

2011年度 修士論文

平成24年3月9日

受動吸盤を用いた壁面移動ロボットの研究開発

主査

立命館大学 理工学部 教授 馬 書根

副査

立命館大学 理工学部 准教授 小澤 隆太

立命館大学大学院 理工学研究科

氏名 吉田 佑

Abstract

Nowadays, a lot of tall buildings have been built due to urbanization. Maintenance or inspection of them are necessary but dangerous for human workers. Robots that can move on a wall are desired to be developed for improving the automation of the tasks.

Robots using active suction mechanisms have been widely researched. The active suction mechanisms can adhere to a wall by themselves. However, weights of the robots are heavy because the active suction mechanisms need components for generating an adhering force. In addition, energy is consumed by the mechanism to maintain adhesion to the wall.

This paper presents a wall-climbing robot that uses passive suction cups as the adhering components. Passive suction cup is categorized as one of the passive suction mechanisms. Although the cup must be pushed to a wall in order to be attached to the wall, it does not need any energy to maintain the adhesion. Moreover, the cup can be detached easily by a small pulling force when the edge is peeled off. This robot, which has a single motor, can not only move on a wall but can also autonomously attach and detach the suction cups to the wall. The robot has a guide rail that distributes a load to adhering suction cups, and a supporting tail to prevent from falling off by canceling the bias of the distribution.

Load distribution analysis shows the distribution of the loads on the suction cups. The optimal parameters of the robot are designed based on this analysis, and a prototype is fabricated based on these parameters. Finally, we conduct experiments to verify the robot performance.

要旨

近年，都市化に伴い，高層の建物が多く建設されている．それらの壁面の保守・点検は必要不可欠であり，この作業の無人・省力化を実現するため，壁面を移動できるロボットの実現が望まれている．

従来では，自ら吸着を行う「能動吸着機構」を用いたロボットが研究されているが，これらは真空ポンプといった吸着を行うための機構が必要となるため，その分の本体重量の増加を招く．また，吸着中はエネルギーを消費し続けるという欠点がある．そのため，近年では小型・軽量で吸着維持にエネルギーを消費しない「受動吸着機構」を用いたロボットの研究が行われている．

本研究では，受動吸着機構である「受動吸盤」を用いた壁面移動ロボットの開発を行う．受動吸盤は，吸着の際に吸着面に対して押し付ける力が必要であるが，吸着維持にはエネルギーを消費しない．その上，吸盤を端から剥がすと少ない力で素早く取り外すことが可能である．この特徴を利用し，ただ1つのモータにより，移動だけでなく受動吸盤の吸着開始・解除をも実現するロボットを開発する．その他に，開発するロボットは負荷を各吸盤に分散させるガイドレールや，負荷の分散の偏りを解消してロボットの落下を防ぐ支持尾といった特徴的な機構も有する．

ロボットの壁面吸着時に吸盤に加わる負荷を製力学的に解析(負荷分散解析)し，それを元に壁面移動に適したロボットの物理パラメータを設計した．最後に，そのパラメータに基づいて製作した実機の有用性を実験により検証する．

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既存研究	1
1.2.1	能動的な吸着機構	2
1.2.2	受動的な吸着機構	2
1.3	本研究の内容	4
1.4	本論文の構成	6
第 2 章	ロボットの機構	7
2.1	機構の概要	7
2.1.1	全体の構成	7
2.1.2	動作原理	10
2.2	支持尾機構	11
2.3	吸着機構	13
2.3.1	吸盤取り付け機構	13
2.3.2	吸盤取り外し機構	14
2.4	ガイドレール機構	15
2.4.1	吸盤取り付け機構の補助	15
2.4.2	負荷分散機能	16
第 3 章	ロボットのパラメータ設計	17
3.1	吸盤に加わる負荷の解析	17
3.1.1	負荷分散解析	19
3.1.2	吸着開始から解除までの吸盤への負荷の変化	21
3.2	パラメータの最適化	23
3.2.1	支持尾の長さ	24
3.2.2	吸盤の大きさ・個数	26
第 4 章	壁面移動実験	29
4.1	実験内容	29
4.2	実験結果	30
4.3	実験結果の考察	34
第 5 章	結論	37
5.1	本論文のまとめ	37
5.2	今後の課題	37

謝辞	39
参考文献	41
付録 A フレーム部の仕様	43
付録 B ベルト部の仕様	45
付録 C 前試作機の吸盤負荷解析	47

目 次

1.1	Geckobot [5]	3
1.2	ヤモリの足裏 [6]	3
1.3	ヤモリを模したロボットの足裏 [7]	3
1.4	受動吸盤	5
1.5	前試作機	5
2.1	開発した壁面移動ロボット	7
2.2	フレーム部	8
2.3	ベルト部	9
2.4	吸盤を取り付けるための金属ホック	9
2.5	ロボットの後方部	10
2.6	ロボットの動作	11
2.7	支持尾の機能	12
2.8	パンタグラフの各部に加わる力	12
2.9	吸盤の壁面への接触	14
2.10	吸盤接触の幾何学モデル図	14
2.11	ロボットの後方部の側面図	15
2.12	支持尾の動作	16
2.13	各吸盤に加わる負荷	16
3.1	吸着中の吸盤に加わる負荷	17
3.2	ガイドレールと其中的の吸盤に加わる外力 (a) と, その外力による吸盤への負荷 (b)	18
3.3	新機構の各吸盤に加わる負荷 (支持尾あり)	20
3.4	前機構の各吸盤に加わる負荷 (支持尾なし)	21
3.5	ベルトの回転による吸盤の位置変化	22
3.6	吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 35 \text{ mm}$, $F_{rt} = 12 \text{ N}$, 異なる y_0)	23
3.7	吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 35 \text{ mm}$, $F_{rt} = 12 \text{ N}$, 異なる n)	23
3.8	設計されるパラメータ	24
3.9	各吸盤に加わる負荷の総和	25
3.10	吸盤特性の計測装置	26
3.11	吸盤取り付け・取り外しに必要な力の計測結果例 ($D = 35 \text{ mm}$)	27
3.12	吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 40 \text{ mm}$, $F_r = 20 \text{ N}$, $n = 5$)	28
4.1	開発した壁面移動ロボット	29
4.2	吸盤取り付け機構実験	31

4.3	吸盤取り外し機構実験	32
4.4	壁面移動実験	33
4.5	2つのモータによるベルトの駆動	35
A.1	フレーム部のドラフト図	43
B.1	ベルト部のドラフト図	45
C.1	前試作機のガイドレールとその中の吸盤に加わる外力	47

表 目 次

1.1	吸着機構の分類	2
3.1	吸盤の特性	27
3.2	製作するロボットのパラメータ	28
4.1	試作機の仕様	29
A.1	フレーム部の主な部品	43
B.1	ベルト部の主な部品	45

第 1 章 序論

本章では、まず研究の前段階として、壁面移動ロボットが必要とされる背景について述べる。また、吸着機構に焦点を当て、既存のロボットの特徴を示す。それを踏まえて、本研究の目的・意義を述べる。

1.1 研究背景

近年、多くの高層ビルが世界中で建設されており、それらの建物の保守・点検が必要とされている。しかしながら、高所の壁面は重力の影響により人間が活動するのが危険かつ困難な環境である。そこで、壁面での作業の無人・省力・安全化を目的とし、壁面上で活動できるロボットの実現が望まれている。現在は、壁面での作業の前段階として、落下せずに安全で確実な壁面移動が可能なロボットの開発が行われている。

壁面移動ロボットは一般的に、吸着機構によって壁面からの落下を防ぎ、吸着を維持した状態で移動機構によって壁面上を移動する。そのため、吸着機構と移動機構の組み合わせにより、壁面移動ロボットは成り立つ。吸着機構は、壁面から落下せずに安定した移動が可能か否かを左右するものであるため、壁面移動ロボットにとって特に重要である。次節では、吸着機構に焦点を当て、既存研究を紹介する。

1.2 既存研究

吸着機構はこれまでに様々な方式が提案されてきたが、それらは能動的と受動的の2種類に大きく分類することができる。本論文ではそれぞれ以下のように定義する。

- **能動的な吸着機構** … 自ら吸着の開始・解除が可能であるが、吸着維持にもエネルギーを消費する。
- **受動的な吸着機構** … 自ら吸着の開始・解除は不可能であるが、壁面との吸着維持にエネルギーを消費しない。

それぞれ比較した場合の主な特性を表 1.1 に示す。

表 1.1: 吸着機構の分類

	Active adhesion mechanism	Passive adhesion mechanism
Example	Suction cup with vacuum pump	Permanent magnet
Energy to maintain adhering	Necessary	Unnecessary
Weight	Heavy	Light
Suction force	Strong	Weak
Control of adhesion	Easy	Difficult

次に、能動的・受動的な吸着機構の既存研究について述べる。

1.2.1 能動的な吸着機構

壁面移動ロボットは、能動的な吸着機構を用いたものが主流であり、これまで広く研究されてきた。以下に能動的な吸着機構の代表的な種類と、その主な特徴を示す。

真空ポンプを用いた吸盤 [1]

真空ポンプを用いて吸盤と壁面との間の空気を吸い出す。それにより、吸盤と壁面との間の圧力を下げて、大気圧との圧力差により吸着力を発生させる。全ての吸着機構の中で、最も多く使用されている機構である。吸着する壁面の材料に左右されることなく機能するが、エネルギー消費・騒音が激しい。また、比較的滑らかな壁面でしか機能できないという欠点もある。

静電気引力を用いた機構 [2]

近年新たに開発された機構であり、壁面と機構の表面との電荷に偏りを持たせ、静電気引力で壁面と吸着する。吸着する壁面の材料に左右されることなく、表面が滑らかでない壁面においても吸着力を発生させるが、1–5 kV の高電圧が必要である。

表 1.1 に示すように、能動的な吸着機構は一般的に、受動的なものとは比べて大きな吸着力を持つ。また、真空ポンプなどの吸着力を発生させる機構によって自ら壁面へと吸着するため、吸着の開始・解除の切り替えが容易である。その反面、移動のみならず吸着維持に関してもエネルギーを消費するので、その分消費エネルギーが増加する。その上、真空ポンプなどの吸着を保つ機構も必要となるため、機構が複雑となり、ロボット本体の重量が増加するという問題もある。

1.2.2 受動的な吸着機構

受動的な吸着機構としては、永久磁石 [3] が一般的であったが、近年では分子間力を用いたもの [4] も研究されている。分子間力を用いた吸着機構は日常生活にも利用されており、液晶保護フィルムやラップフィルムなどが例として挙げられる。

近年、ヤモリの足の吸着構造を模した壁面移動ロボット(図 1.1) [5] が開発されたが、これもまた分子間力を利用したものである。ヤモリの足裏には、図 1.2 [6] に表されるように、極細の毛が大量に生えており、その毛は先端でより細い毛に枝分かれしている。その大量の繊毛により、壁面の表面の僅かな凹凸に対しても、隙間なく分子レベルで接触することができる。これにより、壁面との間に分子間力の一種であるファンデルワールス力が発生し、壁面との吸着が可能となる。

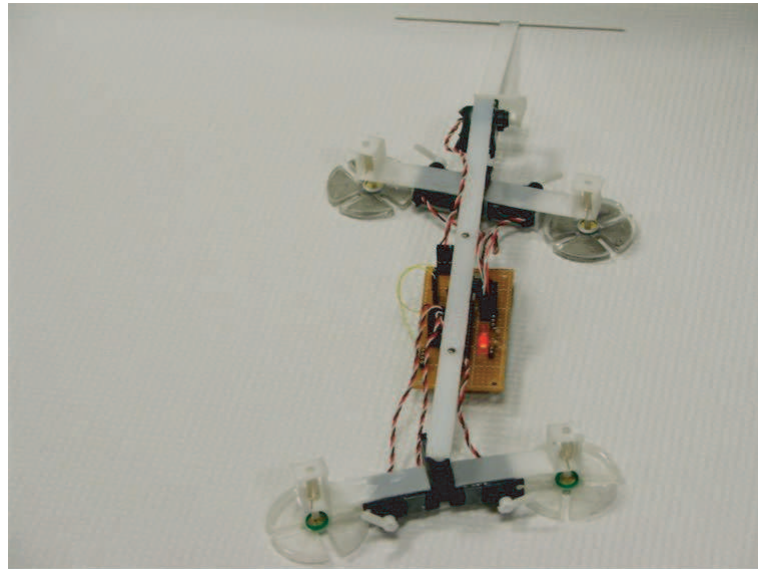


図 1.1: Geckobot [5]

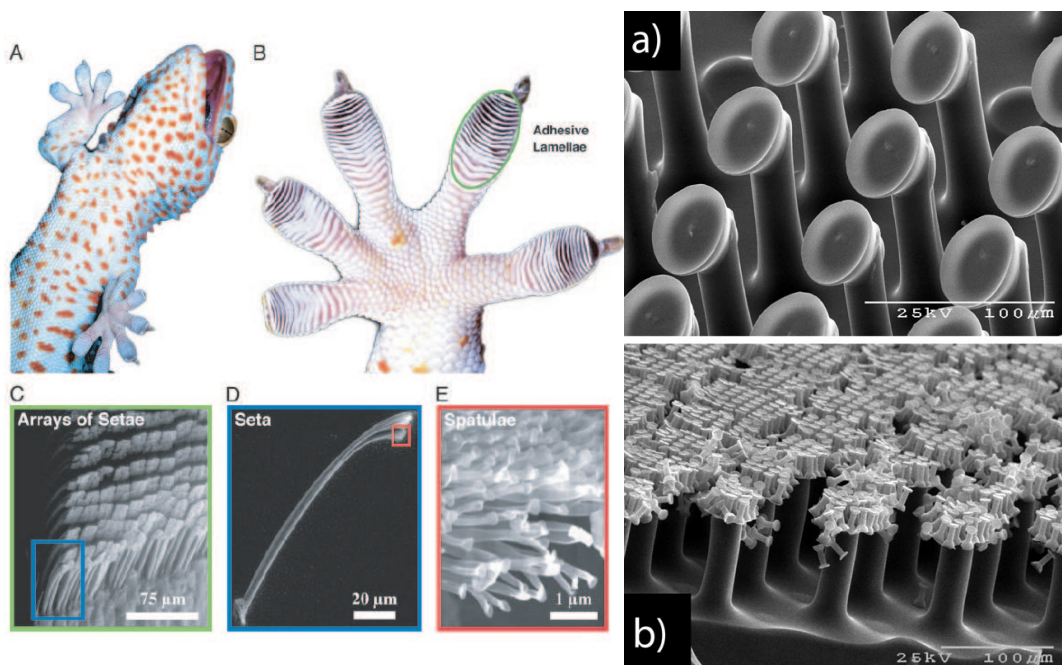


図 1.2: ヤモリの足裏 [6]

図 1.3: ヤモリを模したロボットの足裏 [7]

受動的な吸着機構は能動的なものと違い、吸着維持にエネルギーが不必要である。

また、真空ポンプなどの吸着を維持する機構も必要でないため、ロボット本体の小型・軽量化が可能である。その反面、吸着力が弱いために安定した壁面移動が難しい。その上、自ら吸着を行なう訳ではないので、外部のアクチュエータなどによって吸着の開始・解除が行われる。よって、吸着の開始・解除を実現する機構が必要になるという問題がある。

1.3 本研究の内容

前述したように、能動的な吸着機構の壁面移動ロボットは、吸着状態を維持するためにエネルギーを消費し続けなければならないため、エネルギー消費が大きくなる。その上、吸着を行う機構の分だけ、重量が大きくなり機構も複雑化する。また、重量が増えると、その増加分の重量を支えることが可能な吸着機構が必要となる。その結果、より一層の機構の大型・重量化に繋がる、という悪循環が生まれる。そこで、本研究では機構の小型・軽量化を目指し、受動的な吸着機構に注目する。

しかしながら、受動的な吸着機構には、自ら吸着が行えないという欠点がある。そのため、吸着の開始・解除を行うためだけにアクチュエータを用いるロボットがあるが、結果として、モータ数・重量の増加に繋がる。よって、本研究では、移動用のモータを利用して吸着の開始・解除を実現することも目的とする。

以上より、本研究では、以下の項目を満たす壁面移動ロボット開発することを目的とする。

- 本体が小型・軽量でエネルギー消費が少ない
- 受動吸着機構を用いる
- 移動のためのアクチュエータを利用し、吸着の開始・解除を行う

なお、本研究では、形状が平らであり表面が滑らかな壁面を移動対象面とする。

また、前節で述べたヤモリの手の構造を模した吸着機構であるが、図 1.3 に表されるように、非常に精密かつ微細な構造のため構造自体を製作することが困難である。そこで、ヤモリの手の構造を模した機構のように特殊な構造を用いない、低コストな機構を実現させる。

以上の目的を踏まえて提案する壁面移動ロボットの移動機構は、クローラ方式である。クローラ機構は構造が簡単であり、接地面積が大きいという特徴がある。

また、本ロボットの吸着機構には、図 1.4 に示されるような受動吸盤を用いる。ここで述べる「受動吸盤」とは、真空ポンプによって吸盤内を真空状態に保つものではない。吸盤を押し付けることにより吸盤の内部の空気を抜き、吸盤内部の圧力と大気圧との圧力差によって壁面と吸着するタイプの吸盤である。受動吸盤は、一度吸着すると大気圧によって吸着力を発揮し続け、吸着維持にはエネルギーを消費しないという利点を持つ。

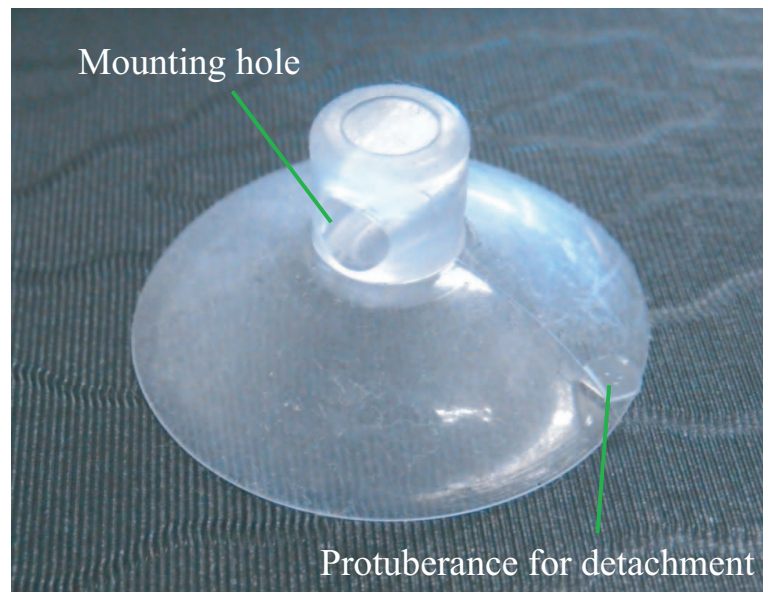


図 1.4: 受動吸盤

卒業研究として，図 1.5 に示される試作機を製作し実験を行ったが，壁面移動は実現できずに落下した [8,9].

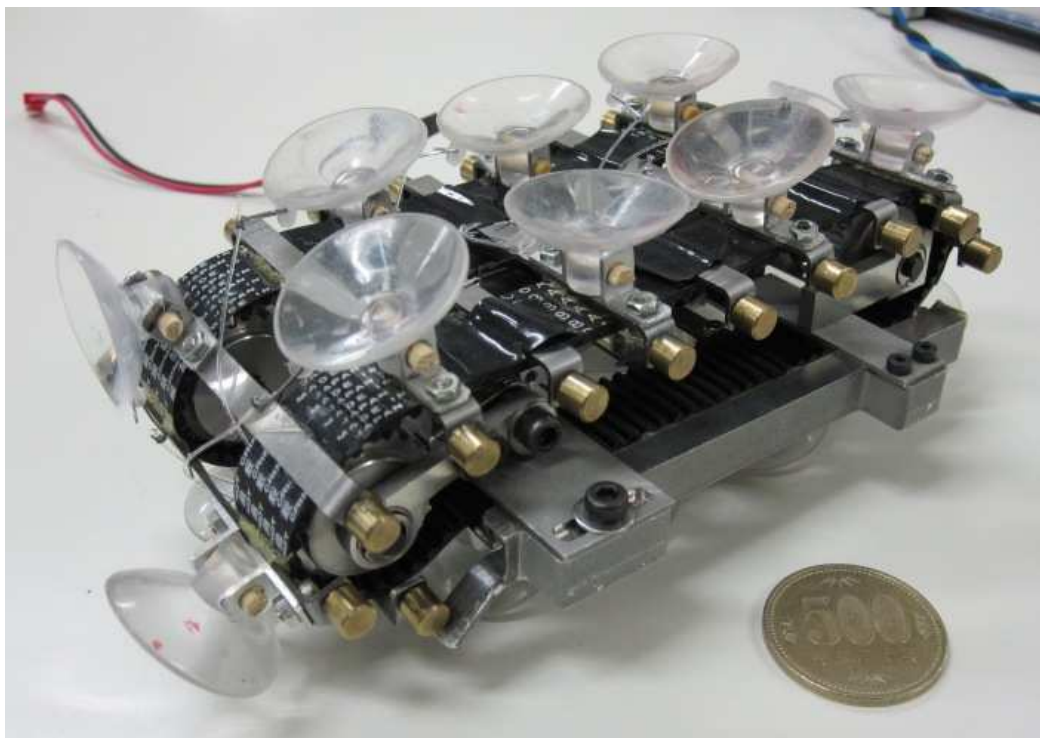


図 1.5: 前試作機

本論文では，前試作機の有する問題を改善するために，「クローラ的前方角」や「支持尾機構」などを追加した新しい試作機を開発し，実機実験によりその有用性を検証する．

1.4 本論文の構成

以降の本論文の構成について述べる．

第2章では，開発した壁面移動ロボットの機構と動作について示す．第3章では，本ロボットの垂直壁面における各吸盤への負荷を解析し，その結果を基にロボットの物理パラメータを設計する．第4章では，設計したパラメータに基づいて製作した実機による壁面移動実験の結果と考察を述べる．第5章では，本論文のまとめと今後の課題について述べる．

第2章 ロボットの機構

本章では，開発したロボットの概要とその各部の機能の詳細について述べる．

2.1 機構の概要

本節では，開発した壁面移動ロボットの全体の構造を示し，そのロボットが壁面を移動する際の動作について説明する．

2.1.1 全体の構成

開発した壁面移動ロボットの3DCAD図を図2.1に示す．本ロボットは，クローラロボットのベルトの表面に吸盤が取り付けられた機構である．実際には，上部のベルトにも等間隔に吸盤が取り付けられているが，図2.1では省略されている．

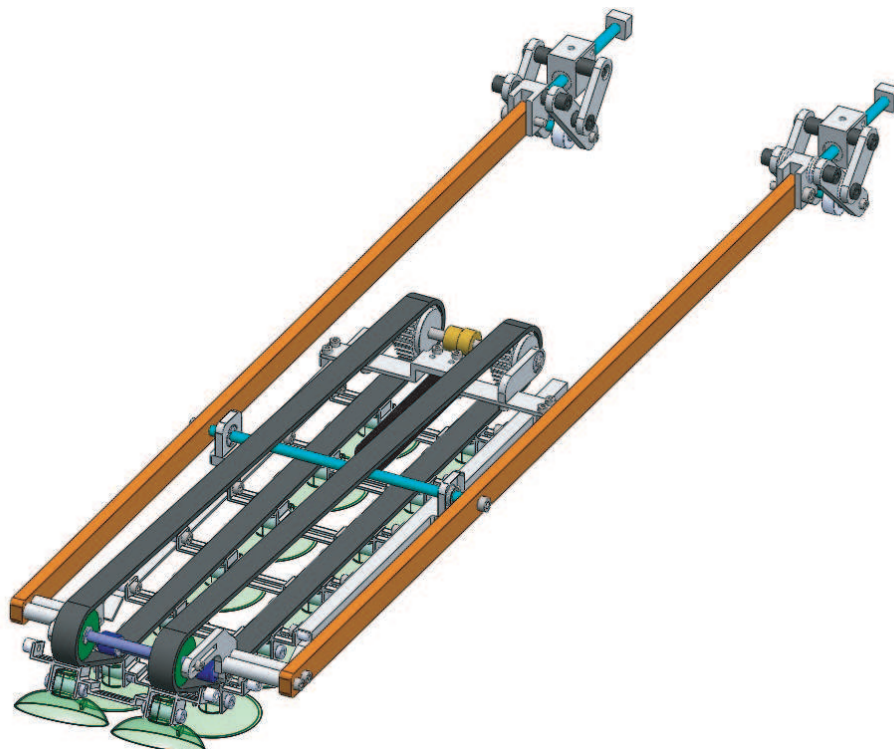


図 2.1: 開発した壁面移動ロボット

本ロボットは，フレーム部とベルト部から構成される．以下ではそれぞれの構造について説明する．

フレーム部

フレーム部は、図 2.2 に示されるように、クローラベルト駆動のためのプーリとモータや、ガイドレールと支持尾、それらを固定する金属フレームから成り立つ。モータはウォームギアを介して後方プーリを回転させる。ガイドレールとは、図 2.2 に示される C 型金属フレームの呼称であり、支持尾は主に、ロボットの落下の防止・吸盤の取り付けを実現する機構である。それらの機能については詳しく後述する。なお、フレーム部には軽量で安価なアルミを使用している。

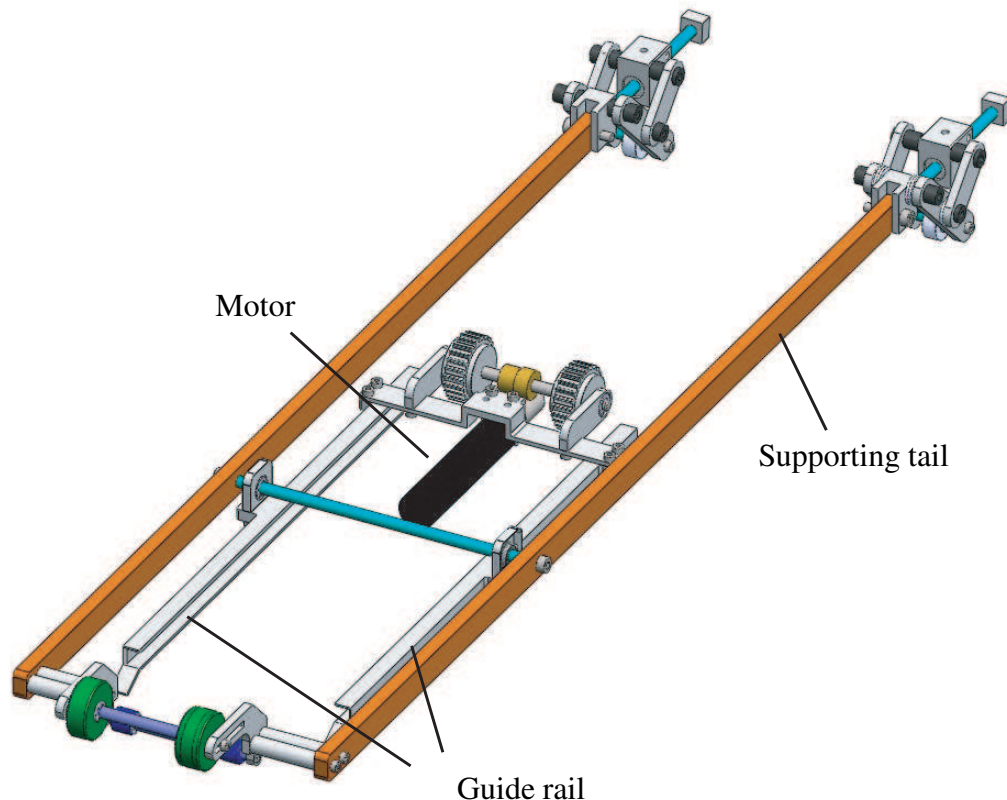


図 2.2: フレーム部

ベルト部

ベルト部は、図 2.3 に示されるように、ロボットの移動のためのクローラベルトと吸着機構である吸盤によって構成される。その他には、ガイドシャフトと、それを取り付けるための金属ホックがベルトの外側に等間隔に取り付けられている。クローラベルト 2 本とホックは接着剤により固定され、吸盤は図 2.4 に示すように、固定用の横穴に差し込んだシャフトをホックの穴に通して設置される。ホックの穴はシャフトよりわずかに直径が大きいので、吸盤はその軸周りに自由に回転させることができる。ベルト部は、一般的なクローラベルトと同様に、フレーム部のプーリにより張力を加えられて固定される。

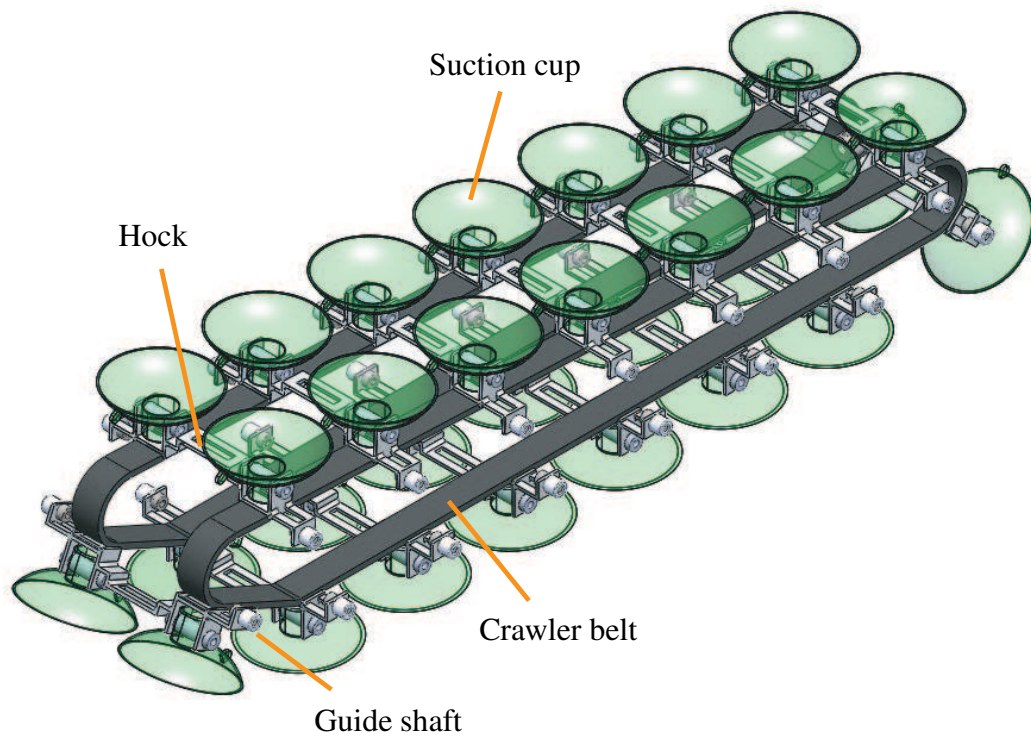


図 2.3: ベルト部

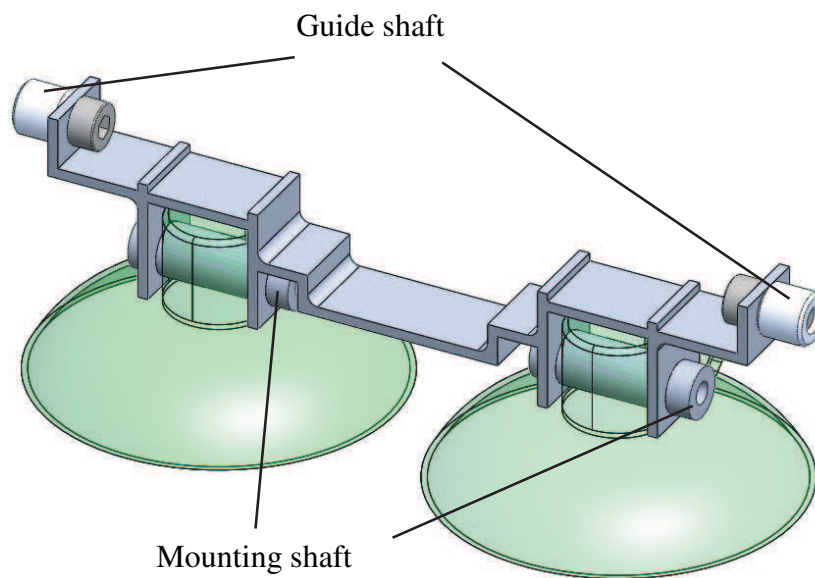


図 2.4: 吸盤を取り付けるための金属ホック

本論文のロボットで使用する吸盤は、図 1.4 に示すように、外側に取り外し用の取っ手が付いている。ベルト部では、吸盤の外側の取っ手とその後ろのホックは図 2.5 のようにワイヤーで繋がっている。

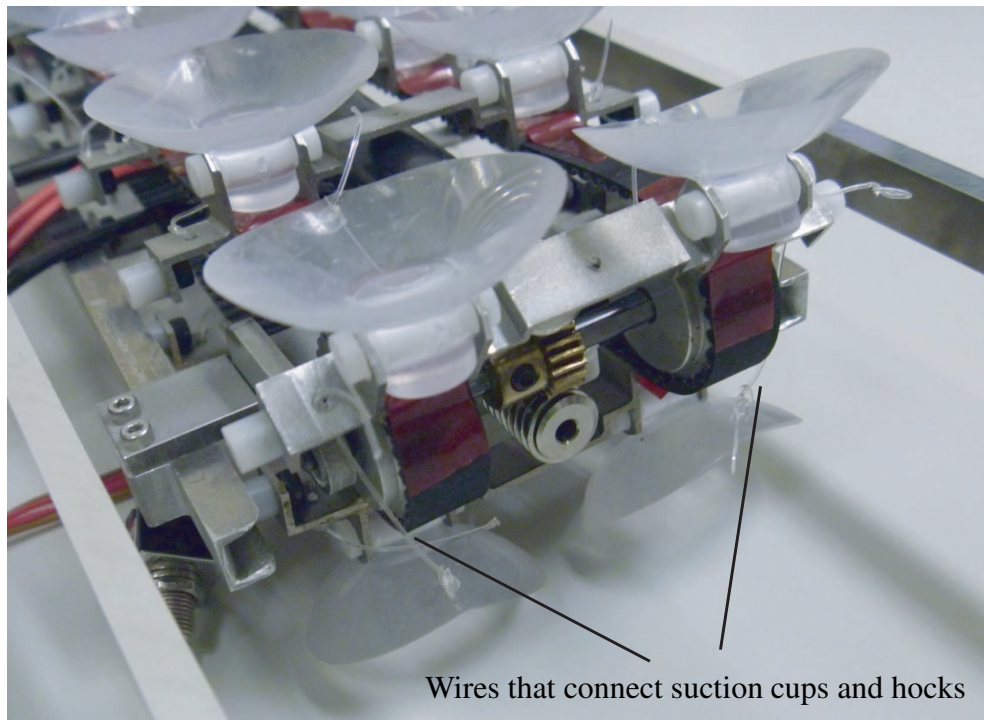


図 2.5: ロボットの後方部

2.1.2 動作原理

開発した壁面移動ロボットの動作の流れについて説明する。

図 2.6 に示すように、本ロボットはクローラベルトの回転を利用し、ロボットの移動のみならず受動吸盤の取り付け・取り外しをも行う。まず、モータが後方プーリを回転させて、クローラベルトが駆動する。それに応じて、ベルトに固定されたホック、吸盤、ガイドシャフトも回転する。これにより、前方プーリ部分においてはベルト上の新たな吸盤が壁面に接触する。その際に吸盤取り付け機構によって壁面に押し付けられて吸着する。次に、吸着した吸盤の取り付けられたホックのガイドシャフトがガイドレール内に進入し、ガイドレール上を滑りながら移動する。図 2.2 に示すように、ガイドシャフトのガイドレールへの進入を補助するために、ガイドレールの入り口には板状のガイドを設けた。最後に、吸盤が後方プーリに達した時に、吸盤取り外し機構により取り外される。この時、その吸盤のガイドシャフトは、ガイドレールから滑り出る。なお、「吸盤取り付け機構」と「吸盤取り外し機構」については、2.3 節で詳しく説明する。

以上より、図 2.6 の (1) から (2) に示すように、前部で吸盤を吸着させ、後部で吸盤を剥がし、それを繰り返すことによって壁面を移動する。なお、前方部で吸盤を機能させて後方部で吸盤の機能を解除するので、本論文の壁面移動ロボットは後退できない。

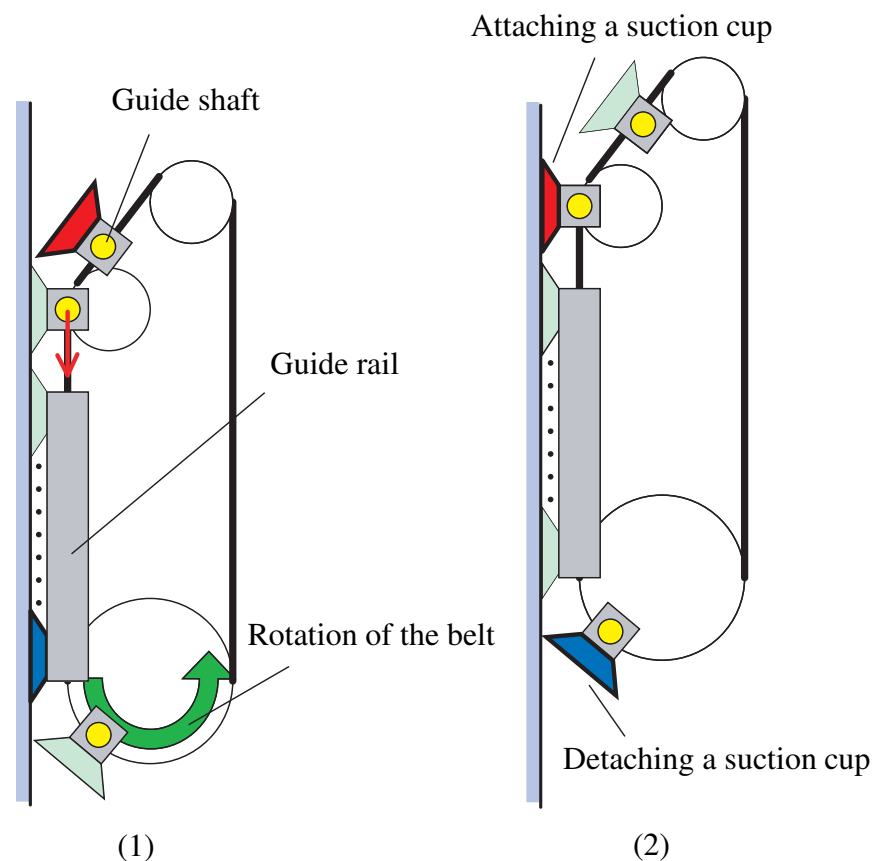


図 2.6: ロボットの動作

以降の節では，支持尾，吸着機構，ガイドレールの詳細を説明する．

2.2 支持尾機構

本節では，支持尾機構の機能について説明する．支持尾機構は，図 2.7 に示すように，後方部にパンタグラフ機構を有している．パンタグラフ内の圧縮されたバネの復元力により，後方部に取り付けられた受動車輪が壁面を押し付ける．また，支持尾はベアリングを通じてガイドレールと固定されており，その固定軸周りに自由に回転できる．

支持尾が壁と吸盤を押し付けた力の反力は，ガイドレールを通して吸着中の吸盤に伝わる．この反力によって各吸盤への引っ張り負荷の偏りを解消するが，この詳細は次章の負荷分散解析において述べる．

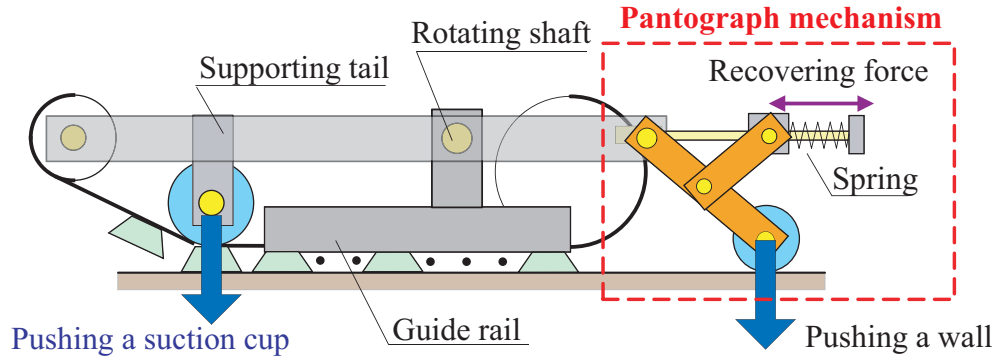


図 2.7: 支持尾の機能

次に、パンタグラフのバネの復元力 F_e と壁を押す力の反力 F_t の静学的関係について図 2.8 を用いて説明する．なお，ここでは重力の影響は無視する．

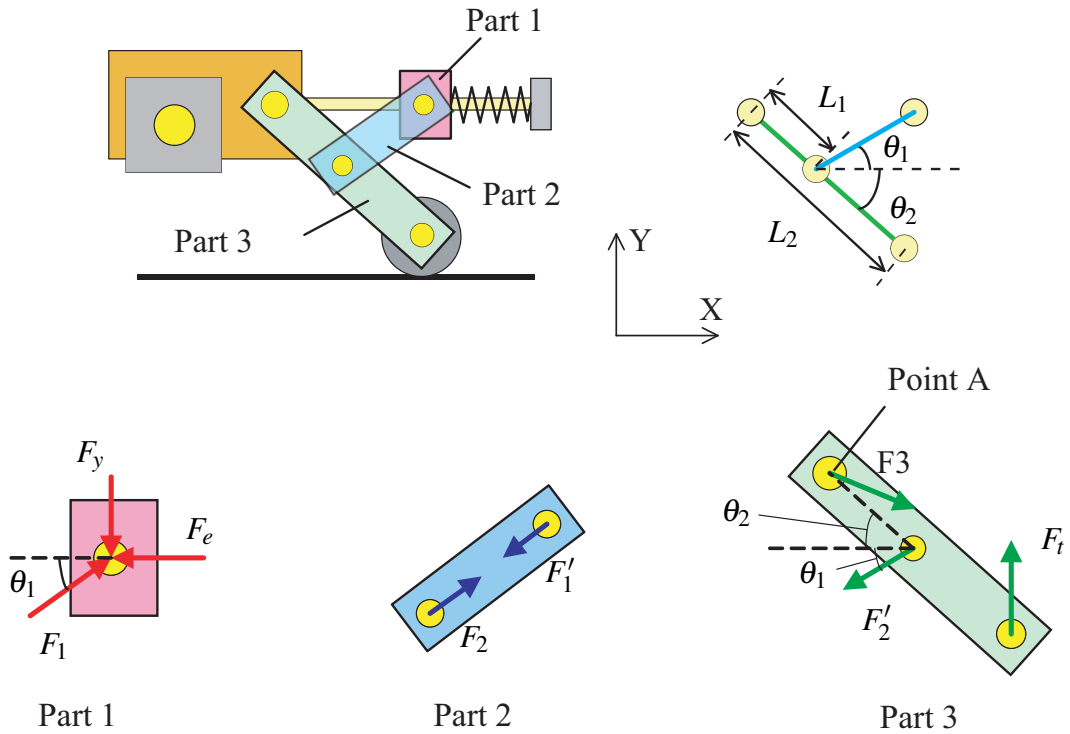


図 2.8: パンタグラフの各部に加わる力

F_e から F_t を求める際，パーツ 1 からパーツ 3 に分けて考えていく．

まず，パーツ 1 に関しての力のつり合いについて考える．X 方向の力のつり合いより，式 (2.1) が求められる．ここで， F_1 はパーツ 2 から受ける力である．

$$F_e = F_1 \cos \theta_1 \quad (2.1)$$

また，パーツ 2 に関しての力のつり合いは式 (2.2) で表される．なお， F_1' は F_1 の反力であり， F_2 はパーツ 3 より受ける力である．

$$F_1' = F_2 \quad (2.2)$$

最後に、パーツ3に関しては点A周りのモーメントのつり合いより、式(2.3)が成り立つ。なお、 F'_2 は F_2 の反力である。

$$F_1 L_2 \cos \theta_2 = F'_2 L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3)$$

以上より、 $\theta_2 = \theta_1$ 、 $L_2 = 2L_1$ の場合、パンタグラフが壁を押す力 F_t はバネの復元力 F_e より、以下の式のように表される。

$$F_t = F_e \tan \theta_1 \quad (2.4)$$

2.3 吸着機構

本節では、吸着機構である受動吸盤の取り付け、取り外しを実現する機構について述べる。クローラロボットのベルトに受動吸盤を取り付けただけでは壁面を登ることは不可能である。受動吸盤を吸着させるには、その吸着面を壁面に対し押し付ける力が必要である。また、吸着を解除する場合には、壁面に対し引き剥がす力が必要となる。本ロボットでは、どのようにして吸盤の付け外しを実現するのかを、以降の小節で述べる。

2.3.1 吸盤取り付け機構

本ロボットの吸盤取り付けは、図2.7に示される。支持尾は後方部のパンタグラフにより壁面を押すが、支持尾はガイドレールと回転軸を通して固定されているので、押し付けの反力によりその軸を中心に回転しようとする。それにより、前方部では支持尾に取り付けられた前方プーリが吸盤を壁面へと押し付ける。

また、吸盤が壁面へと押し付けの際の、壁面との接触方法も重要である。図1.5の前試作機では、図2.9(b)のように前方部が半円状であったため、吸盤の吸着面ではなく外側が壁面に接触してしまい、吸盤の取り付けが失敗するという問題があった。そこで、吸盤を確実に取り付けるため、図2.9(a)のように前方部には前方角を設けた。なお、壁面から見た吸盤が動く速度は、図2.9のように、ベルトの駆動によるものとロボット全体の移動によるものの合計であり、前方角 θ が小さければ小さい程、壁面に対して垂直に近い角度で吸盤を押し付けることが可能となる。

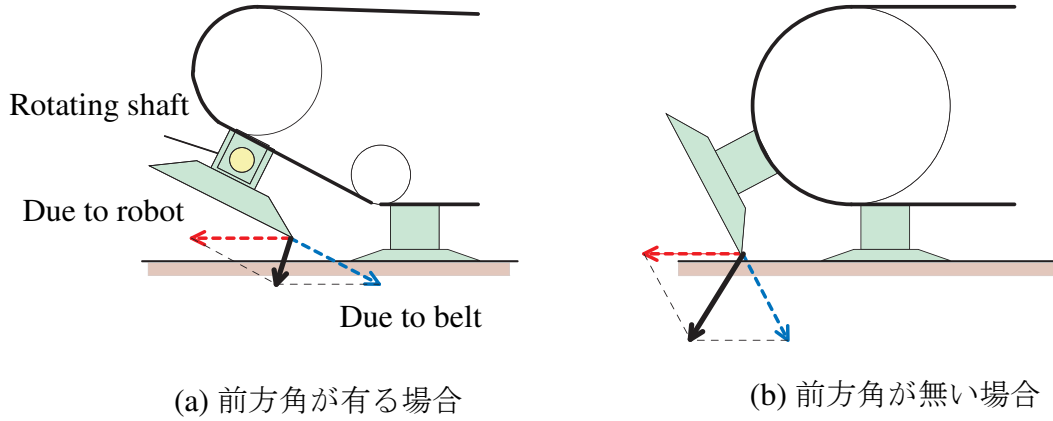


図 2.9: 吸盤の壁面への接触

次に、前方角に差し掛かるまでに吸盤と壁面の接触を防ぐ条件を、図 2.10 を用いて説明する。

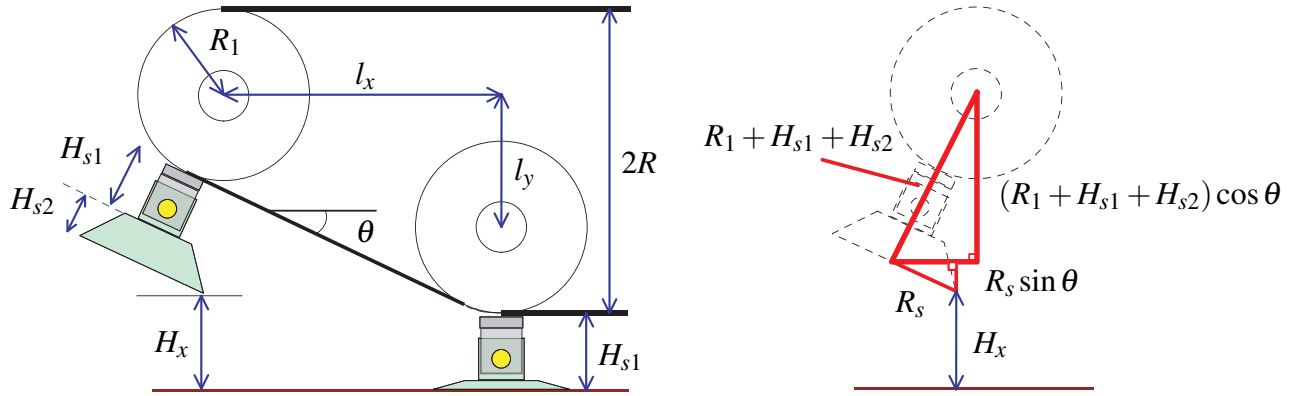


図 2.10: 吸盤接触の幾何学モデル図

幾何学的関係から、吸盤と壁面との距離 H_x は式 (2.5) のように表される。

$$H_x = 2R + H_{s1} - R_1 - (R_1 + H_{s1} + H_{s2}) \cos \theta - R_s \sin \theta \quad (2.5)$$

ここで、 H_{s1} は吸盤の円柱部の高さ、 H_{s2} は吸盤の吸着部の高さ、 R は後方プーリの半径、 R_1 は前方上プーリの半径、 R_s は吸盤の吸着面の半径、 θ は前方角の角度を表している。なお、吸着中の吸盤においては、 $H_{s2} = 0$ であると仮定している。吸盤が前方角に差し掛かるまでに接触させないためには、 $H_x > 0$ となるように設計する必要がある。

2.3.2 吸盤取り外し機構

吸盤を剥がすには、壁に対して引く方向の力が必要となるが、単純に引っ張るだけでは取り外しが困難である。一般的に、我々が吸盤を取り外す場合、吸盤の端を剥がし空気を流入させて剥がす。そのため、本ロボットでは、図 2.5 で示したワイヤーの張力により吸盤の端を引き剥がすことを吸盤取り外し機構とした。吸着中の

吸盤がガイドレール中腹にある場合は、そのワイヤーは緩んだ状態であり、張力は発生しない。しかしながら、図 2.11 に示すように、吸着中の吸盤が後方プーリに到達した場合には、ワイヤーは巻き上げられて張力が発生し、取り外し用の取っ手が壁から引く方向の力を受ける。その結果、ベルトの回転を利用して受動的に吸盤を取り外すことが可能となる。

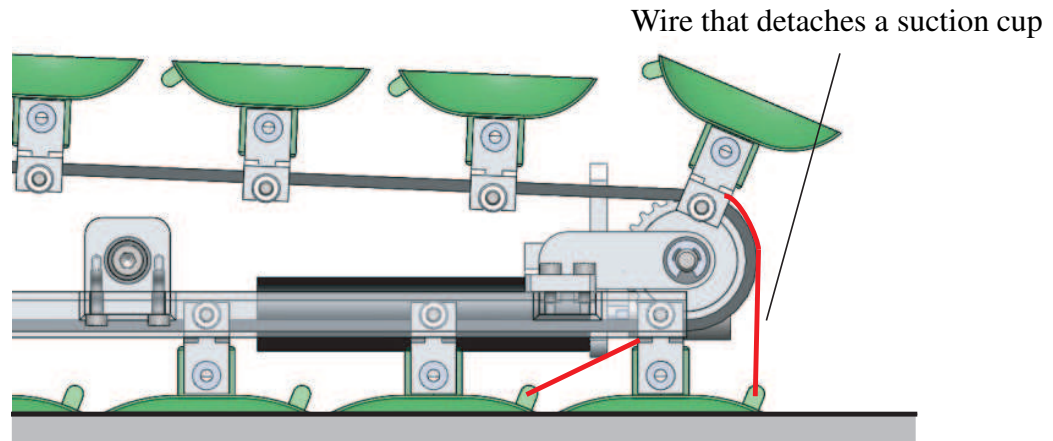


図 2.11: ロボットの後方部の側面図

2.4 ガイドレール機構

本節では、ガイドレールの機能について詳しく述べる。ガイドレールには主に、以下に示すような役割がある。

- 押し付け機構の補助
- 負荷分散機能

以降の小節では、これらについて詳しく述べる。

2.4.1 吸盤取り付け機構の補助

前節で説明した押し付け機構であるが、押し付け力を発生するには、押し付けの反力を吸着中の吸盤に伝えることが必要である。例えば、壁面にどの吸盤も吸着していない場合、新しい吸盤を取り付けることは不可能である。ガイドレールが機能する場合は、図 2.12(a) のようになる。パンタグラフ内のバネの復元力により支持尾が変形しようとするが、支持尾はガイドレールに固定されているため変形せず、変形しようとする力は前方部において押し付け力になる。この場合、ガイドレールに入ったガイドシャフトが、支持尾による押し付けの反力をベルトに取り付けられたホックを通して吸盤に伝える。

一方で、ガイドレールが機能しない場合は図 2.12(b) のようになる。この場合、支持尾がパンタグラフで壁面を押そうとしても、支持尾はただ変形するだけであり、押し付けの反力を吸盤に伝えることができないので、前方プーリの押しつけ力は発生しない。

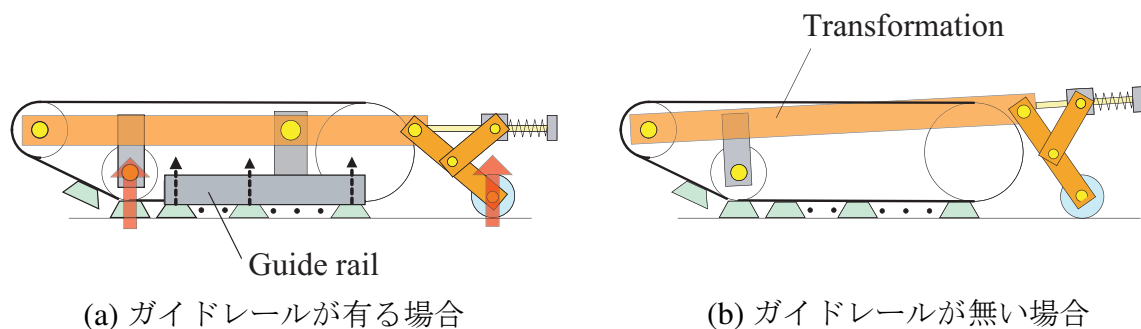


図 2.12: 支持尾の動作

2.4.2 負荷分散機能

クローラ型壁面移動ロボットではベルト自体には剛性がないため、図 2.13(b) のように、ベルトの両端に大きな力が加わり本体中心に近づくにつれて負荷が減少する。よって、吸盤をベルト外側に取り付けただけのクローラ型壁面移動ロボットでは、負荷が両端の吸盤に集中してベルトの端の方から吸盤が徐々に外れていく状態になる。つまり、吸盤の個数に比例してロボット全体の吸着力を増加させることが不可能である。

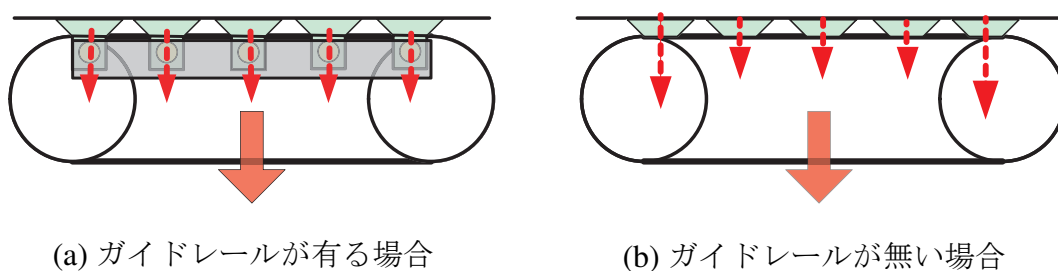


図 2.13: 各吸盤に加わる負荷

ガイドレールは負荷分散機能 [3] を有しており、吸盤の位置による負荷の偏りを解消する。本論文のロボットでは、ベルトに等間隔に取り付けたガイドシャフトがガイドレール上を接触しながら移動する。ガイドレールがある場合、図 2.13(a) のようにベルトに直接負荷は加わらず、ガイドレール内のガイドシャフトを通じて各吸盤に負荷が加わる。ガイドレールには剛性があるので、各吸盤に加わる力は吸盤の数だけ分散させることが可能となる。

第3章 ロボットのパラメータ設計

本章では，ロボットが壁面上で静止した場合に壁面と吸着中の各吸盤に加わる負荷の静力学解析を示す．また，その解析に基づいて，ロボットを製作する上で必要となる物理パラメータを設計する．

3.1 吸盤に加わる負荷の解析

2.4節において前述した通り，吸盤を押し付ける反力によって吸着中の吸盤には壁から引っ張られる方向の負荷が加わる．つまり，本ロボットが新たに吸盤を取り付けるには，吸着力が必ず必要となる．吸着力が無いと，吸盤押し付けの反力によりロボットが壁面から離れてしまう．そのため，吸盤の吸着を維持させる事が非常に重要である．

図3.1のように，壁面と垂直な方向には，吸着力 F_s ，垂直抗力 N ，その他の外力 F_x という3つの力が吸着中の吸盤には加わっている． $F_s \leq F$ となった場合，吸盤が壁面から剥がれる．つまり，吸盤の吸着を維持するには， $F_s > F_x$ の条件を常に満たさなければならない．

以上より，壁面移動を実現するには，壁面に垂直な外力 F を常に吸着力以下に保つ必要がある．

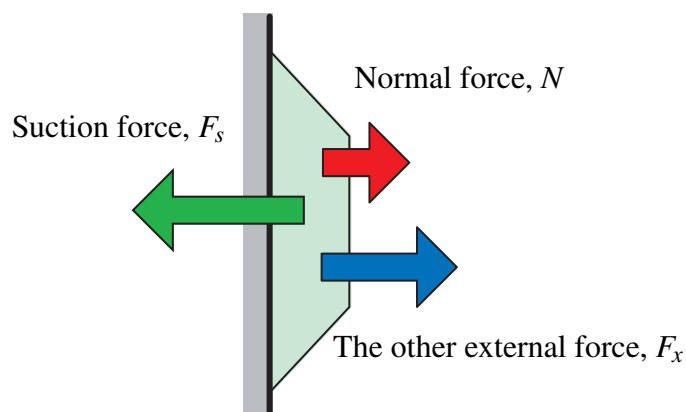


図 3.1: 吸着中の吸盤に加わる負荷

図3.2(a)に示すように，吸着力，吸盤と壁との摩擦力を除けば，本ロボットのガイドレールとその中の吸盤には，本体の重力，支持尾から受ける力という2種類の外力が加わる．そのため，ロボットが壁面に静止する場合，図3.2(b)に示すように，吸着する各吸盤はこの2種類の力による負荷を受ける．なお，ガイドレールの負荷分散機能により，負荷が線形に分散するという仮定している．本節では，この負荷

の x 成分を解析し、壁面移動中に全ての吸盤が外れない最適な条件を求める．実際には、ロボットが壁面から滑り落ちる場合を考えると y 成分も考慮されるべきであるが、ここでは吸盤の脱着に注目しているため、壁面と垂直な x 成分のみを解析する．以降での「吸盤への負荷」は全て x 成分の負荷を意味することとする．

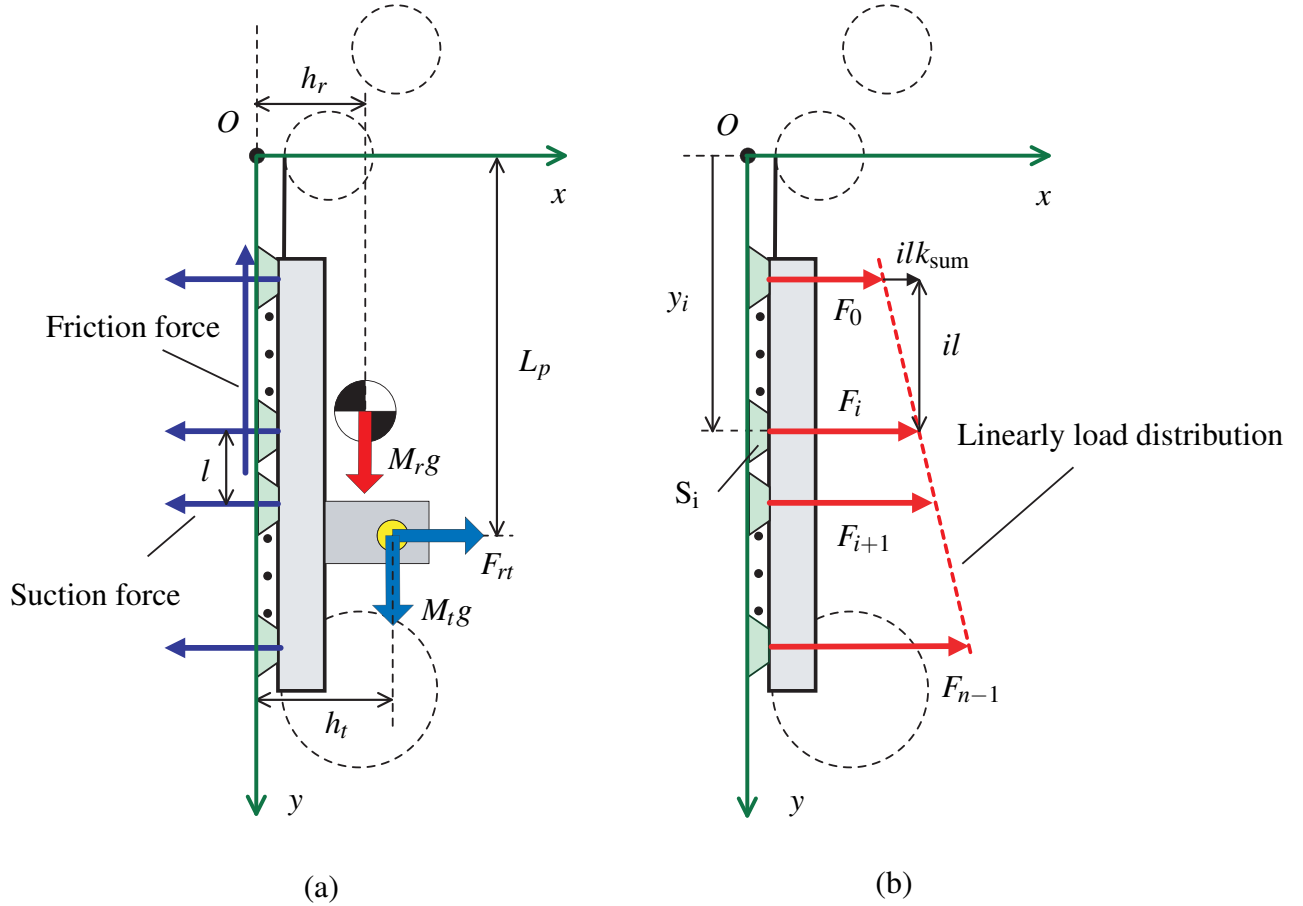


図 3.2: ガイドレールとその中の吸盤に加わる外力 (a) と、その外力による吸盤への負荷 (b)

解析に使用するパラメータを以下のリストに示す．

- M_r [kg] : ロボット本体の質量
- M_t [kg] : 支持尾の質量
- g [m/s²] : 重力加速度
- h_r [mm] : 本体底面からロボット本体の重心までの距離
- h_t [mm] : 本体底面から支持尾の重量の作用点までの距離
- l [mm] : 各吸盤の取り付け間隔
- L_p [mm] : 前方プーリと支持尾固定軸との距離
- n : ガイドレール内の吸着中の吸盤の個数

- S_i : ガイドレール内の上から i 番目の吸盤
- y_i [mm] : 原点 O と S_i の間の距離
- F_i [N] : S_i に加わる力
- k_{sum} [N/mm] : y 軸単位長さ当たりの負荷の分布の変化量
- F_{rt} [N] : 押し付けの反力により支持尾がガイドレールを引く力

3.1.1 負荷分散解析

吸盤に加わる負荷は、力とモーメントに関する等式により求められる。しかしながら、求めるべき負荷の数は吸盤の個数だけ存在するため、全ての吸盤に加わる負荷を個々に求めることは困難である。ただし、図 3.2 に表されるように負荷が線形に分散すると仮定した場合、最初の吸盤 S_0 への x 方向の負荷 F_0 と吸盤への負荷の単位長さあたりの変化量 k_{sum} が分かると、式 (3.1) のように、 n 個の吸着する吸盤の中の i 番目である S_i への x 方向の負荷 F_i が求められ、結果として全ての吸盤への x 方向の負荷が求められる。ここで、 $0 \leq i \leq n-1$ である。

$$F_i = F_0 + ilk_{\text{sum}} \quad (3.1)$$

2つの未知数である k_{sum} と F_0 を求めるには、2つの等式が必要である。本論文では、 x 方向の力の等式と点 O 周りのモーメントの等式より、 k_{sum} と F_0 を求める。

まず、 x 方向の力に関して、式 (3.3) が成り立つ。

$$F_{rt} = \sum_{i=0}^{n-1} F_i \quad (3.2)$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} (F_0 + ilk_{\text{sum}}) \quad (3.3)$$

これを整理すると、式 (3.4) が求められる。

$$\frac{F_{rt}}{n} = F_0 + \frac{l(n-1)}{2} k_{\text{sum}} \quad (3.4)$$

次に、点 O 周りのモーメントのに関して、式 (3.6) が成り立つ。

$$F_{rt}L_p - (M_rgh_r + M_tgh_r) = \sum_{i=0}^{n-1} (F_i y_i) \quad (3.5)$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} \{(F_0 + ilk_{\text{sum}})(y_0 + il)\} \quad (3.6)$$

これを整理すると、式 (3.7) が求められる。

$$\frac{2(F_{rt}L_p - M_rgh_r - M_tgh_r)}{n\{2y_0 + l(n-1)\}} = F_0 + \frac{l(n-1)\{3y_0 + l(2n-1)\}}{3\{2y_0 + l(n-1)\}} k_{\text{sum}} \quad (3.7)$$

式 (3.4), (3.7) より, k_{sum} と F_0 はそれぞれ, 式 (3.8), (3.9) で表すことができる.

$$k_{\text{sum}} = -\frac{6[2G + F_{rt} \{2(y_0 - L_p) + l(n-1)\}]}{l^2(n-1)n(n+1)} \quad (3.8)$$

$$F_0 = \frac{2[3G + F_{rt} \{3(y_0 - L_p) + l(2n-1)\}]}{ln(n+1)} \quad (3.9)$$

なお, ここで G は重力項であり, 式 (3.10) で表される.

$$G = (M_r h_r + M_t h_t)g \quad (3.10)$$

式 (3.1), (3.8)–(3.10) より, 本ロボットの各吸盤へ分散する負荷は, 図 3.3 のように表すことができる. ここでは, $k_{\text{sum}} = 0$ となるように各パラメータを設定している. その設定は, $M_r + M_t = 0.3 \text{ kg}$, $l = 16 \text{ mm}$, $n = 6$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $L_p = 73 \text{ mm}$, $y_0 = 16 \text{ mm}$, $h_r = h_t = 26 \text{ mm}$, $F_{rt} = 4.5 \text{ N}$ である. なお, 機構の質量の中心は機構全体の中心であると仮定した.

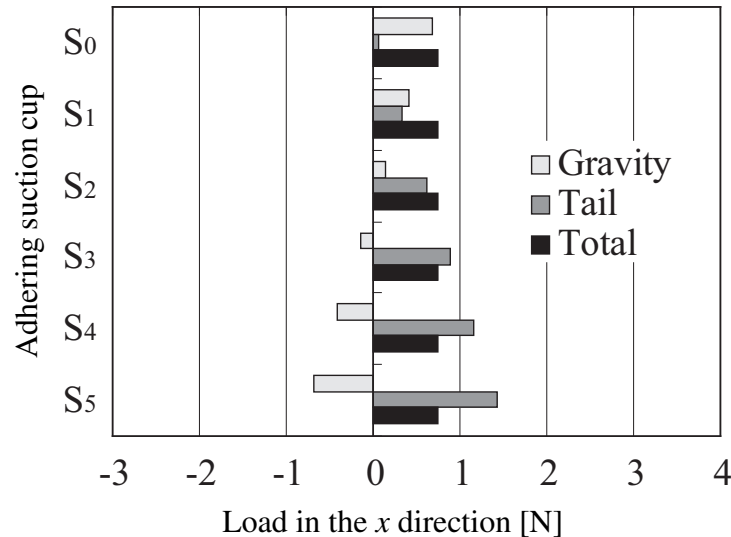


図 3.3: 新機構の各吸盤に加わる負荷 (支持尾あり)

また, 支持尾の無い前試作機に関しても同様にモデルを立てて解析すると, この場合の各吸盤に加わる負荷は, 図 3.4 のように表される [8,9]. 前試作機の力学モデル, 図 3.4 の導出は, 付録 C に記述する.

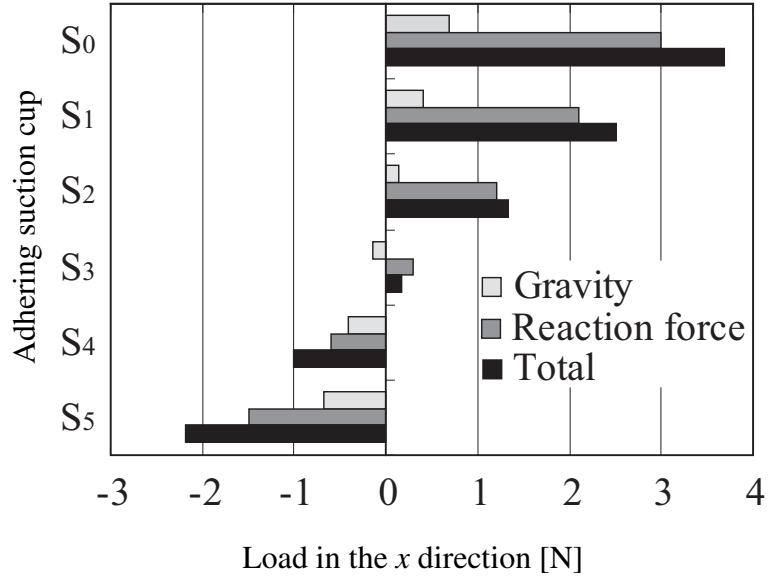


図 3.4: 前機構の各吸盤に加わる負荷 (支持尾なし)

図 3.3, 3.4 より, 重力による負荷は支持尾の有無に関わらず, 必ず上部の吸盤に集中してしまう. その上, 図 3.4 に示すように, 支持尾がない場合は吸盤押し付けの反力による負荷もまた必ず上部の吸盤に集中し, 上部への負荷の偏りがより大きくなってしまう. その反面, 下部の吸盤には吸盤を押す方向の負荷が加わっており, 結果的に吸盤として機能していないことが分かる.

一方で, 支持尾がある場合は, 図 3.3 に示すように, 支持尾による負荷によって上部の吸盤への負荷の偏りを解消させることが可能である. この場合, $k_{\text{sum}} = 0$ であり, 全ての吸盤への負荷の値を等しくすることができる.

3.1.2 吸着開始から解除までの吸盤への負荷の変化

前小節で述べた通り, 本ロボットは $k_{\text{sum}} = 0$ とすることが可能である. この場合, 各吸盤の負荷は変わらないため, 全ての吸盤に同じ負荷が加わる. 式 (3.8) より, $k_{\text{sum}} = 0$ になる条件は, 以下の式で表すことができる.

$$0 = 2G + F_n \{2(y_0 - L_p) + l(n - 1)\} \quad (3.11)$$

この式を見ると, 変数 y_0 を有するのが分かる. 図 3.5 に示すように, y_0 は前方プーリから S_0 までの距離である.

図 3.5 に示すように, ガイドレール内のある吸盤 S はベルトの回転によって位置が変化し, その変化に応じて S への負荷 F も変化する. (1) は, S がガイドレールに入った瞬間であり, $S = S_0$, $y_0 = l$ である. ここでは, (1) の場合に $k_{\text{sum}} = 0$ であると仮定する. (2) では, 依然として $S = S_0$ であるが, ベルトの回転により吸盤の位置関係が変わるため, y_0 の値が $\frac{3}{2}l$ へと増加している. よって, 式 (3.8) より, $k_{\text{sum}} \neq 0$ となる. また, (3) のように S が $y_0 = 2l$ になる瞬間, 新しい吸盤がガイドレールに入る. この吸盤が新たに S_0 となり, S は S_1 になる. そのため, y_0 は $l \leq y_0 < 2l$ という範囲において l の周期で変化する.

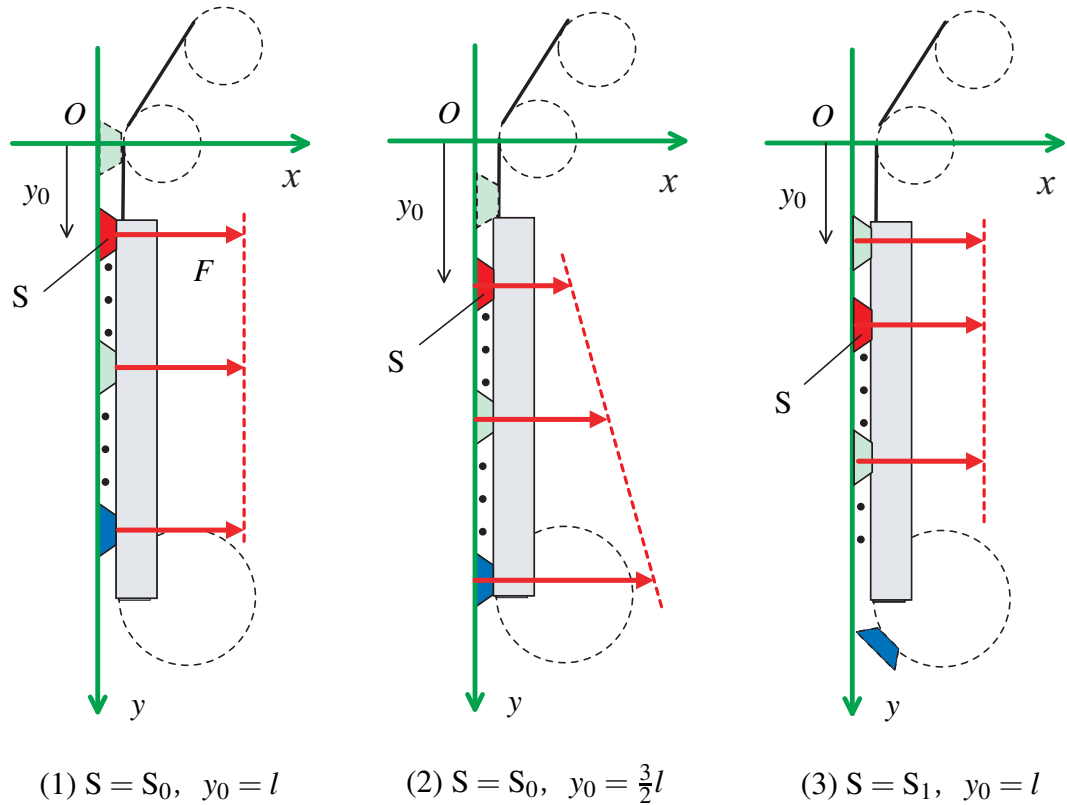


図 3.5: ベルトの回転による吸盤の位置変化

式 (3.11) と図 3.5 の (1) から (2) への変化より分かるように、 y_0 がある 1 つの値の場合でしか、 $k_{\text{sum}} = 0$ に設定することができない。つまり、ある場合に $k_{\text{sum}} = 0$ になると設定したとしても、ベルトの回転によって吸盤の位置が変化すると、 $k_{\text{sum}} = 0$ では無くなり、吸盤に偏りが生じてしまう。そのため、ある場合だけでなく吸盤の全ての位置状態を考慮し、吸盤への負荷の最大値が常に吸着力よりも小さくなる条件を求める必要がある。以降では、この条件について述べる。

式 (3.1), (3.8)–(3.10) より、ある吸盤 S の吸着開始から終了までに加わる負荷は図 3.6, 3.7 のように求められる。ここでの吸着開始・終了は、吸盤がガイドレールに入ってから出るまでを意味し、 F は S に加わる負荷である。

図 3.6 は、異なる 2 つの y_0 において $k_{\text{sum}} = 0$ にした場合の負荷の変化である。 $y_0 = l$ で $k_{\text{sum}} = 0$ になる場合は、 $y = 69$ において約 10 N の最大値を示し、負荷の最大値に偏りがあるのが分かる。しかしながら、 $y_0 = \frac{3}{2}l$ で $k_{\text{sum}} = 0$ になると設定すると、図 3.6 のように線対称となり、負荷の最大値に偏りが生じない。そのため、吸盤の大きさ・個数などに関わらず、吸盤への負荷の最大値が最も低い値に設定できる。これより、 $y_0 = \frac{3}{2}l$ で $k_{\text{sum}} = 0$ になると設定するのが適切であると言える。

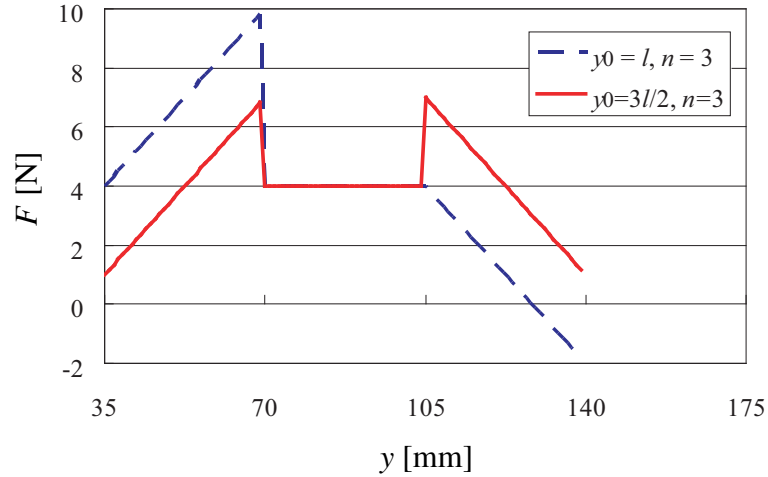


図 3.6: 吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 35 \text{ mm}$, $F_{rt} = 12 \text{ N}$, 異なる y_0)

一方で、吸盤への負荷の値は、図 3.7 に示すように、吸着中の吸盤の数によっても変化する。吸盤の個数が多い程、負荷が分散する箇所の数が増えるので、1 つの吸盤に加わる負荷は減少する。ただし、吸盤の個数 n を増やすと、それに伴いロボットの全長も長くなってしまう。そのため、吸盤への負荷と吸着力との安全率を考慮して、必要十分な吸盤の個数や吸盤 1 つあたりの吸着力を設定しなければならない。

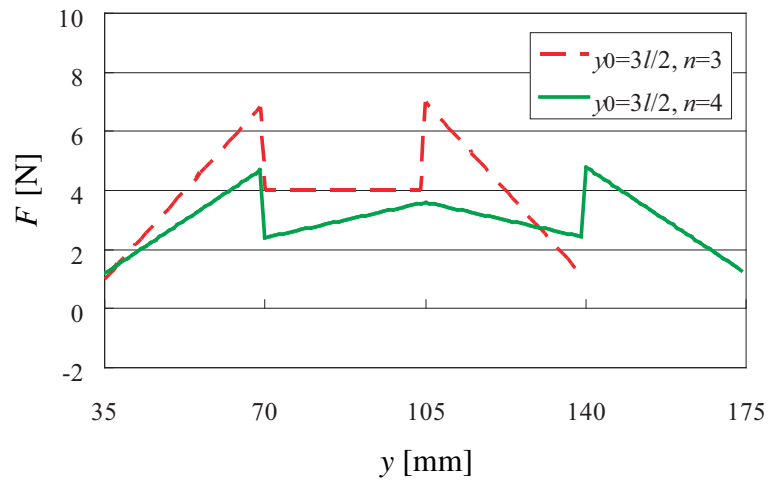


図 3.7: 吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 35 \text{ mm}$, $F_{rt} = 12 \text{ N}$, 異なる n)

3.2 パラメータの最適化

前節では吸盤への負荷の偏りを抑える解析を行ったが、それを元にロボットの物理パラメータを設計する必要がある。本節では、図 3.8 と以下のリストに示す 5 つのパラメータに関して、最適な値を設定する。

- p : 支持尾回転軸から支持尾と壁面の接触点までの距離 L_t と L_p との比率
- $L_p \text{ [mm]}$: 前方プーリから支持尾回転軸までの距離

- F_r [N]: 吸盤の取り付け力に対する壁からの反力
- l [mm]: 吸盤の固定間隔
- n : 壁面に吸着する吸盤の個数

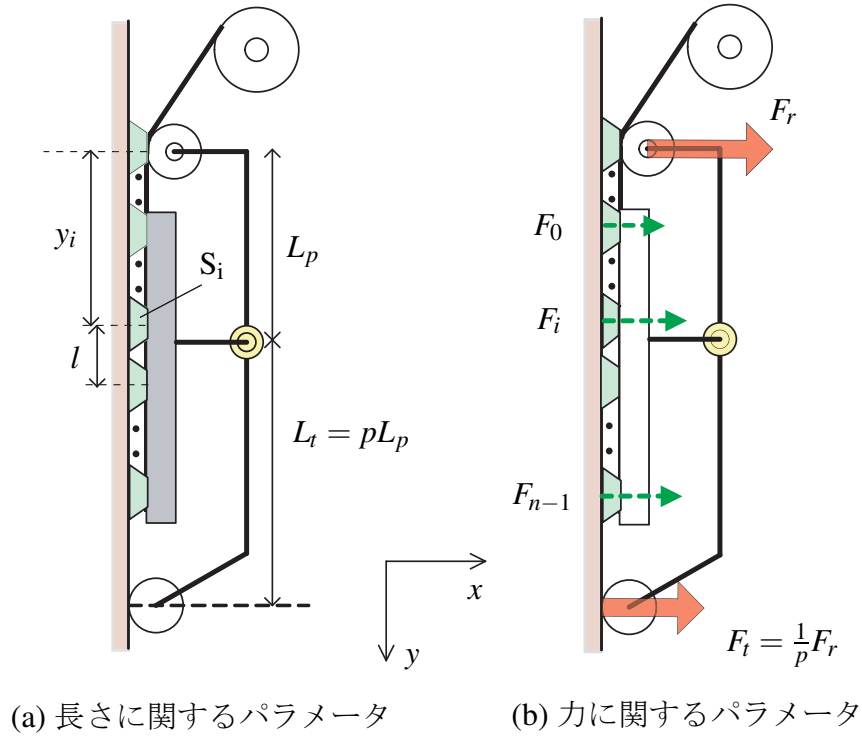


図 3.8: 設計されるパラメータ

3.2.1 支持尾の長さ

まず、支持尾の長さに関するパラメータである p について求める． p は、式 (3.12) で表されるように、支持尾の長さに関するパラメータである．

$$p = \frac{L_t}{L_p} \quad (3.12)$$

壁面上では、支持尾が壁や吸盤を押す力は、吸盤が壁に吸着していなければ発生しない．つまり、 F_r と支持尾が壁を押す力 F_t は、ガイドレールを通じて吸盤を壁に対して垂直に引く負荷となって伝わる．よって、吸盤が受ける x 方向の負荷の総和は F_{rt} と等しくなり、式 (3.13) で求めることができる．

$$\sum_{i=0}^{n-1} F_i = F_{rt} \quad (3.13)$$

また、 F_{rt} は、 F_r と F_t の和であるので、式 (3.14) が成り立つ．

$$F_{rt} = F_r + F_t \quad (3.14)$$

支持尾の固定軸周りのモーメントのつり合いより，式(3.15)が成り立つ．なお，支持尾とガイドレールはベアリングを通して固定されているので， F_r と F_t によるモーメントはガイドレールに伝わらない．

$$F_t = \frac{1}{p}F_r \quad (3.15)$$

以上より， F_{rt} は p と F_r により，以下の式で表される．

$$F_{rt} = (1 + \frac{1}{p})F_r \quad (3.16)$$

式(3.16)より， p と吸盤の負荷の総和の関係は図3.9のように表される．ここでは， $F_r = 10 \text{ N}$ である．これより， F_r が一定の場合は p が大きくなる程， F_{rt} が少なくなることが分かる．よって， p が大きくなる程，吸盤の負荷の総和が減少するため，支持尾は長ければ長いほど良いといえる．

しかしながら， p を大きくすると，それだけ支持尾の全長・重量が増えてしまう．その上， p が1から2に増える場合と3から4に増える場合で比べると，支持尾の長さが同じ値だけ増えるにも関わらず，減少する負荷の量は p を1から2に増える場合が5倍程度の値を示している．よって，負荷を減少させる効果が大きいことから p の値を2に設定する．

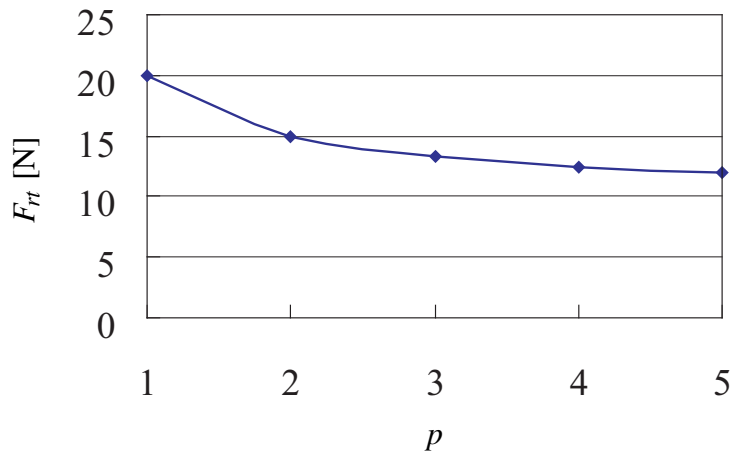


図 3.9: 各吸盤に加わる負荷の総和

次に， L_p の最適な値を求める．

式(3.11)より， $k_{\text{sum}} = 0$ となる L_p は以下の式で求められる．

$$L_p = \frac{G}{F_{rt}} + \frac{l(n-1) + 2y_0}{2} \quad (3.17)$$

前節より， $y_0 = \frac{3}{2}l$ において $k_{\text{sum}} = 0$ になると設定するのが適切であるとわかった．この場合の L_p は，式(3.17)より，以下の式で表すことが出来る．

$$L_p = \frac{G}{F_{rt}} + \frac{l(n+2)}{2} \quad (3.18)$$

最終的に、式(3.16)、(3.18)より、最適な L_p は以下の式で表される。

$$L_p = \frac{p}{p+1} \frac{G}{F_r} + \frac{l(n+2)}{2} \quad (3.19)$$

以上で求めた p と L_p により、支持尾の全長を定めることが可能となる。

3.2.2 吸盤の大きさ・個数

ここでは、吸盤の負荷の最大値は、常に吸盤の吸着力より小さくなるように、使用する吸盤の大きさや個数を設定する。

前述したように、壁面での吸盤の押し付け力は、吸着中の吸盤の吸着力により発生させる事が可能である。つまり、吸着に必要な押し付け力 F_a が小さく、吸着力 F_s が大きく、 F_s と F_a との比率である R が大きい吸盤が最も壁面移動ロボットに適しているといえる。 R は式(3.20)で表される。

$$R = \frac{F_s}{F_a} \quad (3.20)$$

また、ある範囲に設置できる吸盤の数は大きさによって変わるので吸盤の大きさも重要であり、吸盤の大きさあたりの吸着力の吟味も必要である。実際は面積当たりの R で評価するべきであるが、本機構ではロボットの長さが重要となるため、吸盤の直径 D と R の比率である $\frac{R}{D}$ の値により、吸盤を決定する。よって、 F_a と F_s を力センサにより計測し、使用する吸盤を決定する。その計測を行う実験装置の概要図を図3.10に示す。1つの吸盤を押し付けてから取り外すまでの Z 軸方向の力を、取り付けられた力センサにより計測する。

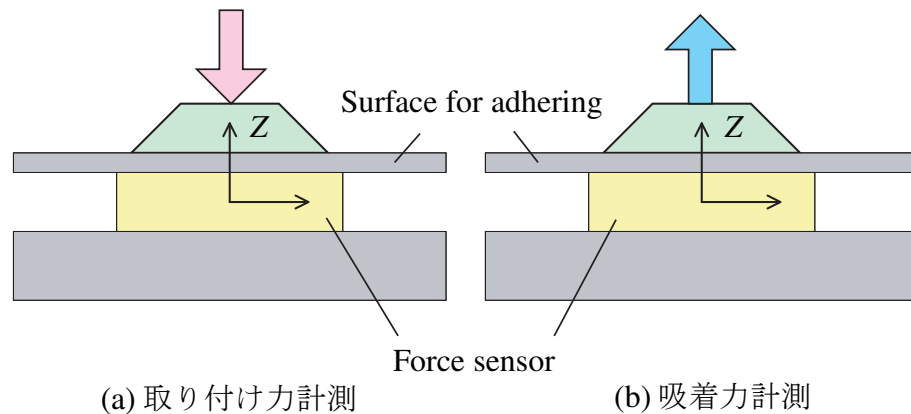


図 3.10: 吸盤特性の計測装置

計測した値の一例を図3.11に示す。引っ張りが正の方向であるので、最小値は押し付け力を示し、最大値は取り外し力を示している。

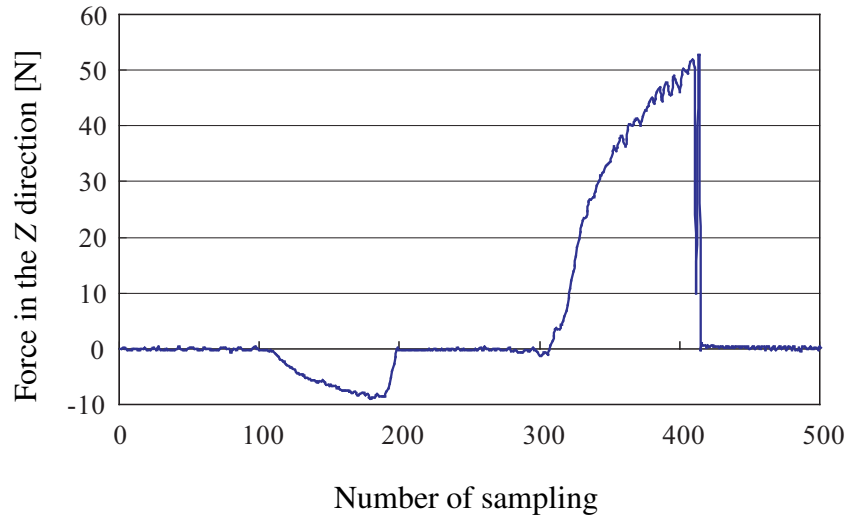


図 3.11: 吸盤取り付け・取り外しに必要な力の計測結果例 ($D = 35 \text{ mm}$)

計測結果から求めた直径 25–40 mm の吸盤の付け外し特性を，表 3.1 に示す．

表 3.1: 吸盤の特性

$D \text{ [mm]}$	$F_a \text{ [N]}$	$F_s \text{ [N]}$	R	$\frac{R}{D} \text{ [1/mm]}$
25	8	30	3.75	0.150
30	10	40	4.00	0.133
35	10	50	5.00	0.143
40	15	80	5.33	0.133

表 3.1 より，最も R の値が大きいのは，直径が 40 mm の吸盤である．しかし，この吸盤は $\frac{R}{D}$ が最も小さい．一方で， $\frac{R}{D}$ が最も大きいのは直径 25 mm の吸盤であるが，このときは R の値が最低である．以上より， R と $\frac{R}{D}$ のどちらも 2 番目に大きい，直径 35 mm の吸盤を使用するのが妥当であると考えられる．前後の吸盤の干渉を防ぐための隙間として吸盤の直径に 5 mm を追加して，吸盤の取り付け間隔 l を 40 mm と設定した．

また，前方部での吸盤取り付け，吸盤の剥離の防止を実現するには，吸盤押し付けの反力 F_r は F_a 以上，最大負荷 $F_{\max}$ は F_s 以下になる必要がある． F_r が F_a の 2 倍 ($F_r = 20 \text{ N}$) であり，直径 35 mm の吸盤がガイドレール上に 5 列ある ($n = 5$) 状態では，負荷の変化の流れは図 3.12 のようになり， $F_{\max}$ は約 9 N と分かる．表 3.1 より，直径 35 mm の吸盤の F_s は 50 N であるから，吸盤の負荷に関して 5.6 倍の安全率を設けていることになる．

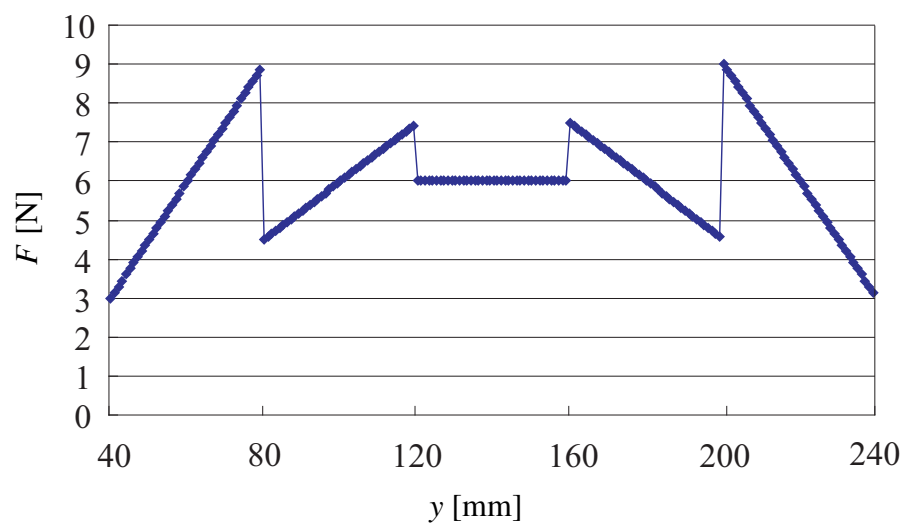


図 3.12: 吸着中の吸盤の負荷の変化 ($l = 40$ mm, $F_r = 20$ N, $n = 5$)

以上より，ロボットの各パラメータは，表 3.2 のように定めることができる．

表 3.2: 製作するロボットのパラメータ

Parameter	p	L_p [mm]	F_r [N]	l [mm]	n
Value	2	142	20	40	5

第4章 壁面移動実験

本章では，開発した壁面移動ロボットの実機実験の結果とその考察を述べる．

4.1 実験内容

前章で設計したパラメータに基づいて製作したロボットを図4.1に示す．また，このロボットの主な仕様を表4.1に示す．

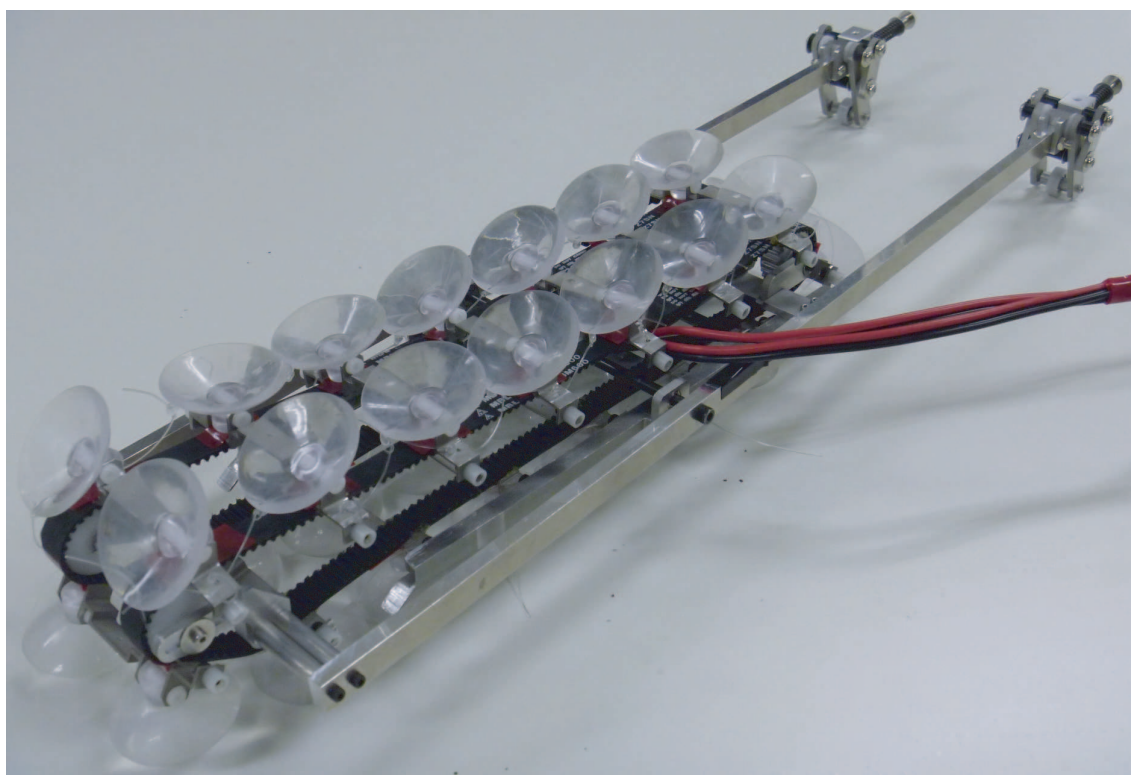


図 4.1: 開発した壁面移動ロボット

表 4.1: 試作機の仕様

Size (Length x Width x Height) [mm]	521 x 143 x 70
Mass [kg]	0.5
Actuator	DC motor x2

このロボットの壁面移動の有用性を検証するため、以下の3つの実験を行う。

実験1 吸盤取り付け機構により、新たに吸盤を壁面に吸着させる。

実験2 吸盤取り外し機構により、吸盤を受動的に取り外す。

実験3 吸盤押し付け機構と吸盤取り外し機構の連続的な機能により、ロボットを壁面上方向に移動させる。

なお、全ての実験を行う際には、ロボットの底面を人間の手で壁面に押しつけて底面の吸盤を全て壁面に吸着させてから開始する。実験のための壁面には表面が滑らかで汚れのないホワイトボードを使用し、地面に対して垂直に固定した。

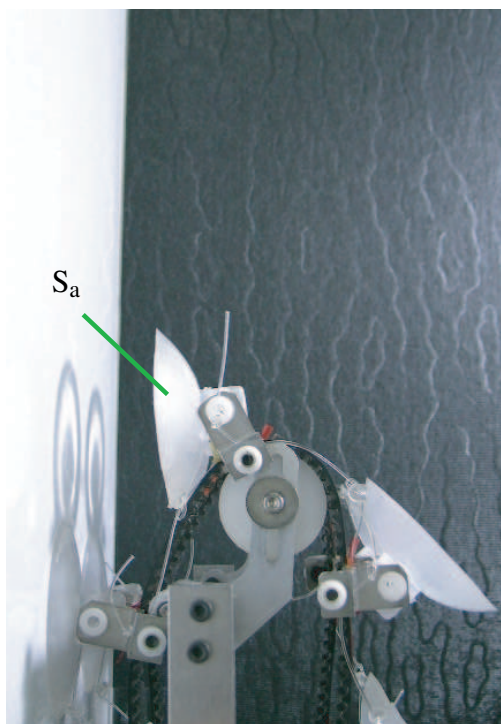
4.2 実験結果

実験の結果を、図4.2–4.4に示す。

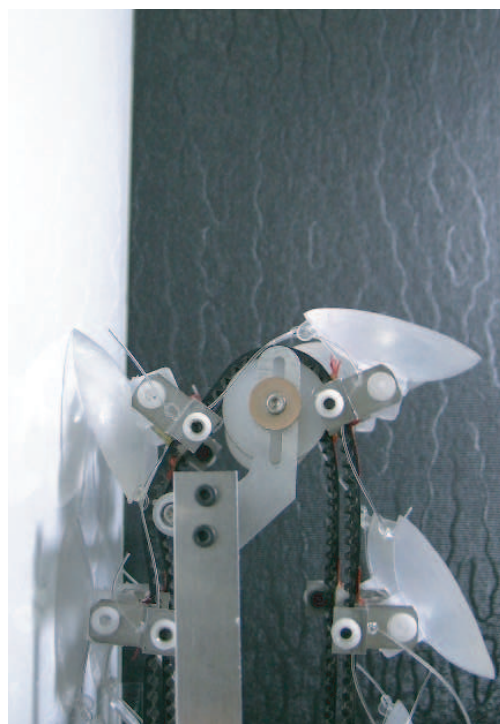
図4.2は、ロボットの前部部の側面図を表している。この図では、前部部において1つの吸盤(S_a)が壁面に接触し、吸着する様子を示している。

図4.3は、ロボットの後部部の側面図を表している。この図では、後部部において1つの吸盤(S_d)が壁面との吸着を解除され、壁面から取り外される様子を示している。

図4.4は、ロボットが壁面を移動している様子を表している。



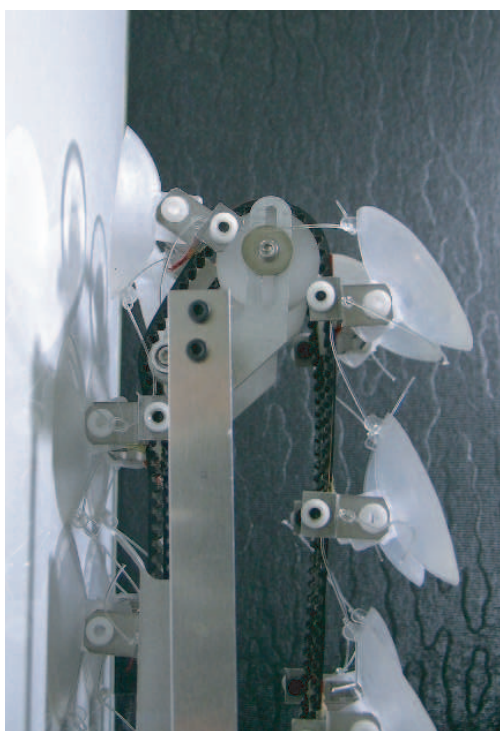
(1)



(2)

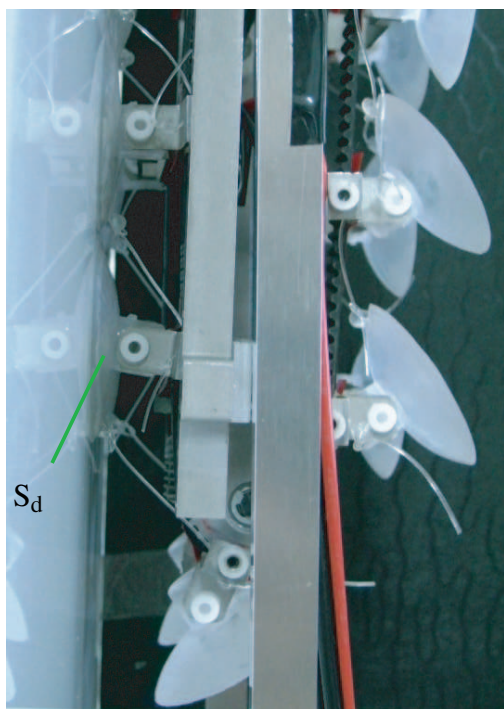


(3)

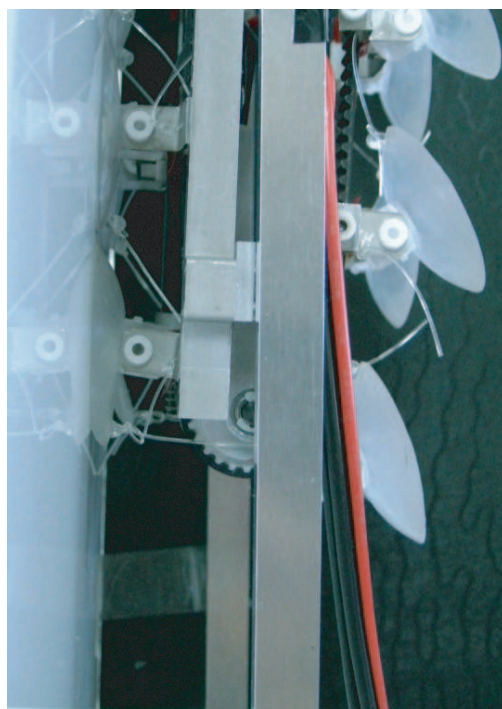


(4)

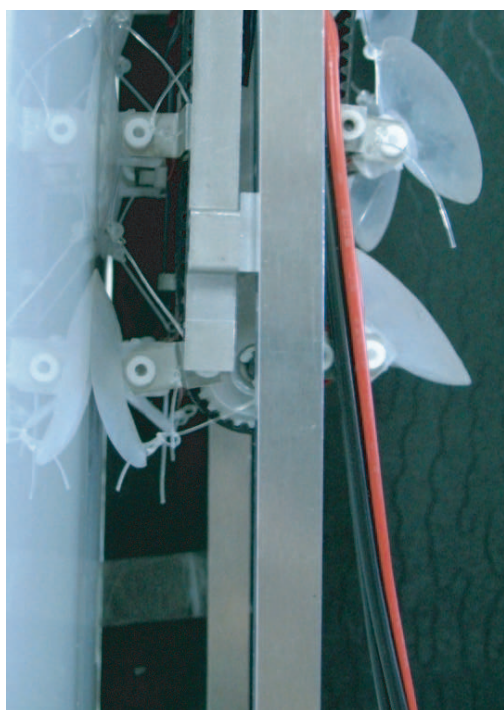
図 4.2: 吸盤取り付け機構実験



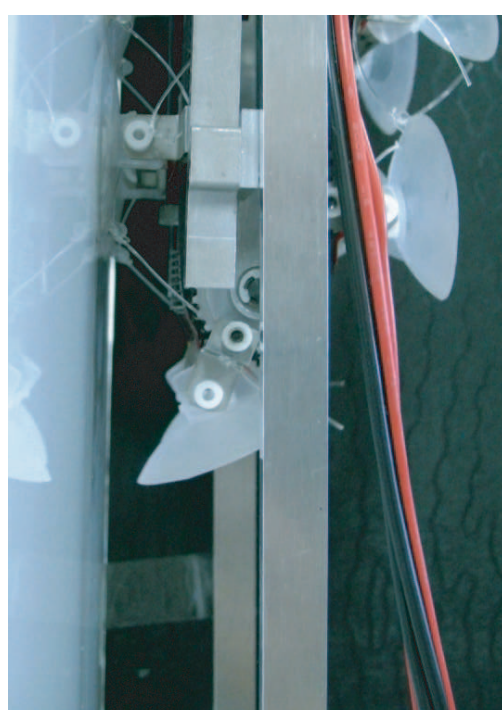
(1)



(2)



(3)



(4)

図 4.3: 吸盤取り外し機構実験

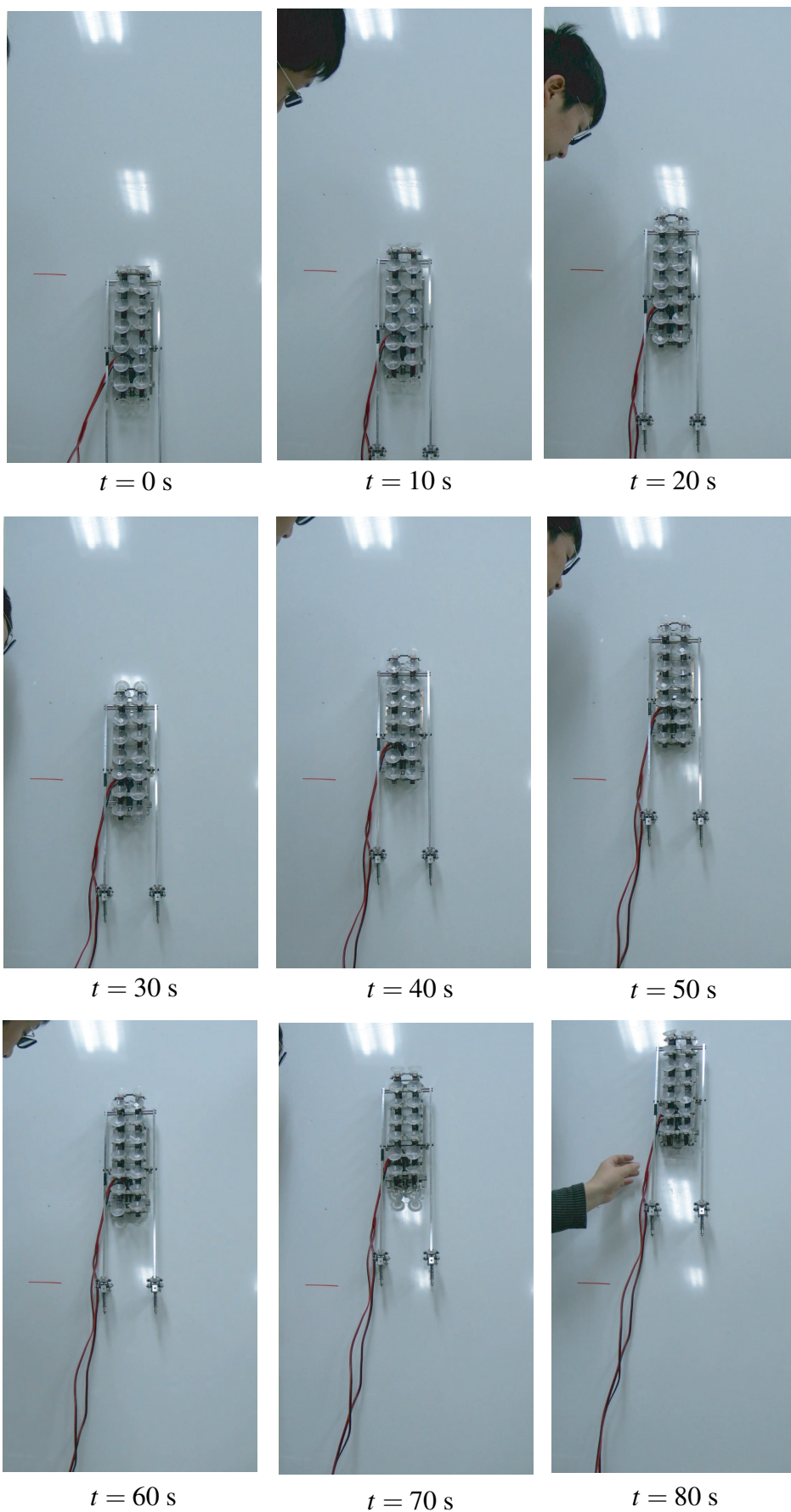


図 4.4: 壁面移動実験

4.3 実験結果の考察

実験の結果を簡単に述べて、それを元に考察を行う。

実験 1

図 4.2 の (1) から (4) に示すように、本ロボットでは、前方角により吸盤の吸着面と壁面と接触し、支持尾により前方プーリでの吸盤の押し付けが実現した。その結果、以前の機構では失敗した前方部での吸盤取り付けが成功した。(1) では、吸盤が前方プーリの向かい角に差し掛かっている。(2) では、吸着面が壁面に対して滑らかに接触し、(3) では前方プーリにより壁面に押しつけられて、最終的には (4) に示されるように吸着を完了する。

ただし、壁面を登る距離が増えるにつれて吸盤押し付けが不十分となり、取り付けが失敗することが発生した。本ロボットでは取り付け機構は一切制御をしておらず、受動的に吸盤の押し付けを行なっている。そのため、実験前に操作者が自ら取り付けた吸盤と比較して、ロボットによって取り付けられた吸盤は押し付けが少なく、吸盤の中の空気の排出がやや不十分である。吸盤の中の空気の排出が不十分であると、吸盤の高さが少しずつ増加する。壁面を登るにつれて、その高さの増加が蓄積していき、十分な吸着力が得られなくなっていく。その結果、押し付けられた直後に吸着が解除されて、取り付けが失敗する。

実験 2

図 4.3 の (1) から (4) に示すように、提案した吸盤取り外し機構によって吸盤を取り外すことに成功した。(1) では、吸盤は壁面に吸着している。(2) では、ロボットの後方部に到達しており、糸の張力により端が剥がされて空気が吸盤内部に流入し始めている。(3) では吸着が解除されており、最終的には (4) に示されるように完全に壁面から離れる。

しかしながら、吸着中の吸盤が後方部に到達しても取り外せない場合が発生した。それは、吸盤引き剥がしに必要な力を発生させる糸の長さの値が解析されておらず、取り外し機構の糸の長さを、経験的に決定したことが原因であると考えられる。

実験 3

以前の機構では失敗した前方部での取り付けが成功し、後方部での取り外しと合わさって壁面移動を可能にしている。前回の試作機では、実験を始める際に操作者によって取り付けられた吸盤が取り外されると落下してしまったが、本ロボットでは、図 4.4 に示すように、クローラ部の長さの 2 倍以上の距離を線状のマークから移動しているのが分かる。

本ロボットは、原理上 1 つのモータで壁面移動を実現するものであるが、今回製作したロボットはモータのトルク不足により、同じモータを 2 つ使用した。図 4.5 に示すように、2 つのモータに取り付けられたそれぞれのウォームが 1 つのウォームホイールを駆動させ、プーリを駆動させる。ワイヤーの長さや張力に関する設計の

不十分により取り外しに必要以上の力が必要となったことが、予想した以上のトルクが必要となった1つの要因ではないかと考えられる。

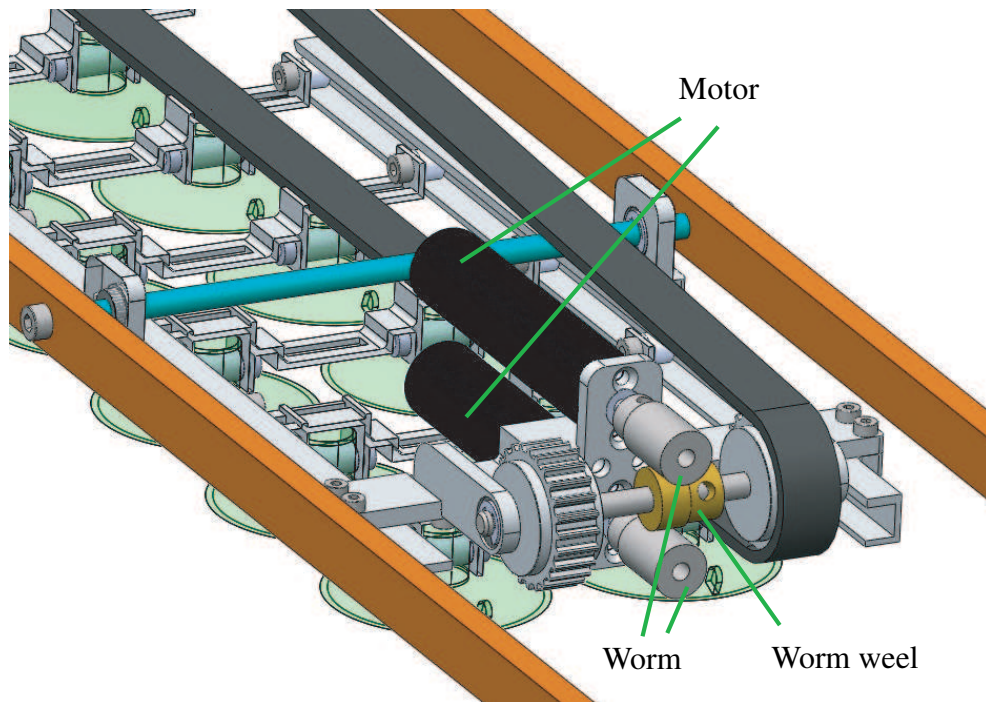


図 4.5: 2つのモータによるベルトの駆動

また、このロボットは壁面移動は可能であるが、登り続けることは不可能であった。実験1より、登る距離が増えると吸盤取り付けが失敗してしまうと述べたが、押し付け力は吸着中の吸盤によって発生させることができるため、1つの吸盤の取り付けを失敗すると次の吸盤の取り付けもまた困難となる。これにより、前方部では吸盤の押し付けが失敗し続けて後方部では吸盤を取り外し続けると、いずれは全ての吸盤が壁面から外れてしまい、結果としてロボットの壁面からの落下が発生する。

第5章 結論

5.1 本論文のまとめ

本論文では、受動吸盤を吸着機構に用いたクローラ型壁面移動ロボットについて述べた。このロボットはクローラベルトの駆動を利用して移動だけでなく、吸盤の取り付け・取り外しも行う。また、前試作機の問題を解決するために、吸盤の吸着面の壁面との接触を実現する「クローラの前方角」、各吸盤への負荷の偏りを解消してロボットの落下を防ぐ「支持尾機構」を追加した。

安定した壁面移動を行うためには吸盤の吸着を維持する必要がある。吸盤への負荷が吸着力を超えてはならない。必要となる吸着力を求めるため、吸盤に加わる負荷を静力学的に解析した。そして、吸盤の負荷分散解析を基に、支持尾の長さや吸盤の大きさ・個数などに関して吸盤の吸着の維持できるパラメータを求め、そのパラメータに基づいた実機を製作し、垂直壁面での実験を行った。その結果、ロボット前方部での吸盤取り付けが実現し、本ロボットは壁面での上方移動が可能であることが示された。ただし、吸盤取り付けが不安定であるため、このロボットは登り続けることは不可能であった。

5.2 今後の課題

前章の考察で述べた問題点から得られた課題を以下にまとめる。

課題1 壁面移動に十分なトルクを持つモータの選定

課題2 吸盤取り外し機構の糸の長さ・張力に関する解析

課題3 より確実な吸盤取り付け機構の実現

今後は以上の課題を解決し、より安定した壁面移動が可能なロボットの開発を目標とする。

また、ロボットの実用化を考えた場合、以下のような課題も解決しなければならない。

課題4 方向転換を行う機構設計

課題5 壁面移動に適した受動吸盤の開発

課題 4

本研究の壁面移動ロボットは、保守・点検を目的としている。そのために、直進だけでなく方向転換を行う必要がある。しかしながら、一般的にクローラ型ロボットはベルトを接触面上を滑らせて旋回を行う。吸盤を吸着機構とした場合、各吸盤は壁面と吸着して位置が固定されるので、壁面上で吸盤を滑らせることは困難である。この問題を踏まえて、方向転換を実現する機構を設計しなければならない。

課題 5

ロボットの吸着性能は、吸着機構である受動吸盤に依存する。つまり、吸盤が吸着できない壁面には、必ずロボットも吸着することができない。そのため、表面が荒い壁面に対しても吸着力の持続する受動吸盤を開発しなければならない。

また、吸着中の受動吸盤は少しずつ内部に空気が流入しており、いずれは壁面から外れてしまう。よって、吸盤への空気流入を防ぐ、もしくは空気流入による吸着力の低下を保証する機構が必要となる。

そして、吸盤の取り付け・取り外しに必要な力が大きいと、それだけモータに必要なトルクも増加する。そのため、より小さい力・短い時間で吸着の開始・解除が可能となる吸盤の開発も課題である。

以上をまとめると、以下の項目を実現する新しい受動吸盤の開発が必要である。

- 表面の荒い壁面への吸着
- 吸盤内部への空気流入の補償
- より小さい力での吸盤取り付け・取り外し

謝辞

本研究の遂行に当たり御指導下さいました立命館大学 理工学部 ロボティクス学科 馬 書根 教授に深く感謝の意を表します。また，院ゼミなどにおいて御意見下さいました同学科 前田 浩一 教授，野方 誠 准教授に深く感謝の意を表します。そして，グループゼミなどでアドバイス頂いた全 斉全さん，加古川 篤さん，葛 鼎新さん，松野 孝博さんをはじめ，同研究室の皆さんに深く感謝の意を表します。最後に，実機製作においてご指導・ご協力頂いた立命館大学 工作センターの弓山 都志夫さん，山植 肇さん，杉本 弘之さんにも深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 福田敏男, 松浦英雄, 新井史人, 西堀賢司, 坂内 仁, 吉井直均: “壁面移動ロボットの研究 (第 1 報, 吸盤装着クローラ壁面移動ロボットにおける走行機構の開発)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.58, no.550, pp. 286–293, 1992.
- [2] Harsha Prahlad, Ron Pelrine, Scott Stanford, John Marlow, and Roy Kornbluh: “Electroadhesive Robots.Wall Climbing Robots Enabled by a Novel, Robust, and Electrically Controllable Adhesion Technology,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3028–3033, 2008.
- [3] 内藤神司, 佐藤主税, 藤井正昭: “負荷分散クローラ機構の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.5, no.5, pp. 3–6, 1987.
- [4] Ozgur Unver, Metin Sitti: “Tankbot: A Miniature, Peeling Based Climber On Rough and Smooth Surfaces,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2282–2287, 2009.
- [5] O. Unver, A. Uneri, A. Aydemir, M. Sitti, “Geckobot: A Gecko Inspired Climbing Robot Using Elastomer Adhesives,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2329–2335, 2006.
- [6] Hansen, W.R. and K. Autumn: “Evidence for self-cleaning in gecko setae,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.102, no.2, pp. 385–389, 2005.
- [7] Burak Aksak, Michael P. Murphy, and Metin Sitti: “Gecko Inspired Micro-Fibrillar Adhesives for Wall Climbing Robots on Micro/Nanoscale Rough Surfaces,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3058–3063, 2008.
- [8] Yu Yoshida and Shugen Ma: “Design of a Wall-Climbing Robot with Passive Suction Cups,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1513–1518, 2010.
- [9] 吉田 佑, 馬 書根: “受動吸盤を用いた壁面移動ロボットの設計,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 3Q3-6, 2010.

付録A フレーム部の仕様

開発した壁面移動ロボットのフレーム部の上面図と側面図を，図 A.1 に示す．

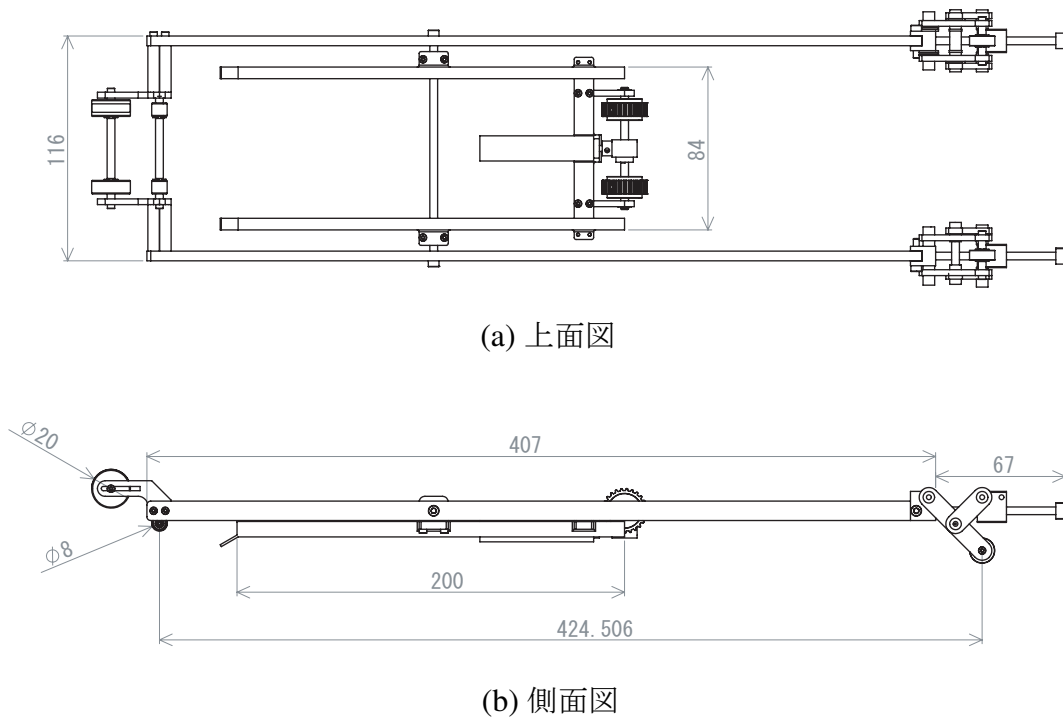


図 A.1: フレーム部のドラフト図

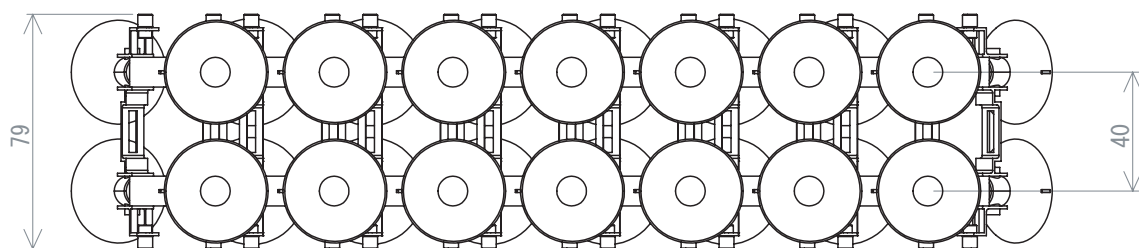
次に，フレーム部に使用した主な部品の詳細を，表 A.1 に示す．

表 A.1: フレーム部の主な部品

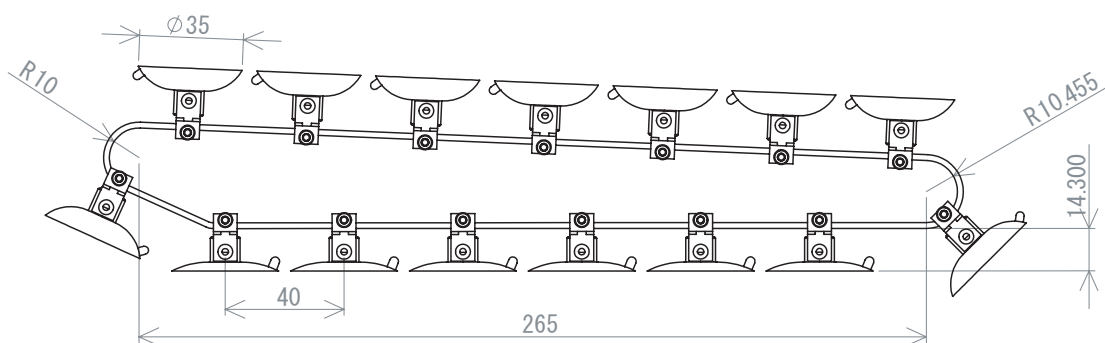
Parts	Specification	Used number
DC motor	Nominal torque: 1.28 mNm Nominal Speed: 7110 rpm Nominal voltage: 9.0 V Nominal current: 0.256 A	2
Gear head	Reduction ratio: 1:67	2
Worm gear	Reduction ratio: 1:20	2

付録B ベルト部の仕様

開発した壁面移動ロボットのベルト部の上面図と側面図を、図 B.1 に示す。



(a) 上面図



(b) 側面図

図 B.1: ベルト部のドラフト図

次に、ベルト部に使用した主な部品の詳細を表 B.1 に示す。

表 B.1: ベルト部の主な部品

Parts	Specification	Used number
Crawler belt	Perimeter: 600 mm, Width: 10 mm	2
Suction cup	Diameter: 35 mm, Maximum load: 0.5 kg	30
Guide shaft	Made of Polyacetal	30

付録C 前試作機の吸盤負荷解析

ここでは，前試作機において各吸盤に加わる負荷の解析について記述する．

図 C.1 に示すように，吸着力，吸盤と壁との摩擦力を除けば，前試作機のガイドレールとその中の吸盤には，本体の重量 $M_r g$ ，吸盤押し付けの反力 F_r という 2 種類の外力が加わる．

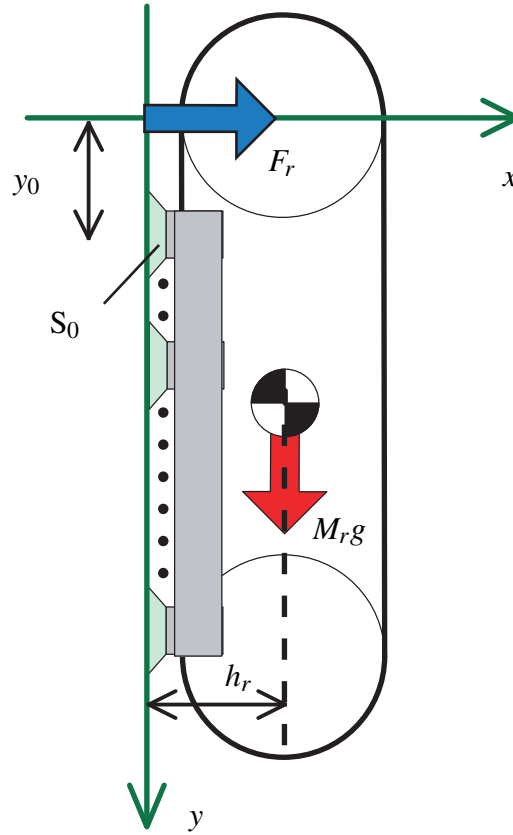


図 C.1: 前試作機のガイドレールとその中の吸盤に加わる外力

3.1 節と同様に， x 方向の力，モーメントの等式から，前試作機における k_{sum} と F_0 はそれぞれ以下の式で表すことができる．

$$k_{\text{sum}} = -\frac{6[2M_r g h_r + F_r \{2y_0 + l(n-1)\}]}{l^2(n-1)n(n+1)} \quad (\text{C.1})$$

$$F_0 = \frac{2[3M_r g h_r + F_r \{3y_0 + l(2m-1)\}]}{ln(n+1)} \quad (\text{C.2})$$

$M_r = 0.3 \text{ kg}$, $l = 16 \text{ mm}$, $n = 6$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $y_0 = 16 \text{ mm}$, $h_r = 26 \text{ mm}$, $F_r = 4.5$
N と設定した場合，各吸盤に加わる負荷は図 3.4 のように表される．