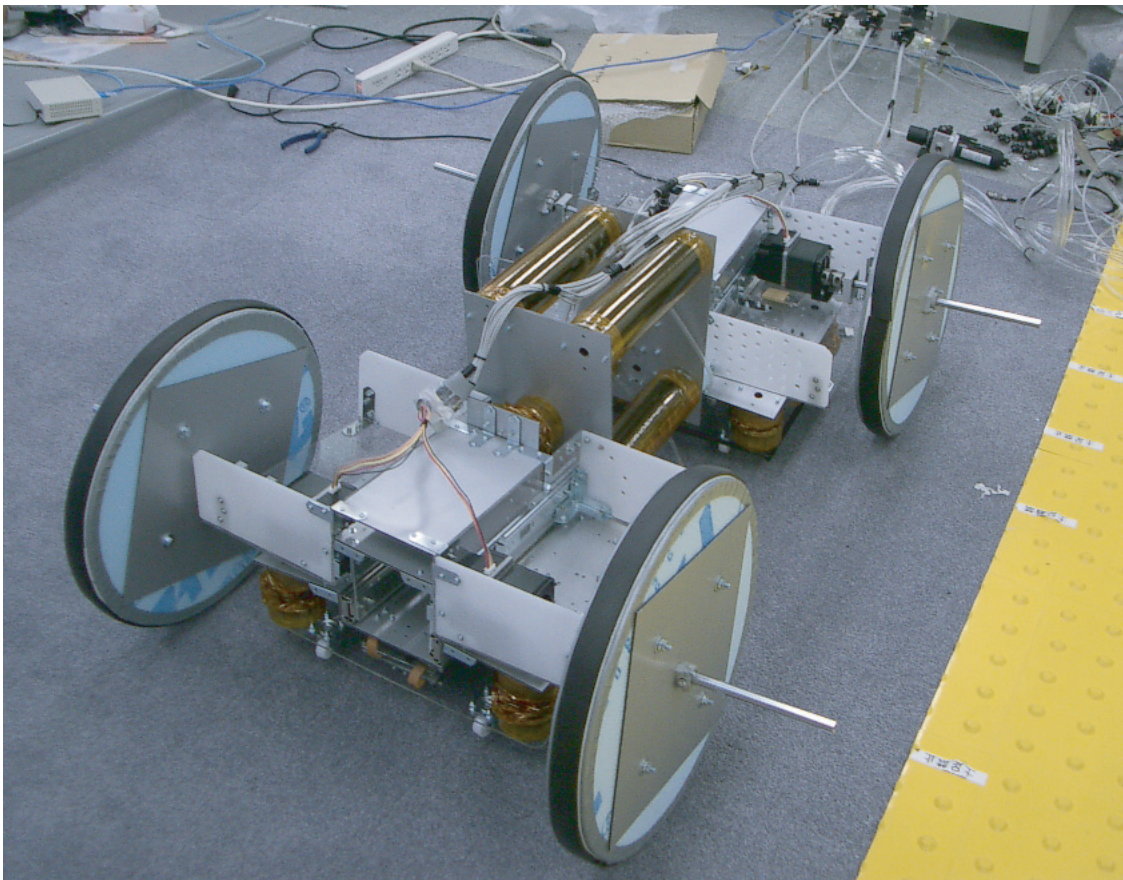
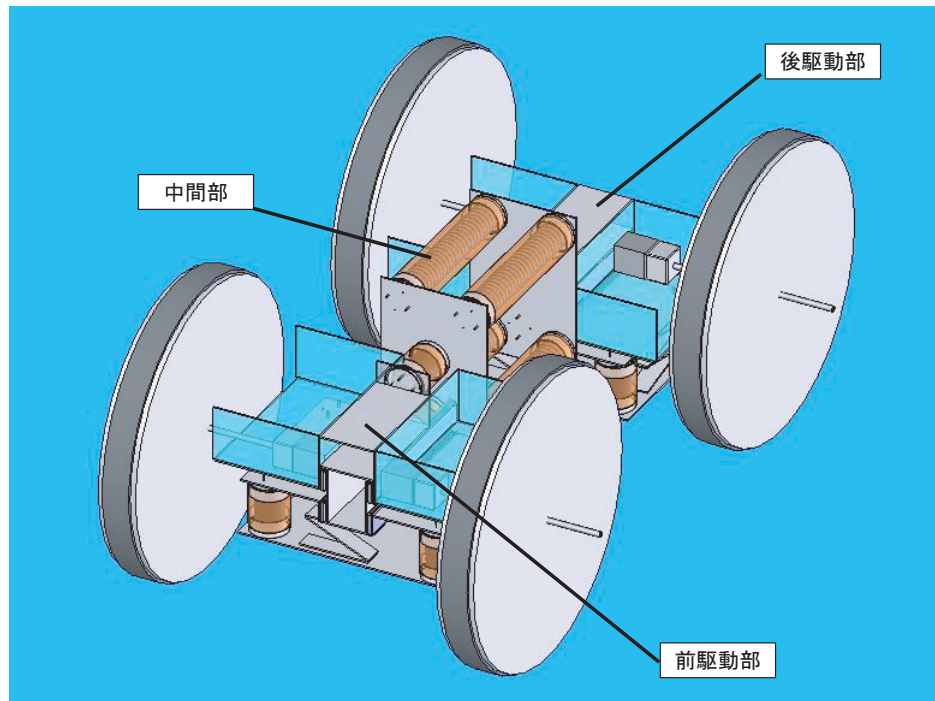
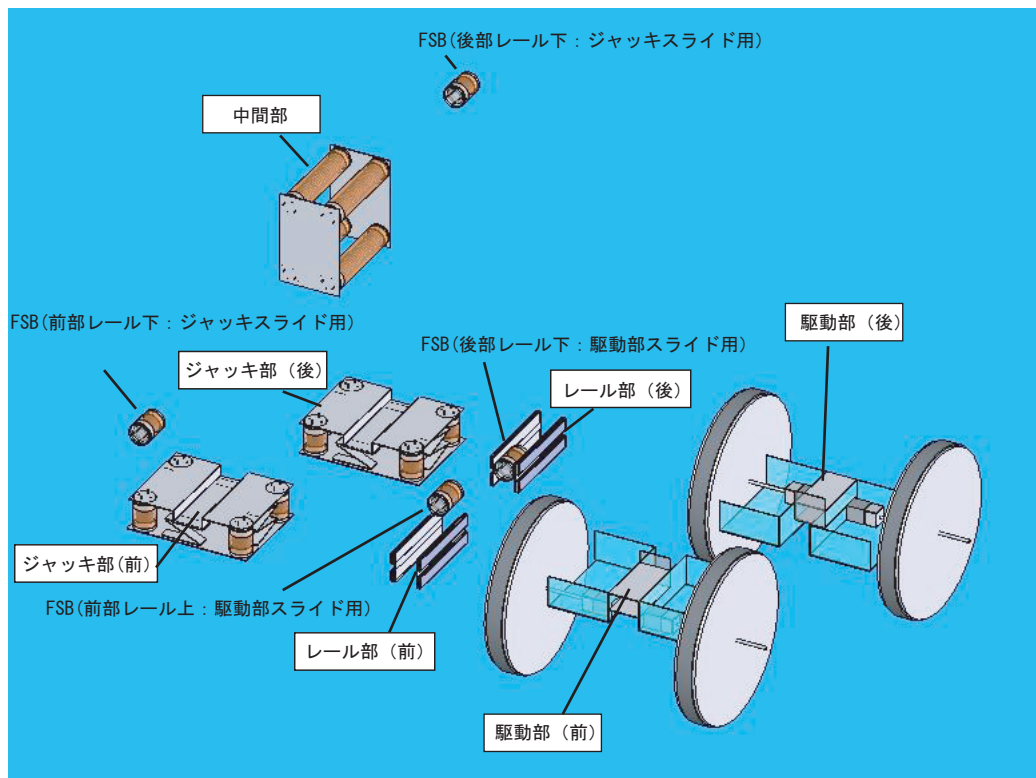


図 5.1: 本研究で開発したインフレーターブル移動ロボット「JAI-Rover-I」



(a) 構成図



(b) 分解図

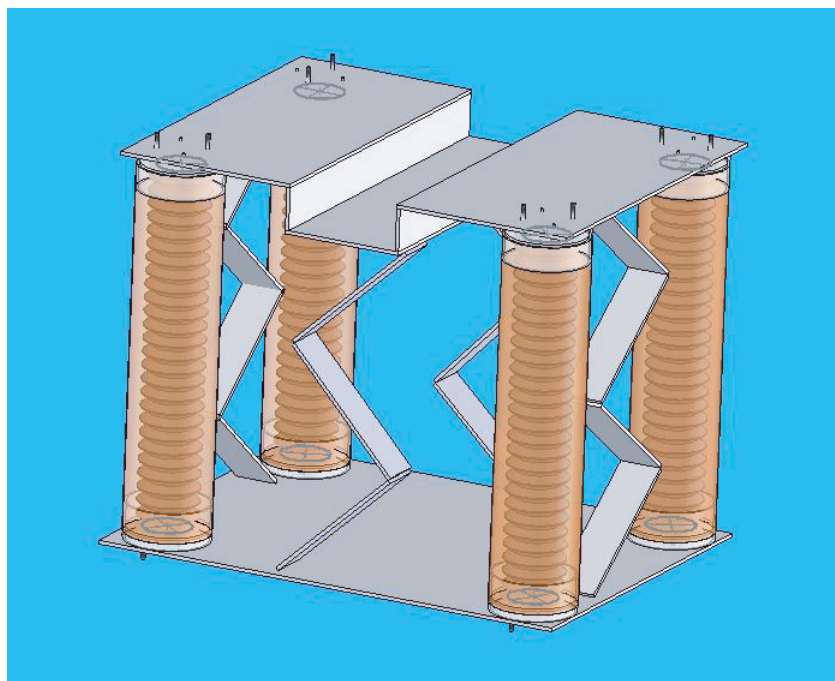
図 5.2: JAI-Rover-I4 (Solid Works Model)

### 5.1.1 ジャッキ部

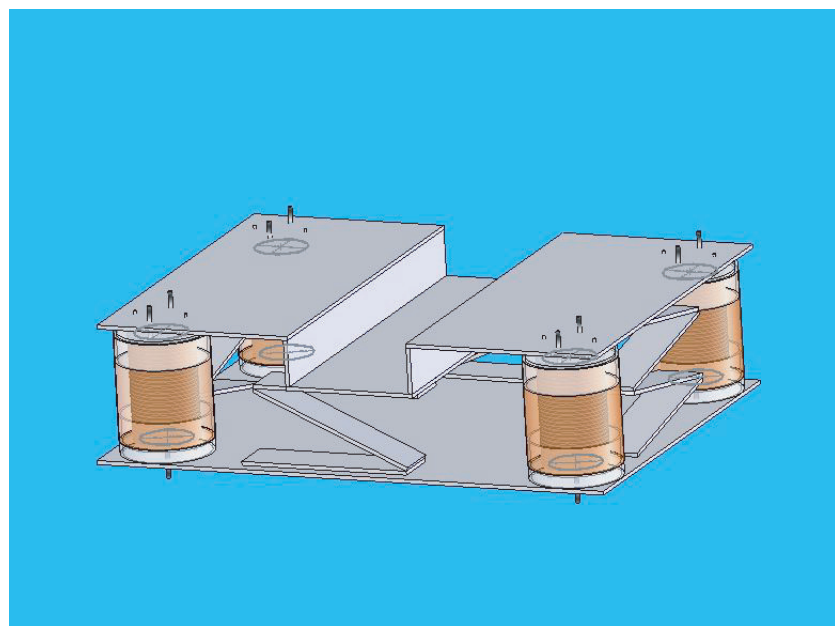
本障害物乗り越え機構に用いるジャッキ部を図 5.3, 5.4 に示す. 本ジャッキ部は 300 [mm](L) × 400(W) [mm] の両平板間に 4 本の FSB を各頂点付近に配置し、各辺の中心付近にはジャッキの展開方向を拘束するための蝶番による折りたたみ機構がある. 本ジャッキの出力は FSB の使用圧力が 0.1 [MPa] のとき 6240 [N] であるが、FSB の空気漏れが激しいため実際はもっと低い. 本ジャッキ部はインフレータブル構造物という観点からすると展開方向の拘束機構があるため単純な展開機構とは言い難いが、ジャッキは本来重量物を上面に支持して面間距離を拡げてジャッキアップしていくものであるため、展開過程におけるジャッキの展開方向に対する剛性が維持できない場合、展開方向を特定できないという問題がある. 本研究における FSB は展開前と展開後の 2 状態は安定しているが、展開過程においては膜面内圧が均等ではなく気体も膜面内を移動するため、張力が膜面に一様に発生しない. そのため、形状が一意に定まらず、絶えず鉛直の展開方向に荷重を受けているため、FSB の展開方向が横へとスライドしていき、膜面が FSB の上面端部と地面に挟み込まれる形となってしまう、膜面とジャバラを傷つける可能性があった. この場合、膜面内圧を高めていけばあるときを境に急にジャッキアップ後の形態へと変形するのであるが、展開方向が著しくずれた状態で展開を行った場合、ジャッキアップによってロボットがバランスを崩して転倒する恐れがあるため、図 5.4(b) のような蝶番を用いた折りたたみ機構を製作して、鉛直方向へと展開方向を定めた. また、この蝶番による折りたたみ機構のみでは 4 本の FSB を均等に展開させることは出来ない. 上面が傾いて 4 本のうちのいくつかに負荷をかけて伸展を妨げ、他の 3 本が展開しているにも拘らず、1 本だけ展開していないような状況となってしまうためである. そこで 4 本の FSB に均等な圧力がかかって伸展距離が同等となるように太目の輪ゴムを用いて上面から絶えずゴムの張力を与えることによって伸びている FSB には強いゴムの張力を、伸びていない FSB には弱いゴムの張力がかかる機構を採用した. これにより、本ジャッキの展開方向が拘束され、鉛直方向に展開するジャッキを得ることができた. 昨今のジャッキとしては X ジャッキと呼ばれるものが東工大の広瀬研究室と (株) 日本ギアで開発および市販されており、本ジャッキ機構にもその機構を採用するほうが展開方向をより安定させることが出来るであろう. しかし、本研究では製作も容易であるため、ゴムと蝶番を利用した折りたたみ機構を採用したエアジャッキを製作した.

### 5.1.2 レール部

本障害物乗り越え機構においてロボットの重心位置の前後スライド機構の役目を果たすものがこのレール部である. このレール部は 1 対 2 本が前後上下の 4 箇所に配置されており、計 8 本のレールによって構成されている. 下 2 対の伸展レールが、重心位置を障害物乗り越えを完了させた後のジャッキ部格納用に用いられ、上 2 対の伸展レールが駆動部付近に存在する重心位置の移動用に用いられる. 図 5.6 にフロント部における上下レールの



(a) ジャッキアップ



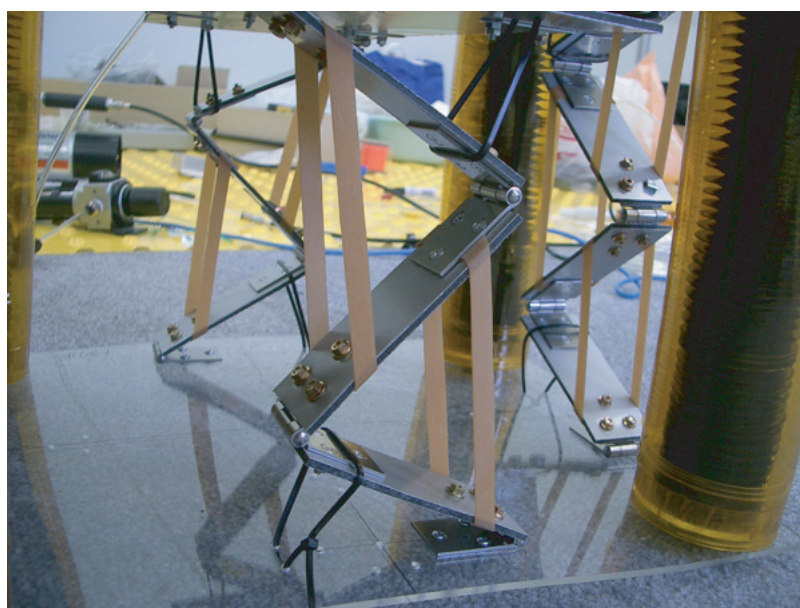
(b) ジャッキダウン

図 5.3: JAI-Rover-I : ジャッキ部 (Solid Works Model)





(a) ジャッキアップ



(b) 展開方向拘束機構：蝶番による折りたたみ機構 (拡大図)

図 5.4: JAI-Rover-I : ジャッキ部 (写真)

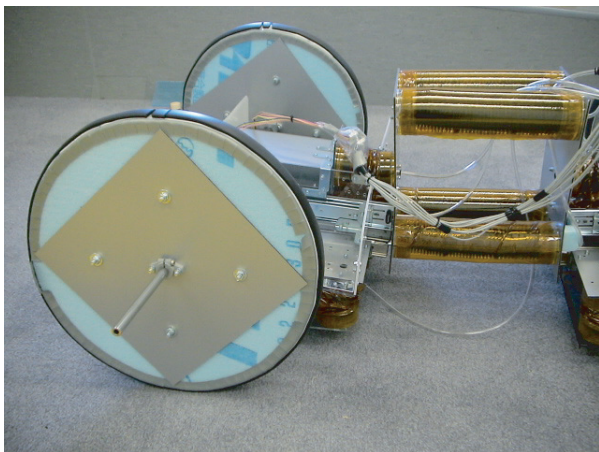


図 5.5: 東京工業大学 広瀬研究室 X - ジャッキ

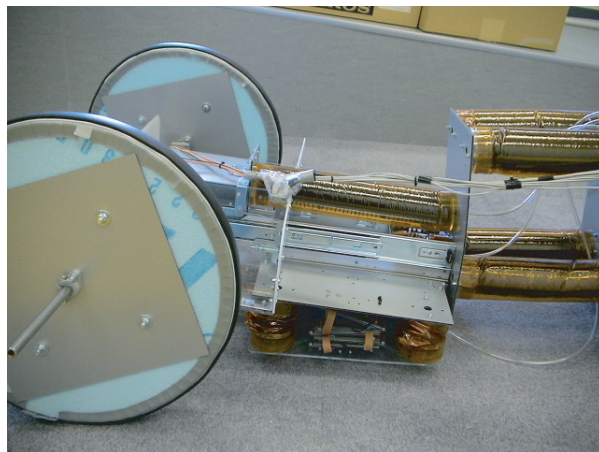
展開の様子を示す.

### 5.1.3 空気圧回路

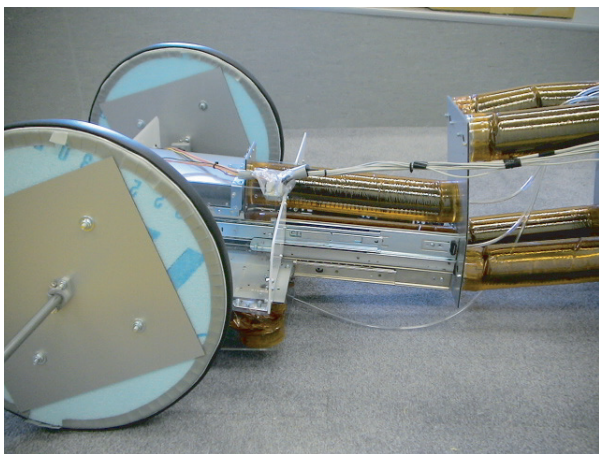
JAI-Rover-I の空気圧回路を図 5.7 に示す. コンプレッサは送気側と吸気側に分け, 送気側のコンプレッサには最大圧力  $0.25[\text{MPa}]$  のものを二台使用し, 吸気側のコンプレッサには真空到達度  $-0.05[\text{MPa}]$  のものを使用している. 送気側コンプレッサは, ジャッキ部の FSB8 本に接続された 1 台, そして伸展レール部 4 本と伸縮用中間部フレーム 4 本の FSB 計 8 本にもう 1 台を接続する. また, 吸気側は DC モータコンプレッサを 6 台接続して一斉に吸気を行っている. これは, ジャッキアップして高圧がかかっている状態の FSB から低圧の伸展レール部の FSB へと空気経路が接続された場合, 高圧側の空気が低圧側に流れ込み, ジャッキ部の剛性が失われるのを防ぐためである.



(a) 展開前



(b) フロントレール上部：展開後



(c) フロントレール下部：展開後

図 5.6: フロントレール展開の様子



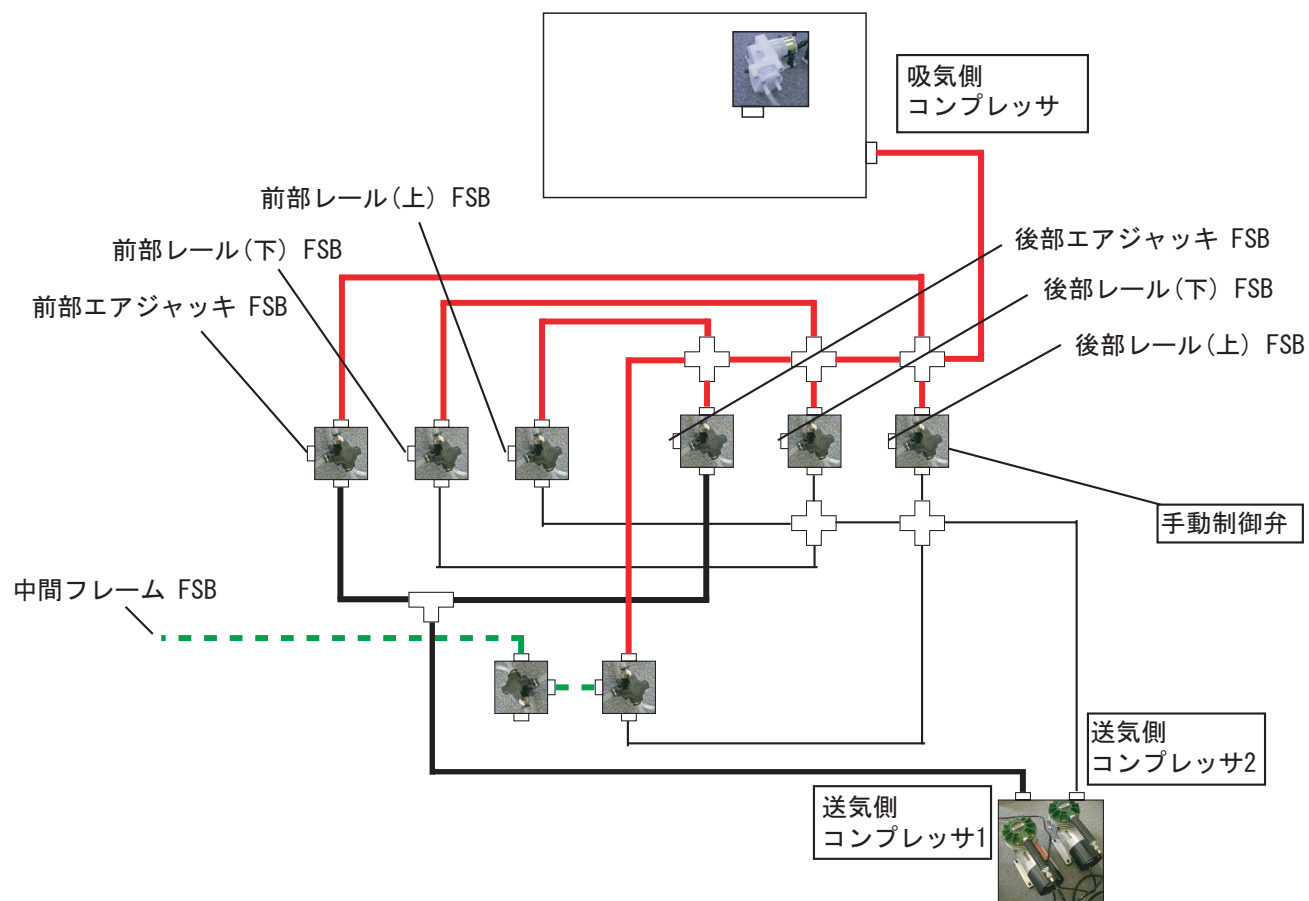


図 5.7: 空気圧回路

表 5.1: 空気圧回路構成部品：空気経路関連

|                 |           |                  |
|-----------------|-----------|------------------|
| ウレタンチューブ        | PISCO Co. | UB0640 - 20 - C  |
| フィルタレギュレータ      | PISCO Co. | FRF300 - 03 - MD |
| チューブフィッティング     | PISCO Co. | PC6 - 03         |
| チューブフィッティング     | PISCO Co. | PC6 - 01         |
| 手動制御弁 (チェンジバルブ) | PISCO Co. | HBV6 - 6         |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PE6              |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PVU6             |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PV6              |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PC6M             |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PE6M             |
| 継ぎ手             | PISCO Co. | PZA6M            |

表 5.2: 空気圧回路構成部品：吸気側コンプレッサ 1

|                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| DC モータ（ダイヤフラム方式）        |                         |
| 真空ポンプ/コンプレッサ兼用タイプ メドー産業 |                         |
| 型式                      | DP0140                  |
| 到達真空度                   | -53.3 [kPa]             |
| 吐出空気量                   | 4 [l / min]             |
| 定格電圧                    | DC12 [V]                |
| 最高圧力                    | 0.05 [MPa]              |
| 耐用時間                    | 500 [時間]                |
| 吸入口サイズ                  | φ 5(外径) [mm]            |
| 吐出口サイズ                  | φ 5(外径) [mm]            |
| 取付寸法                    | 52(L) [mm] x 36(W) [mm] |
| 本体質量                    | 0.19 [kg]               |

(メーカー仕様より. <http://www.medo.co.jp/New-index1.html>)

表 5.3: 空気圧回路構成部品：送気側コンプレッサ 2

|                       |                                         |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| ダイヤフラムコンプレッサー         | 株式会社キソパワーツール                            |
| 型式                    | E5305                                   |
| 最高圧力                  | 0.25 [MPa]                              |
| 吐出空気量                 | 12 [l / min] (0.2MPa 時)                 |
| 消費電力                  | 80 [W]                                  |
| 吐出口サイズ                | PF1/8 "凸                                |
| 定格使用時間                | 30 [min]                                |
| サイズ                   | 210(L) [mm] × 111(W) [mm] × 147(H) [mm] |
| 本体質量                  | 2.7 [kg]                                |
| ■付属品                  |                                         |
| ウレタンホース (両口 PF1/8 "凹) | 2 [m](E1312)                            |
| 振動防止スポンジ              |                                         |

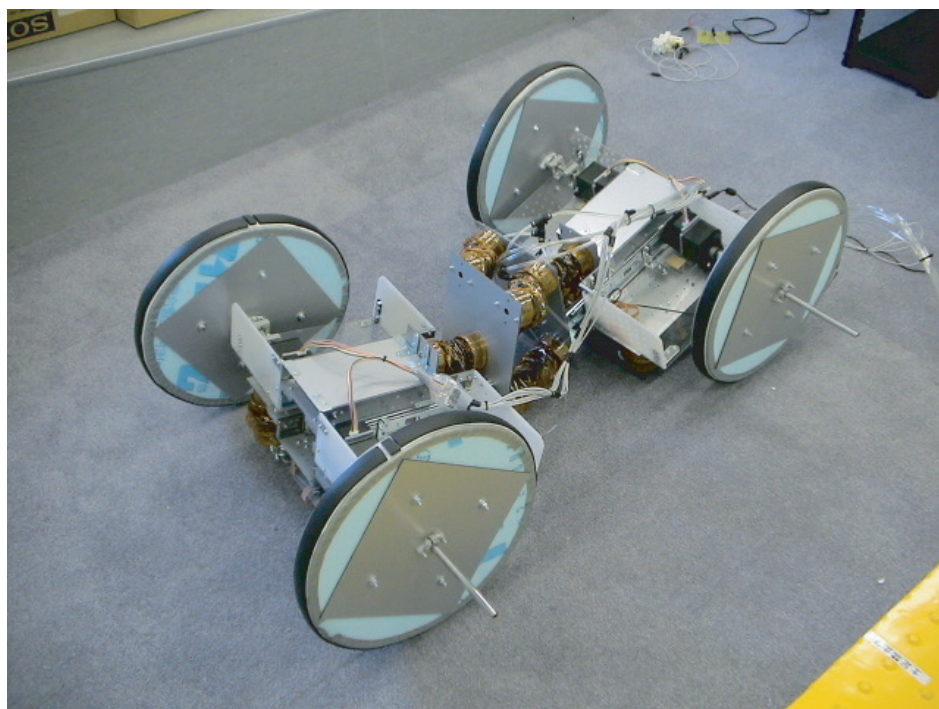
(メーカー仕様より. <http://www.kiso-proxxon.co.jp/top05.html>)

## 5.2 収納効率実験結果

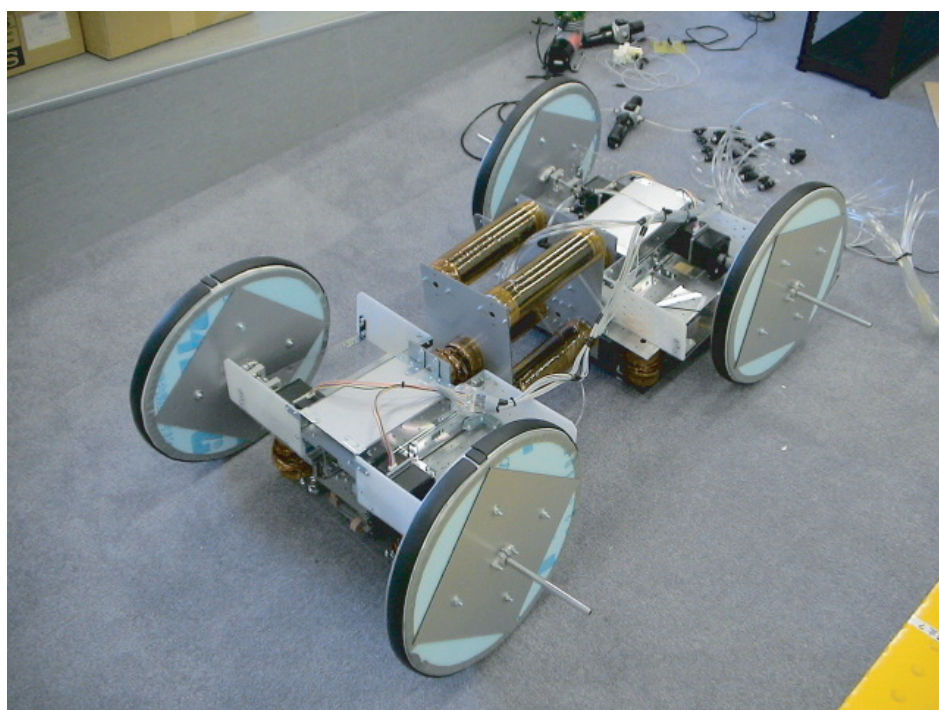
FSBに空気を入れることにより、収縮状態から展開状態へと移行する．このとき，中間部フレームが230 [mm] 膨張展開し，本移動ロボットのフレームとして使用に耐えることを確認した．これにより，展開状態の全長1000[mm] から，収縮状態の全長770 [mm] へと230 [mm] 全長を縮めることが出来ることを確認した．展開時間は8秒である．

$$\text{収納効率} = \frac{\text{展開時の容積}}{\text{展開前の容積}} \quad (5.1)$$

とすると，収納効率は30 [%] 程度の向上となった．



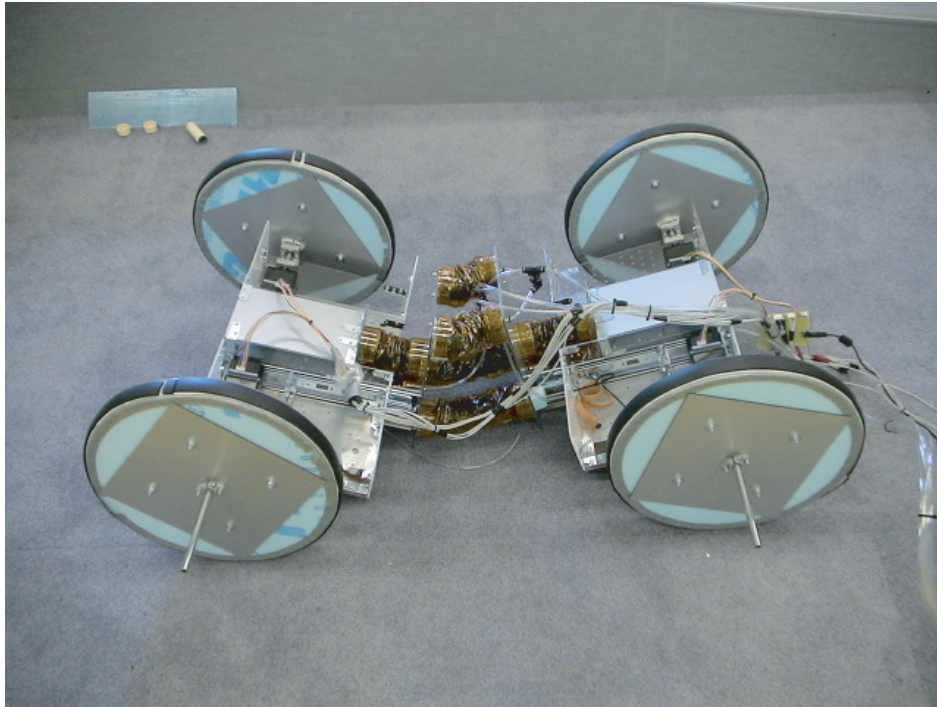
(a) 展開前



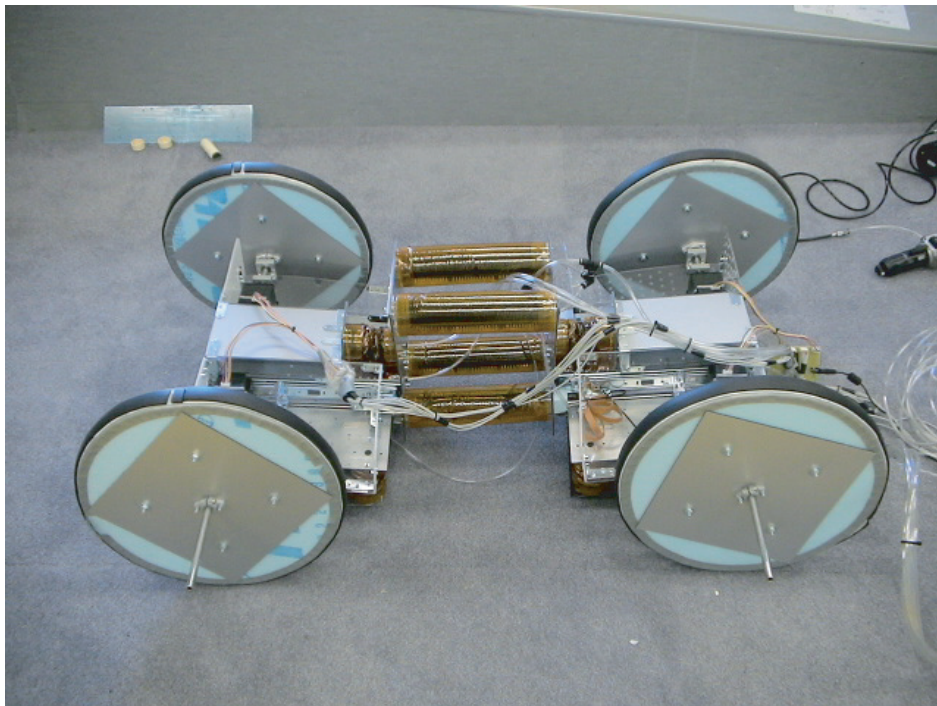
(b) 展開後

図 5.8: 中間インフレーターブルフレーム：俯瞰





(a) 展開前

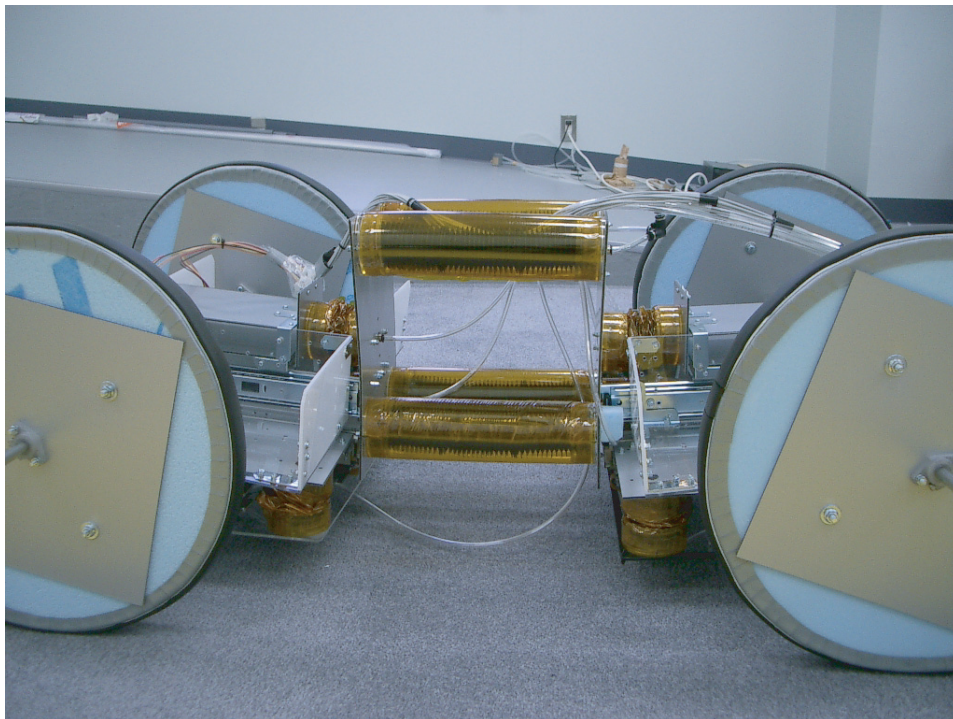


(b) 展開後

図 5.9: 中間インフレーターブルフレーム：側面



(a) 展開前



(b) 展開後

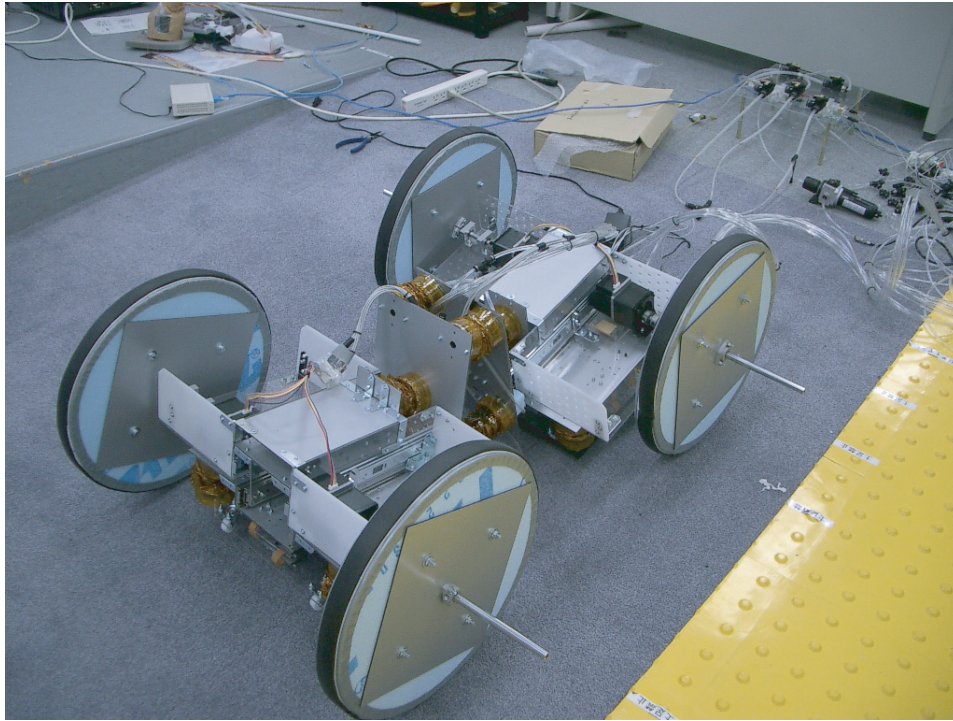
図 5.10: 中間インフレーションフレーム：側面（拡大図）



### 5.3 障害物乗り越え実験

実験方法は、JAI-Rover-I を高さ 17 [cm] の障害物に対して正対させ、障害物乗り越え実験を行う。

本実験結果を図 5.11～5.15 に示し、障害物乗り越えが可能であることを確認した。また、障害物乗り越え時間は約 10 分であった。



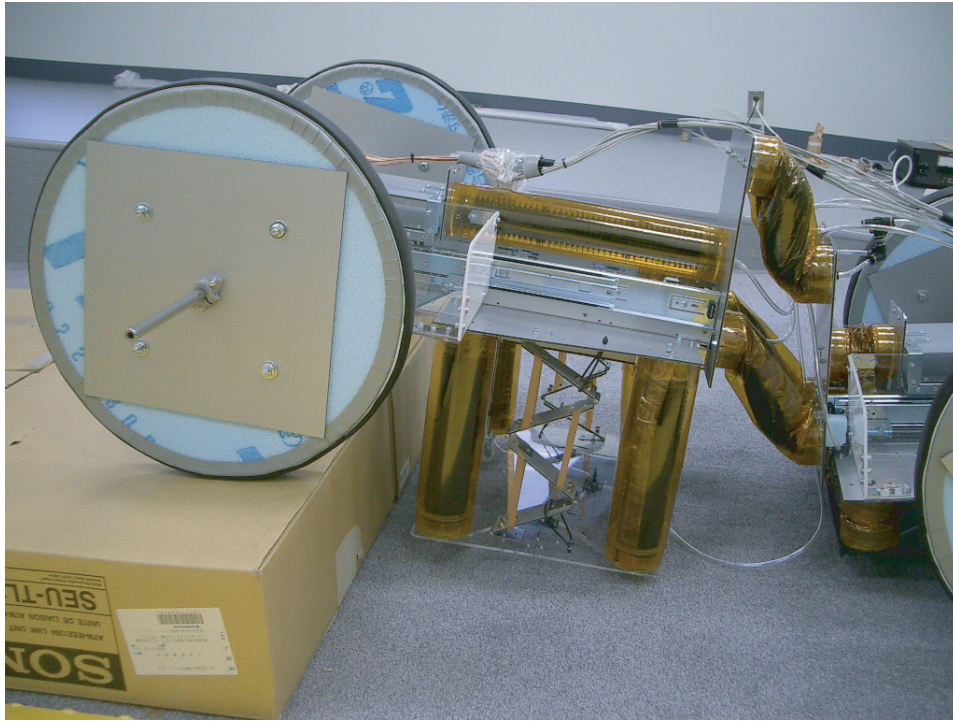
(a) Step 1 / 9 : スタート



(b) Step 2 / 9 : フロントジャッキアップ

図 5.11: 障害物乗り越え実験 : STEP 1~2 / 9





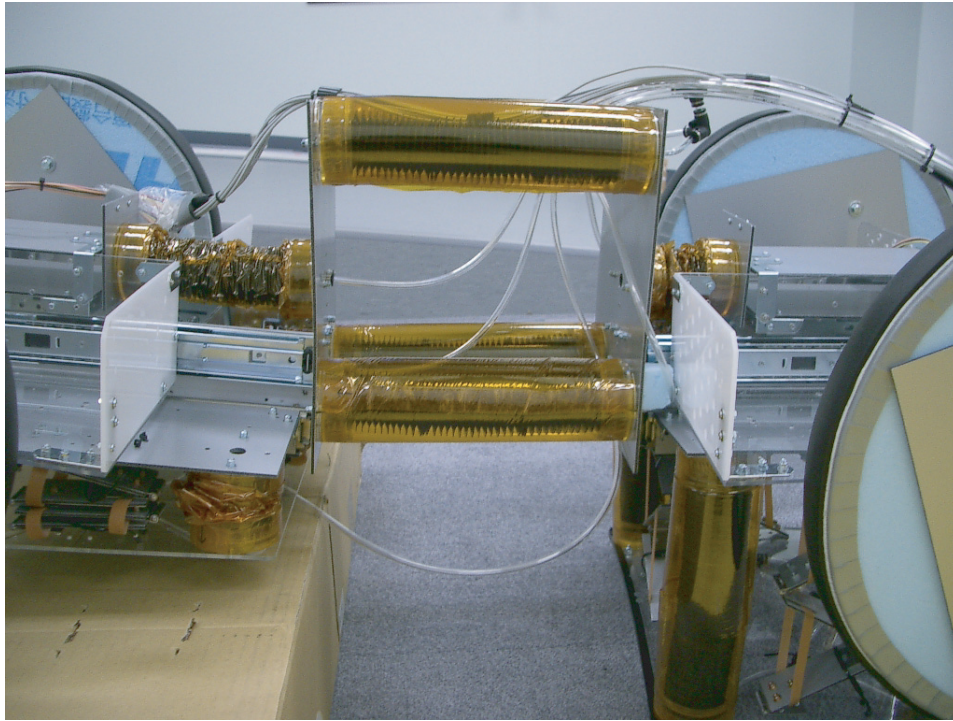
(a) Step 3 / 9 : フロントレール展開



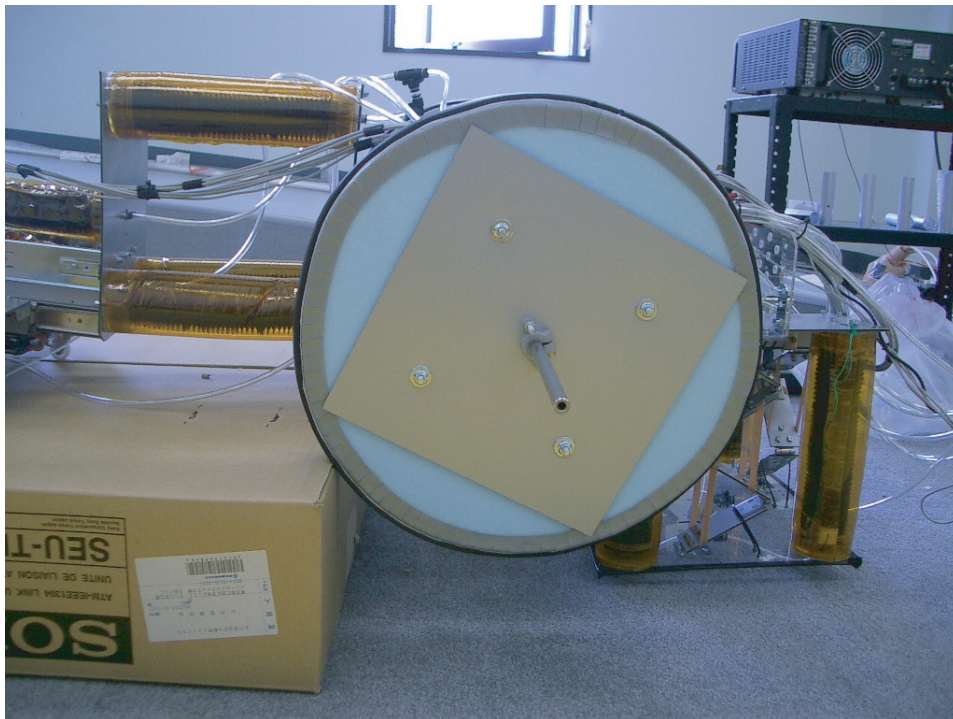
(b) Step 4 / 9 : フロントジャッキダウン

図 5.12: 障害物乗り越え実験 : STEP 3~4 / 9





(a) Step 5 / 9 : フロントレール伸縮 & リアジャッキアップ



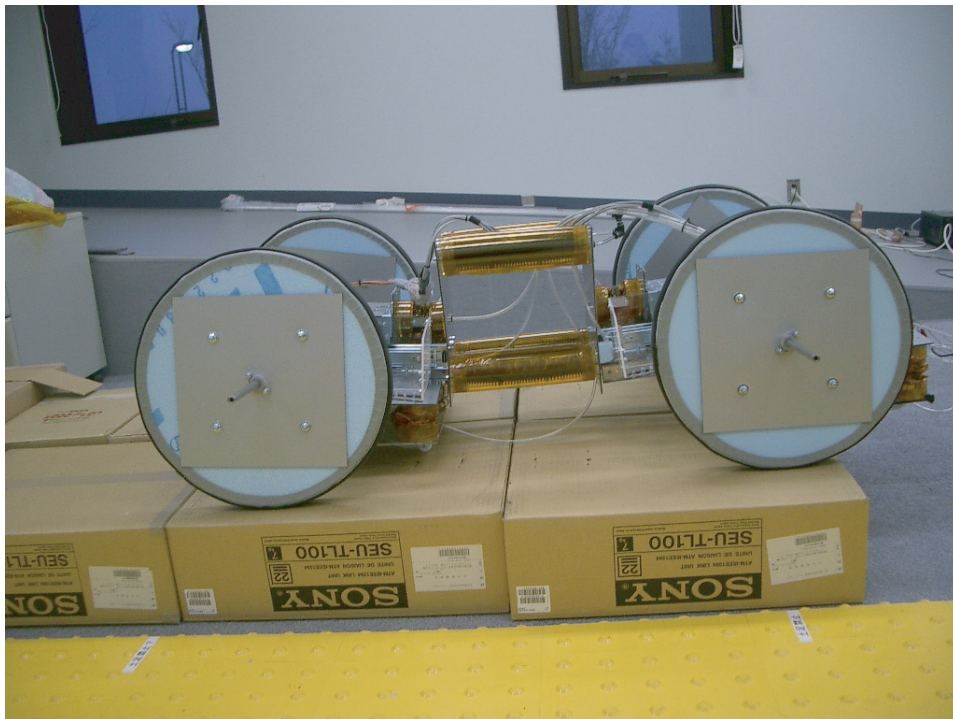
(b) Step 6 / 9 : リアレール展開

図 5.13: 障害物乗り越え実験 : STEP 5~6 / 9



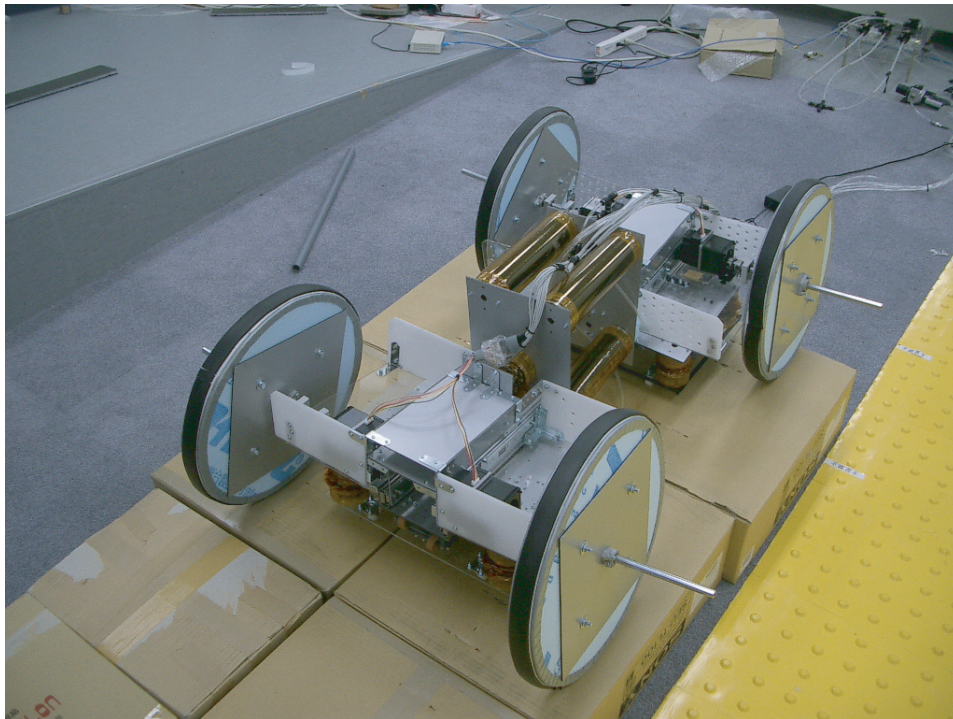


(a) Step 7 / 9 : リアジャッキダウン



(b) Step 8 / 9 : リアレール収縮

図 5.14: 障害物乗り越え実験 : STEP 7~8 / 9



(a) Step 9 / 9 : 障害物乗り越え完了！

図 5.15: 障害物乗り越え実験 : STEP 9 / 9



## 第6章 考察

### 6.1 エアジャッキ

本障害物乗り越え機構に適用しているジャッキは、展開方向を拘束するために、蝶番で平板を接続した折りたたみ機構を採用しているが、この折りたたみ機構には、4本のFSBが均等に展開するためにゴムの張力を利用して4本の内圧差を減少させている。このゴムは市販の強い輪ゴムを適用しているだけなので、内圧の平均化は大雑把なものとなっている。このため、ジャッキとしての機能の信頼性を上げるためには、4本のFSBに対する展開距離と内圧調整を行うか、展開方向の不安定さが無視できるほど短いFSBを多段に連結して瞬間展開を繰り返すか、または他の機構を利用したハードウェアによる拘束が必要となる。これらの方法のうち、4本のFSB内圧と展開距離を制御する方法は、空気漏れを含めた流量制御や、膜面展開形状の制御を行うこととなるため、非常に困難であり、早期の開発を求める場合、これらは現実的ではない。そこで短いFSBの多段連結による瞬間展開法か、Xジャッキに用いられている拘束機構を適用することがジャッキ部の信頼性の向上に有効であると考える。

### 6.2 収納効率向上実験結果

収縮時のロボットの全長は展開時に比べ230 [mm]短くなることが確認できた。これにより、従来の柔軟性のないフレームで構成されているときを100 [%]とすると、収納効率が30 [%]ほど向上することがわかった。また、駆動部の形状や重量等を工夫すれば、折りたたんで収納することも可能になるため、従来の柔軟性のないフレームをFSBに置換することは収納容積の低減に非常に有用であるといえる。また、展開状態のFSBの曲げ剛性については、本研究の障害物乗り越えを行うロボットのフレームとして十分に使用に耐えられるものを実現した。また、FSBの内圧を調整することにより、中間部のフレームに柔軟性を与えることも可能であることを確認した。ただし、本研究で適用しているFSBは密閉精度がそれほど高くないため、空気漏れの影響が大きく、FSB内に空気を充填しても10秒ほどで膜面に内圧がかからなくなる。そのため、現在のところはFSBをフレームとして使用する際にはコンプレッサで空気を送り続けている。実際に現代社会で機能している内圧を封入する膜面構造物も定期的に空気を送り込んでいることから、完全にコンプレッサレスというわけにはいかず、実用化の際にもコンプレッサで定期的に空気を送り込む必要がある。また空気は膜面を通して外部に漏れていくので、この問題に関して

は使用目的に応じて実用に耐えられる程度にFSBの密閉精度を高めるしかない。また本研究で製作したロボットは重量、寸法がともに大きくなってしまったため、本ロボットの前後部を接続する中間部フレームのように両端の荷重を支える部分にFSBを適用した場合、FSBに内圧がかかっていないペシャンコ状態でロボットを移動させると、ロボット前後部の慣性による引っ張りやねじり荷重がFSB膜面の一部に集中し、膜面に大きなダメージを与えることがわかった。このため本ロボットの中間部フレームは、収納状態という膜面内圧がかかっていない状態におけるロボットの移動の際に、取り扱いがデリケートなものとなってしまった。この結果より、内圧がない状態のFSB両端に荷重がかかる場合は、膜面材料の強度とロボット質量とのバランスが重要となり、このバランスがあまりにアンバランスになると、収縮状態でロボットを扱ったときにFSBにダメージが集中して破損することがあることがわかった。

## 6.3 障害物乗り越え実験結果

本障害物乗り越え機構により、高さ170 [mm]の障害物を移動ロボットが乗り越えることを確認した。このとき、本移動ロボットが障害物乗り越えに要した時間は約10分である。この時間は、ほかのクローラやアームによる障害物走破を行うロボットと比較すると良いものではない。また実際のレスキュー現場でロボットがレスキューチームとの連携を取るためには搜索要求を受けてから2分以内で搜索結果を返す能力が要求される。以上の前提と本実験結果からFSBを適用した障害物乗り越え機構の有効性について考察する。

まず本障害物乗り越え機構が、障害物乗り越えに10分の時間を要する原因を追求したところ、以下の問題が挙げられた。

- FSBの空気密閉精度の悪さによる出力低下および操縦性悪化によるタイムロス
- ロボット部材(アクリル板, ポリカーボネート板)の剛性不足によって発生したスライド部の干涉摩擦によるエネルギーロスに起因した操縦性悪化によるタイムロス
- FSBとコンプレッサ送吸気能力のバランスによって増減する展開時間

以下では上記の各問題に対する考察を述べる。

### 6.3.1 FSBの空気密閉精度による出力低下および操縦性悪化によるタイムロス

本研究で製作したFSBは、素人が手作りしていることによる製作精度の悪さと、密閉精度を高めるように設計していないという設計段階による問題のため、空気密閉精度が大

変悪い。また本FSBには膜面内の内圧調整機能を実装していないため、このままFSBの密閉精度を高めても膜面内圧が高圧になりすぎてFSBが破裂してしまうという問題がある(図6.1に膜面内圧が高圧になりすぎて破裂したFSBを示す。)。本空気圧回路には圧力調整用レギュレータが送気用のコンプレッサ2台のそれぞれに接続しているが、これは大元の空気圧を0.1 [MPa]に調整しているだけであるため、各FSBそれぞれには一律の内圧を与えているわけではない。そのため手動制御弁を開閉するたびに高圧であったFSBの空気が低圧のFSBに流れ込み、高圧状態のFSBの剛性が失われるという問題があった。それら高圧であったFSBが重要な荷重を支えていたりするとロボット全体のバランスが崩れ、障害物乗り越え作業を著しく困難化させる。本研究ではこの問題に対しては2台の送気側コンプレッサを用意することによって応急処置的に対処しているが、コンプレッサ数を削減して実用化を図る場合は、各FSBに内圧調整機構を実装することが必要不可欠となるだろう。またこの密閉精度に関する問題は、吸気側に対して与える影響も大きい。これは吸気側コンプレッサの単位時間当たりの吸気量が膜面内に膜面外から流入する空気量を超えなければ収縮することが出来ないからであることと、本ロボットは展開していない箇所のFSBは常に収縮状態であるため、収縮用コンプレッサが一元化されている本空気圧回路の場合、一つのFSBの空気漏れの密閉精度の悪さが収縮状態の数だけ累乗されて影響するためである。この影響を最も受けるのが収縮方向に出力するときのレール部に配置されたFSBである。このFSBは一本でジャッキ部、もしくは駆動部を前後にスライドさせる働きをするもので、このポイントは後に述べる部材の剛性不足による摩擦も増加しており、特にモータを駆動させずに駆動部をFSB収縮のみによってスライドさせることを考えた場合、収縮出力不足でレールが収縮しきれないことがわかった(図6.2)。この問題に対しては、FSBの密閉精度を上げるほかに、車輪に突起部をつけて障害物へ回転トルクを確実に伝達させる機構を作り、レール部FSBへの負担を低減することや、吸気側の空気圧回路にコンプレッサの吸入流量が、FSBへの空気流入量を超えるような設計が必要となる。

### 6.3.2 ロボット部材の剛性不足によるエネルギーロスに起因した操縦性悪化によるタイムロス

本ロボットはロボット部材の軽量化を目的にアクリル板やポリカーボネート板を多用して設計されている。だが本設計ではジャッキ部と駆動部において必ず曲げ荷重による誤差が発生するものとなっていたため、その値が部材の剛性不足により大きくなり、相乗効果で駆動部底面とジャッキ部上面が干渉し、伸展レールによる前後スライド部に摩擦が発生するという問題がある。特にジャッキ部上面にはジャッキ部4本のFSBを設置するためにネジやナットが突出しているため、前後スライドする駆動部底面が曲げによってたわみ、それらに引っかかるという問題があった。これにより伸展レールに使用されているFSBに必要以上の負荷がかかり収縮出力不足という大きな原因となり、ひいては操縦性の悪化を招いていた。この問題は、材料物性とモータ配置や前駆動部重量が大型化してしまった

ために発生した剛性不足であるため、これらの設計見直しにより干渉摩擦の発生を防ぎ、障害物乗り越え作業に対する困難化を防止することができる。本研究では応急処置的に駆動部底面およびジャッキ上面間にフリーベアリングを設置することにより剛性不足による干渉摩擦を低減している。

### 6.3.3 FSB とコンプレッサ送吸気能力のバランスによって増減する展開時間

FSB は膜面構造物であるため、伸縮展開を行うためにはコンプレッサの送吸気能力の高さがじかに現れる。本研究における空気圧回路で伸縮展開を行った場合、FSB 一本あたりの展開に約 8 秒の時間を要した。そのためジャッキ部においては展開時間が単純計算その 4 倍かかることになり、実際 30 秒程度でジャッキアップを完了する。これらを吸気側に関しても計算すると、

- フロントジャッキアップ工程 (32 秒)
- フロントレール伸展工程 (8 秒)
- 前進行動 (2 秒)
- フロントジャッキダウン工程 (30 秒)
- フロントレール収縮工程 (8 秒)
- 前進行動 (2 秒)
- リアジャッキアップ工程 (32 秒)
- リアレール伸展工程 (8 秒)
- 前進行動 (2～10 秒) ; この工程において車輪が障害物とスリップし、タイムロスが起こる。
- リアジャッキダウン工程 (30 秒)
- リアレール収縮工程 (8 秒)

最速でも上に示した計 170[sec] が障害乗り越えに必要となる。コンプレッサ送吸気能力の増大化、空気密閉精度の向上、そして展開膜面の全長が乗り越えるべき段差に応じて変化し、送り込むべき空気の量を最適化するような機構が必要となる。本手法には短い全長で多段連結した FSB を順次膨張展開させることによってジャッキアップ&ダウン距離を調整できるようになるものと考えられる。

## 6.4 本障害物乗り越え機構

本研究を通して本稿で提案した障害物乗り越え機構は実用に適しているか考察する。

まず本障害物乗り越え機構を実用化するためには、「乗り越え時間が長すぎる」、「膜面が破れる可能性がある」、「コンプレッサの数が多すぎる」、「あらゆる障害物に対応できない」、「意外と全備重量が重い」という問題を解消する必要がある。

まず、「乗り越えに要する時間が長すぎる点」に関しては、前節でも述べたとおり、「操縦性向上」、「ロボット部材および寸法に関する設計の見直し」、「コンプレッサ送吸気能力の増大化」、「空気密閉精度の向上」、「障害物高さに対する展開膜面全長の最適化機構の実装」の以上5点が必要不可欠である。これらのうち、コンプレッサ送吸気能力の増大化と空気密閉精度の向上に関しては早い段階で限界に達する。そのため、これらの能力があまりに向上されない場合は、障害物乗り越え速度という点での本機構のメリットは無いこととなる。

次に「膜面が破れる可能性がある」という懸念であるが、確かに膜面構造物であるため、突出物の多い瓦礫上での使用に本障害物乗り越え機構が適しているかは定かではない。また、本膜面材料に用いているカプトンフィルムは引っ張り強度や耐折り回数において非常に優秀であるが、耐刃性能に関しては非常に脆く破れやすい。そのため、カプトンフィルムを今後も使用する際は、フィルム表面をケブラー素材のような防刃性に優れた素材で覆うことが必要となる。また、カプトンフィルムではなく消防用ホースを用いるという手法も考えられるが、消防ホースそのものは円筒軸方向に対する伸縮率が非常に低いので、ジャッキ下に本展開方向拘束機構に用いた折りたたみ機構のように折り曲げて配置し、送吸気することで稼動するジャッキシステムへと変更する必要があるだろう。膜面を傷つける問題に対しては以上二点の対処法で、内圧による破裂を防ぐためには、空気密閉精度を高めながらもFSB内圧調整機能を付加すれば問題が解決する。

次に「コンプレッサの数が多すぎる」という問題に対しては、コンプレッサの送吸気能力がロボット全体の反応速度に直結するため、作業目的に応じてトレードオフをするしかないと言える。

次に「あらゆる障害物に対応できない」という問題に対してであるが、現状ではFSBは完全に展開するか収縮しているかの状態でなければ基本的に安定状態ではなく、鉛直方向へと展開するがゆえに展開過程においては展開方向が拘束された後も、両端面間の膜面がどのような挙動をとるか予測が出来ない。この問題に対しては、FSBがジャッキ外面へとはみ出ないように、そして外部からの異物が入り込まないようにジャッキ全体をカバーすれば良い。また、現在のジャッキは底面が平面であるため、ジャッキアップするためには滑りが多すぎて、不整地上でジャッキアップを行えば重心位置が高くなることによりロボット全体が転倒することが考えられる。この問題に関しては、不整地上での実験を行い、対処法を考えるしかないが、そもそも本障害物乗り越え機構は重心移動を可能としたものであるため、転倒防止するように重心位置を移動させる制御を行えば、転倒しにくいロボットを作ることが出来、その結果不整地でもある程度の対応をしながらジャッキアップが可能ではないかと推測する。また本障害物乗り越え機構は、FSBの全長を伸ばすほ



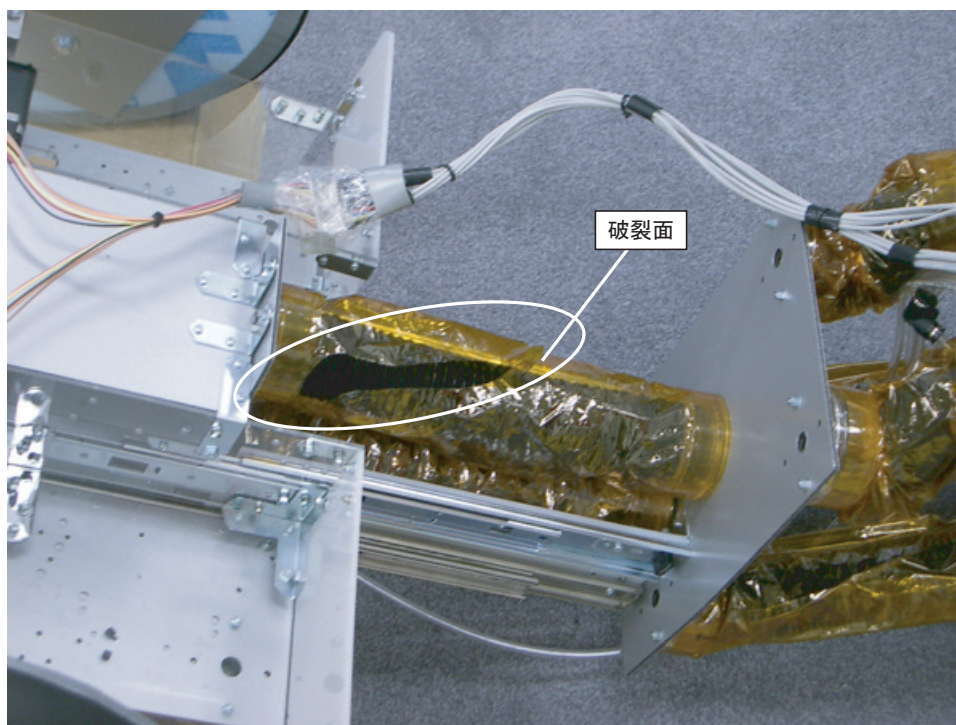


図 6.1: 破裂した FSB

ど、従来までの送りねじ式や油空圧シリンダによる展開方式に比べて単純かつ大きな伸縮率を得ることができるので、もっと大きな障害物の乗り越え専用として適用すれば非常に障害物乗り越えに有利になると推測する。

最後に「意外と全備重量が重い」という問題に関してだが、これはロボットにおける駆動部が大きくなりすぎたためである。これら駆動部の軽量化とコンパクト化はインフレーターロボット全体の操縦性の向上、部品信頼性の向上、必要出力が少なくてすむようになることにより展開容積の縮小化による展開時間の高速化、コンプレッサ数の削減、ロボット部材寸法の縮小化および FSB 置換箇所の増加など、全ての面に対して影響を与える。よって、この駆動部をいかにコンパクト化するかが今後のインフレーターロボットの自由度の未来を握っているといえる。

以上の点に関して改良を行えば、現場でも使用可能な障害物乗り越え機構を有するインフレーターロボットが実現可能となると考えられる。

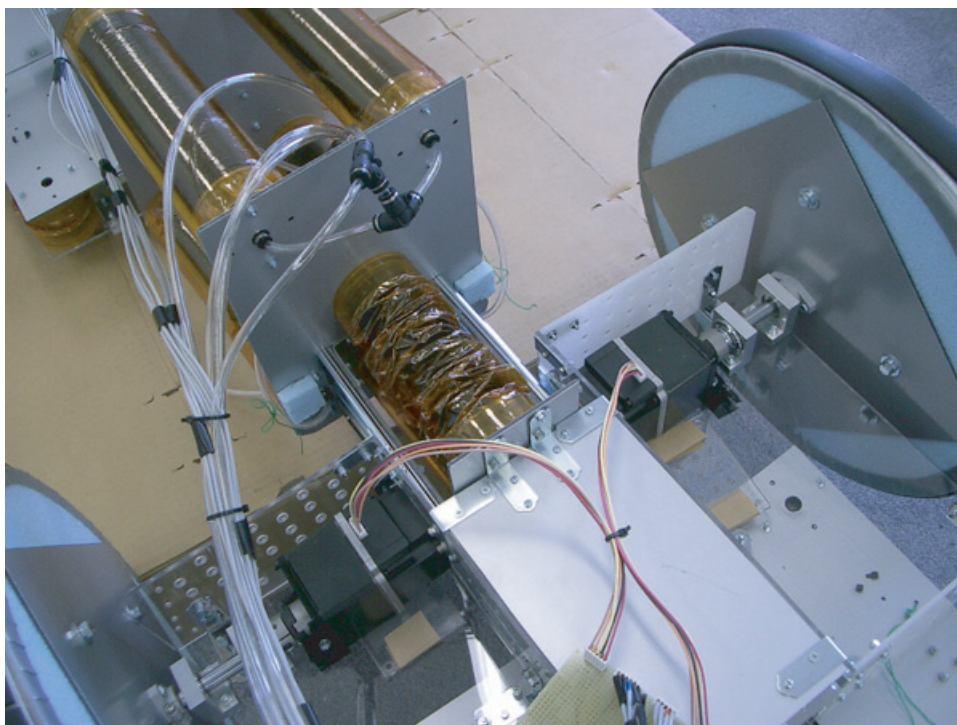


図 6.2: 収縮出力不足で収縮しきれない駆動部スライド用レールの FSB

## 第7章 結論

本研究では、本研究室で開発したインフレータブルアクチュエータ FSB を適用した障害物乗り越え機構を有する移動ロボットを製作し、収縮実験および障害物乗り越え実験によって以下の結論を得た。

- FSB をロボットのフレーム部材に適用することにより、ロボットの収納効率の 30% 向上を実現した。
- 展開後の FSB はロボット部材として十分に耐えられることを確認した。
- 内圧を大まかに調整することによって、FSB の剛性を変化させることができることを確認した。
- 本障害物乗り越え機構によって高さ 17 [cm] の障害物を約 10 分で乗り越え可能であることを示した。
- 本障害物乗り越え機構の実用化に必要な改良点を第 6 章考察において示した。
- 駆動部の軽量化および縮小化が、インフレータブルロボットの自由度を決定づけることを述べた。

以上より、本論文では、ロボットへのインフレータブル構造物の適用について検討し、その有用性について述べ、実際にインフレータブル構造物を適用した移動ロボットを製作して、障害物乗り越えの検証実験を行うことにより、実験結果から有用性および問題点と今後の実現可能性について述べた。

## 第8章 今後の展望

本研究の今後の展望を以下に示す.

- 本障害物乗り越え機構に適用しているジャッキの展開拘束機構に、ゴムと蝶番および平板利用した折りたたみ機構を適用しているが、ゴムの信頼性や蝶番の加増部における材料強度に起因する機構であるため信頼度が低い。そこで、短いFSBの多段連結による瞬間展開法か、Xジャッキに用いられている拘束機構を適用することがジャッキ部の信頼性の向上に有効であると考える。
- 「ロボットの操縦性向上」、「ロボット部材および寸法に関する設計の見直し」、「コンプレッサ送吸気能力と重量とのバランス調整」、「空気密閉精度の向上」、「障害物高さに対する展開膜面全長の最適化機構の実装」
- 駆動部のコンパクト化によるロボット全体の軽量縮小化を行い、FSBの適用箇所および、駆動必要出力のパワーダウンを行い、省エネルギーで稼動するFSBを適用した移動ロボットの製作。

# 参考文献

- [1] 田所 諭, 「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 803-806, 2003.
- [2] 特定非営利活動法人 国際レスキューシステム研究機構：  
<http://www.rescuesystem.org/>
- [3] 高森, 田所他, 「レスキューロボット機器研究会報告書」, 日本機械学会, 1997,  
<http://www.r.cs.kobe-u.ac.jp/tadokoro/rescrep>
- [4] Robine R. Murphy, 牧田 忍 (翻訳), 「ニューヨーク世界貿易センター (WTC) でのレスキューロボット」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 794-802, 2003.
- [5] 防災システム研究所：  
<http://www.bo-sai.co.jp/index.html>
- [6] 「文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 第2回国際シンポジウム論文集」, 国際レスキューシステム研究機構, 2004.
- [7] 特定非営利活動法人 国際レスキューシステム研究機構 (旧 HP) 大大特研究テーマ：  
<http://www.rescuesystem.org/ddt/thema.html>
- [8] 天野 久徳, 「消防防災ロボット」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 778-781, 2003.
- [9] 「救急救助ロボット T-52 援竜」, ”*Newton*,” Vol. 24, No. 4, pp. 78-85, 2004.
- [10] 株式会社テムザック 「援竜 T-52」:  
<http://www.enryu.jp/>
- [11] 森川 泰, 小森川 清, 「情報収集飛行ロボット」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 775-777, 2003.
- [12] 京都大学航空宇宙工学専攻 振動制御工学研究室：  
<http://vib.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>



- [13] 高森 年, 小林 滋, 「災害における羅災者発見とクローラ型ロボット」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 782-785, 2003.
- [14] 神戸大学 高森研究室：  
<http://robomec.cs.kobe-u.ac.jp/>
- [15] UMRS オフィシャルページ：  
<http://www.r.cs.kobe-u.ac.jp/umrs/pukiwiki/index.php>
- [16] 奥川雅之, 三宅 英介, 藤村 甫, 「情報収集型レスキューロボット「BABY II」における自己復帰メカニズム」, 日本機会学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P2-H-41, 2004.
- [17] 広瀬 茂男, 松野 文俊, 「レスキュー用ヘビ型ロボットの開発ー形態設計とその制御ー」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 769-773, 2003.
- [18] N. Sato, F. Matsuno, T. Yamasaki, T. Kamegawa, N. Shiroma and H. Igarashi, “Co-operative Task Execution by a Multiple Robot Team and Its Operators in Search and Rescue Operations,” Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on IROS, pp. 1083-1088, 2004.
- [19] 東京工業大学 広瀬・米田研究室：  
<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/home.html>
- [20] 茨城大学 馬・井上研究室：  
<http://roboken.dse.ibaraki.ac.jp/>
- [21] 浅間 一, 川端 邦明, 倉林 大輔, 嘉悦 早人, 野田 賢一, 「被災者探索用知的データキャリア」, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019, pp. 786-789, 2003.
- [22] 神戸大学 大須賀公一 レスキューロボットに関する研究：  
<http://www.control.mech.kobe-u.ac.jp/osuka/moira.html>  
<http://www.control.mech.kobe-u.ac.jp/osuka/rescue.html>
- [23] 東京工業大学 北川・塚越研究室：  
<http://www.cm.ctrl.titech.ac.jp/>
- [24] Knirps 社  
<http://www.knirps.de/>
- [25] 株式会社アルインコ  
<http://www.alinco.co.jp/>

- [26] 株式会社ハイビックス  
<http://www.hivix.co.jp/>
- [27] 米ジェット推進研究所 (JPL : Jet Propulsion Laboratory )  
<http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/mpfairbags.html>
- [28] 新技術融合シリーズ：第2巻「知的複合材料と知的適応構造物」, 日本機械学会, 1996.
- [29] 「シェルの振動と座屈ハンドブック」, 日本機械学会, 2003.
- [30] 南 宏和, 「膜面構造物設計における膜の弾性理論」, 日刊工業新聞社, 1998.