

Title	FSBを用いた多機能移動機構を有するミニズ型ロボットの開発
Author(s)	久保, 貴史
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3615
Rights	
Description	Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

FSBを用いた多機能移動機構を有する
ミミズ型ロボットの開発

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

久保 貴史

2007年3月

修 士 論 文

FSBを用いた多機能移動機構を有する
ミニズ型ロボットの開発

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

510032 久保 貴史

提出年月: 2007年2月

概要

本研究では、空気圧ソフトアクチュエータである FSB (Film Surfaced Bellows) を用いることによって、軽量で低コストなミミズ型の移動ロボットを開発した。また、FSB の特性であるフレキシブル性により能動的な方向転換が、FSB の並列接続や側面固定により移動機構を拡張することによって能動的な方向転換が可能である。このように、受動的かつ能動的に方向転換が可能である多機能移動機構によって、壁面などに沿って移動する、溝・段差・ケーブルなどを乗り越える、床から壁 (90 ° の勾配) を登り始めるなど、優れた環境適応性を有する。さらに、この技術を応用し、配管内移動ロボットを開発した。これらのロボットは、配線作業や清掃、配管内検査、レスキューなどに応用が可能である。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
第2章	関連研究	2
2.1	モータを用いた移動ロボットとソフトアクチュエータを用いた移動ロボット	2
2.2	比較検討	3
第3章	ソフトアクチュエータ	5
3.1	ソフトアクチュエータ	5
3.2	FSB	5
第4章	シミュレーション	8
4.1	仕様	8
4.2	モデリング - レオロジー物体 -	8
4.3	シミュレーション	8
第5章	FSBを用いた移動ロボット	11
5.1	ロボットの基本構造と特徴および問題点	11
5.2	能動的な方向転換	13
5.2.1	並列接続	13
5.2.2	側面固定	16
5.3	配管内移動ロボット	18
5.4	ロボットの制御方法	18
第6章	動作実験	22
6.1	壁 - ホースの収納 -	22
6.2	床から壁	22
6.3	障害物, 溝, 段差回避	22
第7章	結論	26
7.1	考察	26
7.2	結論	27

第1章 序論

1.1 背景

近年, 清掃, 警備, レスキュー, 案内, 研究, 娯楽などを目的とした移動機構を必要とするロボットが実用化されている. これらのロボットは, それぞれの用途に応じた移動機構や制御アルゴリズムがデザインされたことによって, 高い移動能力を示す. ここでデザインされた機構は, モータによって車輪やクローラ, 脚型を始めとした様々なフレームを動かすものである.

しかし, モータを用いた機構では重量やコスト(時間とお金)の面に問題がある. モータや車輪, クローラ, フレームなどは金属製のものがほとんどであるため組み合わせることによってロボットの重量が増大する. 重量の増大は, 移動可能なフィールドの減少や運搬性の低下を生じる. また, 製作には設計, 工作, 組み立てと, 多くの人手と時間が必要であるし, ロボットを小型化したり多様な動きを可能にしたりするとモータの価格がロボットの価格をつりあげる. さらに, これらの移動ロボットが活動する環境は一様ではないのでフレームに柔軟性や可変性が求められることがあるが, モータを用いた移動機構では, フレームが金属製で他の部品と接続, 固定されているために柔軟性や可変性を得ることができない.

そこで, 最近ではソフトアクチュエータを用いた移動ロボットの研究開発が行われている. ソフトアクチュエータを用いた移動機構ではアクチュエータにフレームの役割を担わせることで, フレームに柔軟性や可変性を付加することができる. また, アクチュエータとフレームの一本化に加え, 軽量, 小型化可能であるといったソフトアクチュエータの特徴によって重量やコストの問題もクリアすることができる. このように, ソフトアクチュエータを用いた移動ロボットにはモータを用いた移動機構を有するロボットに対して大きな利点があり, 今後の展開が期待されている.

1.2 目的

本研究の目的は, ソフトアクチュエータを用いた移動ロボットの開発である. 前節で述べたように, ソフトアクチュエータを用いることにより, 重量やコストを抑える, フレームに柔軟性や可変性を付加する, といったことが可能である. 本研究では, ソフトアクチュエータによるこれらの利点を活かし, モータを用いたロボットにはない, 軽量, 低コストで環境適応性に優れた移動ロボットの開発を目指す.

ソフトアクチュエータには本研究が開発したFSB(Film Surfaced Bellows)を用いる.

第2章 関連研究

本章では、モータを用いたロボットとソフトアクチュエータを用いたロボットについてそれぞれ具体例を述べることによって、モータを用いた移動機構が抱える問題点を示すと共にソフトアクチュエータを用いた移動機構の有用性を明確にする。

2.1 モータを用いた移動ロボットとソフトアクチュエータを用いた移動ロボット

モータを用いた移動ロボットを以下に挙げる。まず、警備や清掃、案内ロボットには、ActivMedia Robotics 社の PIONEER3 のようにモータで車輪を回転させる機構を持ったロボットが用いられている [13]。このタイプのロボットは小さな溝や段差、緩い傾斜面などを進むことができる。しかし、階段のような人間のために設計された場所を移動することができないため、ひとつのフロア上しか移動することができない。

次に、レスキューロボットには神戸大学工学部機械工学科大須賀研究室の MOIRA のように不整地や狭隘空間を走破するためにモータでクローラを動かす機構を持つロボットが用いられている [8][5][6][7]。しかし、このタイプのロボットは、フレームが金属製で他の部品と接続、固定されているために決まったサイズの狭隘空間でしか使用できない。さらに、形状が複雑であるため、瓦礫が各凸部分に引っかかる、クローラ部分に瓦礫がはいりこみ移動困難になる。また、レスキューロボットは複数台を同時に投入することが求められているため、1台のコストを抑える必要がある。

2足歩行ロボットもモータを用いた移動ロボットである。2足歩行ロボットは、モータを用いて足型のフレームを動かす。人間が移動できる場所を同じように移動できるが、制御アルゴリズムが複雑であるし、コストも高い。

同じく、足型のフレームを用いているロボットに大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻システム科学領域新井研究室のアスタリスクがある。このロボットは、モータで足型のフレームを動かす機構を用いて金網の壁を移動することができる [10]。しかし、複雑な動作を可能にしている6本の足は、小型のモータ4個とフレームで構成されているため、コストが掛かる。

また、全てのロボットは本体質量が重いため、可搬性に乏しく衝突時のダメージが大きい。これは、高い可搬性が必要なレスキューロボットや、人やものと衝突する可能性のある清掃、案内ロボットなどにとっては大きな問題となる。図 2.1 にモータを用いた移動機構を

有するロボットを示す。

次に、ソフトアクチュエータを用いた移動ロボットの例を挙げる。まず、立命館大学工学部ロボティクス学科平井研究室と東レエンジニアリング株式会社の KOHARO がある [11][12]。このロボットは、円形のボディを 3 つ組み合わせた形で、内部に 22 本あるいは 18 本の形状記憶合金のアクチュエータが取り付けられている。内部に組み込まれた柔らかいアクチュエータで変形し、不連続な地面の上を転がりながら移動する。また、段差を乗り越えるため、地面の上で跳躍することもできる。

次に、東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻伊能研究室の水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボット（以降 HS）がある [26]。このロボットは、流体圧を利用した水力学的骨格による駆動機構である Hydrostatic Skeleton クローラをアクチュエータに用いており狭隘空間での移動能力を高いものになっている。また、配管内のような狭隘な複雑地形内では地形に対応しながら自動的に旋回することができる。

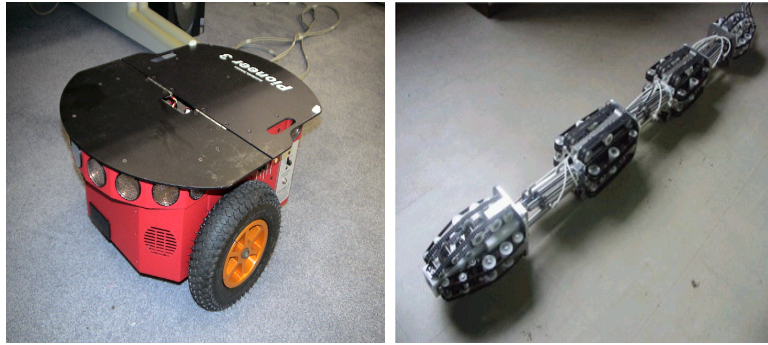
最後に、東京工業大学機械宇宙システム専攻機械創造学講座ロボット創造学分野広瀬・福島研究室の Slim Slime [9] がある。このロボットは、空気圧により伸縮と屈曲を行う単位節を複数直列に連結して構成される 3 次元運動可能な索状能動体である。圧縮空気が中央の主管から 3 本の蛇腹の内部へと蛇腹内部に組込まれた電磁弁を介して供給される。この組込み型の吸気と排気の 2 個の電磁弁により各蛇腹は独立して伸張・収縮・固定の動作モードがとれ、単位節を自在に伸縮・屈曲運動できている。しかし、蛇腹を金属製のシェルで覆っているため、ソフトアクチュエータを用いていながら質量が 12[kg] と重い。

KOHARO と HS は本体質量が軽量なため、可搬性に優れ衝突時のダメージも小さい。また、ソフトアクチュエータ数や長さを変えることで容易にロボットのサイズを変更することができる。図 2.2 にソフトアクチュエータを用いた移動機構を有するロボットを示す。

2.2 比較検討

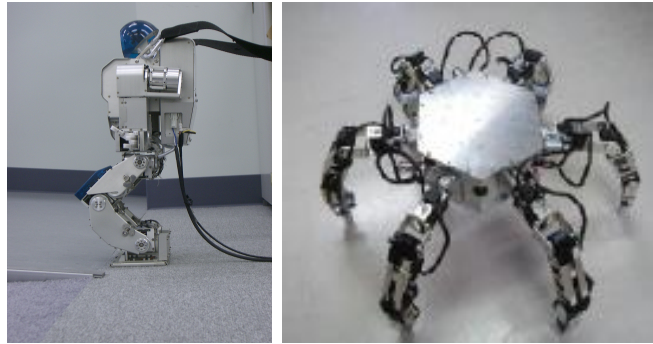
モータを用いた移動機構は、レスキューロボットや清掃、案内ロボットといったアプリケーションにおいて特に問題となる。レスキューロボットでは可搬性が必要であること、清掃や案内ロボットではものと衝突する可能性があることから重量が軽い必要がある。さらに、これらは、複数台のロボットを同時に使用するため、コストが低いことが必要である。また、レスキューや清掃では、移動する環境が一様ではないから、柔軟性が必要である。

このため、レスキューや清掃、案内ロボットの分野で活躍できるロボットをソフトアクチュエータを用いて開発することが有用であると考えられる。これは、現在開発されているソフトアクチュエータを用いた移動ロボットの多くがレスキューロボットであることからわかる。



(a) PIONEER

(b) MOIRA



(c) hoap-2

(d) ASTERISK

図 2.1: モータを用いたロボット



(a) KOHARO

(b) HS

(c) SlimSlime

図 2.2: ソフトアクチュエータを用いたロボット

第3章 ソフトアクチュエータ

本章では、ソフトアクチュエータの定義や特性、具体例を述べる。また、本研究で用いる空気圧ソフトアクチュエータ FSB (Film Surfaced Bellows) についてその構造と特性を述べる。

3.1 ソフトアクチュエータ

ソフトアクチュエータとは、柔らかいアクチュエータのことであり、柔らかいとは、受動的柔軟性を有しているということである。受動的柔軟性とは、ばねのような弾性体としての柔軟性であり、アクチュエータの素材や動作媒体によって決定される [17]。ソフトアクチュエータは柔軟性以外に軽量、小型化可能といった特徴を備えている。ソフトアクチュエータには、マッキベン型ゴム人工筋のようにゴムを素材とし空気圧で駆動される空気圧ソフトアクチュエータや形状記憶合金を用いたものなど様々な形状のものがある [23][24]。

3.2 FSB

FSB (Film Surfaced Bellows) は丁研究室がインフレーターブル構造物を参考に開発した空気圧ソフトアクチュエータである。図 3.1 に FSB の構造を示す。FSB は両端部パーツと蛇腹それらを被う膜面から構成されている。蛇腹には空気穴があり、そこから膜面に気体が到達する。膜面には耐熱性や絶縁性、強度に優れ寸法安定性が高いポリイミドフィルムを用いており厚さは 0.025[mm] である。インフレーターブル構造物とは、膜面内に空気などの気体を充填し内圧を発生させ膜面に張力をかけることにより膨張展開し機能する構造物のことである。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。FSB は、このインフレーターブル構造物の特徴に加え、膜面内の気体を吸引し真空を発生させることにより収縮し展開時と同じ剛性を得ることができる。これにより、展開収縮時では剛性を有しフレームとしての機能を持つ。また、金属部品を使用していないため非常に軽量であり、収縮状態および空気を充填させていない状態では体積を小さくすることが可能であり十分な可搬性を有している。空気圧アクチュエータのため電気部品が使用されておらず故障時に発火することがない。コンプレッサとポンプによる単なる空気の出し入れだけで展開収縮を行うため制御が容易である。軽量であるが 0.1[Mpa] 程度までの圧力で使用可能なため高出力である。そして、蛇腹とフィルムの特性を組み合わせた特性を持つので、伸縮性が高

い, 展開収縮途中ではフレキシブル性を有し環境適応性に優れているといった特性も持つ. 今回製作した, 展開時の長さ 160[mm] 収縮時の長さ 60[mm] 直径 30[mm] の FSB における展開収縮時と展開収縮途中の状態および正面図を図 3.2 に示す. このサイズでは, 展開圧力, 収縮真空度共に 0.02[Mpa] 以上にすることで 1[s] 以内の動作となる (ホースの長さ 1.5[m]). 本研究では円筒膜面端部と膜面側面部の固定にカプトンフィルムシリコン両面粘着テープを使用した. 接着剤を用いることによって, さらに気密性を高めることもできる.

また, 蛇腹だけでは展開時に剛性を得ることができず, フィルムだけでは収縮時に狙い通りの収縮ができないため伸縮性を得ることができない. そこで, FSB は, 蛇腹をフィルムで覆い両者の特性を活かすことによって展開収縮時の剛性と伸縮性を得ている. また, 蛇腹の穴は蛇腹とフィルムの特性をひとつにするために必要である. 図 3.3 に収縮時, 展開時, 収縮展開途中の蛇腹, フィルム, FSB をそれぞれ示す.

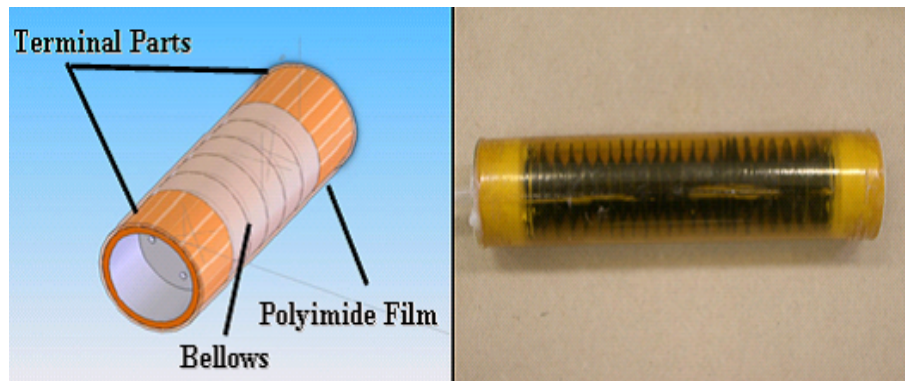


図 3.1: FSB (Film Surfaced Bellows)



図 3.2: FSB の各状態と正面図



図 3.3: FSB の特性

第4章 シミュレーション

4.1 仕様

シーケンス制御を行うには,FSBの展開収縮にかかる時間がわかっている必要がある.そこで,FSBのサイズ(直径,展開時の長さ),ホースの直径と長さ,使用しているコンプレッサとポンプのスペックを入力することで,展開時間[s],収縮時間[s],出力[N],支持力[kg]を出力する仕様をExcelで作成する.この仕様を用いればシーケンス制御に必要なFSBの展開収縮にかかる時間を知ることができる.また,FSBのサイズや出力,支持力を入力し必要なコンプレッサのスペックを知ることやコンプレッサのスペックや出力,支持力を入力して必要なFSBのサイズを知ることでもできる.

4.2 モデリング - レオロジー物体 -

実際にロボットを製作し実験を行う前に,シミュレーションを行う必要がある.そこで,本研究では,FSBをレオロジー物体であると仮定してシミュレーションを行うことにする.レオロジー物体とは,レオロジー的な変形特性を示す物体のことである.例えば,指で物体を押して変形させた後,指を離す.弾性物体はもとの形状に完全に戻り,塑性物体は変形後の形状のままである.そして,レオロジー物体はパン生地やピザ生地,ゼリー,生体組織などのようにこれらの中間的な変形を示す.

レオロジー物体をモデリングするには,格子モデリング法を用いる.質点を四面体の頂点に,三要素モデルを四面体の稜線に配置する.三要素モデルによって,バネとダンパを並列に結合したフォークト部で弾性変形をそれに直列につながっているダンパで塑性変形を表す.これにより,三要素モデルは弾性変形と塑性変形の中間的な変形であるレオロジー変形を表すことができる.三要素モデルとその変形過程を表したグラフを図4.1に示す.

4.3 シミュレーション

FSBをレオロジー物体として扱いシミュレーションを行う.シミュレータは立命館大学平井研究室がHP上で公開している動的変形シミュレータを使用する.このシミュレータは質点と三要素モデルの運動方程式をコンピュータで解くことにより,レオロジー物体の変形を求めている.FSBの動きをシミュレーションするために,三要素モデルの各係数を選

び与える必要がある. 図 4.2 と図 4.3 にシミュレータと並列接続した FSB の動きをシミュレーションした様子をそれぞれ示す. また, FSB の動きをシミュレーションするための三要素モデルの係数などシミュレーションに必要な入力値を付録とする.

FSB をレオロジー物体としてシミュレーションするこの手法では, 入力値がある一定の値を外れるとシミュレーション結果が正確ではなくなる. そのため, 簡単な動きであればシミュレーションを行うことができるが, 複雑な動きはシミュレーションすることができない. これは, FSB をレオロジー物体とした最初の仮定が適切ではなかったからであると考えられる.

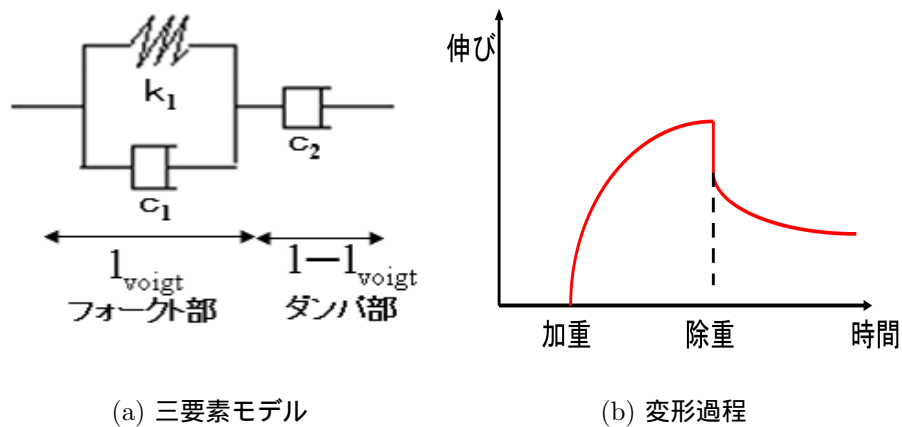


図 4.1: 三要素モデル

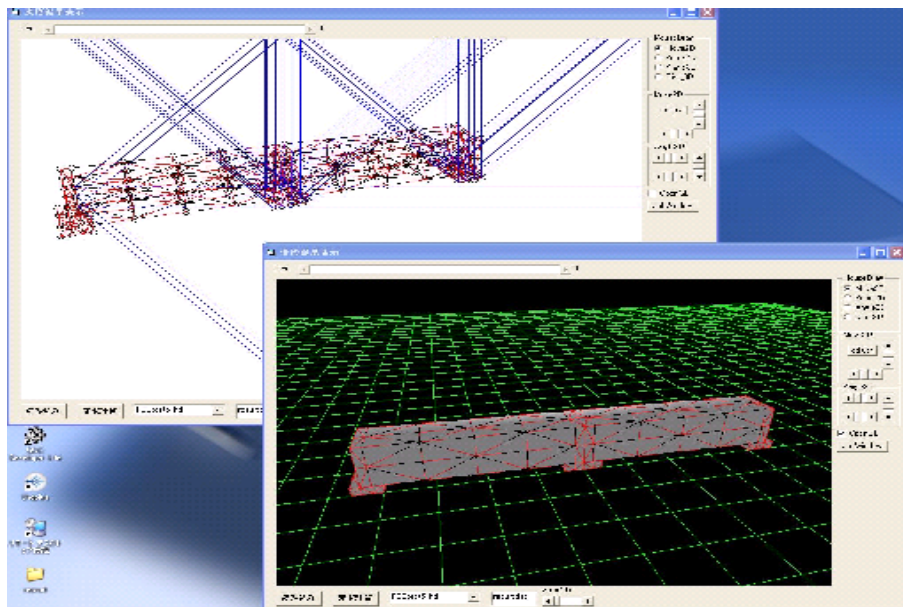


図 4.2: シミュレータ

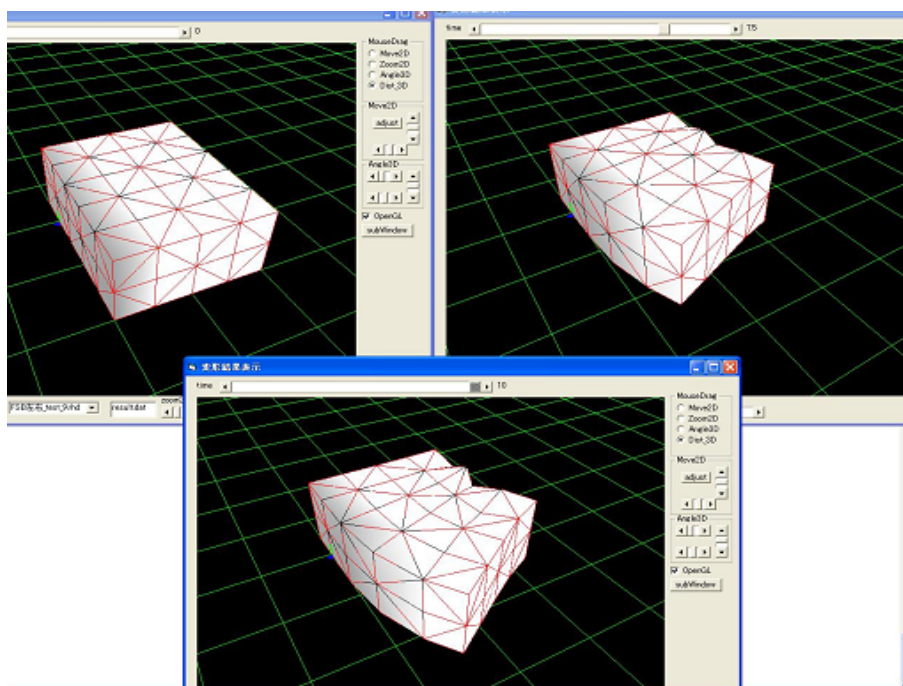


図 4.3: シミュレーション結果

第5章 FSBを用いた移動ロボット

本章では, 前章で述べた FSB を用いた移動ロボットについてその構造や特性, 制御方法を述べる. また, 能動的に進路を選択する手法について2通り述べる. さらに, FSB を用いた移動ロボットを応用した例として配管検査用ロボットについて述べる.

5.1 ロボットの基本構造と特徴および問題点

本研究では, FSB の伸縮性の高さを考慮し FSB と吸盤による移動機構を構成して, ミミズ型の移動ロボットを開発する. 図 5.1 にこれを示す. このロボットは吸盤の吸着開放と FSB の収縮展開の組み合わせによってミミズのように前進と後進を行う. FSB の展開収縮途中でのフレキシブル性により図 5.2 のように壁面や狭隘空間に沿って受動的に方向を変え進むことができる. また, FSB を用いたことにより本体質量が軽量であること, 移動機構に吸盤を用いていることにより図 5.3 のように垂直な壁面を登ることができる.

しかし, この構造では受動的にしか方向転換ができないために, 直進することしかできない. そこで, 能動的な方向転換を可能にし環境適応性を得るために移動機構を拡張する.



図 5.1: FSB を用いたミミズ型移動ロボット

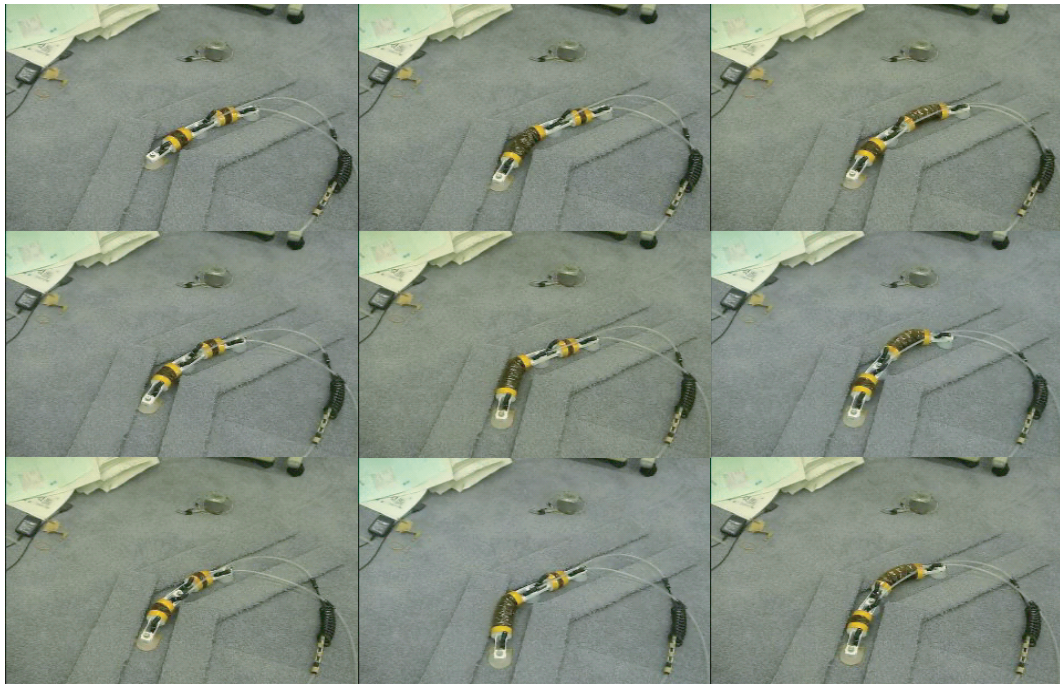


図 5.2: 受動的な方向転換

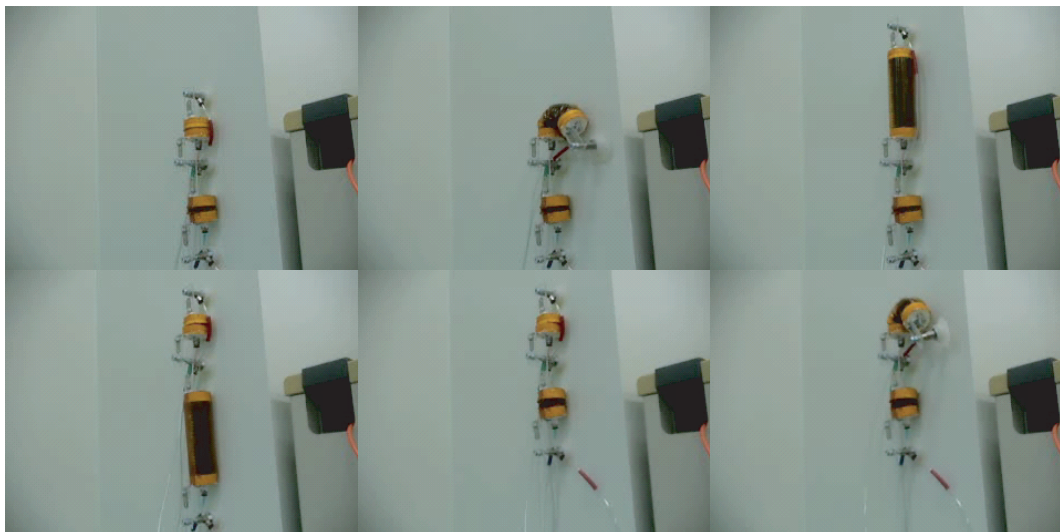


図 5.3: 壁面進行

5.2 能動的方向転換

本節では前節で述べたように能動的に方向転換をし、進路を選択する機構について2つ述べる。

5.2.1 並列接続

1つ目は、FSBを並列に接続するものである。図5.5にこの機構を付加したミミズ型移動ロボットを、図5.6に方向転換し移動する様子を示す。FSBを並列に接続することによって、展開収縮の組合せにより、2本なら2方向、3本なら8方向の選択が可能になる。また、収縮真空度と展開圧力によって、角度制御が可能である。図5.7に、収縮真空度0.01[Mpa]一定で展開圧力を変化させたときの角度変化を表したグラフを示す。展開圧力を大きくしていくことによって角度が始めは大きくなり、その後小さくなっていくことがわかる。これは、始めは展開圧力を大きくすることにより収縮しているFSBとの力の差から角度が大きくなる。そして、これが収縮真空度と釣り合いが取れるところまで続く。しかし、さらに展開圧力が大きくなると、収縮しているFSBを展開しているFSBが引っ張る形になり、角度が小さくなっていくのである。

この機構では2本のFSBを並列接続した場合、左右への最大角度は、FSBのサイズ（展開時長さ、収縮時長さおよび直径）によって決まる。図5.4から最大角を求める式は次のようになる。

$$\text{最大角} = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{\frac{(\text{展開時の長さ} - \text{収縮時の長さ})}{2}}{\text{直径} \times 2} \right] \times 2$$

これにより、展開時長さ160[mm]、収縮時長さ60[mm]、直径30[mm]のFSBで90°の方向転換が可能であることがわかる。この機構により能動的な方向転換が可能になったが、FSBを並列に接続したために次のような問題が生じる。

- ホース、電磁弁の数が増える
- ロボットのサイズが大きくなる 移動可能なフィールドの減少
- FSB同士が擦れ合いフィルムの交換時期が早まる

特に、ロボットのサイズが大きくなり進入できる狭隘空間の大きさが限定されることは、移動可能なフィールドが減少することであり問題である。そこで、次の項ではロボットのサイズはそのままに能動的に方向転換ができる機構について述べる。

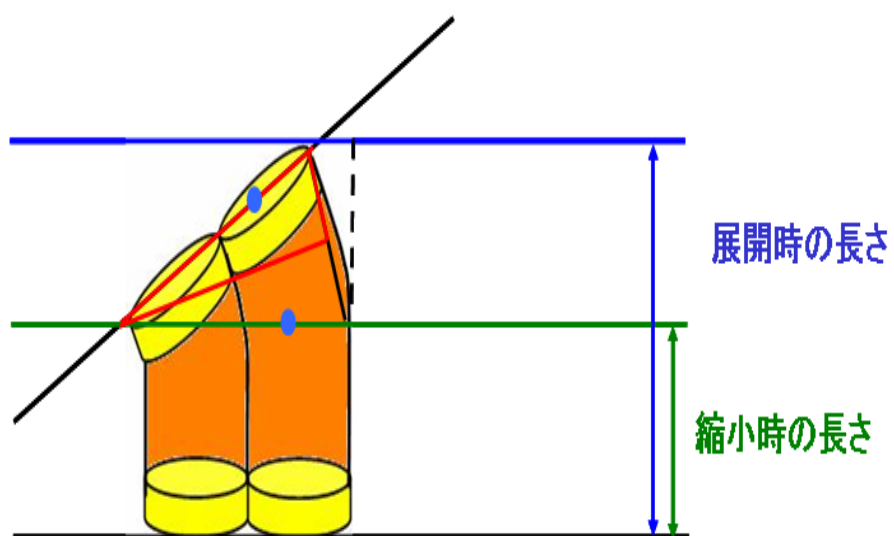


図 5.4: 最大角度の計算



図 5.5: 並列接続による能動的方向転換機能を付加したミミズ型移動ロボット

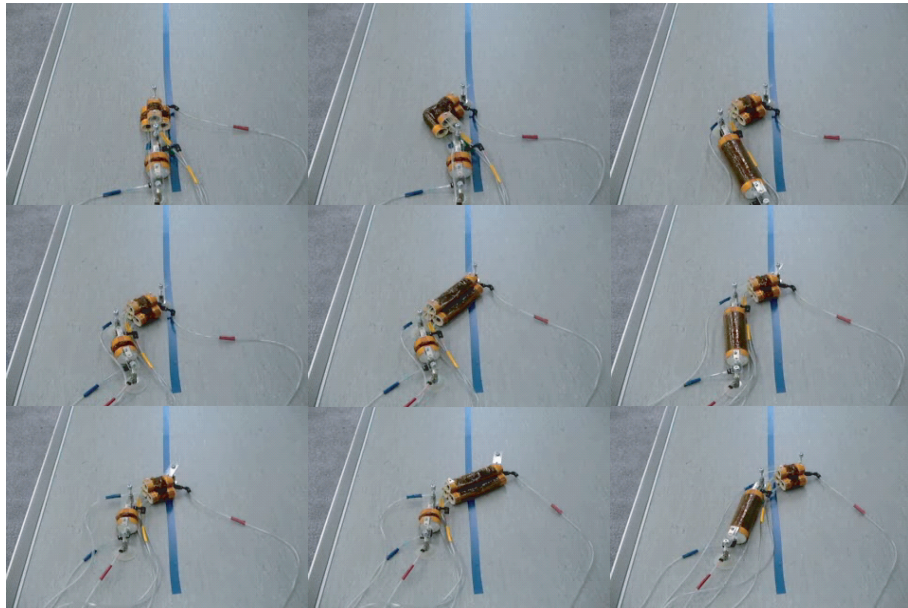


図 5.6: 並列接続を用いた能動的な方向転換

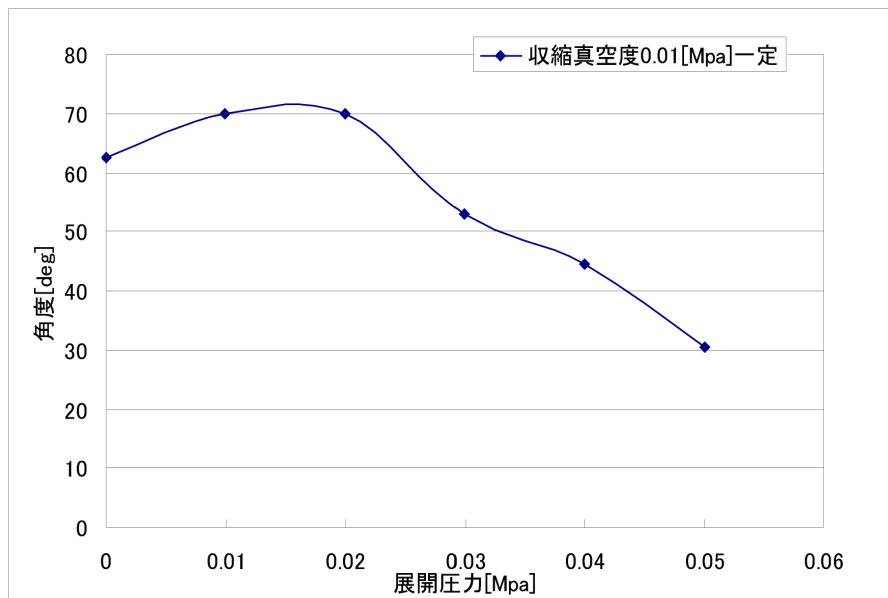


図 5.7: 角度変化 (収縮真空度 0.01[Mpa] 一定)

5.2.2 側面固定

2つ目は、ブレーキワイヤでFSBの側面を固定するものである。前項で述べたようにロボットのサイズはそのままに能動的な方向転換を可能にしたものである。図5.9にこの機構を付加したミミズ型移動ロボットを示す。ブレーキワイヤはアウターワイヤとインナーワイヤからなり、インナーワイヤがアウターワイヤの中を通っている。インナーワイヤは一般的なワイヤである。アウターワイヤは樹脂チューブの外面に長方形断面の鋼帯をらせん状に巻き、その上に外装の樹脂をかぶせたもので、鋼帯を密着巻きにすることにより、インナーワイヤを巻き取る圧縮力に耐えると同時に自由に曲げることができる。アウターワイヤにより、ロボットから制御部分までの間でブレーキワイヤに弛みや接触が発生した場合でも問題なくワイヤを巻き取ることができる。本研究では、H8でステップングモータを制御してワイヤを巻き取っている。インナーワイヤをステップングモータで巻き取ることによって角度を制御でき、ブレーキワイヤを取り付ける本数によって選択できる方向が決まる。図5.8から、FSBの直径と最大長、ワイヤ取り付けによる余し長さ、ステップングモータで巻き取ったワイヤの長さがわかれば、H8のスイッチを押した回数によって角度が何度変化するか次の式から求まる。ステップングモータの励磁方式は2-2相励磁である。

$$\begin{aligned}
 &0^\circ \text{ のときのワイヤ長} : L_0 = Z - 2Y \\
 &90^\circ \text{ のときのワイヤ長} : L_{90} = \sqrt{2}(Z/2 - (X+Y)) \\
 &1^\circ \text{ 動かすために巻き取るワイヤ長} : L = (L_0 - L_{90})/90
 \end{aligned}$$

X : FSBの直径
 Y : ワイヤ取り付け時の余し分
 Z : FSBの最大長

角度 : ステップングモータで巻き取ったワイヤ長 / L

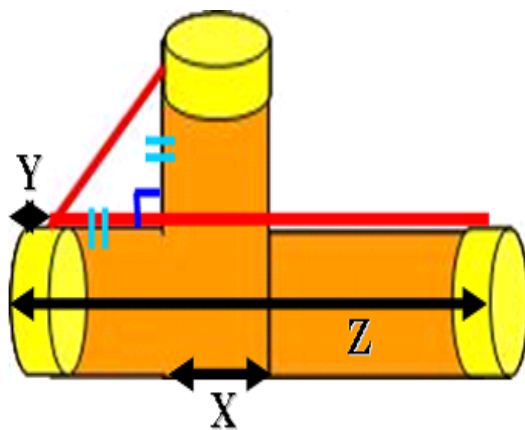


図 5.8: 角度変化計算

図5.10にFSBの直径30[mm]、最大長160[mm]、ワイヤ取り付けによる余し長さ10[mm]における、理論値と実験値の平均を表したグラフを示す。理論値、実験値ともに約5°単位で角度制御が可能であることを示しており、理論式が有用であることがわかる。これにより、シーケンス制御を行うことができるこの機構により、図5.11の様にロボットのサイズはそのままに能動的な方向転換が可能となる。

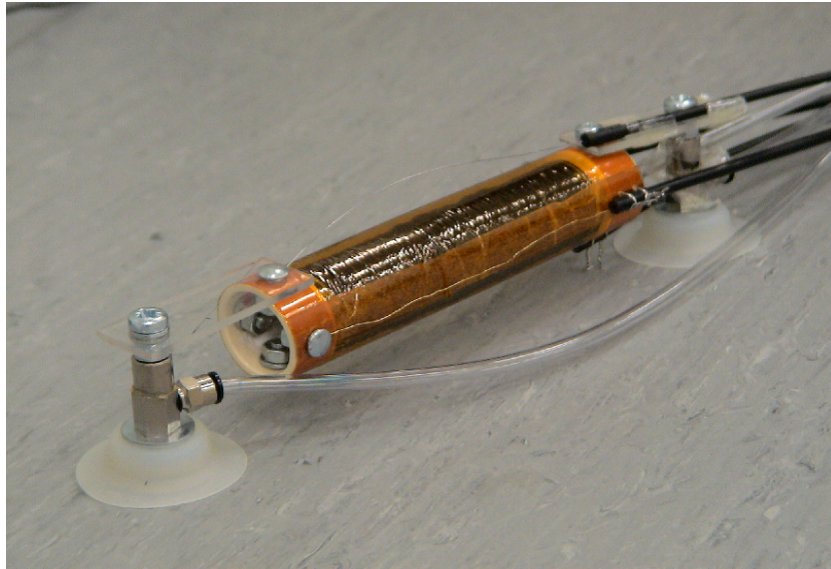


図 5.9: 側面固定による能動的方向転換機能を付加したミミズ型移動ロボット

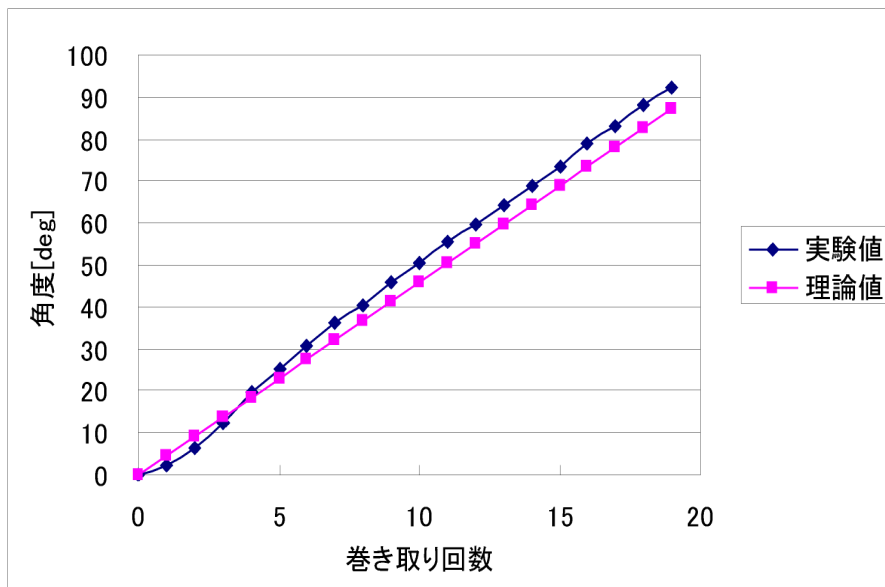


図 5.10: 角度変化

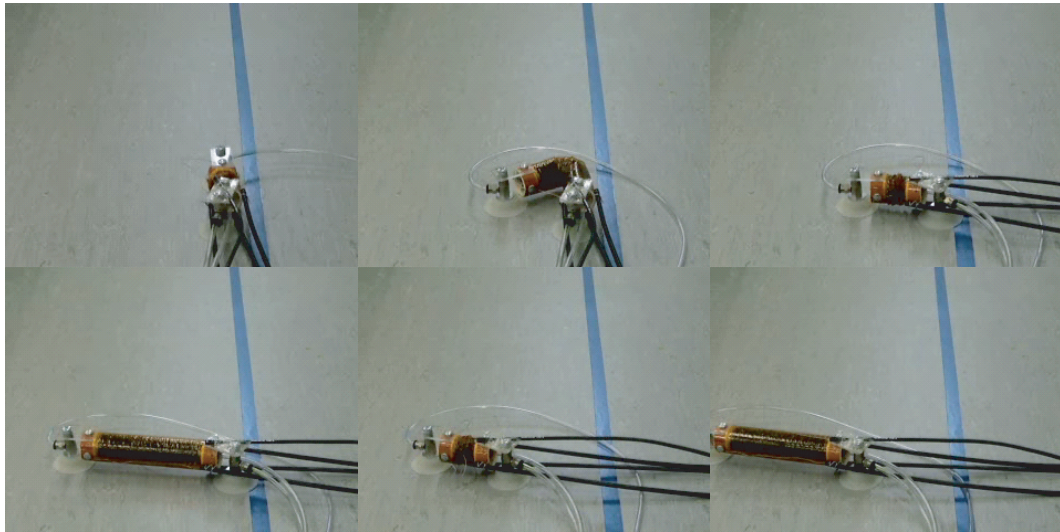


図 5.11: 側面固定による能動的な方向転換

5.3 配管内移動ロボット

FSB は空気圧アクチュエータのため電気部品が使用されておらず故障時に発火することがない。この特性を活かして、ガスや水が存在する配管内の移動ロボットを開発することにする。ロボットの基本構造は前述のミミズ型移動ロボットと同じであるが、配管内に水がある場合は吸盤を用いることができないので吸盤の代用品が必要である。そこで、展開時に FSB のフィルム部分が配管一杯に膨らむようにすることや FSB を配管と垂直方向に展開することにより、配管内でロボットが移動するための摩擦力を得る。これにより、吸盤を用いずに配管内移動ロボットを実現した。図 5.12 に開発した配管検査用ロボットを示す。図 5.13 と図 5.14 に水平、垂直に設置された配管内を移動する様子をそれぞれ示す。

5.4 ロボットの制御方法

FSB は展開収縮、吸盤は吸着開放と、ともにコンプレッサとポンプによる単なる空気の出し入れだけで動作することができるため、簡単なシーケンス制御でロボットの制御を行うことができる。そこで、本研究では H8 を用いて電磁弁をシーケンス制御している。図 5.15 にシステム構成図を図 5.16 に側面固定による能動的な方向転換機能をロボットに付加した場合のシステム構成図を示す。また、プログラムは付録とする。



図 5.12: 配管検査用ロボット

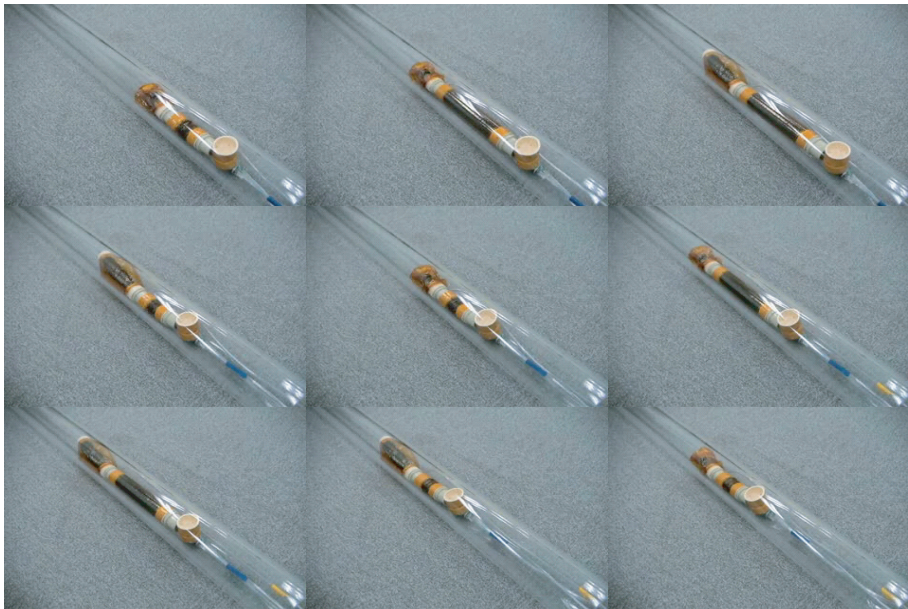


図 5.13: 配管内移動（水平方向）

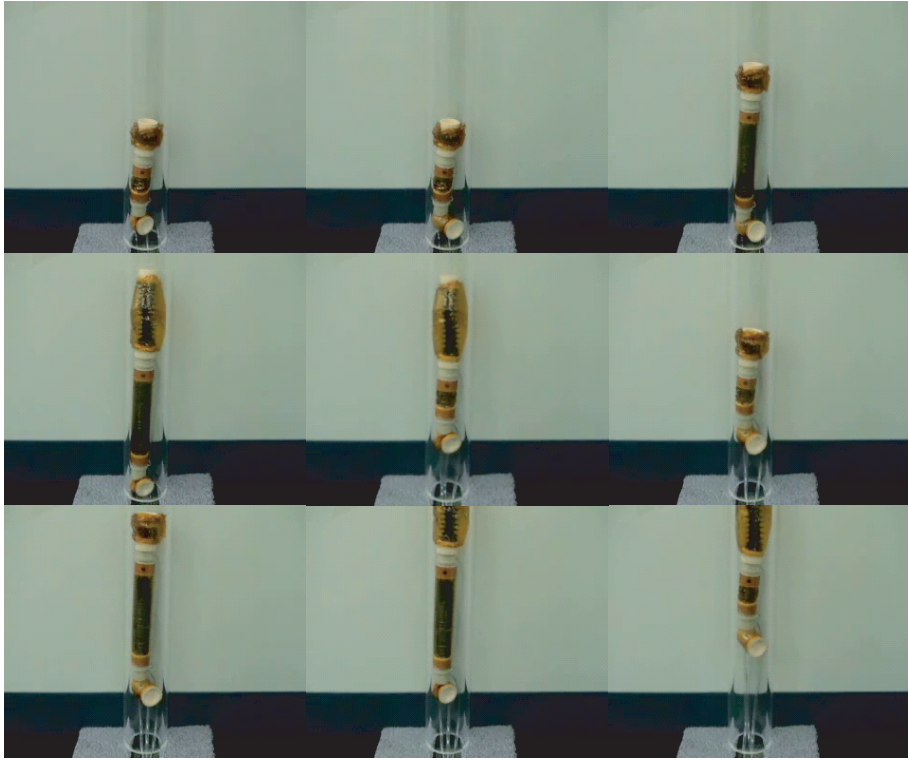


図 5.14: 配管内移動（垂直方向）

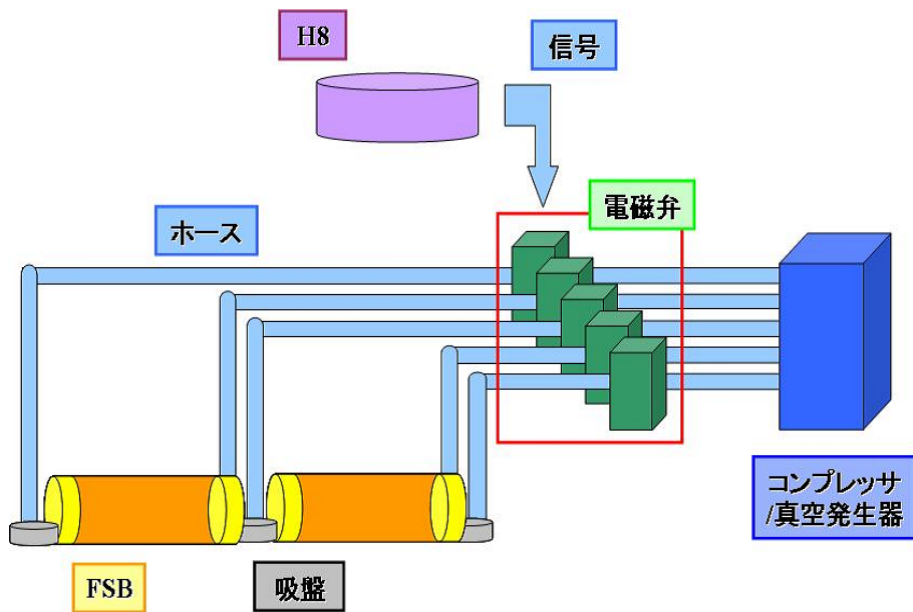


図 5.15: 制御システム

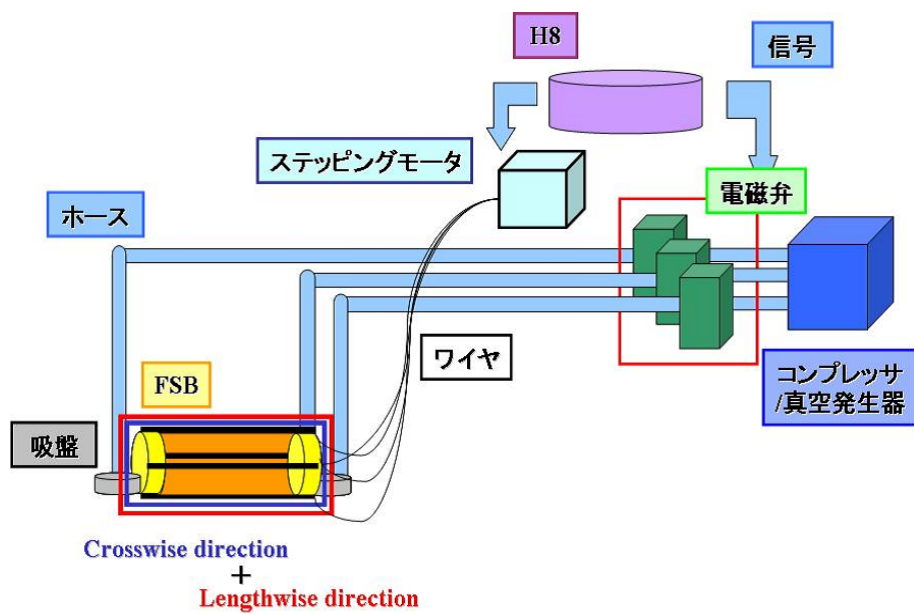


図 5.16: 制御システム (ワイヤによる側面固定あり)

第6章 動作実験

本章では、本研究で開発した移動ロボットを用いて行った動作実験の結果を示す。

6.1 壁 - ホースの収納 -

ブレーキワイヤを用いた側面固定による能動的な方向転換機能を付加したことにより、ロボットが壁を登る際に吸盤の吸着面の高さが同じでなくても、ワイヤを巻き取ることによってFSBを壁の方へ曲げ、吸盤の吸着面を壁に接地させることができる。これにより、吸盤の高さを正確に揃える作業を行う必要がなくなる。また、壁を登る際にFSBを展開すると、図5.3のように、先頭に位置する吸盤のホースがある方へ大きく曲がりながら展開する。これは、FSBが持つ展開途中のフレキシブル性によるものである。そこで、先頭の吸盤のホースをFSB内に通すことにする。これにより、大きく曲がりながら展開することを改善する。図6.1にホースをFSB内に通したロボットを、図6.2にそのロボットが壁を登る様子を示す。

6.2 床から壁

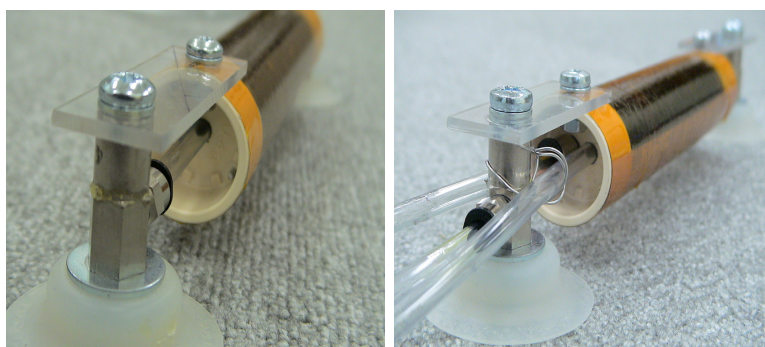
ブレーキワイヤを用いた側面固定による能動的な方向転換機能を付加したことにより、上方向への方向転換ができる。これにより、床を進行してきたロボットが壁際に来たところで上方向に方向転換し、壁を登り始めるといった動作を行うことができる。しかし、この動作を行うにはFSBの展開時長さが350[mm]以上必要である。350[mm]未満では後方の吸盤の吸着面が壁に接地することができない。図6.4に床から壁を登り始める様子を示す。

6.3 障害物, 溝, 段差回避

前節と同じく上方向への方向転換を使用することによって、LANなどの小さな障害物や溝、段差を越えて進むことができる。図6.3 図6.5 図6.6にその様子をそれぞれ示す。溝の回避では、通常に展開した場合、FSBの展開途中の柔軟性と重力により溝の方向に展開してしまいが、上方向に展開後巻き取っていたワイヤを緩めていくことで、溝に落ちることなく反対側に吸盤を吸着させることができる。また、段差の回避では、展開収縮状態と展開収縮途中の状態だけではなくFSBを開放した状態を動作に取り入れている。FSBを開放すること

で展開収縮途中と同じように柔軟性を得ることができる。これにより、図 6.6 の 4 番から 5 番への動きを行うことができる。

このように、移動機構を拡張し、多機能化したことにより様々な環境への適応が可能となる。この多機能化した移動機構により、本研究のロボットはレスキューロボットや手の届かないところの掃除、さらに手の届かないところへおよび手の届かないところから LANなどを運ぶといったことへ応用可能であると考えられる。



(a) フロント

(b) リア

図 6.1: ホースを FSB 内に通したロボット

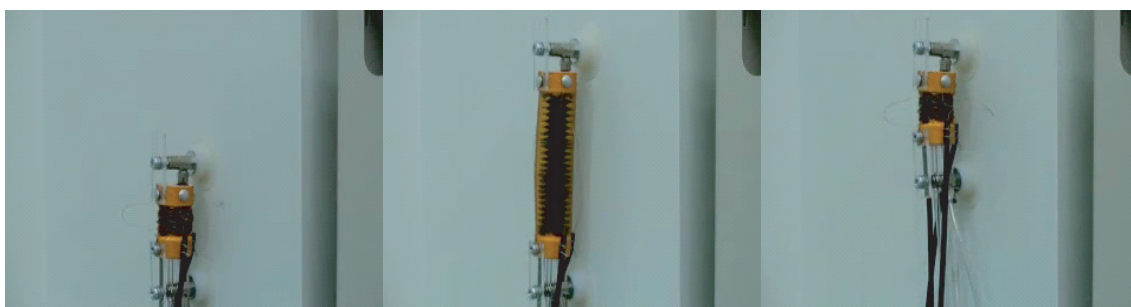


図 6.2: 壁面進行（ホースを収納した状態）

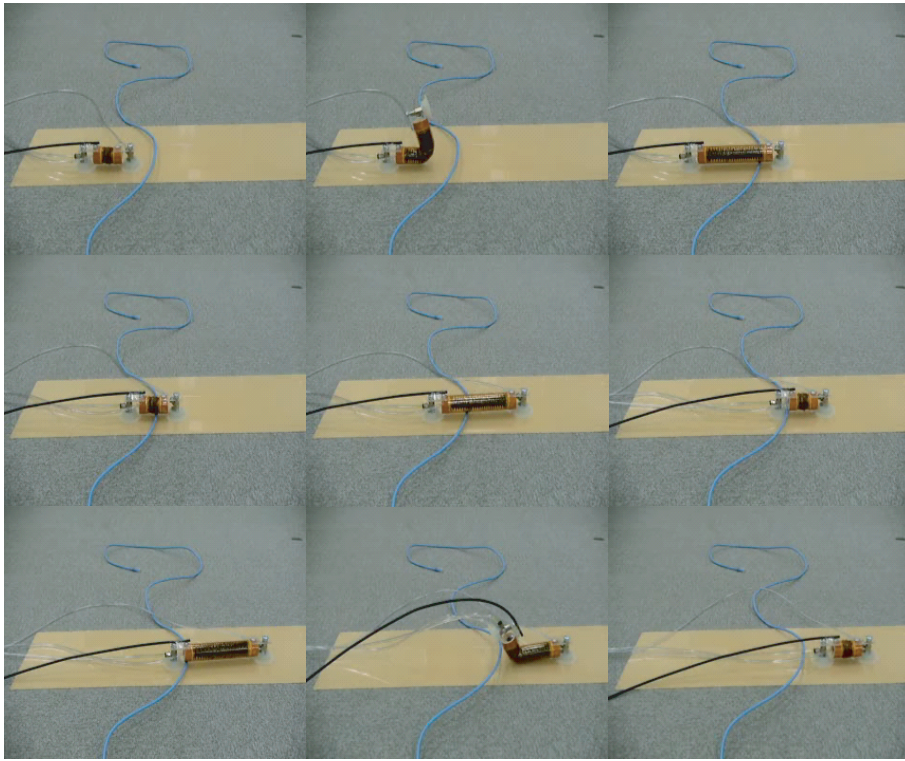


図 6.3: 障害物回避

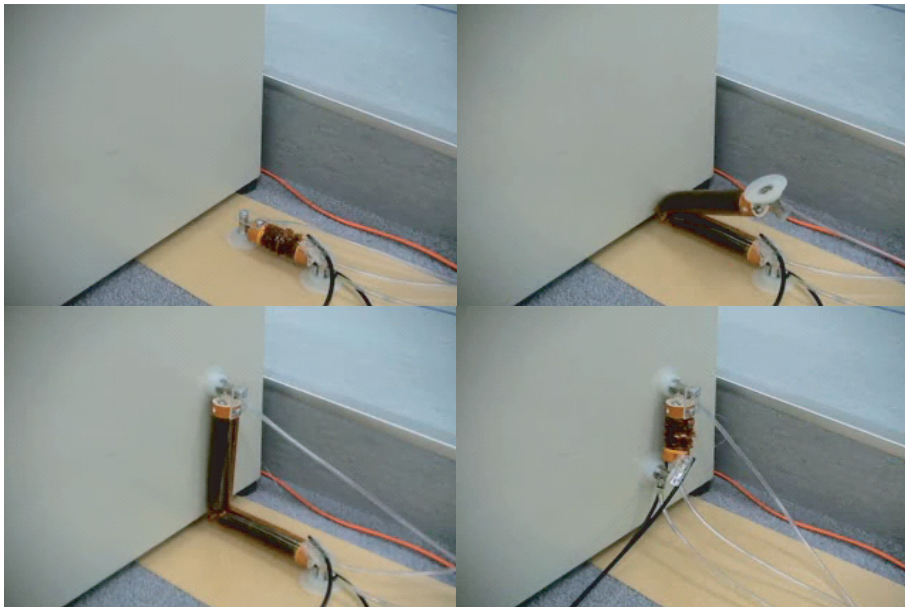


図 6.4: 床から壁へ

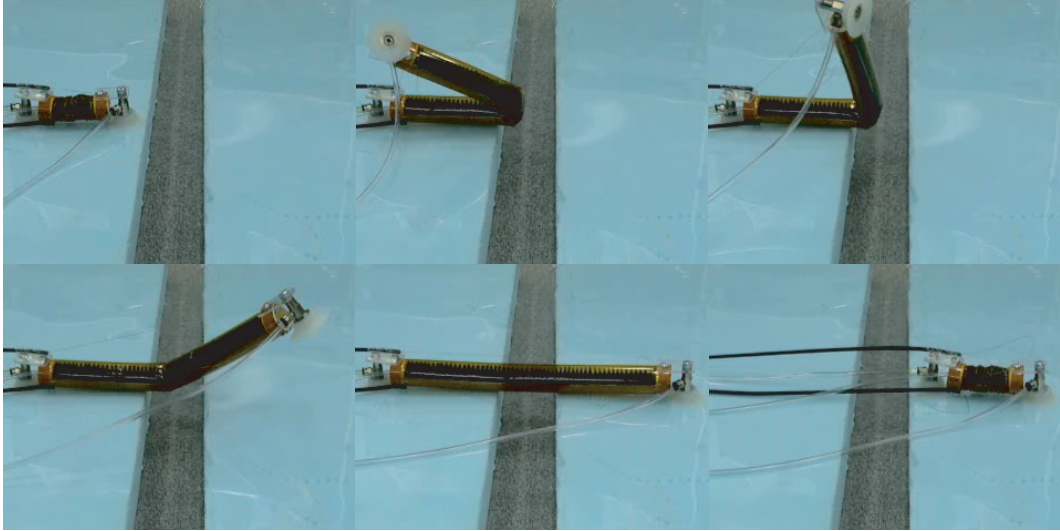


图 6.5: 溝回避

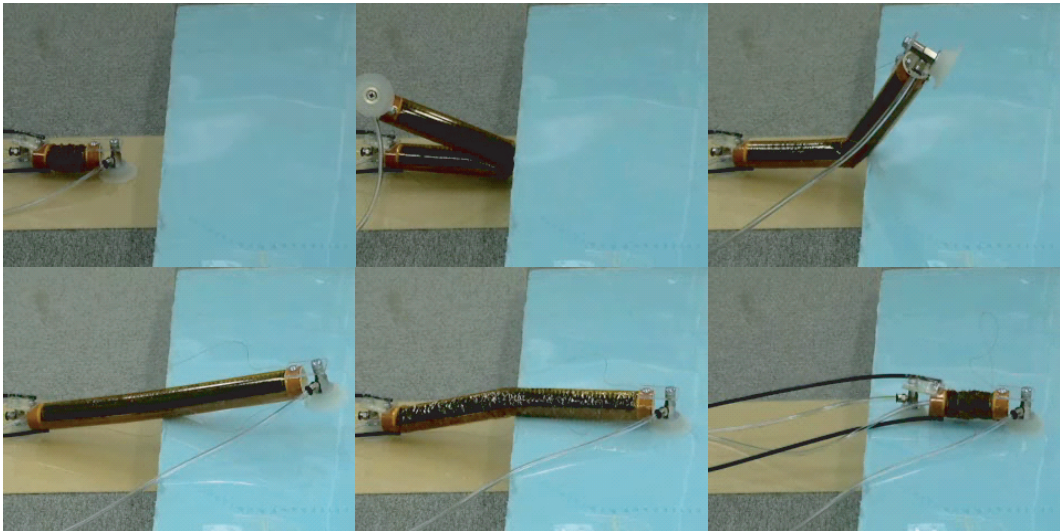


图 6.6: 段差回避

第7章 結論

7.1 考察

2章で述べたモータを用いたロボットである,MOIRA (クローラ型),ASTERISK (足型),Pioneer3-DX (車輪型)の3台とソフトアクチュエータを用いたロボットである,KOHARO:移動型,KOHARO:跳躍型,HS,Slim Slimeの4台,それと本研究にて開発したFSBの側面固定による能動的な方向転換機能を付加したミミズ型移動ロボット earthworm を速度,質量,走行可能な最大勾配において比較した結果を図7.1,図7.2,7.3にそれぞれ示す.

まず,移動速度は車輪型である Pioneer3-DX が他のロボットの2倍以上速い.次いで ASTERISK,MOIRA とモータを用いたロボットが続く.この結果から,ソフトアクチュエータを用いたロボットは移動速度が遅いことがわかる.しかし,earthworm はソフトアクチュエータを用いたロボットである HS,KOHARO と比べると2倍以上速い.また,Slim Slime よりも0.3[m/分]程速い.このように earthworm は,ソフトアクチュエータを用いたロボットでは最も速い移動速度を備えている.ただ,モータを用いたロボットと比べると最も遅い MOIRA でさえ earthworm よりも3倍以上速い.

次に,本体質量では,KOHARO が群を抜いて軽い.次いで,earthworm,HS と続く.モータを用いたロボットとソフトアクチュエータを用いていながら金属製のシェルでロボットを覆った Slim Slime は,KOHARO や earthworm と比べると非常に重い.これは,ソフトアクチュエータが軽量であること,駆動動力がロボット外にあることが原因であると考えられる.また,MOIRA は本体質量に関する情報を得ることができなかつたため,データなしとなっているが,ロボットの構成やその部品,材料からおそらく9[kg]程度であると考えられることができる.

最後に走行可能な最大勾配について比較する.earthworm と ASTERISK がそれぞれ,壁面の形状に条件はあるが90°の勾配である壁面を登ることができる.他のロボットでは MOIRA が45°,Pioneer3-DX が14.2°と続く.HS と Slim Slime のデータを得ることができなかつたため,移動機構による比較は行えない.しかし,90°の勾配(壁面)を登ることが可能なロボットは今回比較検討しているロボット群以外においても,少数である.したがって,earthworm や ASTERISK は他のロボットに比べ環境適応性を備えている.

7.2 結論

本研究の目的は, ソフトアクチュエータを用いることによりモータを用いたロボットにはない, 軽量, 低コストで環境適応性に優れた移動ロボットを開発することである. 本研究の結果と改善すべき問題点について以下に述べる.

本研究で開発した FSB の側面固定による能動的な方向転換機能を付加したミミズ型移動ロボット earthworm と配管移動ロボットのスペックを表 7.1 と表 7.2 にそれぞれ示す. 本研究で開発したロボットは, earthworm 580[g], 配管内移動ロボット 110[g] と 2 軽量である. また, コスト面では earthworm が制作費 18000 円, 製作時間が 2.5 時間, 配管内移動ロボットが制作費 11000 円, 製作時間が 3 時間であり低コストである. earthworm は, 6 章で述べたように柔軟性と可変性を活かした多機能な移動機構により, 十分な環境適応性を示すことができたと考える. さらに, earthworm, 配管内移動ロボット共に FSB のサイズ変更することにより, 容易にロボットのサイズを変更することができる. 以上から, earthworm により本研究の目的が達成されたといえる. また, 配管内移動ロボットにより, FSB を用いた応用例を示すことができたと考える.

改善すべき問題点は, 移動速度の遅さと駆動動力がロボットに搭載されていない点である. 前節で述べたようにソフトアクチュエータを用いたロボットはモータを用いたロボットと比べ移動速度が遅い. また, ソフトアクチュエータを用いたロボットは電源やコンプレッサなどの駆動動力がロボットに搭載されていない. 本体質量の軽さやサイズの変更が容易であるという特性は, このシステム構成に起因しており, 駆動動力の搭載を行うことでこれらの特性が失われてしまう. したがって, 駆動動力を搭載する場合はロボットのデザインが困難となる. 今後は, 実用化に向けて, 移動速度の向上とカメラなどのセンサ類の搭載を考慮した設計を行う必要がある.

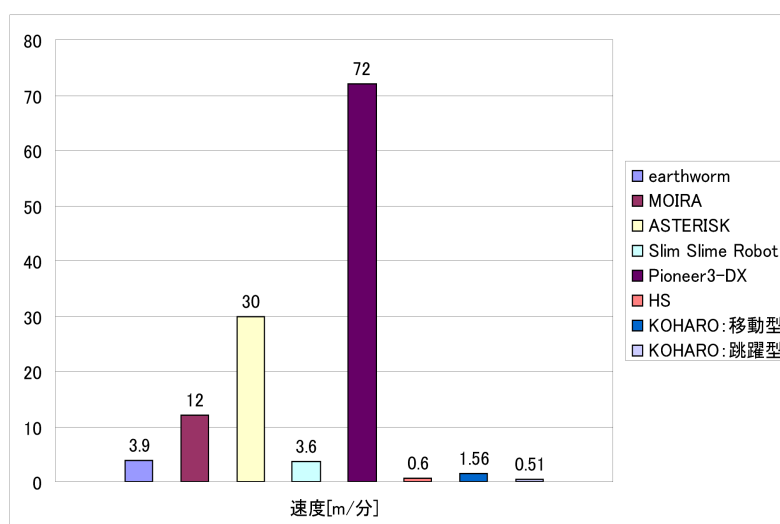


図 7.1: 移動速度

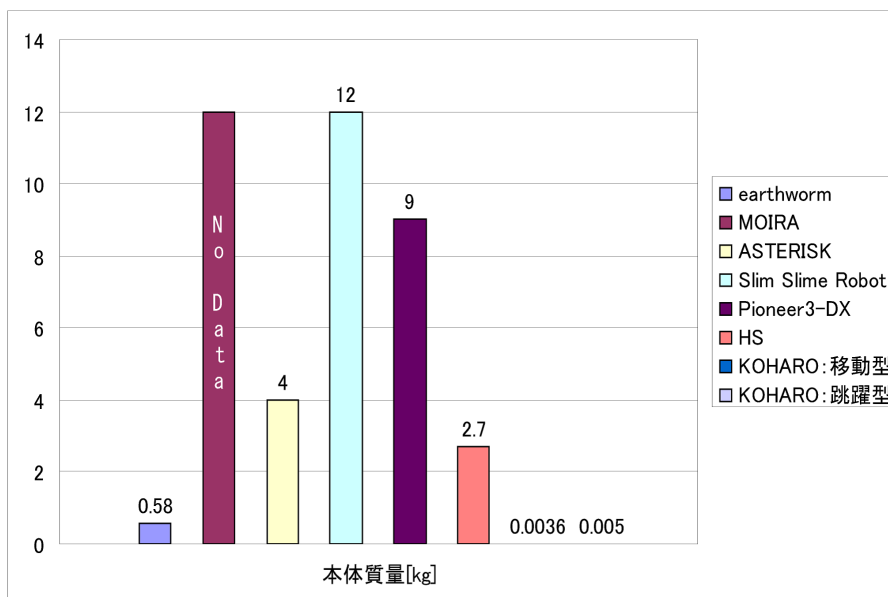


図 7.2: 本体質量

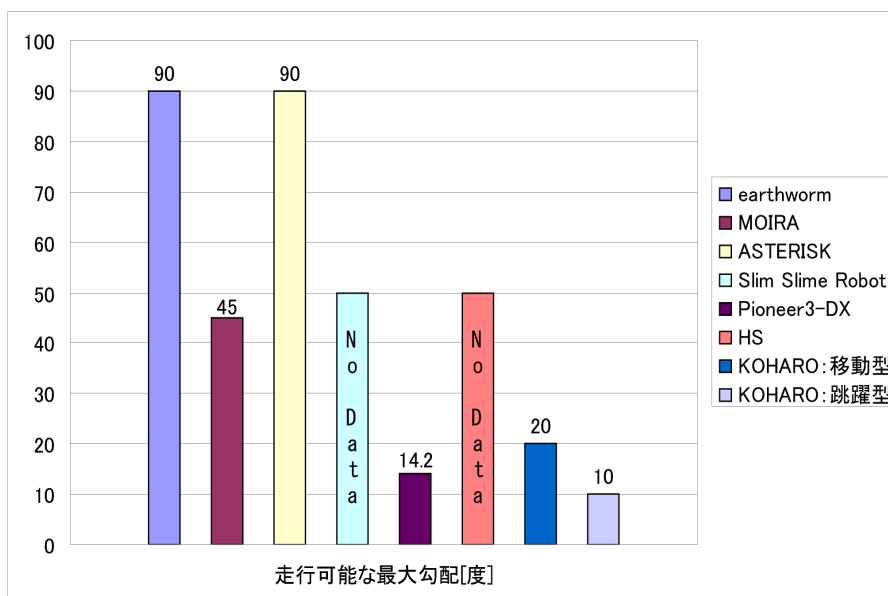


図 7.3: 進行可能な最大勾配

表 7.1: earthworm

名称	earthworm
所属	丁研究室
全長 (収縮時/展開時)[mm]	180/440
全幅 [mm]	50
全高 [mm]	55
速度 [m/分]	3.9
速度 [%] ¹	25
本体質量 [kg]	0.58
走行可能な最大勾配 [度]	90
走行可能な最大段差 [%] ²	11.36
走行可能な溝最大 [%] ¹	28.85
最大屈折角度 [度]	90
使用圧力 [kpa]	20
使用真空度 [kpa]	20
有線/無線	有線

表 7.2: 配管内移動ロボット

名称	pipe
所属	丁研究室
全長 (収縮時/展開時)[mm]	193/348
全幅 [mm]	50
全高 [mm]	50
速度 [m/分]	0.8
速度 [%] ¹	15.38
本体質量 [kg]	0.11
走行可能な最大勾配 [度]	90
走行可能な配管直径 [%] ³	120 以上
使用圧力 [kpa]	20
使用真空度 [kpa]	20
有線/無線	有線

¹展開時長さと収縮時長さの差と 1[s] に進む距離との比

²展開時長さとの比

³全高との比

謝辞

本研究にあたり直接の御指導を頂いた北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授・丁洛榮先生に深謝する。また、本研究の第6章の実験では丁研究室・村井真也氏、南孝氏の協力なしには成し得なかった。ここに両氏に対して感謝の意を表す。そして、日々の様々な面で助言やご協力下さった丁研究室の博士後期課程、前期課程の皆様にも感謝する。

参考文献

- [1] Byungkyu Kim, Moon Gu Lee, Young Pyo Lee, YongIn Kim, GeunHo Lee, 「An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator」, Sensors and Actuators.
- [2] 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, pp803–806, 2003.
- [3] 田所 諭, 「大大特プロジェクトの目的と概要」, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp544–545, 2004.
- [4] Robin R. Murphy, 牧原 忍 (翻訳), 「ニューヨーク世界貿易センターでのレスキューロボット」, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1019, pp794–802, 2003.
- [5] 大須賀 公一 「地震災害における瓦礫内ロボットシステム」ロボット No.164, pp9–13, 2005.
- [6] 広瀬 茂男, 青木 岳史, 「尺取り虫運動を行うスライム型がれき内探査ロボットの開発」,
- [7] 大須賀 公一, 「ヘビ型ロボットによる狭空間探索」, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp554–557, 2004.
- [8] 大須賀 公一, 「瓦礫内探索用多関節型移動システム」,
<http://www.control.mech.kobe-u.ac.jp/osuka/moira.html>
- [9] 東京工業大学機械宇宙システム専攻 機械創造学講座ロボット創造学分野 広瀬・福島研究室, 「空気圧駆動型索状能動体 Slim Slime」,
http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/snake/slim_slime/slim_slime.html
- [10] 大阪大学大学院基礎工学研究科 システム創成専攻システム科学領域 新井研究室,
「腕脚統合型ロボット ASTERISK」,
<http://www.nedo.go.jp/expo2005/robot/prototype/jyutaku017.html>
- [11] 立命館大学理工学部ロボティクス学科 平井研究室, 東レエンジニアリング株式会社,
「移動跳躍ソフトロボット KOHARO」,
<http://www.nedo.go.jp/expo2005/robot/prototype/jyutaku016.html>

- [12] 平井 慎一, 原 義行, 坪井 辰彦, 岩出 卓, 「跳躍移動ソフトロボット KOHARO」, 平成 16 年度～平成 17 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構 21 世紀ロボットチャレンジプログラム・プロトタイプ開発支援事業 研究成果報告.
- [13] 株式会社リバスト, <http://www.revast.co.jp/>
- [14] 原坂 龍太, 「ミミ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 平成 16 年度修士論文.
- [15] 朝比奈 啓博「多段インフレータブルフレームを有する姿勢制御ユニットの開発」, 北陸先端科学技術大学院大学 平成 18 年度修士論文.
- [16] 前田 裕司, 「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 平成 17 年度修士論文.
- [17] 長田 義仁, 「ソフトアクチュエータ開発の最前線 人工筋肉の実現をめざして」, エヌ・ティ・エス出版.
- [18] 上田 晋也, 嵯峨 宣彦, 中村 太郎, 「人工筋アクチュエータを用いた蠕動運動型ロボットの研究」, 計測自動制御学会東北支部第 210 回研究集会 (2003.7.16) 資料番号 210-12.
- [19] 株式会社 日本ピスコ, 「技術資料 初心者への為の空気圧」, <http://www.pisco.co.jp/products/siryo/index.html>
- [20] 広瀬 茂男, 阿部 顕一, 「災害救助に活用できる空気圧ポンプの開発」, 消防防災科学論文, <http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/>
- [21] 友國誠至, 木村 政文, 杉山 勇太, 平井 慎一, 「三要素モデルによる粘弾性物体, 塑性物体およびレオロジー物体のモデリング」, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, Vol.3, pp.25-26, 2002.
- [22] 友國 誠至, 杉山 勇太, 平井 慎一「実時間計算可能な仮想レオロジー物体の構築」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.247-254, 2003.
- [23] 則次 俊郎, 「空気圧アクチュエータ」, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.355～359, 1997.
- [24] 平井慎一, 升井友洋, 川村貞夫, 「複数の単一運動チューブから構成される空気圧群アクチュエータの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.299～306, 2002.
- [25] 則次 俊郎, 久保田 充彦, 「空気圧ソフトアクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, pp.831～838, 2000.

- [26] 木村仁, 梶村文裕, 丸山大輔, 小関道彦, 伊能教夫, 「水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボットの開発」, 第23回日本ロボット学会学術講演会(2005年9月15日~17日).
- [27] 「シェルの振動と座屈ハンドブック」, 日本機械学会, 2003.
- [28] 田所 諭, 「レスキューロボットの評価に関する一考察」.
- [29] 綿末 太郎, 小野里 雅彦, 田所 諭, 「レスキューロボット実用化のためのテストフィールド」, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp572-573, 2004.

表 1: ロボット構成部品 1

ポリイミドフィルム	東レ・デュポン株式会社
タイプ	カプトン 100V
厚さ [mm]	0.025
強度 [MPa]	340
伸度 [%]	80
ヤング率 [GPa]	3.4
絶縁破壊電圧 [kV/mm]	400
熱収縮率 [%]	0.04
熱膨張係数 [ppm/]	27
湿度膨張係数 [ppm/%RH]	24
吸水率 [%]	2.9
熱伝導率 [w/m]	0.15
対折回数 [Cycle]	≥20,000
体積低効率 [Ω m]	1×10^{15}
蛇腹	株式会社 ナベル
形式	YM30-150-F-F
長さ [mm]	~ 150
外形 [mm]	$\phi 30$
オプション	空気穴 有
固定方式	フランジ方式
形式	YM30-370-F-F
長さ [mm]	~ 370
外形 [mm]	$\phi 30$
オプション	空気穴 有
固定方式	フランジ方式

表 2: ロボット構成部品 2

吸盤	株式会社日本ピスコ
形式	VPB50RS6J
ホルダー形状	固定式 真空取出口 横
パッドサイズ [mm]	φ50
パッド形状	一般形
パッド材質	シリコンゴム
質量 [g]	49.5
接続サイズ [mm]	6 × 4
イレクタージョイント部品	矢崎化工株式会社
形式	J-49
長さ [mm]	20
外形寸法 [mm]	φ33
内径寸法 [mm]	φ28
チューブフィッティング	株式会社日本ピスコ
タイプ	ストレートミニ
形式	PC6-M6M
チューブ外形 [mm]	φ6
質量 [g]	4.8
タイプ	カートリッジミニ
形式	POC6-M5M
チューブ外形 [mm]	φ6
質量 [g]	4.4
タイプ	エルボミニ
形式	PL6-M5M
チューブ外形 [mm]	φ6
質量 [g]	4.1
使用流体	空気
最高使用圧力 [MPa]	1.0
使用真空圧力 [kPa]	-100
使用温度範囲 []	0 ~ 60
エポキシ樹脂系	ハンツマン・アドバンスト・マテリアルズ社
エポキシ樹脂	50[%]
ポリアミドアミン	50[%]
変性シリコーン樹脂系	セメダイン株式会社
シリコーンゴム	100[%]

表 3: 制御システムの構成部品

H8/3048F-ZTA	株式会社日立製作所
RAM 容量 [kbyte]	4
ROM 容量 [kbyte]	128
動作周波数範囲 [MHz]	1 ~ 18
動作温度範囲 []	-20 ~ +75
電源電圧 [V]	-0.3 ~ +7.0
電磁弁 025	株式会社コガネイ
使用流体	空気
作動方式	直動形
使用圧力範囲 [MPa]	0 ~ 0.7
使用温度範囲 []	5 ~ 50
質量 [g]	80
定格電圧 [V]	12
消費電力 [W]	0.53
電流地 [A]	0.03
ステッピングモータ	多摩川精機製
形式	TS3103N124
タイプ	2相ユニポーラ型
ステップ数	200(1.8 °)
駆動電圧 [V]	12
コイル電流 [mA]	140
コイル抵抗 [Ω /相]	86

表 4: 空気圧回路構成部品

真空ポンプ	メドー産業
型式	DP0140
到達真空度 [kPa]	-53.3
吐出空気量 [l/min]	4
定格電圧 [V]	DC12
最高圧力 [MPa]	0.05
耐用時間 [h]	500
吸入口サイズ (外形)[mm]	φ5
吐出口サイズ (外形)[mm]	φ5
取付寸法 [mm]	52(L) × 36(W)
本体質量 [g]	190
コンプレッサ	株式会社キソパワーツール
型式	E5305
最高圧力 [MPa]	0.25
吐出空気量 [l/min]	12(0.2MPa 時)
消費電力 [W]	80
吐出口サイズ	PF1/8” 凸
定格使用時間 [min]	30
サイズ [mm]	210(L) × 111(W) × 147(H)
本体質量 [g]	2,700

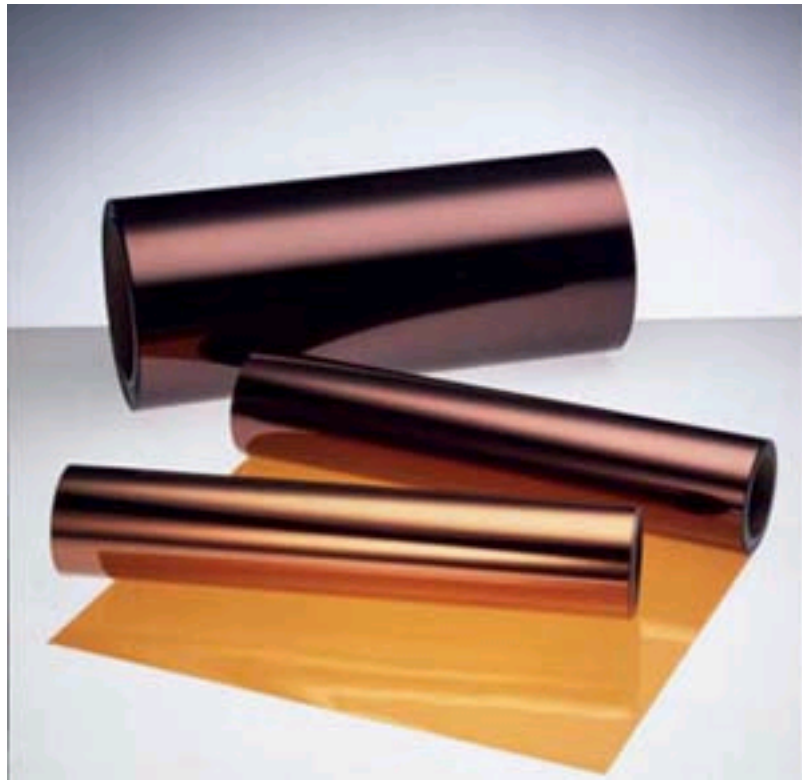


図 1: ポリイミドフィルム カプトン



図 2: ターミナルパーツ

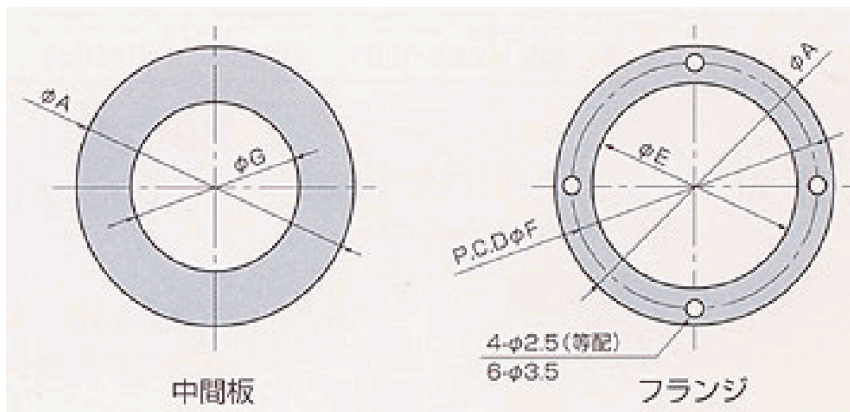
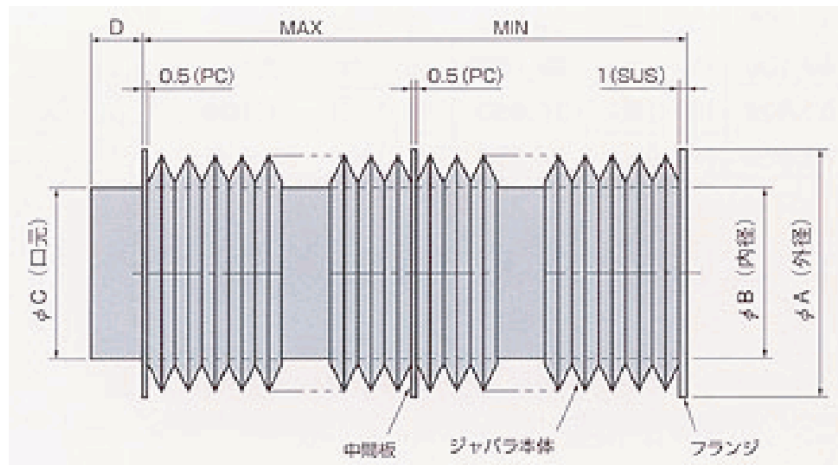


図 3: 蛇腹

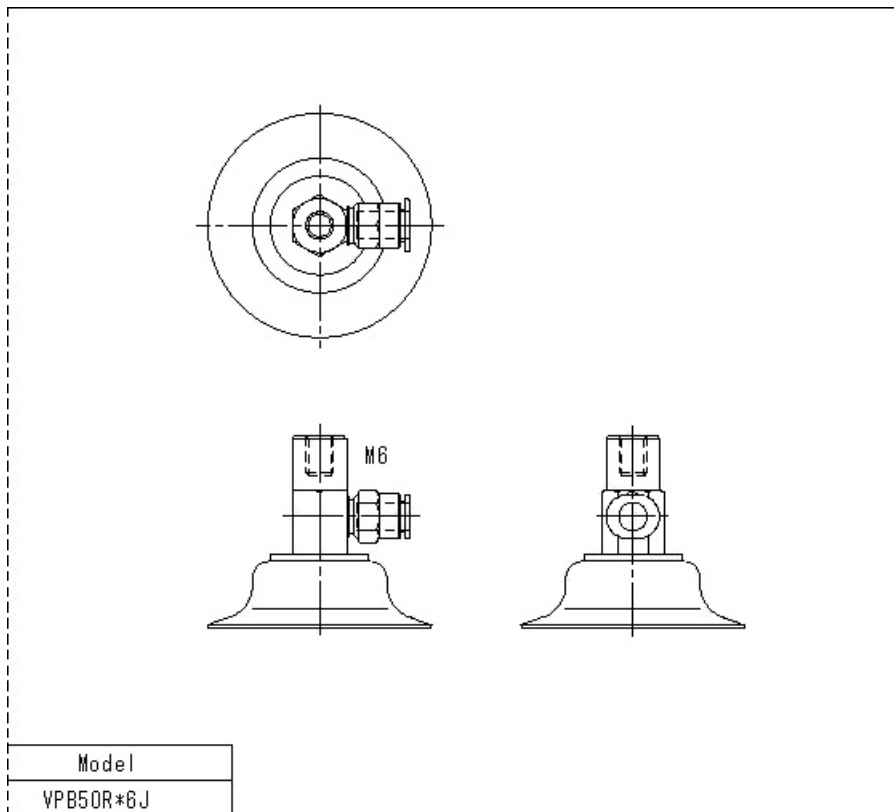
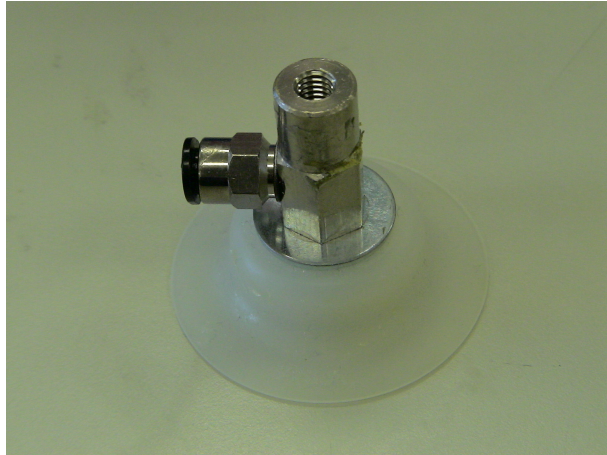


图 4: 吸盘

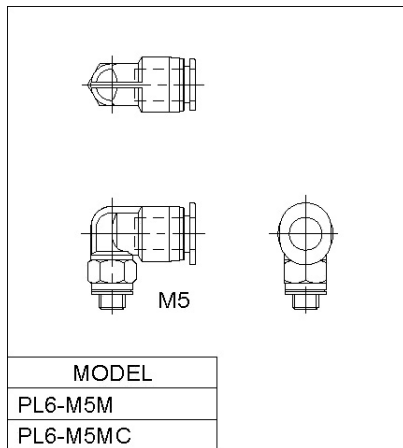
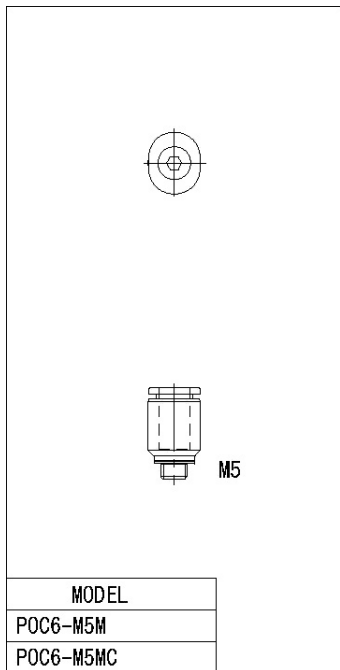
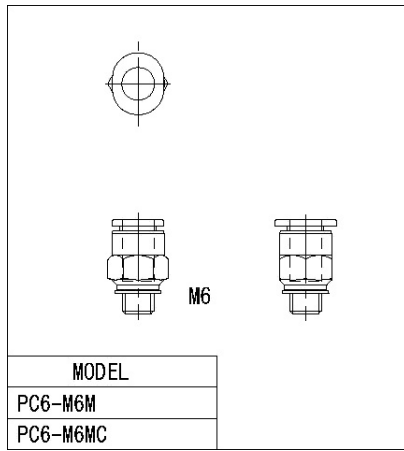
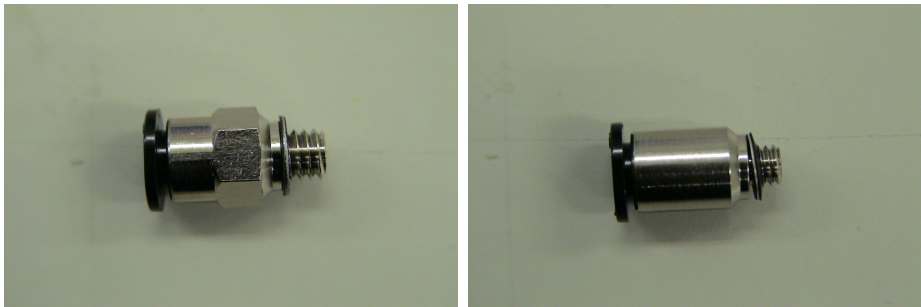


図 5: チューブフィッティング

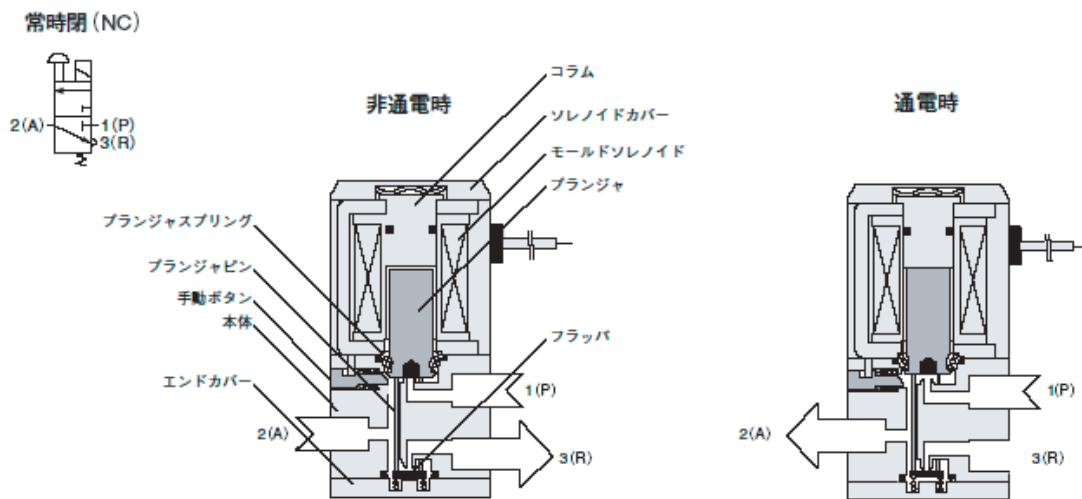
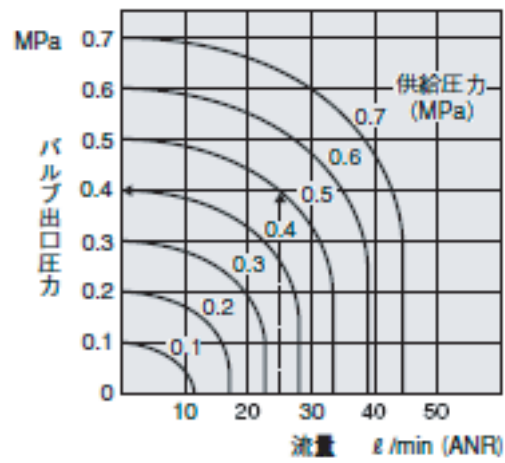


図 6: 電磁弁

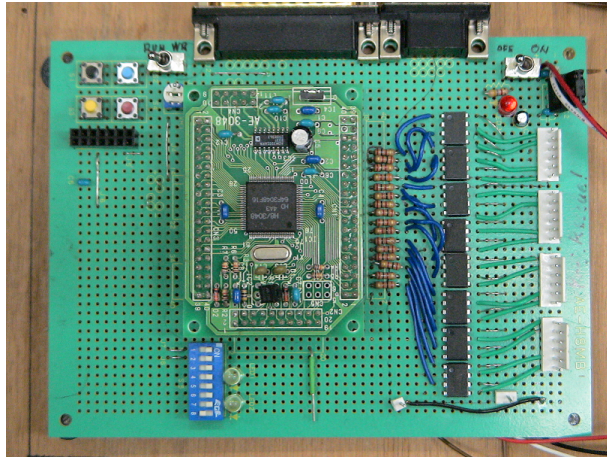


図 7: H8

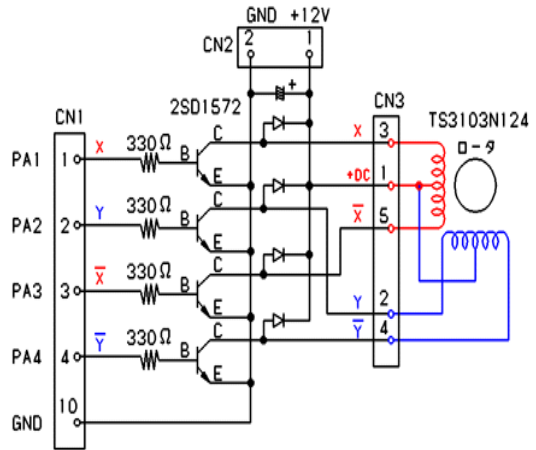
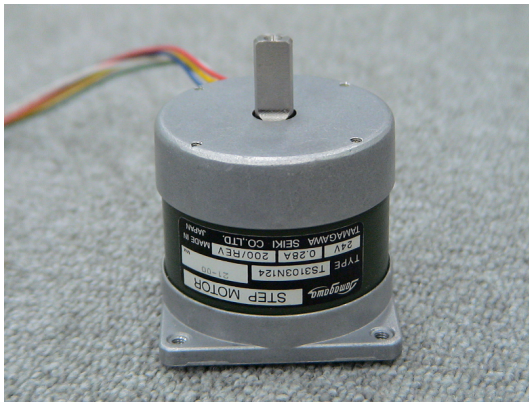


図 8: ステッピングモータとドライブ回路



図 9: コンプレッサ

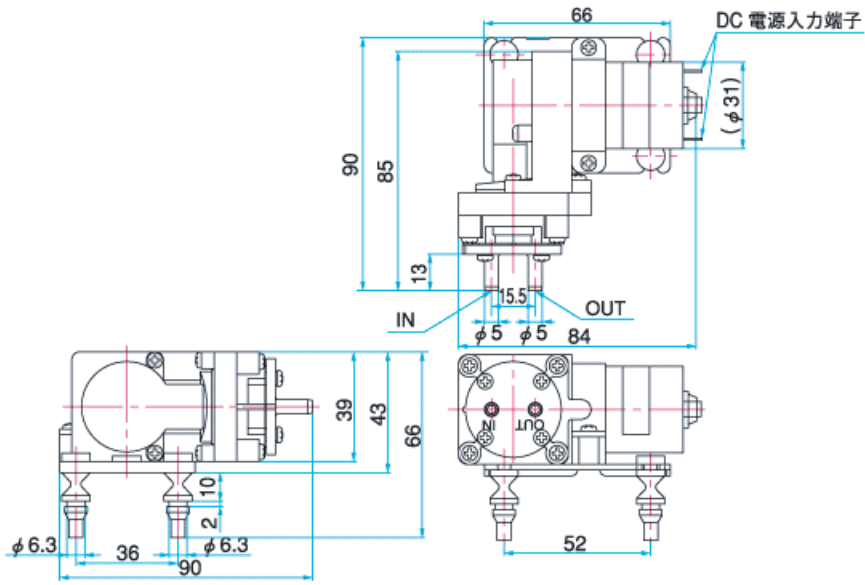
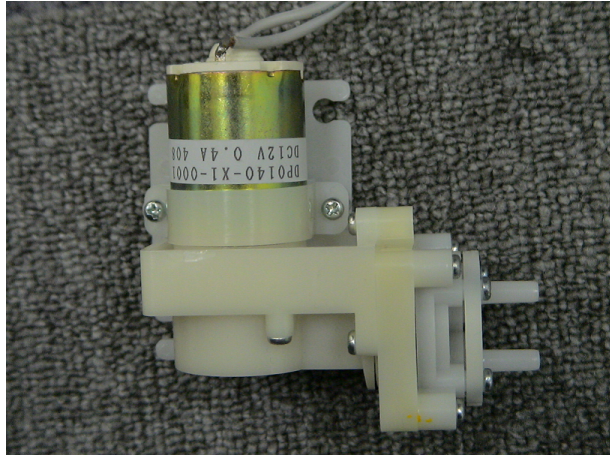


図 10: 真空ポンプ

レオロジー物体としてのシミュレーションプログラム

'設定ファイルのバージョン

10

'シミュレーションに関する設定 (kcnt,t,dt)

kcnt = 1500

t = 0.000000

dt = 0.01000

'箱がない側

meshMaker.cellCountX = 3

meshMaker.cellCountY = 1

meshMaker.cellCountZ = 1

meshMaker.originX = 2

meshMaker.originY = 2

meshMaker.originZ = 0

meshMaker.nodeIntervalX = 10

meshMaker.nodeIntervalY = 10

meshMaker.nodeIntervalZ = 10

meshMaker.generateMesh

edgeOption.initialA = 0.5

edgeOption.k=0.9

edgeOption.c1=1.5

edgeOption.c2=10

nodeOption.m=0.1

'outsideEdgeOption.k=80

'outsideEdgeOption.c1=0.8

'outsideEdgeOption.c2=160

'nodeOption.totalM=30

'outsideEdgeOption.k=1

0 'outsideEdgeOption.c1=0.1

'outsideEdgeOption.c2=20

option.optimizeEdgeParameter=1

volumeElement.enabled = 1

volumeElement.k = 0.0001

forceCount = 4

forces[0].targetNode = 0

forces[0].startTime = 5

forces[0].endTime = 10

forces[0].fx = -7

forces[1].targetNode = 8

forces[1].startTime = 50

forces[1].endTime = 10

forces[1].fx = -7

forces[2].targetNode = 3

forces[2].startTime = 10

forces[2].endTime = 15

forces[2].fx = -7

forces[3].targetNode = 11

forces[3].startTime = 10

forces[3].endTime = 15

forces[3].fx = -7

'箱側

nextBody

meshMaker.cellCountX = 3

meshMaker.cellCountY = 1

meshMaker.cellCountZ = 1

meshMaker.originX = -30

meshMaker.originY = 2

meshMaker.originZ = 0

meshMaker.nodeIntervalX = 10

meshMaker.nodeIntervalY = 10

meshMaker.nodeIntervalZ = 10

meshMaker.generateMesh

edgeOption.initialA = 0.5

edgeOption.k=0.9

edgeOption.c1=1.5

edgeOption.c2=10

```
nodeOption.m=0.1
'outsideEdgeOption.k=80
'outsideEdgeOption.c1=0.8
'outsideEdgeOption.c2=160
'nodeOption.totalM=30
'outsideEdgeOption.k=10
'outsideEdgeOption.c1=0.1
'outsideEdgeOption.c2=20
option.optimizeEdgeParameter=1
```

```
volumeElement.enabled = 1
volumeElement.k = 0.0001
```

```
forceCount = 4
forces[0].targetNode = 0
forces[0].startTime = 0
forces[0].endTime = 5
forces[0].fx = -7
forces[1].targetNode = 8
forces[1].startTime = 0
forces[1].endTime = 5
forces[1].fx = -7
forces[2].targetNode = 3
forces[2].startTime = 5
forces[2].endTime = 10
forces[2].fx = -7
forces[3].targetNode = 11
forces[3].startTime = 5
forces[3].endTime = 10
forces[3].fx = -7
```

'真ん中

```
nextBody meshMaker.cellCountX = 1
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = 2
meshMaker.originY = 2
```

```
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 10
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
'nodeOption.totalM=30
```

'真ん中の下

```
nextBody
meshMaker.cellCountX = 3
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = 4
meshMaker.originY = 0
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 2
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
'nodeOption.totalM=1
```

```
volumeElement.enabled = 1
volumeElement.k = 0.0001
```

```
forceCount = 16
forces[0].targetNode = 8
```

```
forces[0].startTime = 0
forces[0].endTime = 5
forces[0].fy = -10
forces[1].targetNode = 9
forces[1].startTime = 0
forces[1].endTime = 5
forces[1].fy = -10
forces[2].targetNode = 10
forces[2].startTime = 0
forces[2].endTime = 5
forces[2].fy = -10
forces[3].targetNode = 11
forces[3].startTime = 0
forces[3].endTime = 5
forces[3].fy = -10
forces[4].targetNode = 0
forces[4].startTime = 0
forces[4].endTime = 5
forces[4].fy = -10
forces[5].targetNode = 1
forces[5].startTime = 0
forces[5].endTime = 5
forces[5].fy = -10
forces[6].targetNode = 2
forces[6].startTime = 0
forces[6].endTime = 5
forces[6].fy = -10
forces[7].targetNode = 3
forces[7].startTime = 0
forces[7].endTime = 5
forces[7].fy = -10
forces[8].targetNode = 8
forces[8].startTime = 10
forces[8].endTime = 15
forces[8].fy = -10
forces[9].targetNode = 9
forces[9].startTime = 10
forces[9].endTime = 15
```

```
forces[9].fy = -10
forces[10].targetNode = 10
forces[10].startTime = 10
forces[10].endTime = 15
forces[10].fy = -10
forces[11].targetNode = 11
forces[11].startTime = 10
forces[11].endTime = 15
forces[11].fy = -10
forces[12].targetNode = 0
forces[12].startTime = 10
forces[12].endTime = 15
forces[12].fy = -10
forces[13].targetNode = 1
forces[13].startTime = 10
forces[13].endTime = 15
forces[13].fy = -10
forces[14].targetNode = 2
forces[14].startTime = 10
forces[14].endTime = 15
forces[14].fy = -10
forces[15].targetNode = 3
forces[15].startTime = 10
forces[15].endTime = 15
forces[15].fy = -10
```

’箱がない側

```
nextBody
meshMaker.cellCountX = 1
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = 34
meshMaker.originY = 2
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 10
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
```

```
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
```

'箱がない側の下

```
nextBody
meshMaker.cellCountX = 3
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = 36
meshMaker.originY = 0
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 2
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
'nodeOption.totalM=1
```

```
volumeElement.enabled = 1
volumeElement.k = 0.0001
```

```
forceCount = 8
forces[0].targetNode = 8
forces[0].startTime = 0
forces[0].endTime = 10
forces[0].fy = -10
forces[1].targetNode = 9
forces[1].startTime = 0
forces[1].endTime = 10
```

```
forces[1].fy = -10
forces[2].targetNode = 10
forces[2].startTime = 0
forces[2].endTime = 10
forces[2].fy = -10
forces[3].targetNode = 11
forces[3].startTime = 0
forces[3].endTime = 10
forces[3].fy = -10
forces[4].targetNode = 0
forces[4].startTime = 0
forces[4].endTime = 10
forces[4].fy = -10
forces[5].targetNode = 1
forces[5].startTime = 0
forces[5].endTime = 10
forces[5].fy = -10
forces[6].targetNode = 2
forces[6].startTime = 0
forces[6].endTime = 10
forces[6].fy = -10
forces[7].targetNode = 3
forces[7].startTime = 0
forces[7].endTime = 10
forces[7].fy = -10
```

'箱側

```
nextBody
meshMaker.cellCountX = 1
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = -30
meshMaker.originY = 2
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 10
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
```

```
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
```

'箱側の下

```
nextBody
meshMaker.cellCountX = 3
meshMaker.cellCountY = 1
meshMaker.cellCountZ = 1
meshMaker.originX = -28
meshMaker.originY = 0
meshMaker.originZ = 0
meshMaker.nodeIntervalX = -2
meshMaker.nodeIntervalY = 2
meshMaker.nodeIntervalZ = 10
meshMaker.generateMesh
edgeOption.c1=0.2
edgeOption.c2=40000
edgeOption.k=200
edgeOption.minA=1
edgeOption.initialA=1
nodeOption.m=0.1
'nodeOption.totalM=1
```

```
volumeElement.enabled = 1
volumeElement.k = 0.0001
```

```
forceCount = 8
forces[0].targetNode = 8
forces[0].startTime = 5
forces[0].endTime = 15
forces[0].fy = -10
forces[1].targetNode = 9
forces[1].startTime = 5
```

```
forces[1].endTime = 15
forces[1].fy = -10
forces[2].targetNode = 10
forces[2].startTime = 5
forces[2].endTime = 15
forces[2].fy = -10
forces[3].targetNode = 11
forces[3].startTime = 5
forces[3].endTime = 15
forces[3].fy = -10
forces[4].targetNode = 0
forces[4].startTime = 5
forces[4].endTime = 15
forces[4].fy = -10
forces[5].targetNode = 1
forces[5].startTime = 5
forces[5].endTime = 15
forces[5].fy = -10
forces[6].targetNode = 2
forces[6].startTime = 5
forces[6].endTime = 15
forces[6].fy = -10
forces[7].targetNode = 3
forces[7].startTime = 5
forces[7].endTime = 15
forces[7].fy = -10
```

```
gravityElement.enabled = 1
gravityElement.force = 9.8
```

```
floorElement.enabled = 1
```

```
outsideElement.enabled = 1
```

```
combineNodes
combineEdges
```

H8 プログラム

配管検査ロボット

```
#include;3048.h;
/* 待ち時間発生初期化 *****/
void timer_init(void){
ITU0.TCR.BYTE = 0x23; /* GRA clock 1/8 */
ITU0.GRA = 0x07d0; /* GRA を 2000 に設定 */
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* 停止状態 */
return;
}
/* 待ち時間発生 引数に、必要なミリ秒を指定する *****/
void wait(int msec){
int i;
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 1; /* ITU0 TCNT 開始 */
for(i=0;i<msec;i++){
do{ /* TCNT = GRA になるまで待つ (1mS) */
}while(ITU0.TSR.BIT.IMFA == 0);
ITU0.TSR.BIT.IMFA = 0; /* 検知を戻して再開 */
}
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* ITU0 TCNT 終了 */
return;
}
int main(void)
{
P4.DDR=0x0f;
P4.PCR.BIT.B4=0xff;
P4.PCR.BIT.B5=0xff;
P4.PCR.BIT.B6=0xff;
P4.PCR.BIT.B7=0xff;
P8.DDR=0xff;
PA.DDR=0xff;
PB.DDR=0xff;
timer_init();
while(1)
{
if(P4.DR.BIT.B4==0) /* 前 */
{
PB.DR.BIT.B1=1; /*後展開*/

```

```

wait(1000);
PA.DR.BIT.B7=1; /*FSB 展開*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B5=1; /*前展開*/
wait(1500);
PB.DR.BIT.B1=0; /*後収縮*/
wait(1000);
PA.DR.BIT.B7=0; /*FSB 収縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B5=0; /*前収縮*/
}
if(P4.DR.BIT.B5==0) /* 後 */
{
PB.DR.BIT.B1=1; /*前展開*/
wait(1000);
PA.DR.BIT.B7=1; /*FSB 展開*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B5=1; /*後展開*/
wait(1500);
PB.DR.BIT.B1=0; /*前収縮*/
wait(1000);
PA.DR.BIT.B7=0; /*FSB 収縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B5=0; /*後収縮*/
}
}
}
}

```

並列接続を用いた移動機構

```

#include j3048.h
/* 待ち時間発生初期化 *****/
void timer_init(void){
ITU0.TCR.BYTE = 0x23; /* GRA clock 1/8 */
ITU0.GRA = 0x07d0; /* GRA を 2000 に設定 */
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* 停止状態 */
return;
}
/* 待ち時間発生 引数に、必要なミリ秒を指定する *****/
void wait(int msec){

```



```

int i;
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 1; /* ITU0 TCNT 開始 */
for(i=0;i<1000;i++){
do{ /* TCNT = GRA になるまで待つ (1mS) */
}while(ITU0.TSR.BIT.IMFA == 0);
ITU0.TSR.BIT.IMFA = 0; /* 検知を戻して再開 */
}
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* ITU0 TCNT 終了 */
return;
}
int main(void)
{
P4.DDR=0x0f;
P4.PCR.BIT.B4=0xff;
P4.PCR.BIT.B5=0xff;
P4.PCR.BIT.B6=0xff;
P4.PCR.BIT.B7=0xff;
P8.DDR=0xff;
PA.DDR=0xff;
PB.DDR=0xff;
timer_init();
while(1)
{
if(P4.DR.BIT.B4==0) /* 前 (黒) */
{
P8.DR.BIT.B0=1; /*吸盤前開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B5=1; /*FSB 右展開*/
PA.DR.BIT.B7=1; /*FSB 左展開*/
PB.DR.BIT.B1=1; /*FSB 上展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B0=0; /*吸盤前吸着*/
P8.DR.BIT.B4=1; /*吸盤中開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B5=0; /*FSB 右収縮*/
PA.DR.BIT.B7=0; /*FSB 左収縮*/
PB.DR.BIT.B1=0; /*FSB 上収縮*/
PA.DR.BIT.B1=1; /*FSB 後展開*/

```

```
wait(1500);
P8.DR.BIT.B4=0; /*吸盤中吸着*/
PA.DR.BIT.B3=1; /*吸盤後開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B1=0; /*FSB 後收縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B3=0; /*吸盤後吸着*/
}
if(P4.DR.BIT.B5==0) /* 右 */
{
P8.DR.BIT.B0=1; /*吸盤前開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B7=1; /*FSB 左展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B0=0; /*吸盤前吸着*/
P8.DR.BIT.B4=1; /*吸盤中開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B7=0; /*FSB 左收縮*/
PA.DR.BIT.B1=1; /*FSB 後展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B4=0; /*吸盤中吸着*/
PA.DR.BIT.B3=1; /*吸盤後開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B1=0; /*FSB 後收縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B3=0; /*吸盤後吸着*/
}
if(P4.DR.BIT.B6==0) /* 左 */
{
P8.DR.BIT.B0=1; /*吸盤前開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B5=1; /*FSB 右展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B0=0; /*吸盤前吸着*/
P8.DR.BIT.B4=1; /*吸盤中開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B5=0; /*FSB 右收縮*/
PA.DR.BIT.B1=1; /*FSB 後展開*/
```

```

wait(1500);
P8.DR.BIT.B4=0; /*吸盤中吸着*/
PA.DR.BIT.B3=1; /*吸盤後開放*/
wait(500);
PA.DR.BIT.B1=0; /*FSB 後収縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B3=0; /*吸盤後吸着*/
}
}
}

```

ブレーキワイヤを用いた移動機構

```

#include<3048.h>
/* 待ち時間発生初期化 *****/
void timer_init(void){
ITU0.TCR.BYTE = 0x23; /* GRA clock 1/8 */
ITU0.GRA = 0x07d0; /* GRA を 2000 に設定 */
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* 停止状態 */
return;
}
/* 待ち時間発生 引数に、必要なミリ秒を指定する *****/
void wait(int msec){
int i;
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 1; /* ITU0 TCNT 開始 */
for(i=0;i<msec;i++){
do{ /* TCNT = GRA になるまで待つ (1mS) */
}while(ITU0.TSR.BIT.IMFA == 0);
ITU0.TSR.BIT.IMFA = 0; /* 検知を戻して再開 */
}
ITU.TSTR.BIT.STR0 = 0; /* ITU0 TCNT 終了 */
return;
}
int main(void)
{
P2.DDR=0x00;
P2.PCR.BYTE=0xff;
P4.DDR=0x0f;
P4.PCR.BIT.B4=0xff;
P4.PCR.BIT.B5=0xff;

```

```

P4.PCR.BIT.B6=0xff;
P4.PCR.BIT.B7=0xff;
P8.DDR=0xff;
PA.DDR=0xff;
PB.DDR=0xff;
timer_init();
while(1)
{
if(P4.DR.BIT.B5==0) /* 正回転 */
{
PA.DR.BIT.B4=0;
PA.DR.BIT.B0=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B6=0;
PA.DR.BIT.B2=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B0=0;
PA.DR.BIT.B4=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B2=0;
PA.DR.BIT.B6=1;
wait(100);
}
else if(P4.DR.BIT.B6==0) /* 逆回転 */
{
PA.DR.BIT.B2=0;
PA.DR.BIT.B6=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B0=0;
PA.DR.BIT.B4=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B6=0;
PA.DR.BIT.B2=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B4=0;
PA.DR.BIT.B0=1;
wait(100);
}
}

```

```
else if(P4.DR.BIT.B4==0) /* 90 */
{
for(i=0;i<33;i++){ /*何度まで曲げるかを決定*/
PA.DR.BIT.B4=0; /*巻き取り*/
PA.DR.BIT.B0=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B6=0;
PA.DR.BIT.B2=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B0=0;
PA.DR.BIT.B4=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B2=0;
PA.DR.BIT.B6=1;
wait(100);
}
P8.DR.BIT.B0=1; /*吸盤前開放*/
wait(500);
P8.DR.BIT.B4=1; /*FSB 展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B0=0; /*吸盤前吸着*/
PA.DR.BIT.B3=1; /*吸盤後開放*/
wait(500);
P8.DR.BIT.B4=0; /*FSB 収縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B3=0; /*吸盤後吸着*/
for(i=0;i<33;i++){ /*ワイヤ戻す*/
PA.DR.BIT.B2=0;
PA.DR.BIT.B6=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B0=0;
PA.DR.BIT.B4=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B6=0;
PA.DR.BIT.B2=1;
wait(100);
PA.DR.BIT.B4=0;
PA.DR.BIT.B0=1;
```

```
wait(100);
}
}
else if(P4.DR.BIT.B7==0) /* 前 */
{
PA.DR.BIT.B6=1; /* 静止トルク */
P8.DR.BIT.B0=1; /*吸盤前開放*/
wait(500);
P8.DR.BIT.B4=1; /*FSB 展開*/
wait(1500);
P8.DR.BIT.B0=0; /*吸盤前吸着*/
PA.DR.BIT.B3=1; /*吸盤後開放*/
wait(500);
P8.DR.BIT.B4=0; /*FSB 収縮*/
wait(1500);
PA.DR.BIT.B3=0; /*吸盤後吸着*/
}
else /* 静止トルク */
{
PA.DR.BIT.B6=1;
}
}
}
```

参照

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

(蛇腹:<http://www.bellows.co.jp/>)

(ターミナルパーツ:<http://www.yazaki.co.jp/>)

(吸盤, チューブフィッティング:<http://www.pisco.co.jp/>)

(エポキシ樹脂系:<http://www.Huntsman.com>)

(変性シリコーン樹脂系:<http://www.cemedine.co.jp/>)

(角度センサ:<http://www.nec-tokin.com/>)

(Microcomputer:<http://www.hitachi.co.jp/>)

(電磁弁:<http://www.koganei.co.jp/>)

(Photo Mos Reray:<http://www.mew.co.jp/>)

(チューブフィッティング:<http://www.pisco.co.jp/>)

(真空ポンプ:<http://www.medo.co.jp/>)

(コンプレッサ:<http://www.kiso-proxxon.co.jp/>)

(レオロジー物体シミュレータ:http://www.geocities.jp/aua_p/vro/)