

博士論文

スキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪
におけるすべりに関する研究

武田 宗久

第1章 序論	3
1.1 本研究の目的	3
1.2 研究の背景と従来研究	4
1.3 対象とするスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボット	7
1.4 本研究の意義	7
1.5 論文の構成	8
第2章 磁石車輪の力学	9
2.1 緒言	9
2.2 磁石車輪の動力学	9
2.2.1 車輪座標系と磁石車輪に作用する力	9
2.2.2 車輪の運動学と動力学	10
2.2.3 4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの各磁石車輪における作用力	11
2.3 磁石車輪吸着力	12
2.3.1 磁石車輪吸着力の試料及び実験装置	12
2.3.2 磁石車輪吸着力の計測結果	14
2.3.3 磁石車輪吸着力の解析結果	24
2.3.4 磁石車輪の形状、磁路及び作用力	28
2.4 磁石車輪すべり特性の計測	31
2.4.1 磁石車輪すべり特性評価装置	31
2.4.2 表面粗さ、着磁の有無及び付加荷重の影響	32
2.4.3 円筒型磁石車輪すべり特性計測結果	33
2.4.4 樽型磁石車輪すべり特性計測結果	35
2.5 結言	37
第3章 水平走行性能の解析	38
3.1 緒言	38
3.2 スキッドステア方式車輪駆動マイクロロボットの水平走行動力学モデル	38
3.2.1 スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの運動理論	38
3.2.2 磁石車輪吸着力のモデル化	43
3.3 すべりを考慮したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行シミュレーション	44
3.3.1 水平走行シミュレータの構成	44
3.3.2 水平走行シミュレーション結果	47
3.4 スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行性能計測	61
3.4.1 マイクロロボット水平走行性能評価システム	61
3.4.2 直線走行性能計測結果	62
3.4.3 旋回性能計測結果	63

3.4.4	前進と後進の旋回特性の相違	64
3.4.5	実機とシミュレーションの比較	67
3.4.6	円筒型磁石車輪と樽型磁石車輪の旋回性能の比較	67
3.5	結言	68
第4章	垂直走行性能の解析	69
4.1	緒言	69
4.2	垂直走行シミュレータの開発	70
4.2.1	スキッドステア方式6輪走行モデル	70
4.2.2	動力学モデルの3次元化	71
4.2.3	複数個連結移動シミュレータ	89
4.3	磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行シミュレーション結果	93
4.3.1	車輪磁石吸着力と垂直走行可能性の関係	93
4.3.2	下輪磁石吸着力とスリップ率, 上昇速度の関係	94
4.3.3	複数個連結移動シミュレーション結果	96
4.4	磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能計測	102
4.4.1	マイクロロボット垂直走行性能評価システム	102
4.4.2	垂直走行性能評価用スキッドステア方式マイクロロボット	103
4.4.3	垂直走行性能計測結果	104
4.4.4	垂直連結移動性能計測結果	105
4.4.5	細管吸着時の磁石吸着力	107
4.5	結言	109
第5章	結論	110
5.1	結論	110
5.2	展望	111
付録		112
付録A	車輪式移動ロボットの運動理論	113
A.1	車輪式移動ロボットの運動理論	113
A.2	マルチリンクの運動理論	114
A.3	車輪の運動理論	119
A.4	定式化	119
参考文献		127
謝辞		131

第1章 序論

1.1 本研究の目的

本研究の目的は、スキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪における定常状態のすべりに関して明らかにすることである。そして、その結果をもとに、水平及び垂直移動が可能なミリメートルサイズのスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの実現可能性を示すことである。

車輪駆動方式はメートルサイズ以上のマクロな世界では、最も効率良く、かつ高速移動が可能なため、自動車、鉄道をはじめとして主流の移動方式となっている。一般に自動車等の車輪駆動走行車では、旋回する時にすべての車輪軸が1点に交わる「アッカーマン・ジャントー理論」と呼ばれる幾何学に従うような機構や制御を用いることで、複雑なすべり現象の影響が少ない状態を作って、走行させる工夫を行っている。しかしながら、実際には、車輪と走行面との複雑なインターアクションにより、すべりが発生し、精度よく車輪駆動走行車を制御することができない課題がある。したがって、車輪駆動走行車を考える上においては、すべりに関する研究は非常に重要になる。また、車輪駆動では、車輪のグリップ力（車輪の摩擦係数×抗力）を高めることが走行を安定させるためには重要であるが、サイズが小さくなると、自重が軽くなるため、地面と車輪の間の抗力が小さくなって、グリップ力が減少し、すべりが発生して上手く走行できなくなる課題が発生する。その欠点をカバーするために、Jinら [1]やTangら [2]は車輪を磁石にして磁石吸着力を利用した磁石車輪を用いた全方位のマイクロロボットを開発している。筆者らも磁石車輪を用いたマイクロロボット [3], [4]を開発してきたが、その磁石吸着力に関する研究はこれまでほとんどなされていないため、磁石車輪駆動マイクロロボットでは、磁石吸着力の研究も重要となる。

磁石車輪駆動マイクロロボットにおいては、すべりと磁石吸着力が重要なことを述べたが、ここでは、対象とする車輪駆動方式として、構造が簡単ではあるが、旋回時にはすべりが必ず発生する固定4輪のスキッドステア方式のマイクロロボットを対象とする。スキッドステア方式とは車体左右の車輪の回転差により横滑りを起こさせて進行方向を変えるステアリング方式のことで、複雑な操舵機構やキャスタ（自在に向きが変わる小さな車輪）がなく、モータも少なく済むため、機構としては最も簡単でロバストな構造であることから、マイクロロボットの移動方式としては適した方式であるからである。しかしながら、スキッドステア方式は左右の駆動輪の速

度差で横滑りを生じさせながら旋回させる方式であるため、車輪のグリップ力を十分に確保するとともにそのすべり特性を把握することが、その走行性能を確保する上で重要となる。マイクロロボットの走行性能としては、「走る」、「曲がる」、「止まる」があるが、本論文では主に「曲がる」に焦点をあて、定常状態の旋回特性について主に検討する。スキッドステア方式では、旋回特性は最終的な左右の回転数差による定常状態でのすべりを考慮した運動に帰着するため、本論文では定常状態の旋回特性に限定し、旋回特性を旋回半径で評価する。なお、メートルサイズのマクロな移動ロボットに関しては、タイヤ車輪のすべり特性を考慮した研究 [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]が活発に行われてはいるが、マイクロロボットに関しては、車輪のグリップ力並びにすべり特性を考慮した旋回特性の研究はこれまでほとんどなされていない。そこで、本研究ではスキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪における定常状態のすべりに関して明らかにする。また、磁石吸着力と定常状態のすべりの関係についても明らかにする。

さらに、産業用途等において、今後必要になると考えられる壁面移動に関しても、磁石車輪を用いることで可能になるため、磁石車輪マイクロロボットの壁面移動時におけるすべりと磁石吸着力に関しても明らかにする。マイクロロボットは小さいため、搭載できる機能が限定されるため、細管の検査等をマイクロロボットにさせるためには、マイクロロボット間の協調作業が必要になると考えられるが、これまでの壁面移動の研究においては、単独のロボットによる壁面移動の研究は多くなされている [13], [14], [15], [16]が、複数のロボットが連結して壁面移動する研究は殆どなされていない。そこで、マイクロロボットの適用の一つとして考えられる細管の検査のため、すべりと磁石吸着力に加えて、フープ力等の外力をも考慮した磁石車輪駆動マイクロロボットの複数個連結移動の条件を明らかにする。

以上のことから、本研究では、定常旋回運動においてすべりが必ず発生するスキッドステア方式のマイクロロボットにおけるすべりを考慮した車輪駆動マイクロロボットの動力学の導出、磁石車輪の吸着力及びすべり特性の計測とそれをを用いたマイクロロボットのシミュレーションによる解析並びに大きさ $5\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$ のスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットを使った走行実験及びマイクロロボットの複数個連結移動実験から、ミリメートルサイズのスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの実現可能性を示す。

1.2 研究の背景と従来研究

1987年に米国でシリコン基板上に機械部品である歯車が作製されてから電気機械部品の微細加工技術はMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)やマイクロマシンと呼ばれ世界各国で活発な研究開発がなされてきた。その成果として、ゲーム機のコントローラに搭載されている加速度センサ、自動車に搭載されている圧力センサ、加速度センサ、エアフローセンサやスマートフォンに搭載されているマイクロフォンやRFフィルタ等身近な製品の中にMEMSデバイスが入り込むようになってきた。また、最近ではIoT(Internet of Things)として、あらゆるものをインターネットに接続することで、これまでになかった新たな付加価値が創出される社会の実現を目指しており、MEMSデバイスはリアルデータの取得のためのキーデバイスとして、重要な役割を果た

すことが期待されている。しかし、現在実用化されているのは主に移動機能を有しないセンサ等の静的なデバイスである。これら静的なデバイスに移動機能を付加できれば、パイプや種々機器内部の狭所での検査・清掃、輸送、セキュリティ、環境、健康・医療等の分野へと MEMS デバイスの応用はさらに拡大されると考えられる。そのため、現状ミリメートルサイズの MEMS デバイスを搭載して移動可能なミリメートルサイズのマイクロ移動ロボットの開発が期待されるようになってきている。また、最近では群研究のプラットフォームとして、ミリメートルサイズのマイクロロボットが注目されている [17]。

移動方式について考えると、メートルサイズ以上のマクロな世界の移動方式は、自動車、鉄道をはじめとして車輪方式が主流となっている。これはマクロな世界の平坦な面では車輪方式が最も効率良く、かつ高速移動が可能のためである。一方、ミリメートルサイズ以下のマイクロな世界の移動方式を見てみると、車輪方式だけでなく、尺取り虫方式 [18], [19], [20], [21], [22], [23], 振動方式 [24], [25], [26], 磁気駆動方式 [27], [28], [29], [30], 脚方式 [31], [32], ジャンプ方式 [33]等種々の方式のマイクロロボットが報告されている。これはマイクロな世界では自重が軽くなったことにより、マクロな世界では有効に使えなかった摩擦力等の表面力や振動、磁力等が有効に使えるようになったためである。各方式に対して、速度、構造、制御性、自立性に関して比較したものを表 1.1 にまとめた。

表 1.1 マイクロロボットの水平移動方式の比較

方式	車輪方式 [17], [34]~[38]	尺取り虫 方式 [18]~[23]	振動駆動 方式 [24]~[26]	磁気駆動方 式 [27]~[30]	脚方式 [31], [32]	ジャンプ 方式 [33]
速度	◎	×	○	◎	△	△
構造	○	△	○	◎	×	○
制御性	(○)	△	△	○	×	×
自立性	○	○	△	× (外部磁界要)	○	○

表 1.1 より、車輪方式は、構造が簡単で速度を出せ、自立性が良いことからマイクロな世界でも有望であることがわかる。そのため、これまで種々の車輪駆動マイクロロボットが報告されてきた [34], [35], [36], [37], [38], [17]。しかし、サイズが小さくなると、自重が軽くなるため、地面と車輪の間のグリップ力が減少し、スリップが発生して、車輪方式では上手く走行できなくなることが懸念され、その対策として、車輪を磁石にして磁石吸着力を利用したマイクロロボットも報告されている [1], [2], [3], [4]。なお、大きな移動ロボットに関しては、タイヤ車輪のすべり特性を考慮した研究 [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]が多く報告されてはいるが、マイクロロボットに関しては、車輪のグリップ力並びにすべり特性を考慮した走行性能の研究はこれまでほとんどなされていない。そのため、車輪の動力学やすべり及び磁石吸着力を考慮した磁石車輪駆動マイクロロボットの運動学及び動力学の導出並びに磁石車輪の吸着及びすべり特性の解明が求めら

れている。

一方、マイクロロボットは水平面内の移動だけでなく、壁面移動も点検、検査、建設、清掃、輸送、セキュリティ等の分野への応用展開のため期待されている。壁面移動方式としては、車輪方式、クローラ方式、脚方式、推進方式等が、壁面への吸着方式としては磁力方式、吸着方式、吸引方式、把持方式等種々の方式が報告されている [13], [14], [15], [16]。壁面移動方式に対して、速度、構造、制御性から各方式を比較したものを表 1.2 に、吸着方式に対して、吸着力、構造、制御性に関して比較したものを表 1.3 にまとめた。

表 1.2 マイクロロボットの壁面移動方式の比較 [13], [14], [15], [16]

移動機構	車輪方式	クローラ方式	脚方式	推進方式
速度	◎	○	△	△
構造	◎	○	×	△
制御性	(○)	○	×	△

表 1.3 マイクロロボットの壁面吸着方式の比較 [13], [14], [15], [16]

吸着機構	磁力方式	吸着方式	吸引方式	把持方式
吸着力	◎	×	○	◎
構造	○	○	×	×
制御性	(○)	×	△	×

また、発電プラントの細管群の点検等狭所空間での適用のために、マイクロ壁面移動ロボットも報告されている [2], [3], [4], [39]。マイクロ壁面移動ロボットでは複雑な機構を構成するのが困難なため、壁面への吸着方式としては、吸着方式 [40], [41], と磁石車輪方式 [2], [3], [4], [39], [42], [43], の2方式が主に採用されている。吸着方式としては、シリコンラバーを用いた 40 mm×43 mm×14 mm の大きさのクローラ型壁面移動マイクロロボット [40] やヤモリの吸着機構を模倣したマイクロ/ナノ構造 [41] 等が報告されている。磁石車輪方式は磁性壁面に限定はされるが、壁面への引き剥がし機構を用いることなく壁面に吸着しながらの連続移動が可能のため、壁面移動として最も適した方式であるため、次にあげるように多くの研究開発がなされている。ガスタービンの点検のための折りたたみ式磁石車輪駆動壁面移動ロボット [42], 磁石を用いた特殊な構造の直径 28 mm の円筒型壁面移動マイクロロボット (Cy-mag^{3D}) [43], 電磁マイクロモータを用いた直径 26 mm, 高さ 16.4 mm の磁石車輪駆動全方位壁面移動マイクロロボット [2], [39], 細

管群外部検査用の $5\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$ の大きさの磁石車輪駆動マイクロロボット [3], [4]等が報告されている。しかし、水平走行と同様に、車輪のグリップ力並びにすべり特性を考慮した走行性能の研究はこれまでほとんどなされていない。また、これまでは単独のロボットによる壁面移動の研究は多くなされている [13], [14], [15], [16] が、複数のロボットが連結して壁面移動する研究は殆どなされていない。マイクロロボットは小さいため、多くの機能を搭載することは困難であることから、複数のマイクロロボットが協調して作業する群としての研究が今後必要になると考えられる。したがって、複数のマイクロロボットが連結して移動する連結移動の条件を求めることは重要になると考えられる。

1.3 対象とするスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボット

前節で述べた背景に鑑み、本研究では、構造が簡単で、ある程度の速度が確保できて、水平と垂直の移動が可能なミリメートルサイズのマイクロロボットとして、図 1.1 のようなスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットを対象とする。

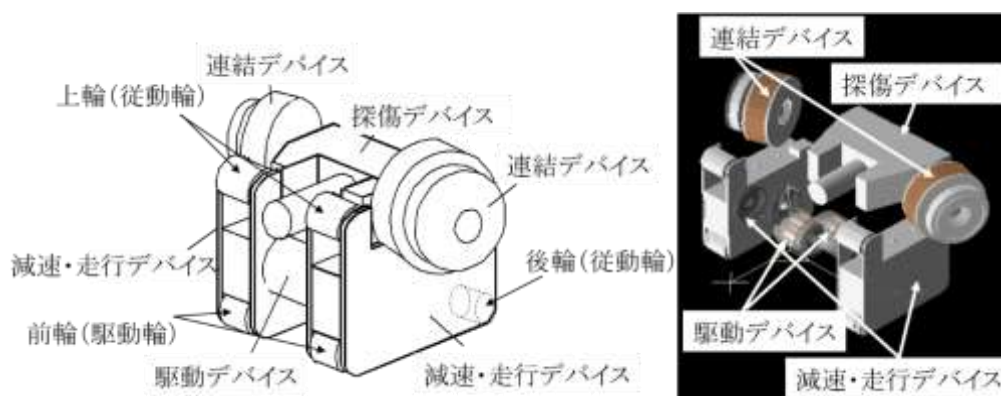


図 1.1 対象とする磁石車輪駆動マイクロロボット

対象とするスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットは2つの駆動デバイス [44], [45], [46], [47], 2つの減速・走行デバイス [48], 1つの探傷デバイス, 2つの連結デバイス [49], [50]で構成される。2つの駆動デバイスの両側に減速・走行デバイスを配置し、その上に左右に連結デバイスが搭載された探傷デバイスを配置するという簡単なブロック構造になっている。大きさは縦 5 mm , 横 9 mm , 高さ 6.5 mm である。また、前輪(下輪)を駆動固定輪, 後輪と上輪を従動固定輪とする6輪の磁石車輪を有し、左右の駆動輪の回転数差で旋回が可能となっている。

1.4 本研究の意義

これまで明らかでなかった磁石車輪のすべり特性を計測し、タイヤ車輪や鉄道車輪のすべり特性とは異なることを明らかにする。また、車輪の動力学やすべり及び磁石吸着力を考慮したスキ

ッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの運動学及び動力学モデルを構築し、シミュレーション及び試作マイクロロボットの実験結果から、磁石車輪では従動輪の磁石吸着力を駆動輪の1/9程度にすることで、その走行性能を大幅に改善でき、ミリメートルサイズのスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの実現可能性を示す。さらに、磁石車輪による壁面移動の条件を明らかにするとともに、これまでほとんど研究がなされていなかった複数のマイクロロボットの細管外部の連結移動の条件についても明らかにする。これにより、今後研究が盛んになると考えられるマイクロロボットの群研究に貢献できる。

1.5 論文の構成

本論文は5章で構成される。以下に各章の概要を示す。

第1章 序論

本研究の目的、背景及びマイクロロボットの移動方式、車輪駆動マイクロロボットと壁面移動マイクロロボットの先行研究についてまとめ、それらに対する本研究の意義を論じる。

第2章 磁石車輪の力学

磁石車輪の動力学として、車輪座標系と磁石車輪に作用する力、磁石車輪の運動学とすべりを考慮した動力学及び4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットにおける作用力について説明する。また、磁石車輪の基礎特性として磁石吸着力の計測結果と解析結果並びに磁石車輪のすべり特性計測装置とその計測結果について詳述する。

第3章 水平走行性能の解析

磁石車輪のグリップ力並びにすべり特性を考慮したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの運動理論について導出する。また、すべりと磁石吸着力を考慮した磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行シミュレーションによる水平走行性能の中でも特に定常旋回特性に関する解析結果について議論する。さらに、試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの定常旋回性能の計測結果とシミュレーション結果の比較について議論する。

第4章 垂直走行性能の解析

スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能解析のための3次元動力学モデルを導出するとともに、単独及び複数個連結垂直移動シミュレーションによる垂直走行性能の解析結果について議論し、複数個連結移動の条件について明らかにする。また、試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能の計測結果とシミュレーション結果の比較について議論する。

第5章 結論

本研究によって得られた知見についてまとめ、結論及び今後の展望を述べる。

第2章 磁石車輪の力学

2.1 緒言

本論文で対象とする固定4輪のスキッドステア方式マイクロロボットでは、磁石車輪を用いている。大きな車輪式移動ロボットではタイヤ車輪が主に使われ、タイヤ車輪のすべり特性を考慮した研究が多くなされているが、これまで磁石車輪のすべり特性等の基礎特性に関する研究はあまり行われていなかった。そこで、磁石車輪の力学の基礎として、磁石吸着力とすべり特性について検討する。

本章では、まず、2.2節で磁石車輪の動力学として、車輪座標系と磁石車輪に作用する力、磁石車輪の運動学と動力学及び4輪スキッドステア方式マイクロロボットの各磁石車輪の作用力について概説する。その後、2.3節で磁石車輪の基礎特性として磁石車輪吸着力の計測結果と解析結果について述べる。さらに、2.4節で磁石車輪のすべり特性を明らかにするために、すべり特性計測装置とその計測結果について詳述し、2.5節でまとめる。

2.2 磁石車輪の動力学

2.2.1 車輪座標系と磁石車輪に作用する力

スキッドステア方式では、車輪は操舵機構を持たず固定されているため、図 2.1 に示すように、車輪方向と進行方向は必ずしも一致せず、スリップ角 α をもってすべりながら移動することになる。

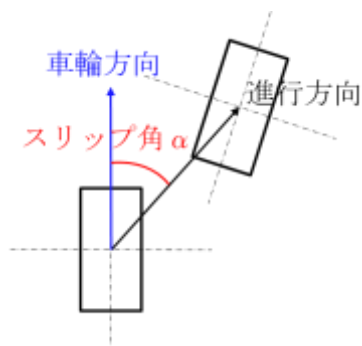


図 2.1 スキッドステア方式における車輪方向と進行方向の関係

つぎに、各車輪における座標系と作用力に関して考える。車輪座標系としては、図 2.2 に示すように、車輪面方向を x 軸、車軸方向を y 軸、鉛直上面を z 軸として考える。図 2.2 には車輪進行速度 V 、x 軸に働く摩擦力「縦力」と進行速度 V の x 軸成分 u 、y 軸に働く摩擦力「横力」と進行速度 V の y 軸成分 v 、z 軸回りの摩擦モーメント「アライニングトルク」とスリップ角 α が示されている。

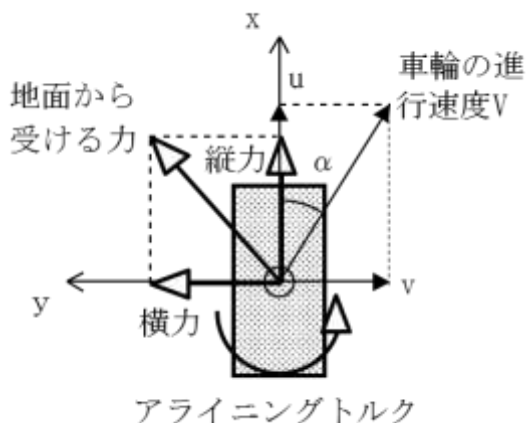


図 2.2 車輪座標系と車輪に作用する力

このとき、車輪 w_i のスリップ率 s_{wi} 、スリップ角 α_{wi} は式(2.1)で定義される。

$$s_{wi} = \frac{u_{wi} - \bar{r}_{wi} \cdot \dot{\phi}_{wi}}{u_{wi}} \tag{2.1}$$

$$\alpha_{wi} = \tan^{-1} \frac{v_{wi}}{u_{wi}}$$

\bar{r}_{wi} : 車輪半径

$\dot{\phi}_{wi}$: 車軸回りの回転速度

u_{wi} : 進行方向速度 V の x 軸方向の速度成分

v_{wi} : 進行方向速度 V の y 軸方向の速度成分

2.2.2 車輪の運動学と動力学

運動方程式の導出の詳細に関しては、次章以降で述べるが、ここでは車輪の運動学と動力学に関して、まずは考察する。2次元移動は移動面との摩擦によって可能となるため、車輪駆動ロボットは何らかの形で必ず接地部分を有する。この摩擦力の取り扱いにより、車輪の運動学と動力学は異なった立場をとる。

(1) 車輪の運動学

車輪の運動学では、摩擦力を拘束力として扱う。車輪のすべりと摩擦力の関係は非線形であり、すべりが零付近の力の勾配は極めて急峻で、正から負へ（負から正へ）と符号を変える。摩擦力を拘束力として見なすということは、この原点付近の力の勾配を無限大として扱うことである。勾配が無限大なので、すべりが零でも力は生じるし、逆に力がある大きさを越えない限りはすべりを生じない。

摩擦力を拘束力として近似した場合は、車輪の車軸方向の並進が許されず、進行方向の並進と鉛直方向の回転のみという拘束条件が成立する。したがって、「アッカーマン・ジャント理論」に従った車輪の運動学を考えることができる。その代わりすべりはないものとして無視される。

(2) 車輪の動力学

すべりを考慮するためには、摩擦力を拘束力として扱うことはできない。動力学では接地部分に働く摩擦力を、非線形の粘性抵抗力としてそのまま扱う。

したがって、運動学の場合のように、車輪の運動を車輪ごとにローカルに決めることは不可能である。車輪の平面運動に関する運動方程式は、マルチリンクの末端の平面運動として扱われ、マルチリンクの運動方程式の中に含まれる形となる。そのため、各車輪でのローカルな運動は、車軸回りの回転運動だけである。したがって、車輪の動力学では、車軸回りの回転角を車輪の関節角として、車軸回り運動方程式のみを考えることになる。

2.2.3 4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの各磁石車輪における作用力

4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの旋回中の各磁石車輪に作用するすべりと摩擦力の方向について、図2.3を用いて説明する。

図2.3は右に旋回している前進の場合の各磁石車輪の状態と作用する摩擦力（縦力、横力）を示している。前進の場合は、前が駆動輪、後ろが従動輪の前輪駆動になっている。①の駆動輪はすべりのため、実際の速度は遅くなる。逆に、②の駆動輪はすべりのため、駆動デバイスからの回転による速度よりも実際の速度は速くなる。また、モデルの仮定により、従動輪は進行方向にはすべりは生じない。横方向に関しては、各車輪は旋回中心からの旋回半径が異なり、前輪はマイナス方向のすべりが、後輪はプラス方向のすべりが発生する。すべりと摩擦力の定義より、すべりと逆方向に摩擦力が作用する。左前輪（①）は進行方向へ回転しているが、すべりのため、結局制動力として働いている。前輪は旋回運動中には進行方向の右側へ頭を振る形となつてすべるが、それを矯正するように地面からは逆方向の力が作用する。同じように後輪は、左側に振られる形となるが、地面から逆方向の力が作用する。マイクロロボットに作用するモーメントは、これらの摩擦力とマイクロロボット重心との距離から大きさが決まる。各磁石車輪には、それぞれの磁石車輪の磁石吸着力とすべり特性に従って、それぞれのスリップ率、スリップ角に合致す

る縦力，横力が作用することになる．そこで，次節以降に磁石車輪吸着力とすべり特性に関して詳述する．

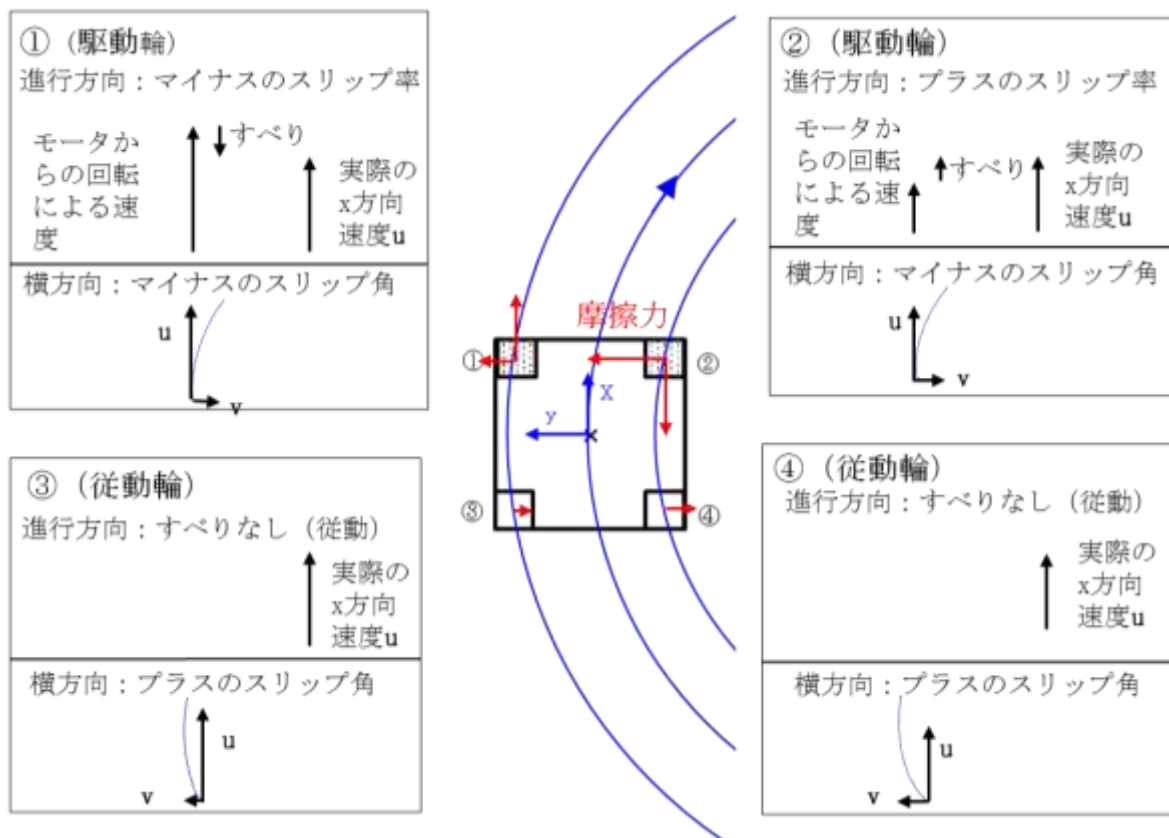


図 2.3 前進右旋回の場合の各磁石車輪の状態と作用する摩擦力

2.3 磁石車輪吸着力

2.3.1 磁石車輪吸着力の試料及び実験装置

磁石車輪における磁石吸着力を評価するため，試料として図 2.4 に仕様を示すように，実際のマイクロロボットに取り付けた外径 1 mm の磁石車輪と相似形状の外径 3 mm (内径 1.5 mm)，外径 4 mm (内径 2 mm)，外径 8 mm (内径 4 mm) の円筒型 SmCo 磁石の両端に SS400 の低炭素鋼のヨークを取り付けたものと取り付けていないもの及び外径 2 mm，外径 4 mm，外径 8 mm の円柱型の SmCo 磁石の両端に SS400 の低炭素鋼のヨークを取り付けたものと取り付けていないものを用いた．製造の関係で外径が 3 mm よりも小さな円筒型磁石車輪及び外径 2 mm よりも小さい円柱型の磁石の加工はできなかった．また，製造の関係で磁石はフル着磁を行っている．

【材料】磁石：SmCo、ヨーク：SS400

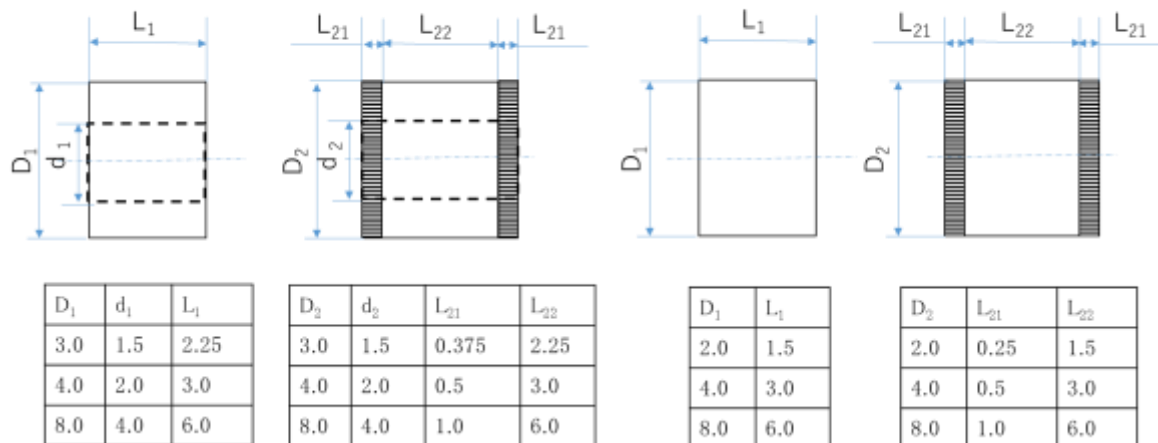


図 2.4 磁石吸着力測定用試料の仕様

図 2.5 に磁石車輪吸着力測定実験装置の外観を、図 2.6 に磁石車輪部の拡大図を示す。

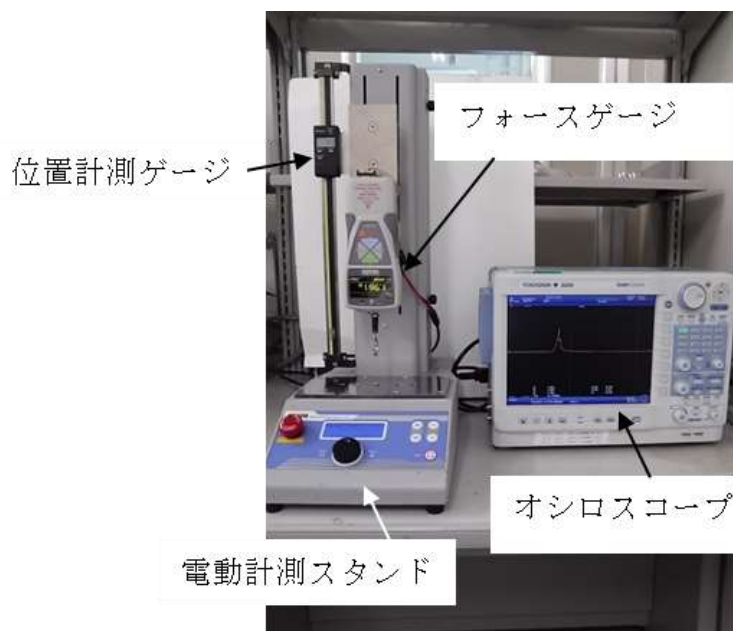


図 2.5 磁石車輪吸着力測定実験装置

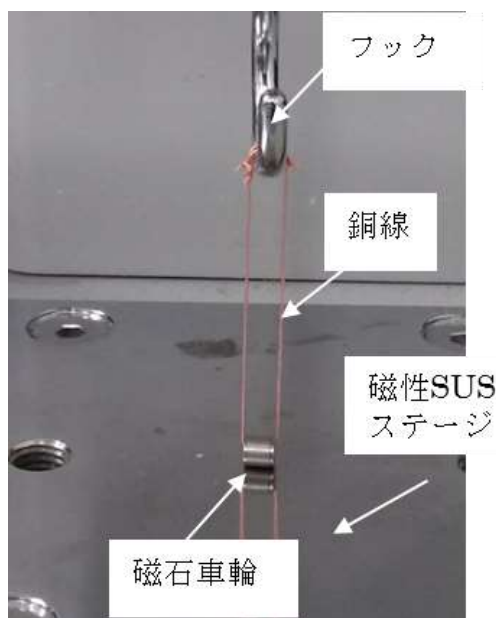


図 2.6 磁石車輪部拡大図

図 2.5 に示すように、磁石車輪吸着力測定実験装置は電動計測スタンド (Imada, MX シリーズ)、フォースゲージ (Imada, ZTS-5N 及び ZP-50N)、位置計測ゲージ、オシロスコープ (YOKOGAWA DL850) からなる。図 2.6 に示すように、円筒型磁石車輪に銅線を通し、磁性 SUS ステージに吸着させ、銅線をフォースゲージのフックにかけて等速 (1.5 mm/sec) で引張り、その時の磁石吸着力を、フォースゲージの出力をオシロスコープに記録することで計測した。円柱型磁石の場合には銅線を磁石上面に接着し、測定した。

2.3.2 磁石車輪吸着力の計測結果

(1) ヨークの有無による磁石車輪吸着力の差異

円柱型磁石の場合には、銅線の接着が上手くいかず、計測できたサンプルが少なかったため、円筒型磁石の実験結果を中心に説明する。直径 3 mm、内径 1.5 mm、長さ 2.25 mm の円筒型磁石をステージに吸着させ、1.5 mm/sec で上昇及び下降させたときの磁石吸着力の変化の一例を図 2.7、図 2.8 に示す。

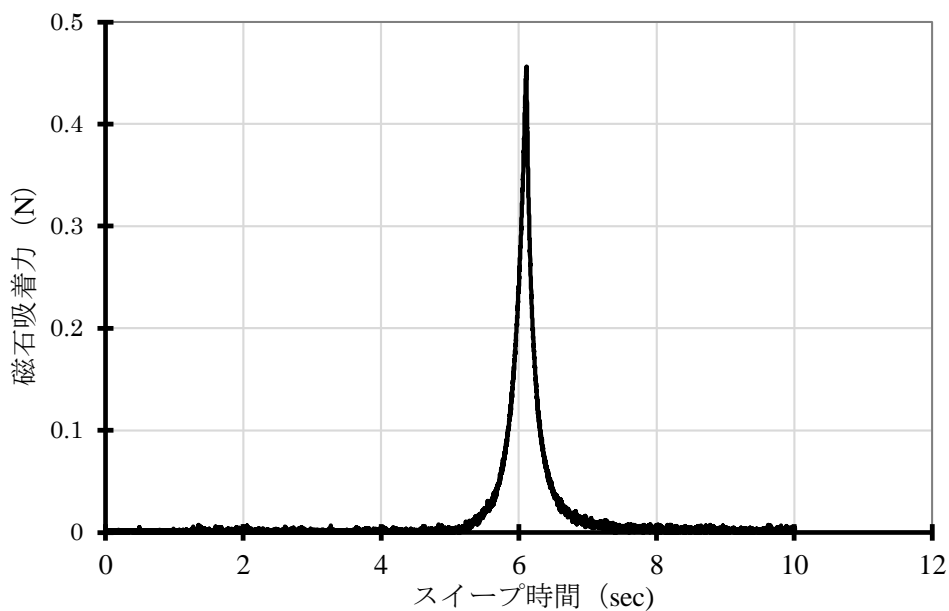


図 2.7 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 3\text{-}\phi 1.5\text{ mm}$, ヨークなし, 上昇)

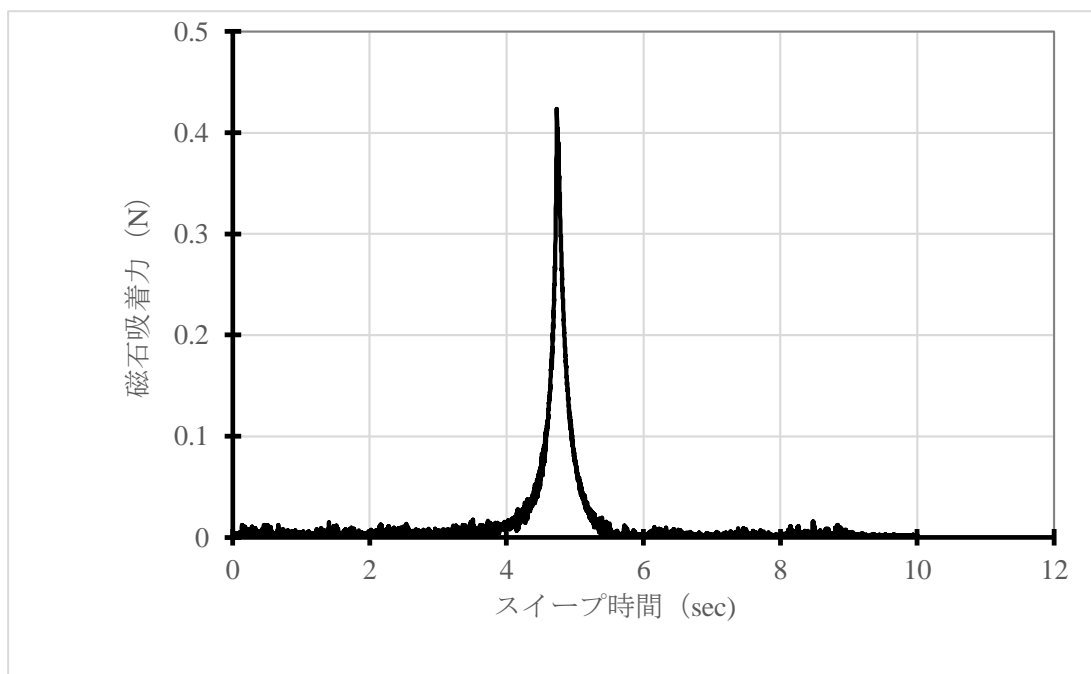


図 2.8 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 3\text{-}\phi 1.5\text{ mm}$, ヨークなし, 下降)

直径 4 mm, 内径 2 mm, 長さ 3 mm の円筒型磁石をステージに吸着させ, 1.5 mm/sec で上昇及び下降させたときの磁石吸着力の変化を図 2.9, 図 2.10 に示す.

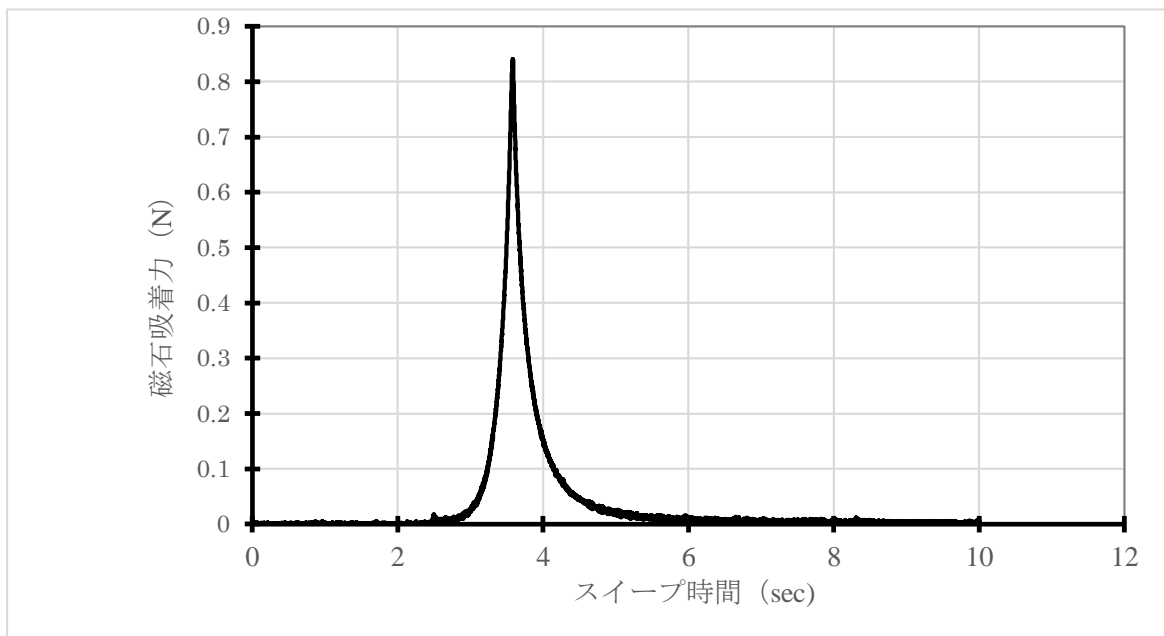


図 2.9 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 4\text{-}\phi 2\text{ mm}$, ヨークなし, 上昇)

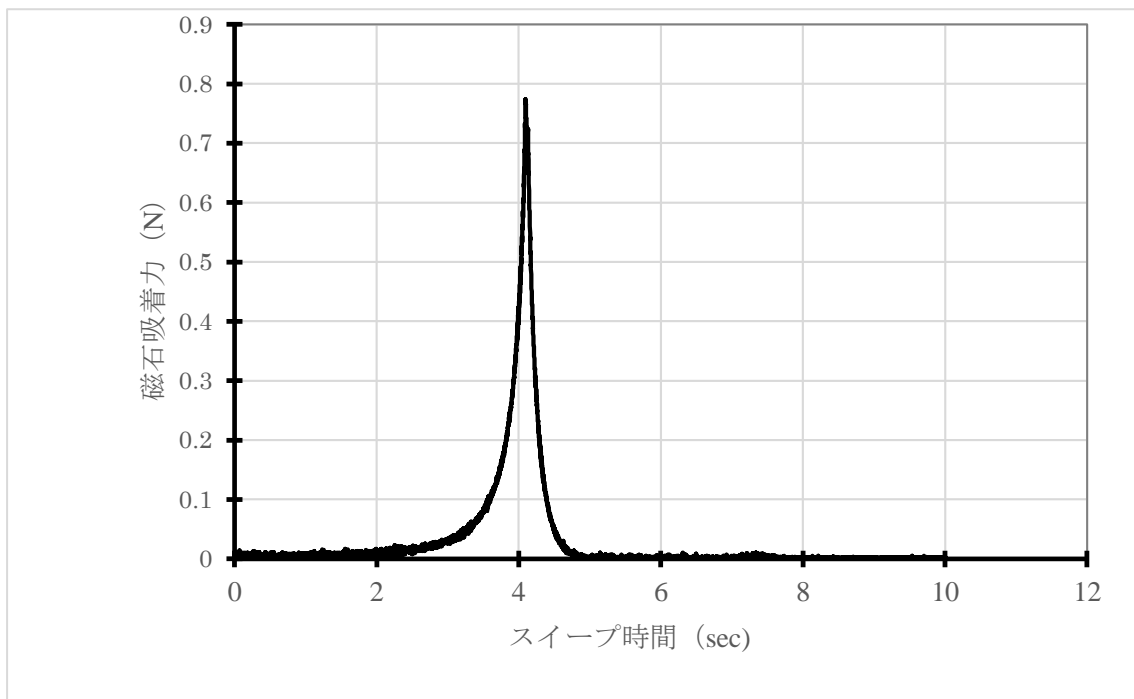


図 2.10 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 4\text{-}\phi 2\text{ mm}$, ヨークなし, 下降)

直径 8 mm, 内径 4 mm, 長さ 6 mm の円筒型磁石をステージに吸着させ, 1.5 mm/sec で上昇及び下降させたときの磁石吸着力の変化を図 2.11, 図 2.12 に示す.

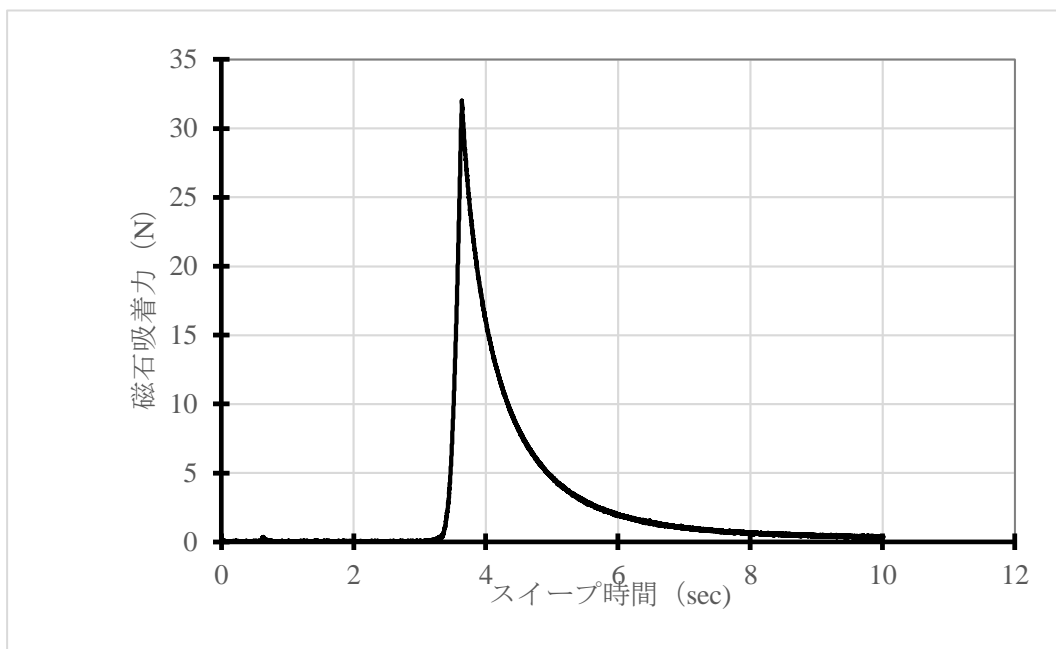


図 2.11 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 8\text{-}\phi 4\text{ mm}$, ヨークなし, 上昇)

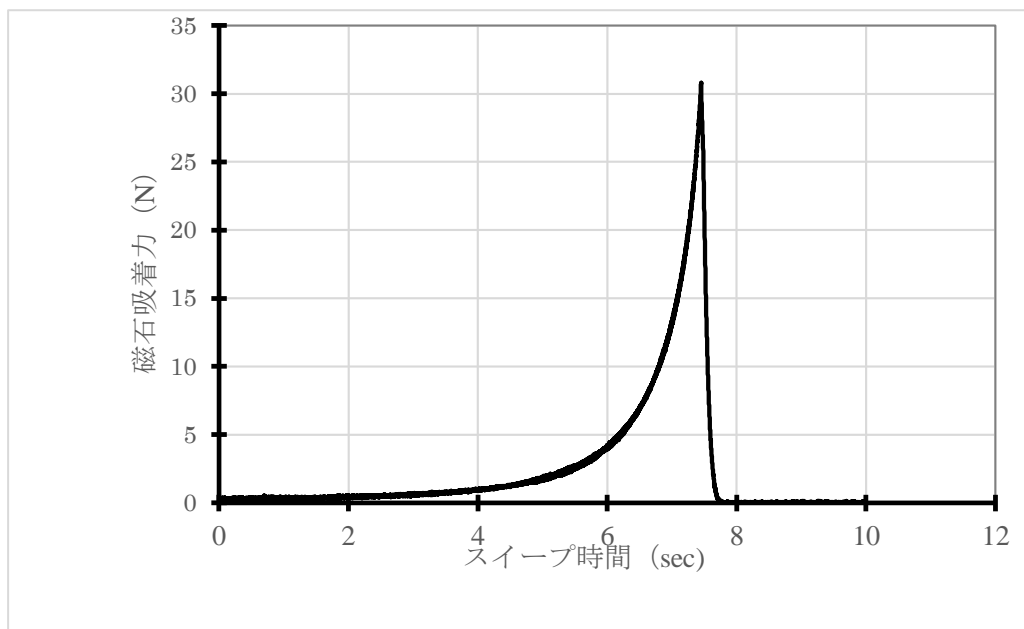


図 2.12 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 8\text{-}\phi 4\text{ mm}$, ヨークなし, 下降)

図 2.7～図 2.12 より, 下降時の最大吸着力は上昇時の最大吸着力よりも低くなっているのが分かる. これは引っ張っている銅線の剛性により, あるギャップよりも小さくなると磁石吸着力が銅線の剛性に打ち勝ってプルインされるため, 低く出たものと思われる. また, 磁石の径が大きくなるに従い, 最大磁石吸着力は大きくなるとともに磁石吸着力の及ぼす範

囲も大きくなってなだらかな曲線になっていることが分かる。

次に、ヨークを付けた場合の同様の計測データを図 2.13～図 2.18 に示す。

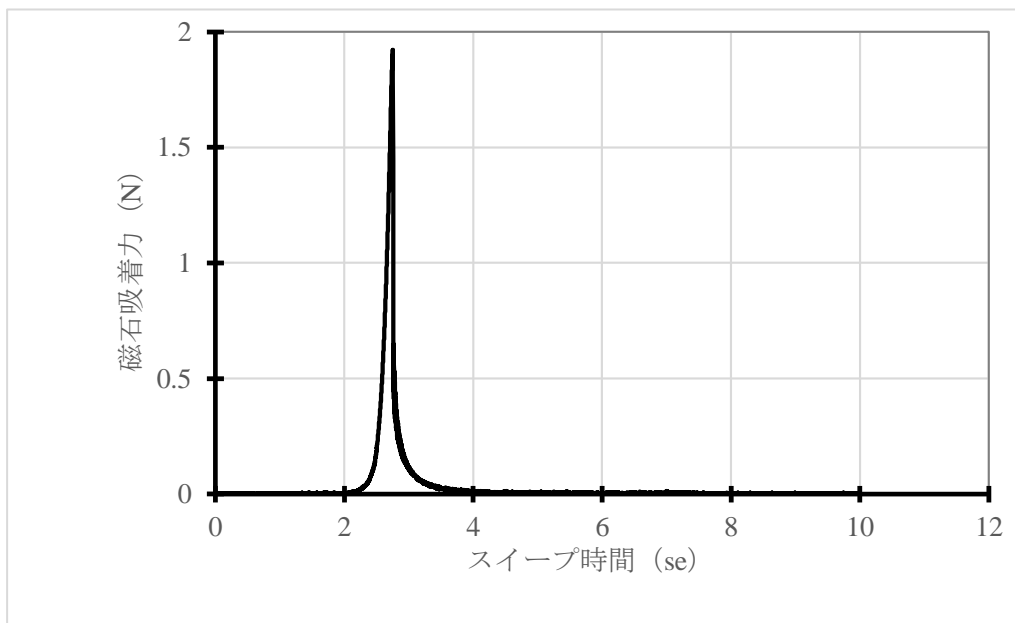


図 2.13 磁石吸着力（円筒型磁石， $\phi 3-\phi 1.5$ mm，ヨークあり，上昇）

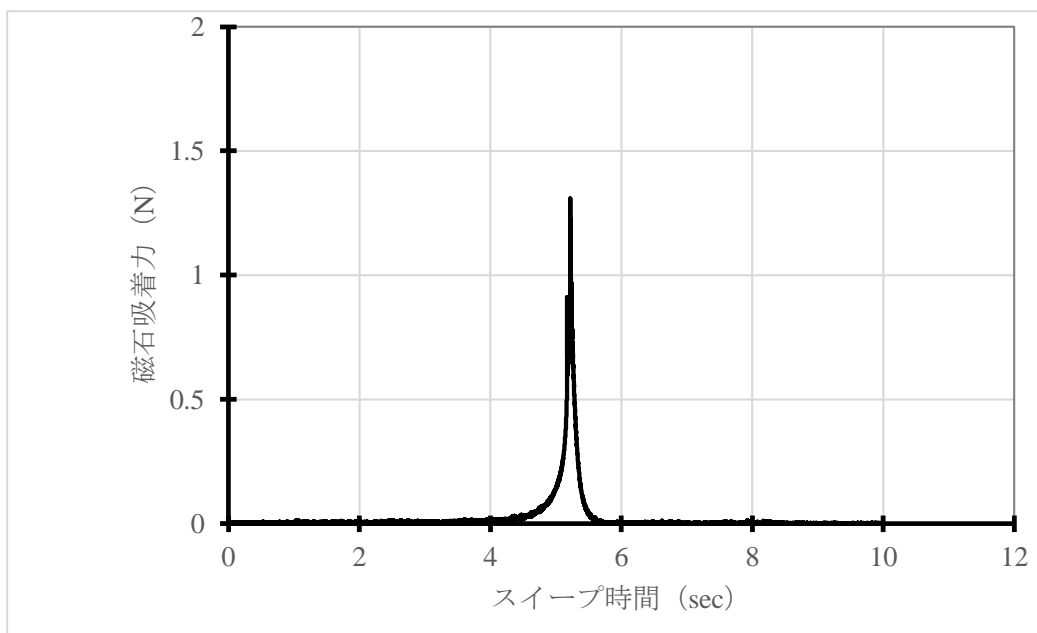


図 2.14 磁石吸着力（円筒型磁石， $\phi 3-\phi 1.5$ mm，ヨークあり，下降）

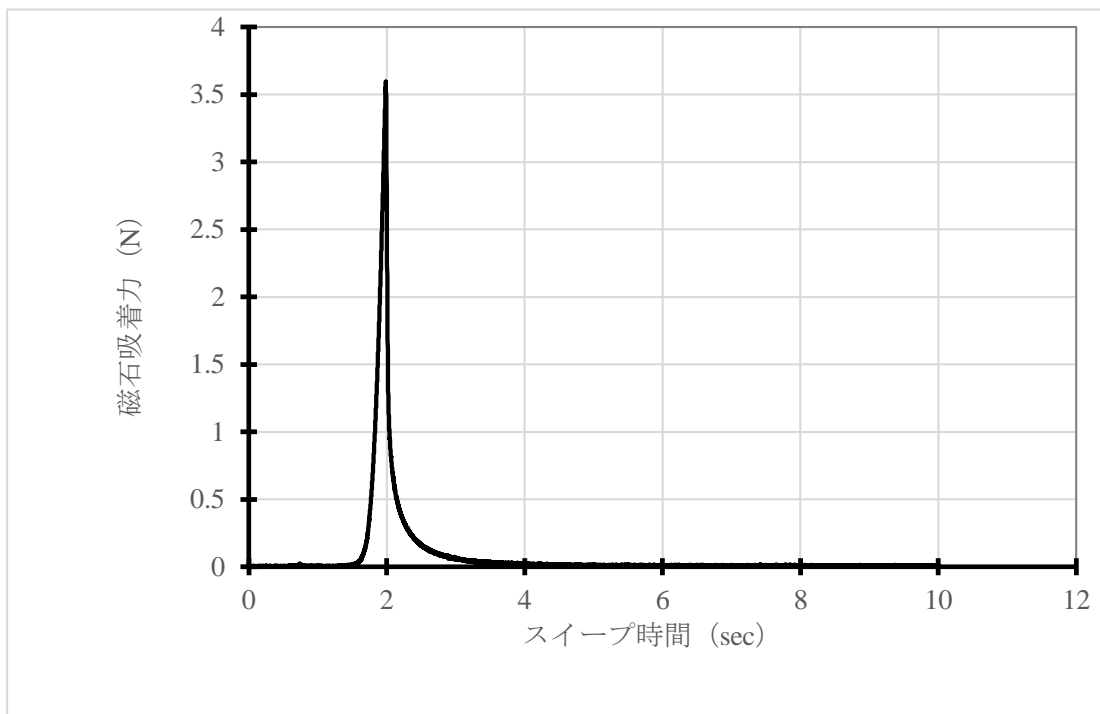


図 2.15 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 4\text{-}\phi 2\text{ mm}$, ヨークあり, 上昇)

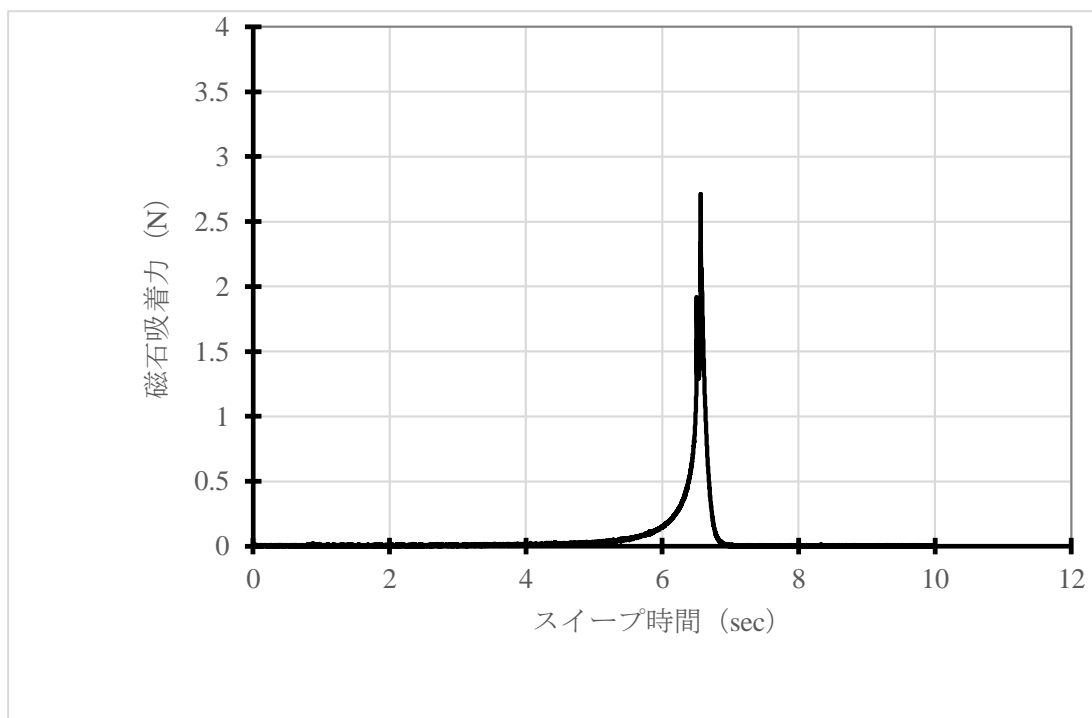


図 2.16 磁石吸着力 (円筒型磁石, $\phi 4\text{-}\phi 2\text{ mm}$, ヨークあり, 下降)

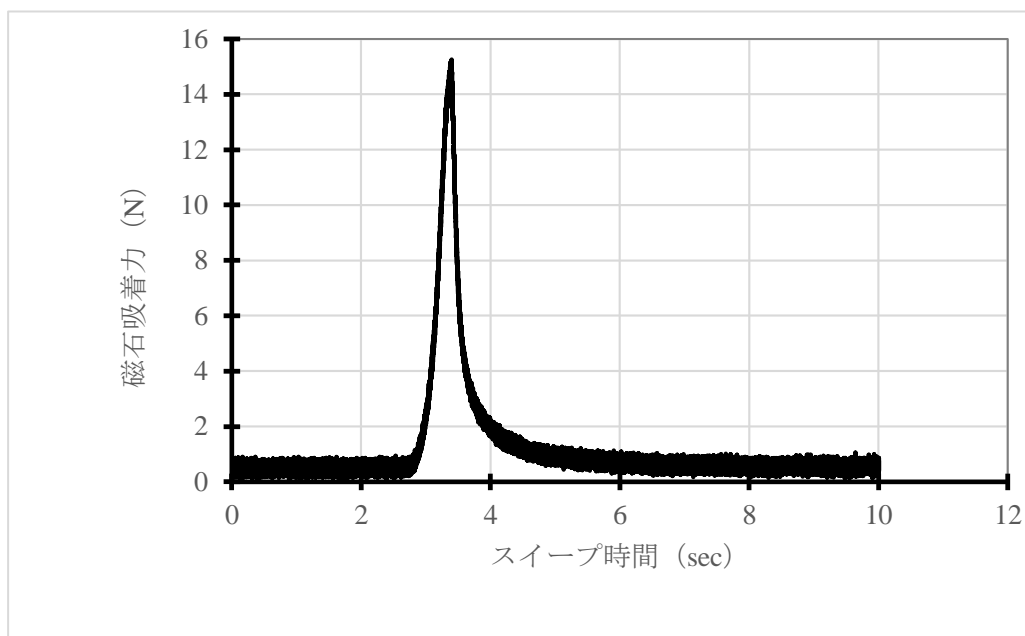


図 2.17 磁石吸着力 (円筒型磁石, φ8-φ4 mm, ヨークあり, 上昇)

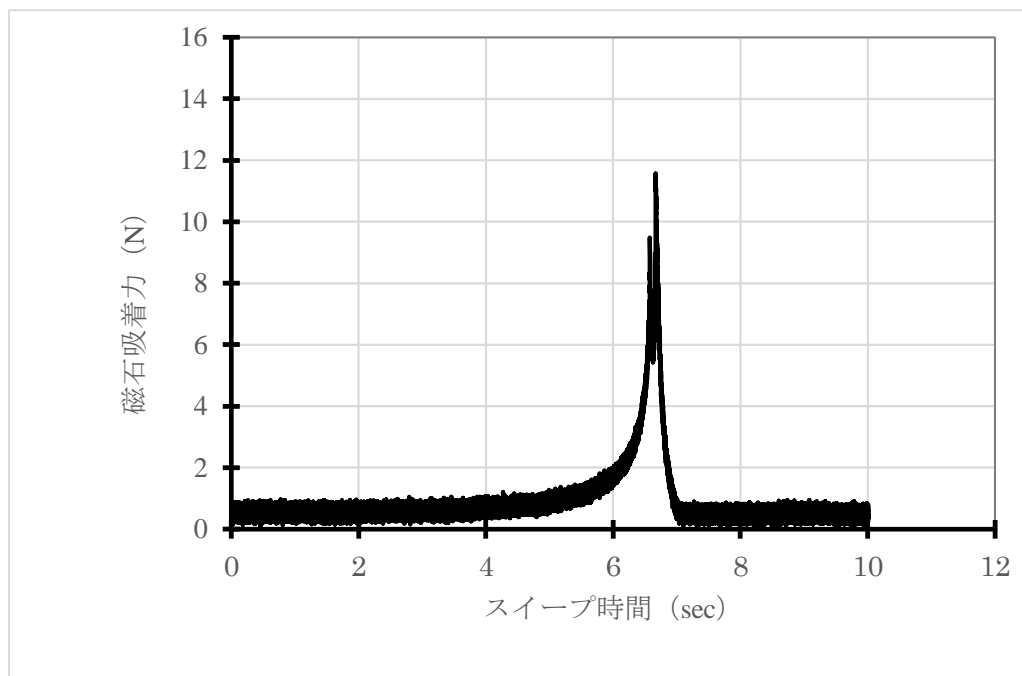


図 2.18 磁石吸着力 (円筒型磁石, φ8-φ4 mm, ヨークあり, 下降)

ヨークなしと比較すると、外径 8 mm を除くとヨークを付けることで、最大磁石吸着力は上昇時には約 4.25 倍大きくなり、形も急峻になっているのがわかる。これはヨークを付けることで磁路がヨークにより集中されるためである。一方、下降時に関してはヨークを付けた場合には、ピークが 2 つ出ており、プルインされた時に一方の端が先に吸着され、その後

にもう一方の端が吸着される片当たり現象が生じている。(3)において片当たり状態での吸着力に関しては詳述するが、片当たりすると磁石吸着力は減少するため、下降時のヨークありの最大吸着力はヨークなしの3.3~3.5倍に留まっていることがわかる。外径8mmでヨークを付けた方が、磁石吸着力が小さくなっているが、これは、ヨークの接着が上手くいかず左右の磁力がアンバランスになり、磁石が傾いた状態で上下動したためと考えられる。そのことにより、形もブロードになったり、片当たりしたりしてピークが2つ出たりしている。これらの結果より、ヨークを同心円状に正確に取り付けることができれば、磁路をステージに集中させ、磁石吸着力を約4.25倍大きくできることが確認された。今回は製造の関係で磁石とヨークを別々に製造して、後で接着を行ったが、磁石とヨークを接着後に外形加工を行ってから着磁をする必要があることが分かった。後述するすべり特性計測や試作マイクロロボットに使用した磁石車輪は、磁石とヨークを接着後に内外径加工を行ってから着磁を行った。

円筒型だけでなく円柱型磁石の計測結果もあわせて、直径4mm以下の磁石体積と磁石吸着力の大きさの関係を図2.19に示す。

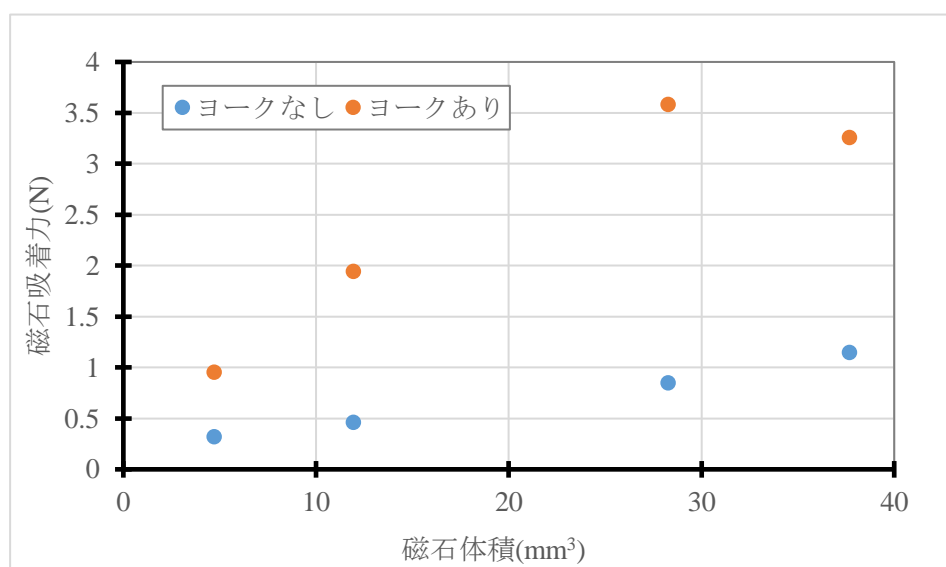


図 2.19 磁石体積と磁石吸着力の関係

直径4mmの円柱型の磁石吸着力が小さく出ているが、これはヨークの接着が上手くいかず偏心したため、左右のバランスが崩れ片当たりして、磁石吸着力が小さく出たためである。それ以外はほぼ磁石吸着力は体積と比例関係にあることがわかる。したがって、外径3mmの磁石車輪吸着力はヨークなしで約0.46N、ヨークありで約1.94Nであることが分かった。したがって、体積比とすると、フル着磁で、直径1mmの磁石車輪吸着力はヨークなしで 1.7×10^{-2} N、ヨークありで 7.2×10^{-2} Nの磁石車輪吸着力を与えることが可能なことがわかった。実際の水平走行用試作マイクロロボットの駆動輪の磁石吸着力は自重 5.0×10^{-4} kgの4.5倍の 2.2×10^{-2} Nに設定したので、ヨークありでは十分な磁石吸着力が得られるものの

ヨークなしでは必要な吸着力が得られなかったこともわかった。また、垂直走行マイクロロボットの駆動輪（下輪）はヨークありのフル着磁相当の $7.1 \times 10^{-2} \text{ N}$ に設定した。

(2) ギャップと磁石吸着力の関係

試作マイクロロボットでは、磁石車輪はヨークと磁石を接着してから同心円加工するとともにその組立では、地面に磁石車輪を吸着させ、それをベースに組立を行ったため、組み立て時に地面と磁石車輪の間にギャップが発生する恐れはない。但し、樽型磁石車輪を用いた場合には、ヨーク部と走行面においてギャップが発生する。また、細管の垂直移動でも磁石車輪の外側でギャップが発生する。ギャップがあると、磁石吸着力が減少すると考えられるので、ギャップの影響をみるため、ヨークありの円筒型磁石の内の磁石吸着力が上手く計測できなかった外径 $\phi 8 \text{ mm}$ を除いた外径 $\phi 3 \text{ mm}$ の円筒型磁石と外径 $\phi 4 \text{ mm}$ の円筒型磁石に関して、図 2.13 と図 2.15 の最大磁石吸着力が得られる磁石車輪がステージから離れる瞬間からステージの距離と磁石吸着力の計測結果を図 2.20 と図 2.21 に示す。

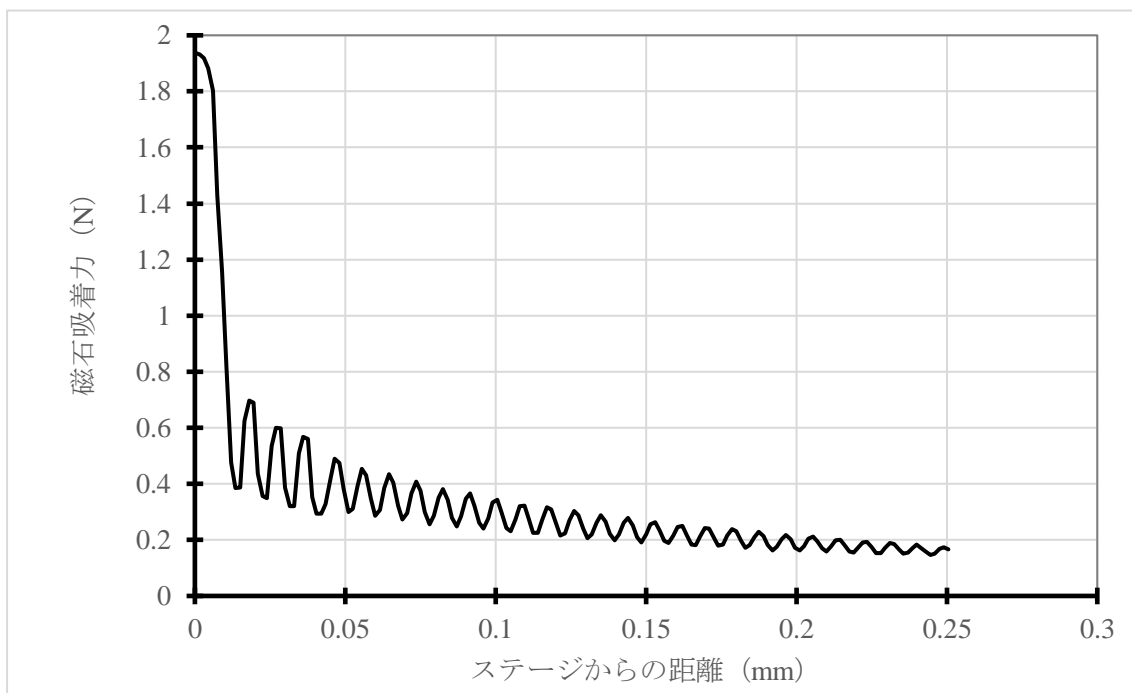


図 2.20 ステージからの距離と磁石吸着力の関係
(円筒型磁石, $\phi 3\text{-}\phi 1.5 \text{ mm}$, ヨークあり)

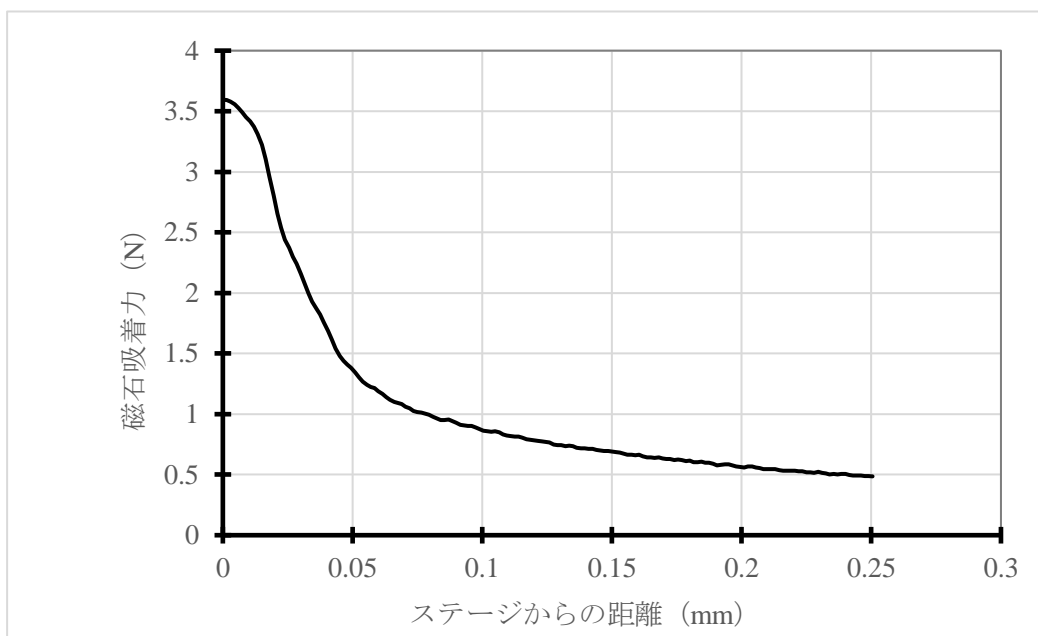


図 2.21 ステージからの距離と磁石吸着力の関係
(円筒型磁石, $\phi 4\text{-}\phi 2\text{ mm}$, ヨークあり)

図 2.20 より, 外径 $\phi 3\text{ mm}$ の円筒型磁石では磁石吸着力が振動的になっているが, これは外径 3 mm の方が, 磁石重量が軽いため, 引っ張っている銅線の剛性と磁石とのばねマス系の振動の影響が大きく表れたためと考えられる. 図 2.20 と同じ磁石をステップ駆動で上昇させた場合のステージからの距離と磁石吸着力の関係を図 2.22 に示す.

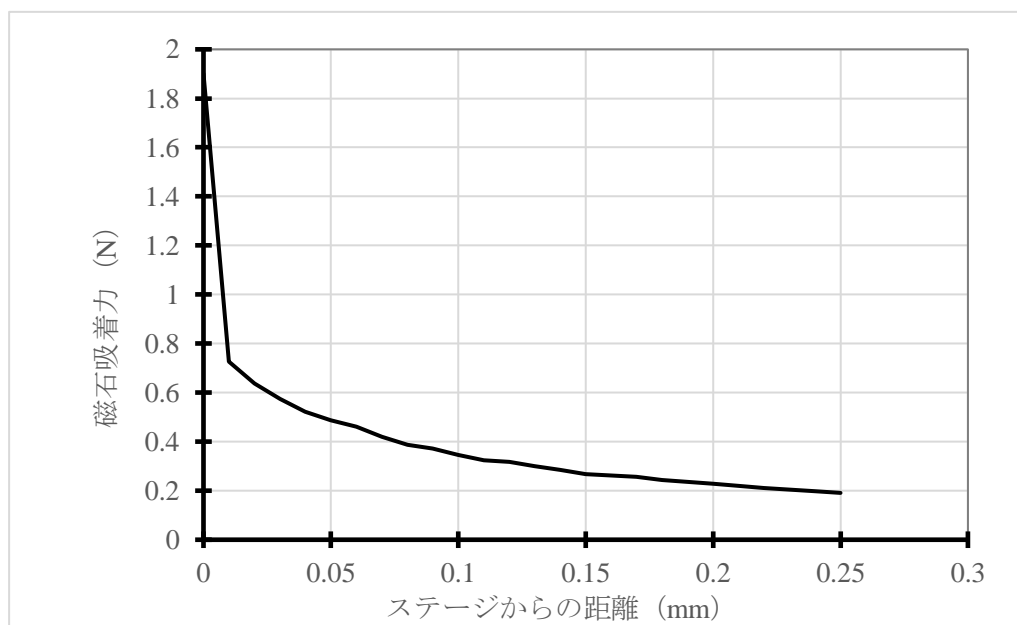


図 2.22 ステージからの距離と磁石吸着力の関係
(円筒型磁石, $\phi 3\text{-}\phi 1.5\text{ mm}$, ヨークあり, ステップ駆動)

図 2.20 の振動の上側ピーク値をとったものとほぼ同じ曲線となっている。図 2.21 と図 2.22 とを比較すると、磁石吸着力が小さい（車輪径が小さい）程周りに与える影響が小さく、より急峻になっているのが分かる。したがって、マイクロロボットに搭載した外径 1 mm の磁石車輪では、より急峻な特性になるものと思われる。

(3) 片当たりの影響

磁石が片当たりした影響に関して調べるために、外径 3 mm の磁石車輪に対して、片側に CR 紙 (0.089 mm./1 枚) をはさんでいって、最大磁石吸着力を計測した結果を図 2.23 に示す。

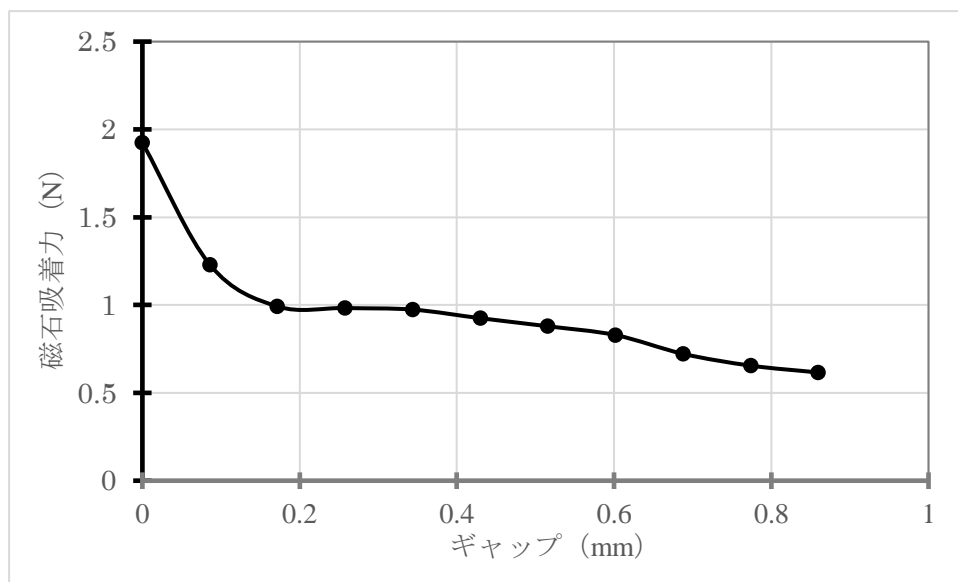


図 2.23 ステージからの距離と磁石吸着力の関係
(円筒型磁石, $\phi 3\text{-}\phi 1.5$ mm, ヨークあり, ステップ駆動)

片側がステージに接触しているため、完全に離れた場合ほど磁石吸着力は低下しないが、ギャップが大きくなるにしたがって磁石吸着力が低下し、約 0.18 mm のギャップで最大吸着力の約半分の磁石吸着力になり、その後ほぼその磁石吸着力を維持した後に若干減少している様子が分かる。

2.3.3 磁石車輪吸着力の解析結果

(1) 磁気吸着力の理論

「磁気吸着力の理論」 [51]に磁気吸着力の解析法が記載されているので、これをベースに磁石車輪の磁気吸着力の解析を行った。両側にヨークが取り付けられた磁石車輪は文献 [51] に示されている、図 2.24 に示すヨーク付き二極型吸着装置と等価である。この吸着装置の吸着力 F_t は以下の式 (2.2) で計算できる。また、式 (2.2) の吸着力 F_t とギャップ G は図 2.25 で表される。

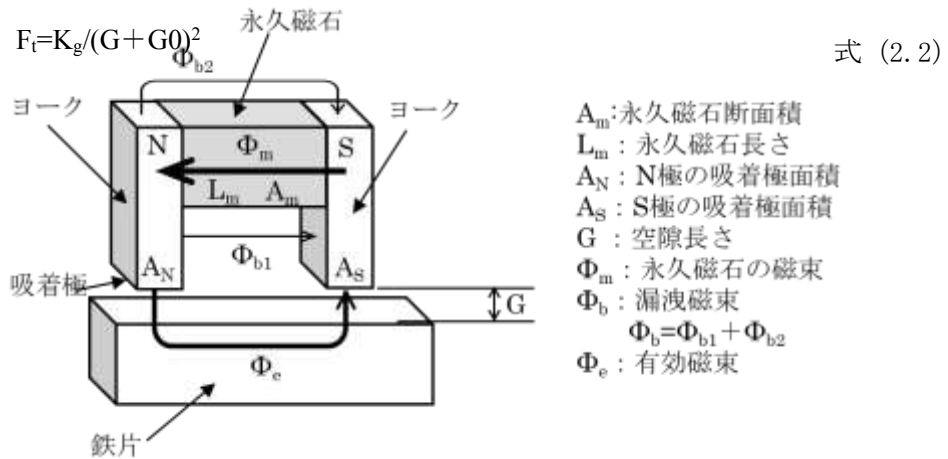


図 2.24 二極型吸着装置の模式図

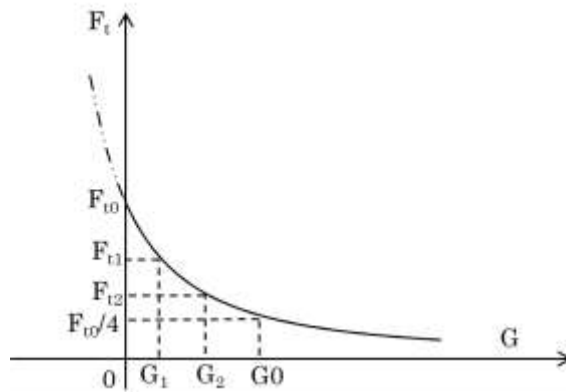


図 2.25 磁石吸着力とギャップの関係

ここで、 $G_0=0$ は地面に接触しているときの吸着力で最大値を示す。 K_g は吸着力係数、 G_0 は空隙係数であり、いずれも吸着装置の特性を表す定数である。実際にはギャップの異なる吸着力を複数計測し、その平均から以下のように求める。

式 (2.2) において吸着力 F_t とギャップ G が実測可能な量である。吸着力を二つの異なるギャップにおいて測定すると、二組のデータ (G_1, F_{t1}) と (G_2, F_{t2}) を得る。これらのデータを式 (2.2) に代入すると、 $F_{t1} = K_g / (G_1 + G_0)^2$ と $F_{t2} = K_g / (G_2 + G_0)^2$ の連立方程式が得られ、 G_0 は式 (2.3) で求められる。

$$G_0 = (G_2(F_{t2}/F_{t1})^{1/2} - G_1) / (1 - F_{t2}/F_{t1})^{1/2} \quad \text{式 (2.3)}$$

空隙係数 G_0 が求められれば、吸着力係数 K_g は $K_g = F_{t1}(G_1 + G_0)^2$ から求められる。磁気回

路は不安定であるため複数個の G_0 と K_g の平均値を G_0 と K_g とする。

なお、式 (2.2) の常用対数をとると、 $\log F_t = -2\log(G+G_0) + \log K_g$ となり、 $\log F_t$ と $\log(G+G_0)$ の関係は傾きが-2の直線関係となる。

前章の実験で求めた磁気吸着力とギャップの関係から $\log F_t$ と $\log(G+G_0)$ を求めたものを図 2.26 と図 2.27 に示す。図 2.26 が $\phi 3 \text{ mm}$ の場合のデータ、図 2.27 が $\phi 4 \text{ mm}$ の場合のデータから求めたものである。

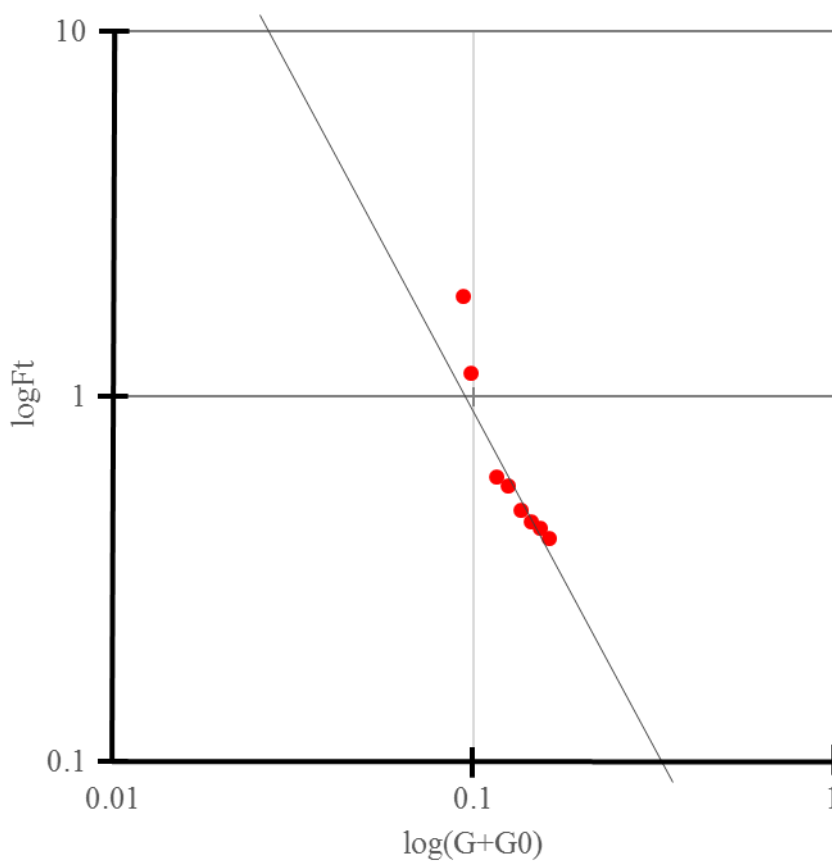


図 2.26 $\log F_t$ と $\log(G+G_0)$ の関係 ($\phi 3 \text{ mm}$)

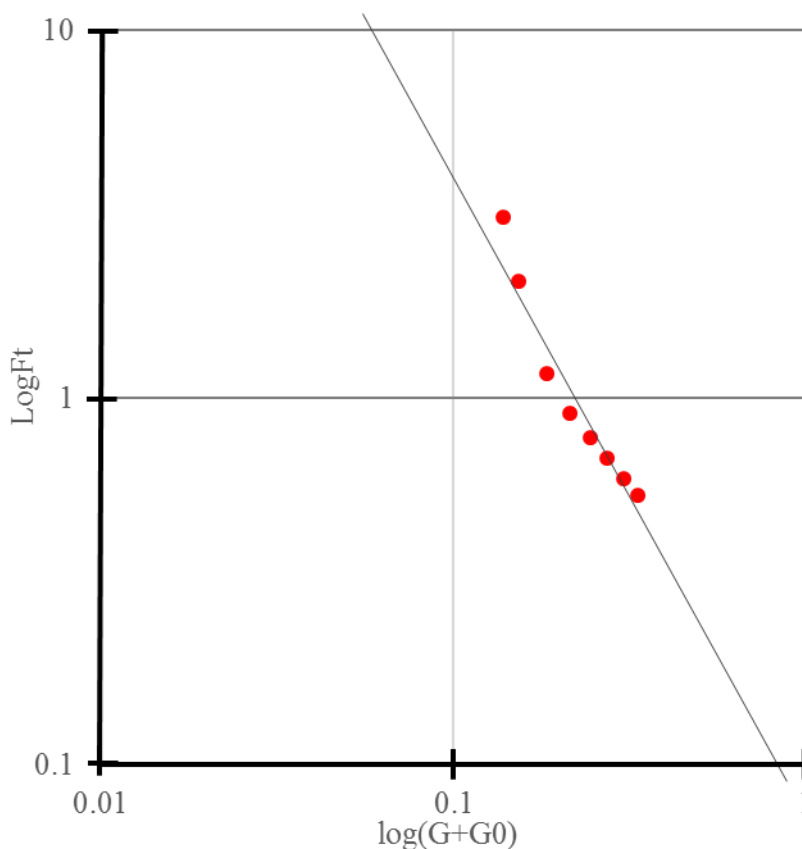


図 2.27 $\log Ft$ と $\log(G+G_0)$ の関係($\phi 4$ mm)

この時の G_0 と K_g は以下となる.

$\phi 3$ mm : $G_0=0.089$, $K_g=0.015$

$\phi 4$ mm : $G_0=0.108$, $K_g=0.042$

式 (2.3) より $G=0$ の時に最大吸着力 $F_0=K_g/G_0^2$ なので, $G=G_0$ の時は $F_t=K_g/4 \cdot G_0^2$ になる. つまり, 吸着力が最大吸着力の $1/4$ になるギャップが G_0 である. したがって, G_0 が大きい程, ギャップの増加による吸着力の減少割合が小さいことになり, $\phi 3$ mm よりも $\phi 4$ mm の方が吸着力の減少割合が小さいことを示している.

(2) 片当たりの影響

片当たりをして, 磁石車輪の一方だけにギャップがある時は, ギャップがある磁石吸着力と接触している場合の最大磁石吸着力の平均したものが片当たりの磁石吸着力と想定して, 実験で実施した 0.089 mm の紙を入れた場合の計算をしたものを図 2.28 示す. 実験結果の図 2.23 とほぼ同等の結果が得られている. これからも解析結果が妥当であり, 片当たり状態が発生しても, 磁石吸着力を求めることが可能であることが分かった.

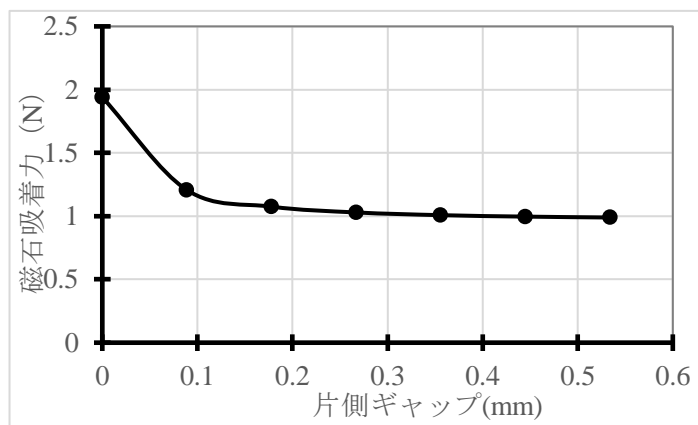


図 2.28 片当たりの磁石吸着力の計算結果 (Φ3 mm)

2.3.4 磁石車輪の形状, 磁路及び作用力

磁石車輪駆動マイクロロボットに搭載した2種類の磁石車輪の形状模式図, 磁路及び作用力を図 2.29 に示す.

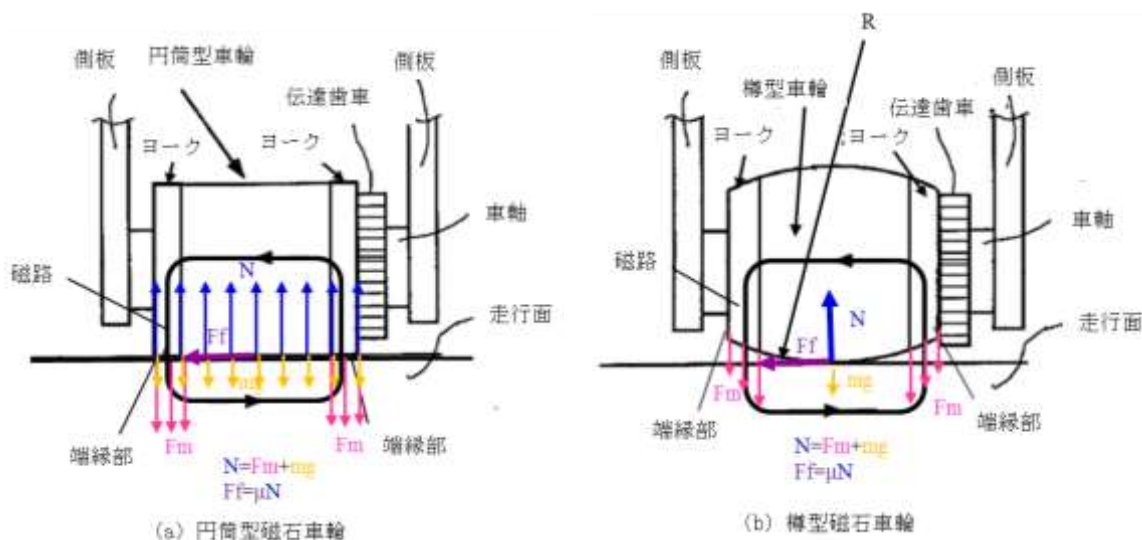


図 2.29 磁石車輪の形状, 磁路及び作用力

図 2.29(a)は円筒型磁石車輪であり, 図 2.29(b)は樽型の磁石車輪である. 円筒型磁石車輪の方が製造は簡単であるが, 地面と線接触になるため, 横すべりする場合に接触面での速度が場所により異なるため, 走行が不安定になることが予測される. 一方, 樽型磁石車輪の方は, 製造は困難であるが, 地面と点接触となり, スムーズな横すべりが期待される.

磁石車輪は試作マイクロロボットでは, 円筒型車輪は直径 1 mm となっており, 樽型車輪は最外径 1 mm で車軸方向に半径 3 mm の R がつけてある. 磁石材料は SmCo 系で長さ 0.75 mm の磁

石の両側に 0.125 mm 幅の低炭素鋼 SS400 の円板ヨークが取り付けられている。後述するすべり特性計測用の磁石車輪では 2.4.1 節で述べるように 8 倍のサイズとなっており、円筒型車輪は、直径 8 mm、長さ 6 mm の磁石の両側に 1 mm 幅の円板ヨークが取り付けられており、全長は 8 mm になっている。樽型車輪も同様に 8 倍モデルで車軸方向に半径 24 mm の R がつけてある。

円筒型車輪も樽型車輪も、図中に記載している磁路のように、車軸方向に着磁がなされている。車軸方向に着磁をすることにより、磁石車輪が回転しても磁力が変動することなく効率的に回転することが可能となっている。また、壁面を移動する場合にも、引き剥がし機構を用いることなく、壁面に吸着しながらの連続走行が可能となっている。

磁石車輪に作用する力としては、重力 mg と磁石吸着力 F_m 及び走行面からの垂直抗力 N がある。円筒型磁石車輪では図 2.29(a)に示すように、重力及び垂直抗力は分布荷重として作用すると考えられるが、左右対称であるため、合力として磁石車輪中心に垂直抗力 N が作用すると考え、この垂直抗力 N に摩擦係数 μ をかけたものとして摩擦力 F_f (縦力と横力) が磁石車輪中央に作用すると考えられる。磁石吸着力もヨーク部で分布荷重として作用するが、左右対象であるため、合力としては磁石車輪中心に作用すると考えられる。樽型磁石車輪の場合には、図 2.29(b)に示すように、ヨーク部 (吸着極) は走行面と接触はしていないが、磁石吸着力は接触していない場合にもヨーク部のところで作用すると考えられるため、ヨーク部に分布荷重として作用する。ヨーク部のギャップが内側と外側で異なるので、内側の磁石吸着力の方が強くなると考えられるが、トータルとしては内側と外側のギャップの平均ギャップのときの磁石吸着力が作用すると考えられる。また、樽型は点接触しているため、接触点に重力 mg 分の力が作用し、トータルとしては $F_m + mg$ 分の下向きの力への反作用として、樽型の膨らんだ接触点に垂直抗力 N が作用し、摩擦力 F_f はこれに摩擦係数 μ をかけたものとして、接触点に作用すると考えられる。

次に、左側磁石車輪が傾いた場合について考察する。図 2.30 に樽型磁石車輪が β 傾いた時の作用力を示す。図 2.30 のように、樽型磁石車輪が傾いた場合には、走行面と磁石車輪の接触点は樽の中央から離れた点に移動する。この時の垂直抗力 N は磁石吸着力 ($F_{ml} + F_{mr}$) の $\cos \beta$ と重力 mg の和になり、これに摩擦係数 μ をかけたものが磁石車輪に作用する摩擦力 F_f になる。磁石吸着力は左側の磁石吸着力 F_{ml} の方が右側磁石吸着力 F_{mr} よりもギャップが狭いため大きくなる。このため磁石車輪としてはより傾く方向のモーメントが作用するが、マイクロロボット全体で考えると右側磁石車輪の磁石吸着力が重心周りのより大きなモーメントで戻そうとするため、実際にはこのような傾いた状態は解消することになる。このように、磁石車輪は走行面から離れることはないが、仮に磁石車輪が走行面から浮いた時にどうなるか以下に述べる。図 3.31 に樽型磁石車輪が走行面から浮いた状態での作用力を示す。樽型磁石車輪には磁石吸着力 F_m と重力 mg が鉛直下向きの力として作用している。この力に対する反作用力は磁石車輪が走行面から浮いているため、これまでのように走行面から受けるのではなく、車軸から受けることになる。したがって、走行面に作用する摩擦力 F_f は接触していないので、摩擦係数がゼロになるため、発生しないことになる。すべり (摩擦力) は磁石車輪と走行面の接触点で発生する現象であり、磁石吸着力は磁石車輪が走行面と接触している時には垂直抗力の一成分として作用するが、

接触しないときには、摩擦力はゼロであるため、磁石吸着力は磁石車輪の摩擦力には作用しないことになる。したがって、磁石吸着力とすべりは切り離して考えるのが良いと考える。

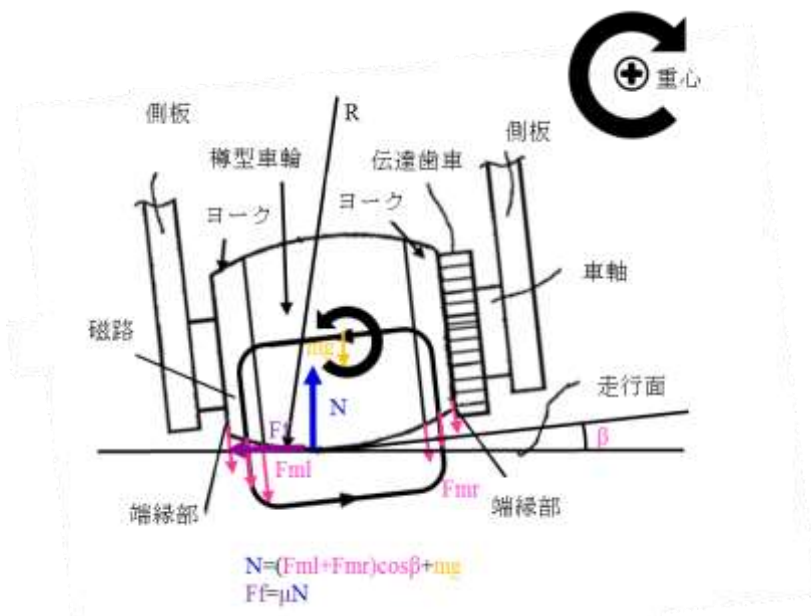


図 2.30 樽型磁石車輪が傾いた時の作用力

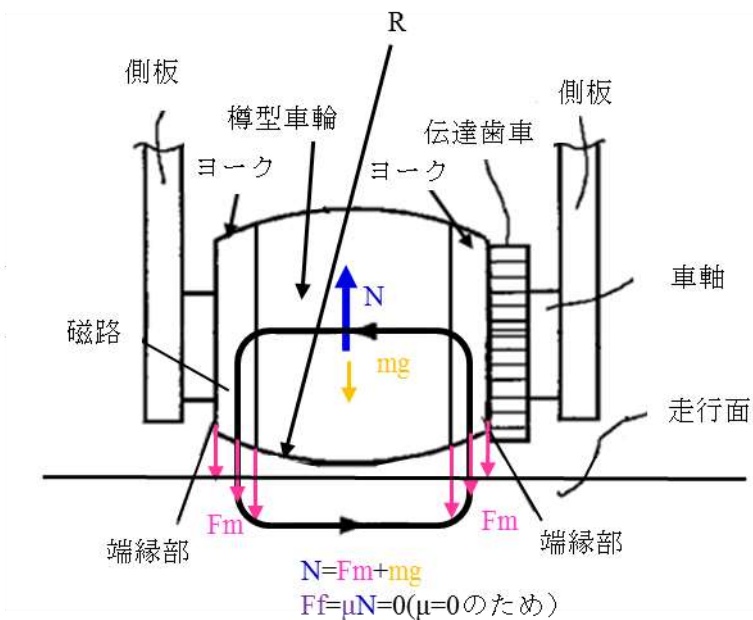


図 2.31 樽型磁石車輪が浮いた時の作用力

2.4 磁石車輪すべり特性の計測

2.4.1 磁石車輪すべり特性評価装置

実際のマイクロロボットで使用する直径 1 mm の磁石車輪のすべり特性をそのまま計測することは計測器の測定レンジの関係で困難であったため、市販されている最小レンジのトルクメータで計測可能な直径 8 mm の磁石車輪のすべり特性を計測する磁石車輪すべり特性評価装置を試作した。トライボロジの専門家によれば、ミリメートルサイズでのトライボロジ現象は大きさによって変化しないとのことであったので、本装置により計測されたすべり特性は実際の試作マイクロロボットに搭載した直径 1 mm の磁石車輪のすべり特性として利用できることを確認している。試作した磁石車輪すべり特性評価装置の構成を図 2.32 に示す。

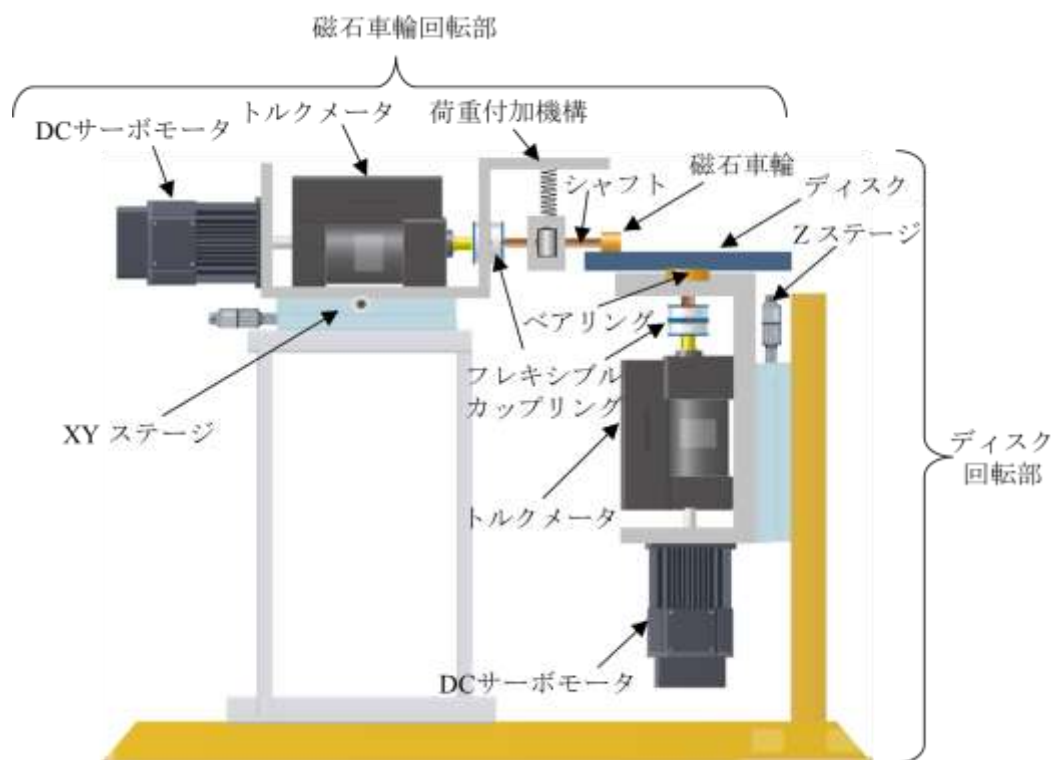


図 2.32 磁石車輪すべり特性評価装置の構成

図 2.32 に示すように、本評価装置は磁石車輪回転部とディスク回転部に分れる。磁石車輪回転部は先端に取り付けた直径 8 mm の磁石車輪がシャフト、フレキシブルカップリングを介してトルクメータに連結されている。トルクメータには DC サーボモータが接続されており、磁石車輪を任意の回転数で回転可能となっている。さらに、上記シャフトには荷重付加機構が取り付けられており、フレキシブルカップリングと合わせて、磁石車輪の偏心吸収機構となっている。磁石車輪はシャフトにネジでとめられており、交換可能となっている。また、磁石車輪回転部全体が XY ステージに固定されており、水平面内の任意の位置に磁石車輪を固定することが可能となっている。

ディスク回転部は円盤状のディスクが軸受、カップリングを介してトルクメータに連結されて

おり、磁石車輪回転部と同様に DC サーボモータによりディスクを任意の回転数で回転可能になっている。また、ディスク回転部は Z ステージに固定されており、磁石車輪下端とディスク上面の位置を水平に調整可能となっている。図 2.33 に示すように、磁石車輪をディスク上の所定の位置に固定し、磁石車輪とディスクの回転数を制御しながら、定常状態になったときにそれぞれのトルクを計測することにより、任意のスリップ率とスリップ角での磁石車輪のすべり特性を計測することが可能となっている。

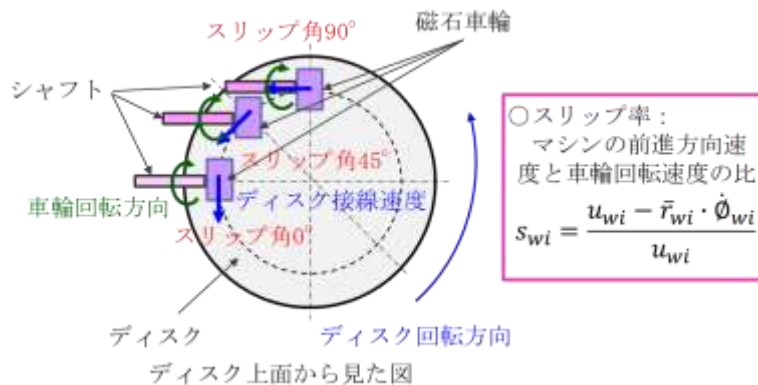


図 2.33 磁石車輪のディスク上位置とスリップ角の関係

2.4.2 表面粗さ、着磁の有無及び付加荷重の影響

先ず走行面の表面粗さがすべり特性にどのように影響するかを検証するため、表面仕上げが▽▽(9s), ▽▽▽(5s), ▽▽▽▽(2s)の3種類のディスクを用意し、ディスク中心から 38 mm でスリップ角 0° の位置に円筒型磁石車輪をセットし、磁石車輪を 10.5 rpm の速度で回転させ、ディスクを、100 rpm を中心に変化させることでスリップ率を変化させたときの荷重 f_z で正規化された縦力 (f_x/f_z) を計測した。スリップ率と縦力の関係を図 2.34 に示す。

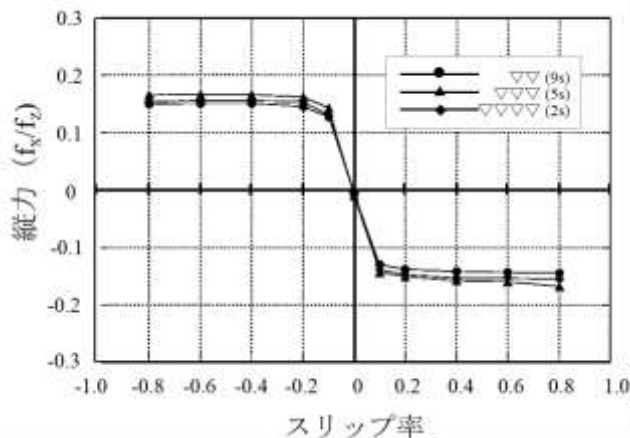
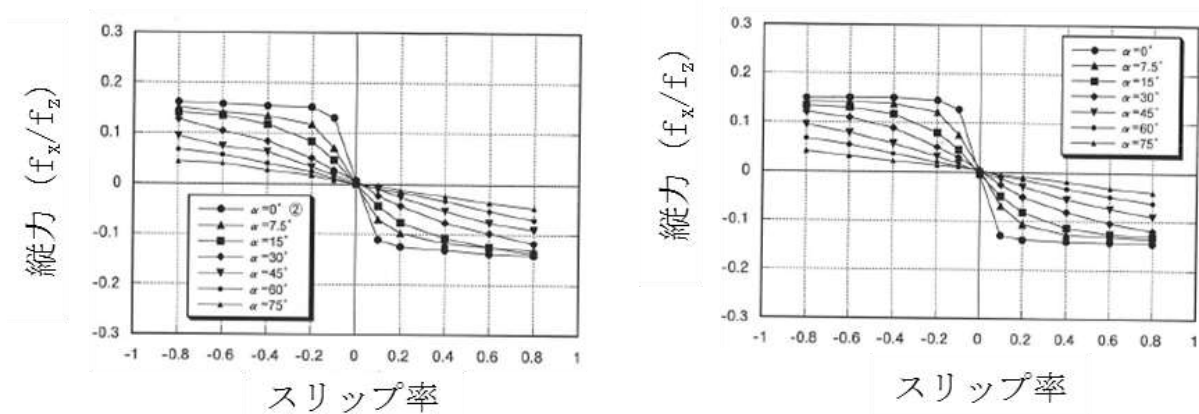


図 2.34 ディスク表面粗さを変化させたときのスリップ率と縦力の関係

図 2.34 に示すように，スリップ率と縦力の関係は表面仕上げ粗さにほとんど影響がなく，スリップ率を大きくしていくと，約 1.5 に収束していることがわかる．スリップ率が 1 の場合の f_z で正規化された縦力は車輪方向のすべり摩擦係数に相当し，表面粗さに関係なく，約 0.15 になっていることがわかる．一般的に摩擦係数は表面粗さに影響せず，材料固有のものになることが知られており，この結果はそのことと矛盾しない結果になっている．また，摩擦係数の値に関しては，材料固有の値になるといわれているが，条件によりバラツキも大きいといわれている．ステンレスと SmCo の摩擦係数の計測例は調べた限りでは見当たらなかったが，鉄-コバルトの摩擦係数が 0.46，ステンレス-ステンレスの摩擦係数が 0.15 の計測結果があるので，妥当な値と思われる．

次に着磁の有無や垂直付加荷重がすべり特性にどのように影響するかを検証するため，着磁なしで垂直付加荷重が 0.37[N] のとき及び着磁あり (0.71[N]) で垂直付加荷重が 1.08[N] のときのスリップ率と縦力の関係を図 2.35(a) 及び図 2.35(b) に示す．



(a) 着磁なし + 付加荷重 0.37N

(b) 着磁あり (0.71N) + 付加荷重 1.08N

図 2.35 着磁有無及び垂直付加荷重を変化させたときのスリップ率と縦力の関係

図 2.35(a) 及び (b) から着磁有無及び垂直付加荷重を変化させても，スリップ率と荷重で規格化した縦力の関係は変化がないことから，スリップ率は磁石吸着力及び垂直付加荷重には依存しないと考える．

2.4.3 円筒型磁石車輪すべり特性計測結果

実際の試作マイクロロボットの車輪の 8 倍モデルである直径 8 mm の磁石車輪 (着磁力: 0.71[N]) を表面粗さ 5.5s のディスクの中心から半径 38 mm の位置で磁石車輪軸がディスクの直径方向と一致するように付加荷重 1.08[N] で固定して (スリップ角 0°)，ディスクの車輪回転方向の速度が一定になるように回転させた．ディスクの回転速度はスリップ率が 0 の時に磁石車輪が 100 rpm になるように設定した．この状態で，磁石車輪を 20 rpm ~ 180 rpm まで変化させて回

転させることにより、スリップ率が異なる点での車輪回転方向（x方向，縦力）とその直角方向（y方向，横力）の摩擦力を磁石車輪回転部とディスク回転部のトルクメータより求めた。また，磁石車輪の位置をXYステージで移動させることにより，異なるスリップ角（7.5°，15°，30°，45°，60°，75°，90°）の特性を計測した。

縦力と横力の計測結果をそれぞれ図2.36と図2.37に示す。

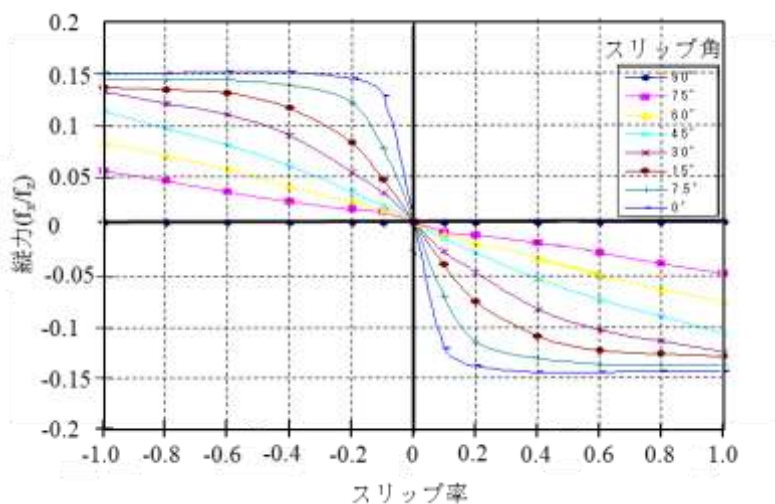


図 2.36 スリップ率と縦力の関係（円筒型磁石車輪すべり特性）

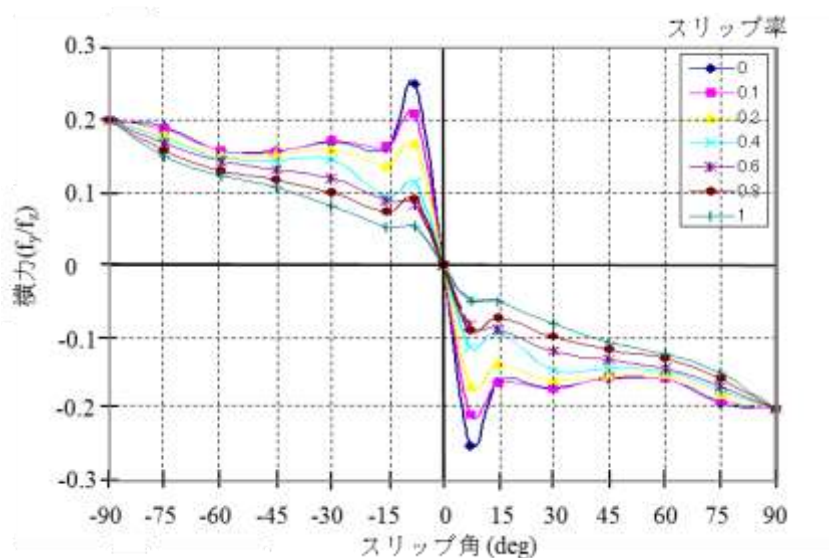


図 2.37 スリップ角と横力の関係（円筒型磁石車輪すべり特性）

付録 A に示すタイヤ車輪すべり特性 [52]の図 A. 6 及び図 A. 7 と比較すると荷重で正規化した縦力とスリップ率の関係に関しては，最大値がタイヤ車輪では 0.8 程度であるのに対して，磁石車輪では 0.15 になっていること及びスリップ角 0° の時に，スリップ率 0.4 以上で一定値 0.15

(車輪がロックしてすべっている状態のすべり摩擦係数に相当) になっていることが分かる。また、荷重で正規化した横力とスリップ角の関係に関しては、最大値が0.25 (最大静止摩擦係数に相当し) になったのちに縦力よりも大きい0.2 (車軸方向のすべり摩擦係数に相当) になっていること及びスリップ角に対して変動があることが分かる。この理由としては、前者は磁石車輪では表面が剛でありその摩擦係数がタイヤ車輪の摩擦係数より小さいため、後者は横方向の摩擦係数が縦方向の摩擦係数よりも大きいこと及びスリップ角が大きい時に磁石車輪の接地面での速度が場所により異なるため外乱の影響を受けやすくなり、動作が不安定になったためと考えられる。

2.4.4 樽型磁石車輪すべり特性計測結果

計測車輪を樽型車輪 (着磁力: 0.71[N]) に変更して、2.4.3 節で述べたのと同様に、樽型磁石車輪のすべり特性を計測した。計測結果を図 2.38 及び図 2.39 に示す。円筒型磁石車輪すべり特性図 2.36 及び図 2.37 と樽型磁石車輪すべり特性図 2.38 及び図 2.39 を比較すると、スリップ率と縦力の関係 (図 2.36 及び図 2.38) は形状としては、それほど変化はないが、収束値が樽型磁石車輪の方が若干小さくなっており、若干ではあるがすべり易くなっていることが分かる。スリップ角と横力の関係 (図 2.37 及び図 2.39) を比較するとピーク値及び収束値が樽型磁石車輪の方が若干小さくなっていることとピーク後のスリップ角の大きなところの不安定性が改善されていることが分かる。これは樽型車輪では、点接触になっているため、スリップ角の大きい場合に、線接触の円筒型車輪では、接触面での速度が場所により異なるため、走行が不安定になっていたことが改善されたものと考えられる。これらの結果から滑らかなすべり特性を有する樽型磁石車輪を用いることで走行性能の改善が期待できる。

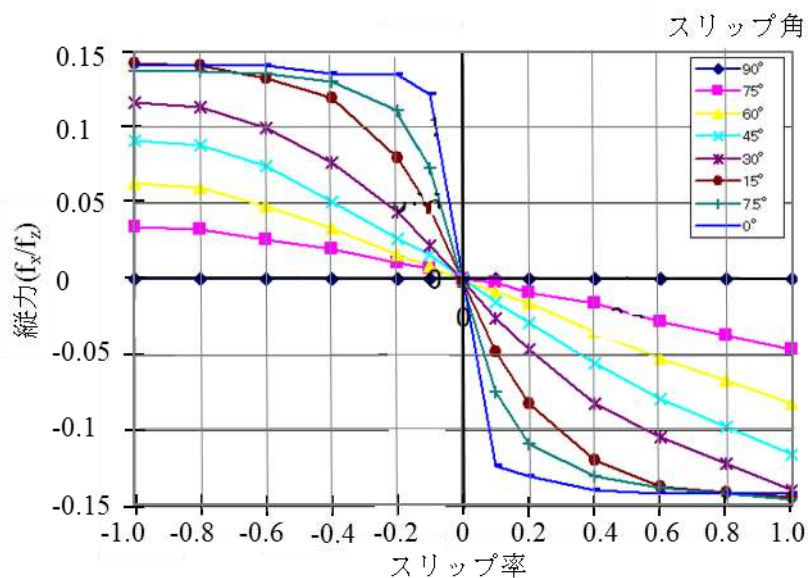


図 2.38 スリップ率と縦力の関係（樽型磁石車輪すべり特性）

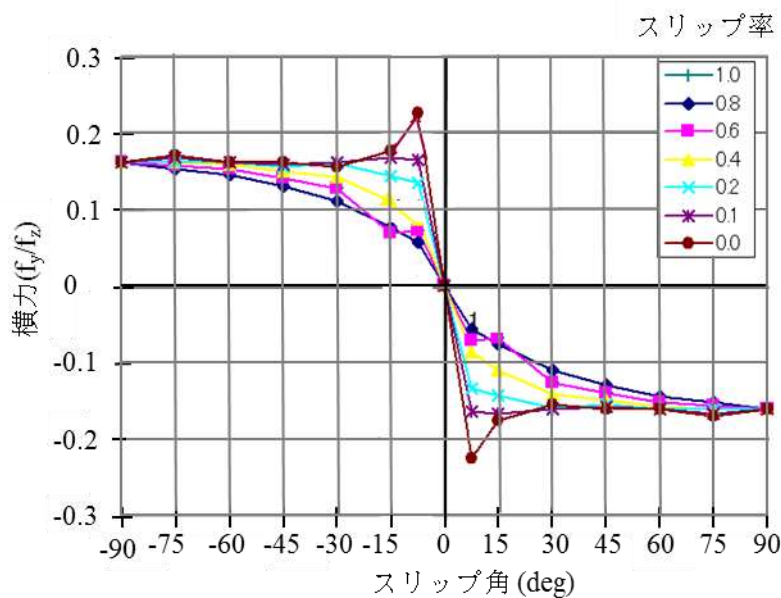


図 2.39 スリップ角と横力の関係（樽型磁石車輪すべり特性）

タイヤ車輪は材質がゴムであり変形が大きいので、金属材料の鉄道車輪とレールとのすべり特性（鉄道分野では「クリープ力特性」あるいは「粘着力特性」と呼んでいる）との比較について考察する。鉄道車輪はレールにのっけていて、レールや鉄道車輪の形状（円錐台）及びフランジによって、操舵をすることなくレール上を走行できるようにしている（自律操舵性）。したがっ

て、横方向の力に関しては、車でのスリップとは考え方が異なるため、直接的な比較はできないと考える。縦方向のすべり率と粘着力の関係は、図 A.6 に示すタイヤ車輪のスリップ率と縦力との関係とほぼ同じものとなっている。つまりスリップ率の小さいところでの線形な関係からあるところでピークを迎え、その後は徐々に低下する特性を示す [53], [54]。線形領域は「微小すべり領域」と呼ばれ固着領域とすべり領域が混在した領域であり、ピークの粘着限界を超えるとすべり領域だけになる「巨視すべり（空転あるいは滑走）領域」になる。鉄道車輪は金属であるが、鉄道車両が重いため、タイヤ車輪と同じように、車輪が弾性変形し、面接触領域が存在するため、非線形性を有するものと考えられる。但し、面接触領域はタイヤ車輪では、はがき大に対して鉄道車輪では、爪の大きさ程度と小さい。また、基本的には巨視すべりが起こらないように、設計・制御を行っており、タイヤ車輪や磁石車輪のようにすべりが発生することが前提となっているものとの取り扱いが異なるを考える。鉄道車輪の粘着限界での粘着係数の値は車両速度及び環境条件にもよるが 0.02~0.2 程度と低くなっており、磁石車輪はタイヤ車輪と鉄道車輪の間に位置するものと考えられる。これらのことから、磁石車輪のすべり特性はタイヤ車輪のすべり特性及び鉄道車輪のすべり特性とも異なる特有のものになっていることが分かった。つまり、スリップ率と縦力の関係では非線形領域がないこと及びスリップ角と横力の関係において山形のピーク特性を有することが磁石車輪のすべり特性の特徴となっている。なお、鉄道車輪では接触を点接触にするように、レール形状及び鉄道車輪の設計を行っており、磁石車輪で点接触の樽型磁石車輪の方が線接触の円筒型磁石車輪よりもすべり特性が良いことにも通じているところもあると考える。

2.5 結言

本章では、磁石車輪の動力学として、車輪座標系と磁石車輪に作用する力、磁石車輪の運動学とすべりを考慮した動力学及び4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの磁石車輪における作用力について説明した。また、磁石車輪の基礎特性として磁石吸着力に関して計測及び解析を行い、磁石車輪にヨークをつけることで、磁石吸着力を約 4.25 倍増強できること、ギャップを含め必要な磁石吸着力を解析で求めることが可能なことが分かった。さらに、これまでその特性が分からなかった磁石車輪のすべり特性を計測で明らかにするとともに、樽型磁石車輪の方が円筒型磁石車輪よりもすべり特性が安定していることを明らかにした。これらの磁石車輪の基礎特性を用いることで、次節以降で述べるように、スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの走行特性（定常旋回特性）を明らかにすることが可能になる。

第3章 水平走行性能の解析

3.1 緒言

対象とするスキッドステア方式の車輪駆動マイクロロボットの水平走行性能を明らかにするため、3.2節では築島ら [5]が提案している車輪の動力学やすべりを考慮した車輪式移動ロボットの運動学及び動力学の定式化をベースにスキッドステア方式車輪駆動マイクロロボットの4輪の水平走行動力学モデルを議論する。また、3.3節では前章と3.2節の結果を踏まえて、すべりを考慮した磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行シミュレータを開発するとともに、そのシミュレータを用いて、駆動輪と従動輪への磁石吸着力の配分、磁石吸着力の効果、タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の比較等について、水平走行性能の中でも定常状態の旋回性能を中心に議論する。3.4節では試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットを用いた定常旋回性能の計測結果について、シミュレーション結果とも比較しながら議論し、3.5節でまとめる。

3.2 スキッドステア方式車輪駆動マイクロロボットの水平走行動力学モデル

3.2.1 スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの運動理論

ここで取り上げるスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの運動理論は、マニピュレータの運動理論と自動車の運動理論を基礎として、多様な形態を持つ車輪式移動ロボットを統一的に一つの運動理論で扱うこと及び車輪のすべりを定量的に処理することを目的として、2次元移動の運動理論の体系化を試みた築島らの論文 [5]を基礎としている。この理論の概要に関しては、付録Aに記載する。対象とするスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットは、左右の駆動輪の速度差で旋回を行う車輪式移動ロボットの一形態として考えられる。本3.2.1項では、4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットに対して、この運動理論を適用する。

4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットに対して、以下の手順で運動方程式を得る。

- ①4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの形態より木構造を考え、表現行列、ベクトル行列を作る。
- ②①を基に、関節の種類を考慮しない「一般マルチリンク」の基本式を得る。
- ③固定関節の自由度を消去する。

図 3.1 に4輪スキッドステア方式走行モデル（以降、4輪走行モデルと記す）を示す。運動理論は2次元であるため、試作システムを地面に平行な車軸の高さの平面で切り取り、2次元のモデルとした。重心位置はマイクロロボット本体、車輪とも幾何学的中心、この図では正方形の中心にとっているが、シミュレーションでは任意に変更可能としている。

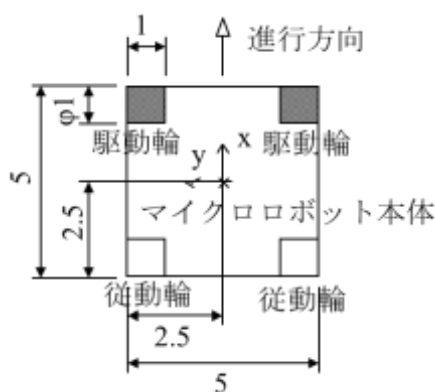


図 3.1 4輪走行モデル

4つの車輪とベースの間の関節は全て固定関節である。

図 3.1 の4輪走行モデルの木構造を図 3.2 に示す。

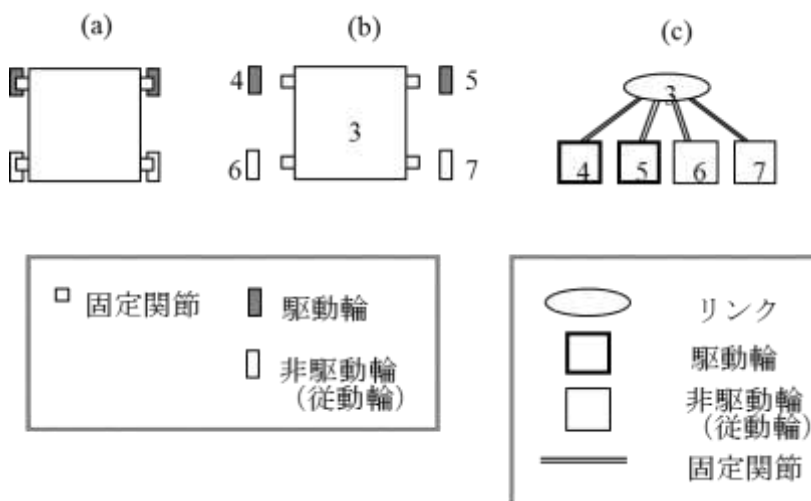


図 3.2 4輪走行モデルの木構造

表現行列 $[\epsilon]$ ，ベクトル配列 $[\mathbf{P}]$ ， $[\mathbf{a}]$ は以下のようなになる。ベース車輪の重心位置，座標

原点位置からこれらのベクトル配列が決定される。

		3	4	5	6	7
3		1				
4		1	1			
5		1		1		
6		1			1	
7		1				1

		3	4	5	6	7
3		\mathbf{p}_{3^*-3}				
4		\mathbf{p}_{4-3}	\mathbf{p}_{4^*-4}			
5		\mathbf{p}_{5-3}		\mathbf{p}_{5^*-5}		
6		\mathbf{p}_{6-3}			\mathbf{p}_{6^*-6}	
7		\mathbf{p}_{7-3}				\mathbf{p}_{7^*-7}

		3	4	5	6	7
3		$m_3 \cdot \mathbf{p}_{3^*-3}$				
4		$m_4 \cdot \mathbf{p}_{4-3}$	$m_4 \cdot \mathbf{p}_{4^*-4}$			
5		$m_5 \cdot \mathbf{p}_{5-3}$		$m_5 \cdot \mathbf{p}_{5^*-5}$		
6		$m_6 \cdot \mathbf{p}_{6-3}$			$m_6 \cdot \mathbf{p}_{6^*-6}$	
7		$m_7 \cdot \mathbf{p}_{7-3}$				$m_7 \cdot \mathbf{p}_{7^*-7}$

図 3.2 の木構造を基に、関節の種類を考慮しない「一般マルチリンク」の基本式から、4 輪走行モデルの式を展開していく。

(1) 一般マルチリンクの運動方程式

4 輪走行モデルの一般マルチリンクの運動方程式は式(3.1)のように行列形式で示される。以下、それぞれの行列について示す。

$$\mathbf{A}_M \ddot{\mathbf{q}}_M + \mathbf{b}_M + \mathbf{C}_M \mathbf{f}_W + \boldsymbol{\gamma}_M = \mathbf{D}_M \mathbf{n} \tag{3.1}$$

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & 0 & a_{66} & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & 0 & a_{77} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}_M = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6 \quad q_7]^T$$

$$\mathbf{b}_M = \mathbf{B}_M \times \mathbf{d}_M$$

$$\mathbf{B}_M = \begin{bmatrix} b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} \\ b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} \\ b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{d}_M = [(\dot{\theta}_3)^2 \quad (\dot{\theta}_4)^2 \quad (\dot{\theta}_5)^2 \quad (\dot{\theta}_6)^2 \quad (\dot{\theta}_7)^2]^T$$

$$\mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & 0 & c_{34} & c_{35} & 0 & c_{37} & c_{38} & 0 & c_{310} & c_{311} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_W = [f_{4x} \quad f_{4y} \quad n_4 \quad f_{5x} \quad f_{5y} \quad n_5 \quad f_{6x} \quad f_{6y} \quad n_6 \quad f_{7x} \quad f_{7y} \quad n_7]^T$$

$$\mathbf{D}_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

n : 関節に働くモーメント

γ_M : 関節に働く摩擦力 (個体摩擦, 粘性摩擦を含む)

(2) 固定関節の自由度の消去

次に, 固定関節の自由度を消去する. このモデルは4輪とも全て固定関節であるため, q_4 から

q₇までの関節が自由度の消去の対象となる。上記の行列並びにベクトルに対して、以下の処理が実行される。

- ① $\mathbf{d}_M, \boldsymbol{\gamma}_M, \mathbf{n}$ の4行から7行を削除する。
- ② $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M, \mathbf{C}_M, \mathbf{D}_M$ の4行から7行を3行に加える。
- ③ $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M, \mathbf{C}_M, \mathbf{D}_M$ の4行から7行を削除する。
- ④ $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M, \mathbf{D}_M$ の4列から7列を削除する。

固定関節の自由度消去処理の結果、最終的残った行列の成分を以下式 (3.2) に示す。

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= m_{\bar{D}_3} = m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 \\
 a_{12} &= 0 \\
 a_{13} &= -\left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^y\right) = -\left(\mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{a}_{4-3} + \mathbf{a}_{4^*-4} + \mathbf{a}_{5-3} + \mathbf{a}_{5^*-5} + \mathbf{a}_{6-3} + \mathbf{a}_{6^*-6} + \mathbf{a}_{7-3} + \mathbf{a}_{7^*-7}\right)_y \\
 a_{21} &= 0 \\
 a_{22} &= m_{\bar{D}_3} = a_{11} \\
 a_{23} &= \left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^x\right) = \left(\mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{a}_{4-3} + \mathbf{a}_{4^*-4} + \mathbf{a}_{5-3} + \mathbf{a}_{5^*-5} + \mathbf{a}_{6-3} + \mathbf{a}_{6^*-6} + \mathbf{a}_{7-3} + \mathbf{a}_{7^*-7}\right)_x \\
 a_{31} &= -\left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^y\right) = a_{13} \\
 a_{32} &= \left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^x\right) = a_{23} \\
 a_{33} &= I_{z3} + I_{z4} + I_{z5} + I_{z6} + I_{z7} + \mathbf{p}_{3^*-3} \cdot \mathbf{a}_{3^*-3} + \sum_{j \in 3} \left(\mathbf{p}_3^j \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^j\right) \\
 &= I_{z3} + I_{z4} + I_{z5} + I_{z6} + I_{z7} + \mathbf{p}_{3^*-3} \cdot \mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{p}_{4-3} \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^x + \mathbf{p}_{5-3} \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^y + \mathbf{p}_{6-3} \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^z + \mathbf{p}_{7-3} \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^w \\
 b_{13} &= -\left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^x\right) = -\left(\mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{a}_{4-3} + \mathbf{a}_{5-3} + \mathbf{a}_{6-3} + \mathbf{a}_{7-3}\right)_x \\
 b_{23} &= -\left(\mathbf{a}_{\bar{D}_3}^y\right) = -\left(\mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{a}_{4-3} + \mathbf{a}_{5-3} + \mathbf{a}_{6-3} + \mathbf{a}_{7-3}\right)_y \\
 b_{33} &= -\left\{ \mathbf{p}_3^3 \times \mathbf{a}_3^3 + \sum_{j \in 3} \left(\mathbf{p}_3^j \times \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^j\right) \right\} \\
 &= -\left(\mathbf{p}_{3^*-3} \times \mathbf{a}_{3^*-3} + \mathbf{p}_{4-3} \times \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^x + \mathbf{p}_{5-3} \times \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^y + \mathbf{p}_{6-3} \times \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^z + \mathbf{p}_{7-3} \times \mathbf{a}_{\bar{D}_3}^w\right) \\
 c_{31} &= \left(\mathbf{a}_3^{w1}\right)_y \\
 c_{32} &= -\left(\mathbf{a}_3^{w1}\right)_x \\
 c_{34} &= \left(\mathbf{a}_3^{w2}\right)_y \\
 c_{35} &= -\left(\mathbf{a}_3^{w2}\right)_x \\
 c_{37} &= \left(\mathbf{a}_3^{w3}\right)_y \\
 c_{38} &= -\left(\mathbf{a}_3^{w3}\right)_x \\
 c_{310} &= \left(\mathbf{a}_3^{w4}\right)_y \\
 c_{311} &= -\left(\mathbf{a}_3^{w4}\right)_x
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2.2 磁石車輪吸着力のモデル化

車輪と地面との間の摩擦力やすべりに関しては、基本的には付録Aに記載された車輪式移動ロボットの定式化に磁石車輪吸着力をz軸に作用させることになる。式(3.3) (付録Aの式(A.9)と同じ)のスリップ率 s_{wi} 、すべり角 α_{wi} を計算するためには、各車輪の並進成分の速度が必要となる。

$$s_{wi} = \frac{u_{wi} - \bar{r}_{wi} \cdot \dot{\phi}_{wi}}{u_{wi}} \quad \text{式 (3.3)}$$

$$\alpha_{wi} = \tan^{-1} \frac{v_{wi}}{u_{wi}}$$

これらの速度は、これまで導出してきた運動方程式には表れなかった。

車輪の並進成分の速度は、以下の外向き運動学の式より計算する。

$$\dot{P}_{wi} = K_{wi}^1 \cdot \dot{P}_{base} + J_{Mwi}^1 \cdot \dot{q}_{joint}$$

$$K_{wi}^I = \begin{bmatrix} {}^{wi}R_0 & [z_x]^{wi} \cdot \mathbf{p}_{wi-3} \\ (0 \ 0) & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{Mwi}^I = [J_{wi4}^I \mid J_{wi5}^I \mid J_{wi6}^I \mid J_{wi7}^I]$$

$$J_{wik}^I = \begin{cases} \begin{bmatrix} [z_x]^{wi} \cdot \mathbf{p}_{wi-k} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & : \text{if } k \in E_{3,wi} \ (k=4,5,6,7) \\ \begin{matrix} : \\ : \\ \end{matrix} & : \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式 (3.4)}$$

タイヤ車輪のすべり特性を適用する場合には、式(3.3)で求められたすべりと車輪に作用するz方向の力 f_z から式(3.5)に示される摩擦力が計算される。磁石車輪駆動マイクロロボット独自のパラメータである磁石吸着力の影響は、式(3.5)の摩擦力の計算において、z方向の力 f_z に磁石吸着力を加えて、車輪摩擦力に寄与することで反映した。

$$\bar{f}_x(s, \alpha, f_z) = -\frac{K_x}{K_y} \cdot \frac{s \cdot |\cos \alpha|}{\sigma} \cdot f(\sigma, f_z)$$

$$\bar{f}_y(s, \alpha, f_z) = -\frac{\sin \alpha}{\sigma} \cdot f(\sigma, f_z) \quad \text{式 (3.5)}$$

なお、磁石車輪のすべり特性はタイヤ車輪のすべり特性 [52]と異なるので、2.4節において計測した磁石車輪すべり特性データから得られた摩擦力の関係を式 (3.5) の代わりに用いた。この時も磁石吸着力は、z方向の力 f_z に加え、車輪摩擦力に寄与するように反映した。

式(3.5)に示すように、車輪が地面から受ける摩擦力は車輪のすべり速度の関数となっている。この車輪が地面から受ける摩擦力は車輪中心の移動速度・加速度と車軸回りの回転角速度の

関数としてあらわすことができる。したがって、車輪の回転加速度とすべり特性から摩擦力を計算することができる。シミュレーションでは、回転数入力から計算される初期値を与えて計算を行っているが、実際には、初期の過渡状態で静摩擦力の不整定の問題が発生する。不整定問題は複雑であること及び本論文では定常状態での旋回特性を評価することに限定をしているため、本論文では初期の不整定の問題は取り扱わないこととする。

3.3 すべりを考慮したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行シミュレーション

3.3.1 水平走行シミュレータの構成

3.2節で構築した動力学モデルを搭載した水平走行シミュレータを開発した。本シミュレータはマイクロな仮想空間を容易に実現するために、オブジェクト指向言語をベースとした運動解析プログラム (SilTools) を用いて独自に開発した。また、SilTools の機能を有効に活用し、ユーザフレンドリな GUI(Graphic User Interface)とした。例として、図 3.3、図 3.4、図 3.5 に走行シミュレータのメインパネル、車輪入力パラメータパネル、車輪出力パラメータパネルをそれぞれ示す。



図 3.3 走行シミュレータメインパネル



図 3.4 車輪入力パラメータパネル



図 3.5 車輪出力パラメータパネル

入力としては、マイクロロボットサイズ、重量等の仕様、地面と車輪の摩擦係数等が与えられるようになっている。また、出力としては、各車輪に発生する x, y 方向の速度、z 軸回りの角速度と旋回半径等が求められる。さらに、移動軌跡を含めたアニメーション表示も容易に実現できる。シミュレーション結果の旋回軌跡の例を図 3.6 に示す。

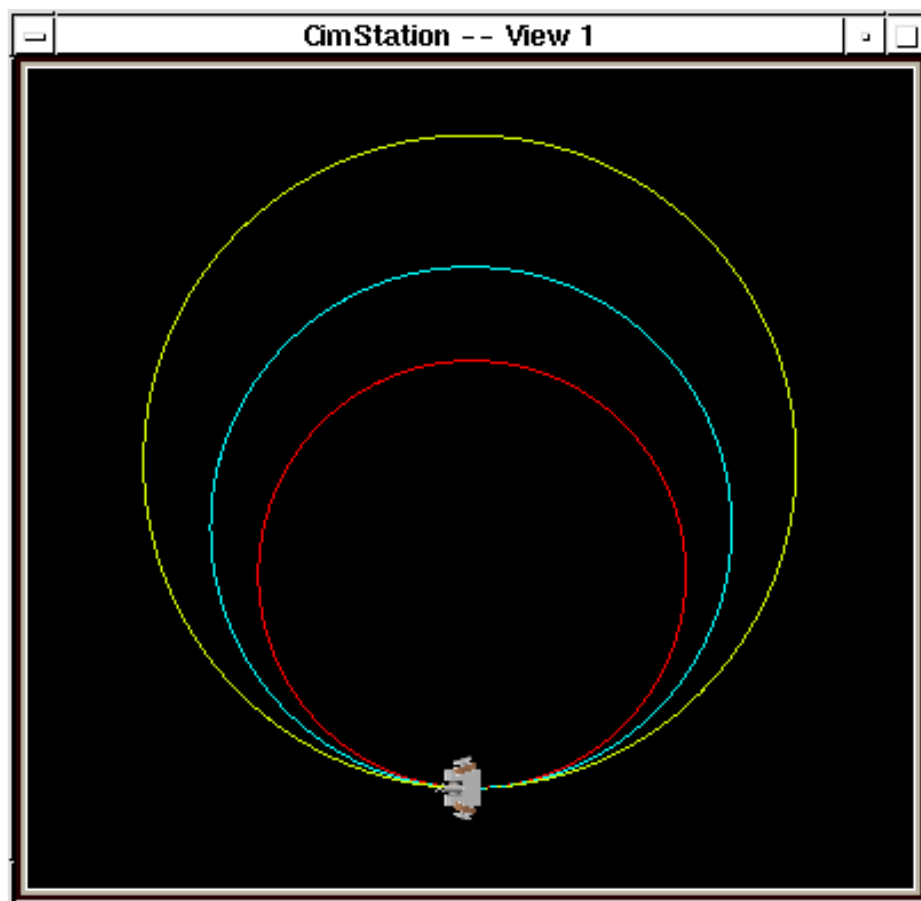


図 3.6 シミュレーション例（旋回軌跡）

ハードウェアとしては Indigo2(SGI 製)を用いた。

本シミュレーションシステムの特徴について、以下に示す。

- ① 前方2輪が駆動輪，後方2輪が従動輪で，駆動輪に与える速度差により，直進運動，定常旋回運動等がシミュレーションできる。
- ② 4輪固定のため，定常旋回時には進行方向，横方向ともにすべりが発生する．このすべりと摩擦力を考慮した動力学モデルを採用している。
- ③ 駆動輪に対してトルクではなく，回転数を入力できるようになっている。
- ④ 従動輪はマイクロロボット本体の運動に従って，すべることなく車軸回りに回転するものと仮定している．そのため，従動輪の進行方向への摩擦力は発生しない。
- ⑤ Z方向の力として，マイクロロボットの自重に加え，磁石吸着力が付加できる。

左右の駆動輪に対してそれぞれ回転数を与え，シミュレーションを実行すると，回転数を変更しない限り，常に同じ速度で安定した運動を行う．これは直進運動，旋回運動にかかわらず，また，すべりが発生すること，発生しないことに関係しない．回転数の変化がある場合は，ある速度から次の速度へと移行することになるが，瞬間的に与えられた速度になるのではなく，徐々に

速度を変え運動の状態を変化させる。

例えば、回転数が与えられていない速度が零の停止した状態から、左右の駆動輪に回転数を与え、シミュレーションを開始する場合はこれに該当する。マイクロロボットは停止状態から加速し、徐々に速度を上昇させ、最終的には、与えられた回転数に応じた速度で運動することになる。旋回運動は自転と公転が合わさった運動であるが、過渡状態は種々条件により複雑に変化し、安定的な評価が困難であるため、定常状態の旋回特性に限定して、以下では評価を行う。特に、スキッドステア方式では、旋回特性は最終的な左右の回転数差による定常状態でのすべりを考慮した運動に帰着するため、本論文では定常旋回特性として旋回半径で評価を行う。

時間について離散化し、タイムステップ毎に速度を求め運動の状態を決定することになるが、速度の変化が発生した初期の段階と、速度が一定になった定常状態とで、大きく状態が異なってくる。速度変化の大きい運動転換期は、ある程度タイムステップが小さくないと運動が不安定になり、正確なシミュレーションができない。離散化することは、そのタイムステップの間は同じ速度で運動していると仮定することである。したがって、同一タイムステップでは、その瞬間におけるすべり率及びすべり角を定常状態で求めたすべり特性曲線に当てはめて、すべり状態を決定できると考える。速度変化が大きい加速段階で、その時間間隔において等速度と仮定し、なおかつシミュレーションの精度を保つためには、時間の刻み幅を十分に小さくする必要がある。速度ゼロの初期では、目標速度から計算される初速度を与えて計算を開始している。

時間が進むにつれ徐々に速度が上昇し、速度変化が小さくなり安定していく。最終的には、駆動輪に与えられる回転数から得られる速度に、進行方向のすべりの寄与を含んだ形で、一つの速度に落ち着く。この後は速度一定の安定した運動状態になるが、この場合は時間間隔に関係なく速度一定であるため、時間間隔を大きくして、計算の負荷を軽くすることが可能となる。本システムでは、与えられる回転数の変化を検知し、速度が変化している段階ではタイムステップ (1.0×10^{-5} sec) を小さくし、回転数変化のない定常状態ではタイムステップ (1.0×10^{-1} sec) を大きくしている。収束の判定は、マイクロロボット本体の速度と加速度について行っている。前のタイムステップの速度と角速度と現在のタイムステップの速度と角速度をそれぞれ比較し、その変化率が $1e^{-6}$ より小さくなった場合、マイクロロボットの運動が定常状態となり速度一定、角速度一定で運動していると判断する。

3.3.2 水平走行シミュレーション結果

(1) 摩擦係数の影響

まずは摩擦係数の影響を検討するため、摩擦特性が定式化されている付録 A.4②に記載のタイヤ車輪すべり特性を用いて、摩擦係数を変えた時の水平走行シミュレーションを行った。摩擦係数のみの影響を見るため、全車輪の磁石吸着力はゼロとした。左右駆動輪の入力回転数をそれぞれ 100 rpm, 70 rpm にし、以下のように地面と車輪との摩擦係数を変化させた時の定常状態での走行軌跡の相違を図 3.7 に、摩擦係数と旋回半径の関係を図 3.8 に示す。

- ①摩擦係数 0.1 の場合
- ②摩擦係数 0.3 の場合
- ③摩擦係数 0.85 の場合

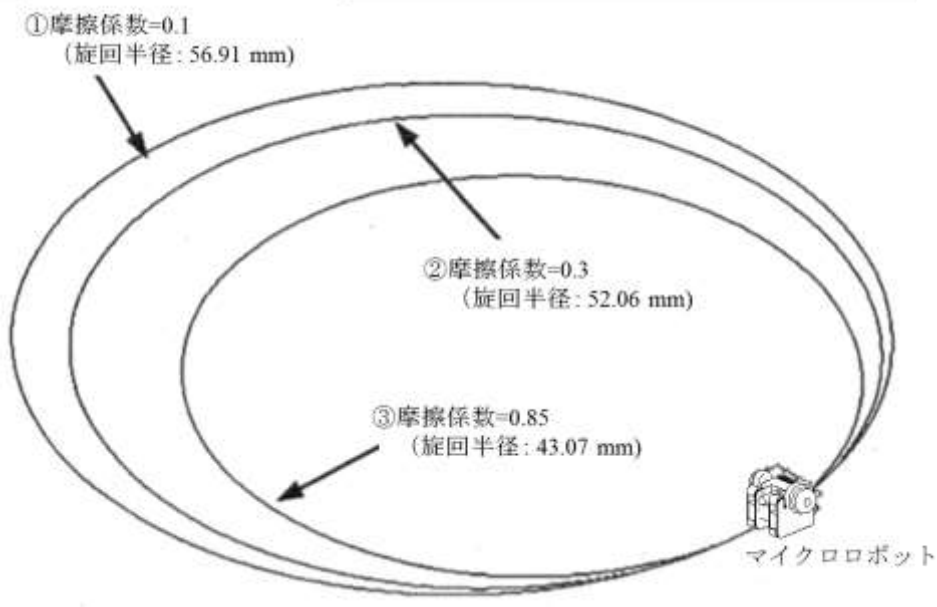


図 3.7 走行軌跡 (摩擦係数の影響)

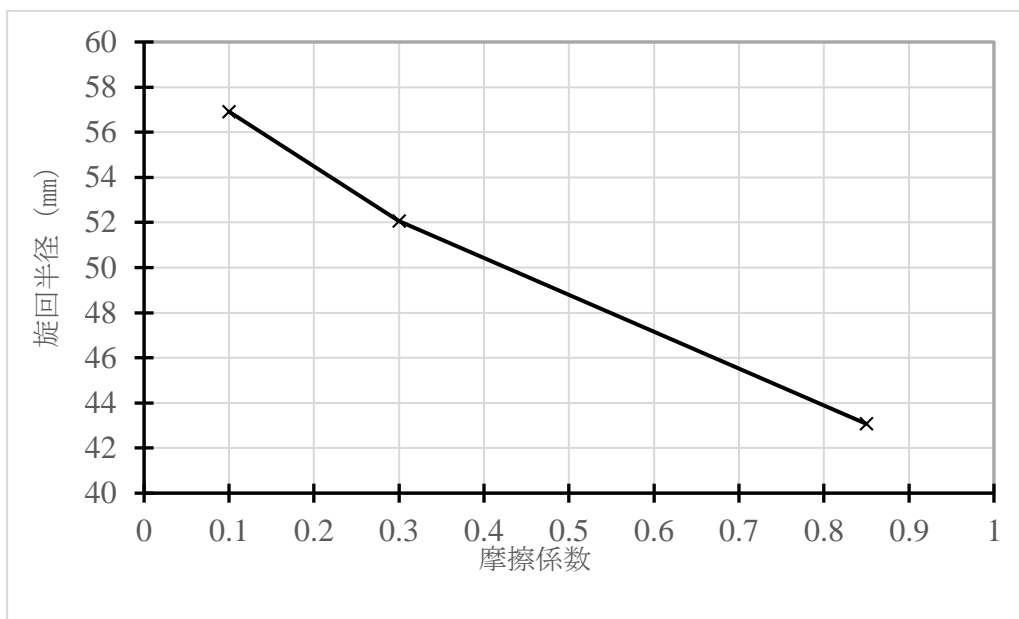


図 3.8 旋回半径と摩擦係数の関係

図 3.7 及び図 3.8 より, ③の摩擦係数が 0.85 の場合に一番旋回半径が小さく(旋回半径:

43.07 mm) , 次いで②の摩擦係数が 0.3 の場合(旋回半径:52.06 mm) で①の摩擦係数が 0.1 の場合は一番大きくなる(旋回半径:56.91 mm) ことがわかった. これは摩擦係数が大きい程グリップ力が増し, 走行性能が良くなるためである. 磁石吸着力がない場合には, グリップ力を増して, 走行性能を良くするために, 車輪の材質をゴム等の摩擦係数の大きなものにするのが意味のあることであることが明らかとなった. ただし, 基本的には摩擦係数は 1 以下であるため, それほどグリップ力は大きくすることはできない.

(2) 駆動輪, 従動輪への磁石吸着力の配分

次に, 駆動輪と従動輪への磁石吸着力の配分をどのようにするのが良いかを検討するため, 摩擦係数 0.3 で左右駆動輪の入力回転数をそれぞれ 100 rpm, 70 rpm にし, 駆動輪と従動輪への磁石吸着力の配分を以下のように変化させた. この時の定常状態での走行軌跡の相違を図 3.9 に, 磁石吸着力と旋回半径の関係 (車輪への磁石吸着力の配分の影響) を図 3.10 に示す. 以下 W はマイクロロボットの自重を表す.

- ①各従動輪に $0.5W$ の磁石吸着力を与え, 駆動輪は磁石吸着力ゼロの場合
- ②駆動輪, 従動輪にそれぞれ $0.25W$ の磁石吸着力を与えた場合
- ③各駆動輪に $0.5W$ の磁石吸着力を与え, 従動輪は磁石吸着力ゼロの場合

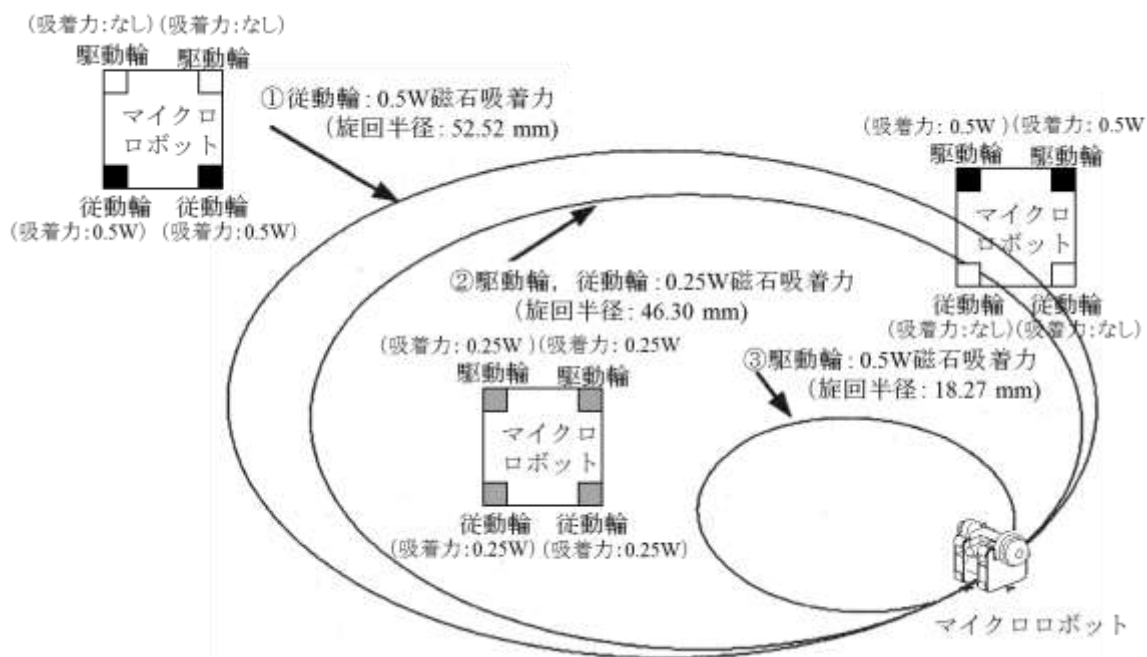


図 3.9 走行軌跡 (車輪への磁石吸着力の配分の影響)

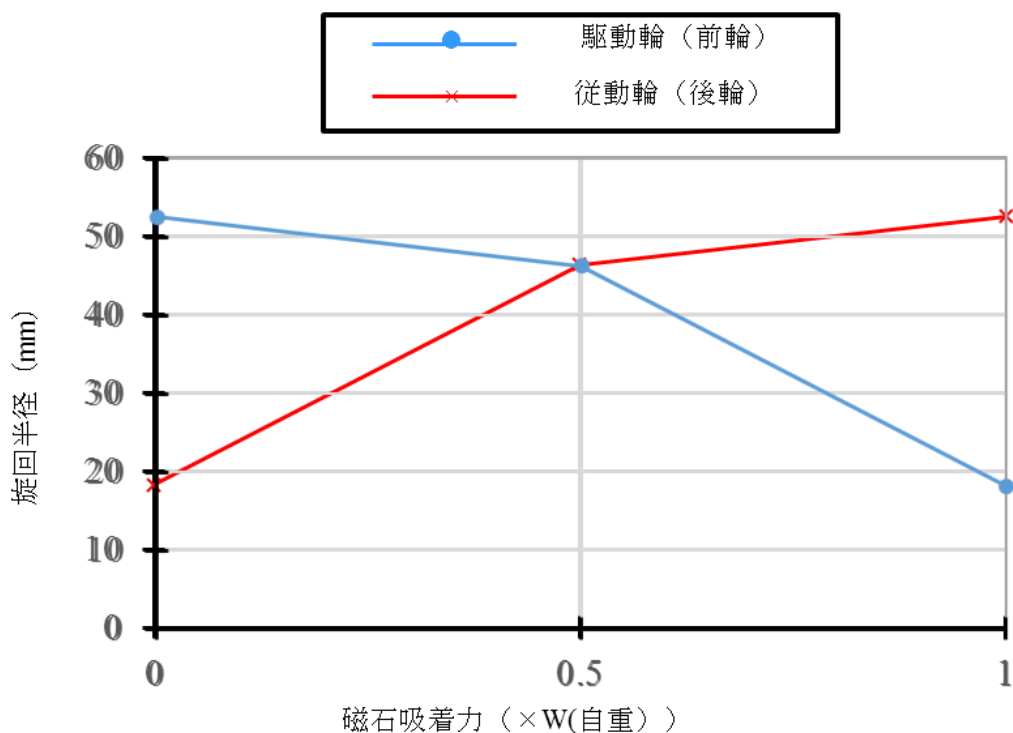


図 3.10 磁石吸着力と旋回半径の関係 (車輪への磁石吸着力の配分の影響)

図 3.9 及び図 3.10 より，③の駆動輪のみを磁石車輪にすると一番旋回半径が小さく(旋回半径:18.27 mm)，次いで②の全車輪均等に磁石吸着力を与えた場合(旋回半径:46.30 mm) で，①の従動輪のみを磁石車輪にした場合は一番旋回半径が大きくなる(旋回半径:52.52 mm) ことが分かった．これは，駆動輪に磁石吸着力を与えるとグリップ力が増し，走行性能が良くなるが，逆に従動輪に磁石吸着力を与えるとそれが負荷となって旋回できにくくなるためと考えられる．

(3) 磁石吸着力の大きさの効果

駆動輪のみを磁石車輪にするのが，旋回性能が一番良いことが分かったので，次にどれくらいの磁石吸着力を与えるのが良いかを検討するため，駆動輪，従動輪への磁石吸着力の配分の検討と同じく，摩擦係数 0.3 で左右駆動輪の入力回転数をそれぞれ 100 rpm，70 rpm にし，今度は一番旋回性能が良かった駆動輪のみを磁石車輪にした時に，以下のように駆動輪の磁石吸着力を変化させた．その時の走行軌跡の相違を図 3.11 に，駆動輪磁石吸着力と旋回半径の関係を図 3.12 に示す．

- ① 駆動輪，従動輪とも磁石吸着力ゼロの場合
- ② 各駆動輪に 0.5W の磁石吸着力を与え，従動輪は磁石吸着力ゼロの場合
- ③ 各駆動輪に 4.75W の磁石吸着力を与え，従動輪は磁石吸着力ゼロの場合

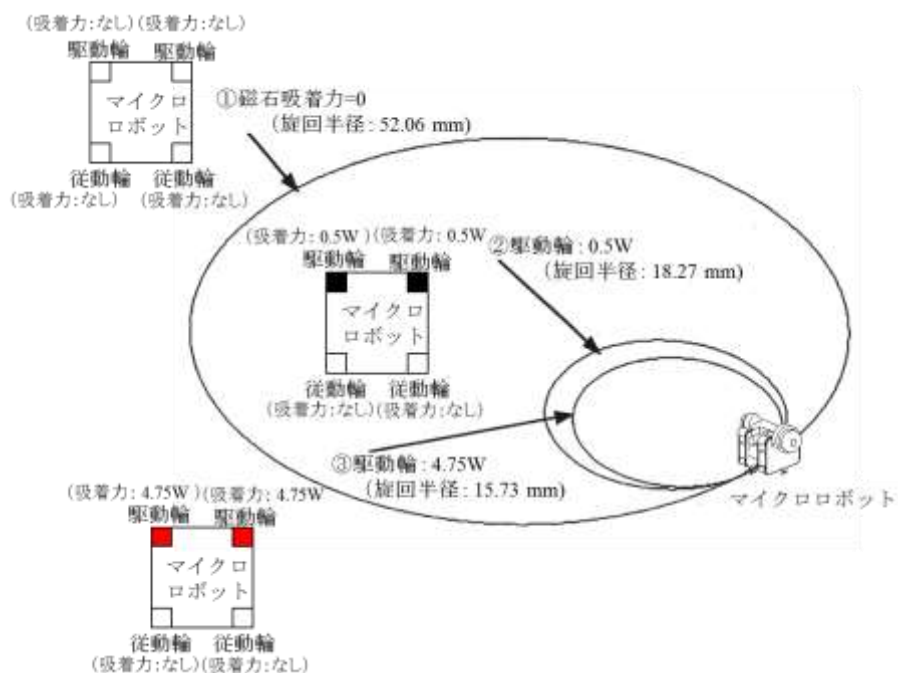


図 3.11 走行軌跡（駆動輪の磁石吸着力大きさの影響）

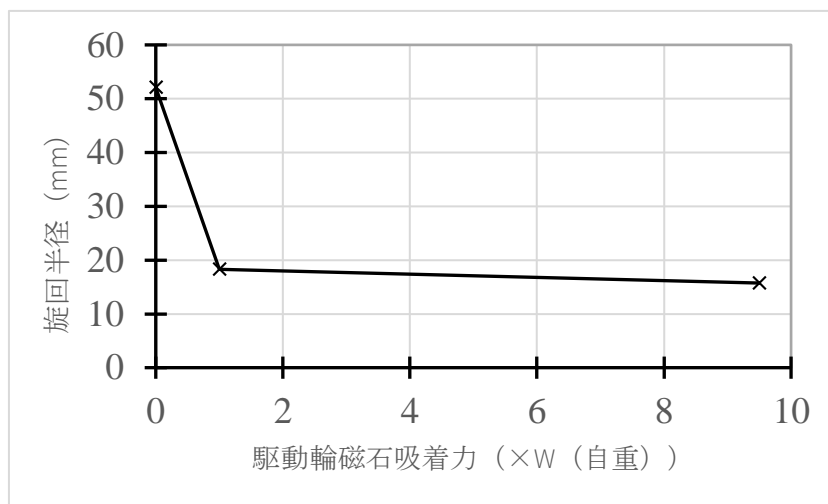


図 3.12 走行軌跡（車輪への磁石吸着力の配分の影響）

図 3.11 及び図 3.12 より，③の各駆動輪に 4.75W の磁石吸着力を与えた場合に一番旋回半径が小さく(最小旋回半径:15.73 mm)，次いで②の駆動輪に 0.5W の磁石吸着力を与えた場合(旋回半径:18.27 mm) で，①のすべて磁石吸着力ゼロにした場合は旋回半径が一番大きくなる(旋回半径: 52.06 mm) ことが分かった. ただし，トータル 9.5W の磁石吸着力を与えても 1W の磁石吸着力を与えた時と比較して，それほど旋回性能は向上しないことも分かった. これはその旋回に必要な十分なグリップ力が確保できれば，それ以上の磁石吸着力を与えても

効果がないことによると思われる。つまり、片側駆動輪のグリップ力としては、自重と合せて $0.75W=3.7\times 10^3\text{N}$ 必要であることが分かる。自重だけでこのグリップ力を確保するためには、体積で3倍の大きさが必要になる。試作マイクロロボットは $5\text{mm}\times 9\text{mm}\times 6.5\text{mm}$ の大きさなので、比重を一定とすると、これと同じ体積を有する立方体の1辺は 6.64mm になる。したがって、立方体と仮定すると1辺 9.58mm の大きさが必要になる。つまり1辺 10mm 以下のマイクロロボットでは磁石車輪にしてグリップ力の向上を図る必要があることが分かる。また、今直径 1mm 、長さ 1mm の磁石車輪の最大吸着力は $7.2\times 10^{-2}\text{N}$ であり、グリップ力 $3.7\times 10^3\text{N}$ の磁石吸着力を確保するためには、体積で $1/19.46$ 倍、1辺では $1/2.69$ 倍、立方体では $6.64\text{mm}/2.69=2.47\text{mm}$ になるので、本論文が対象とする磁石車輪駆動マイクロロボットの大きさとしては、立方体として1辺約 $2.5\text{mm}\sim 10\text{mm}$ になると考えられる。

(4) タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の比較

タイヤ車輪すべり特性の車輪と磁石車輪すべり特性の車輪の旋回性能の比較を行うため、左右駆動輪の入力回転数をそれぞれ 100rpm 、 60rpm にし、前輪に $5.0\times 10^{-2}\text{[N]}$ の吸着力を与え、後輪の吸着力を変化させたときの旋回半径を求めたものを図 3.13 に示す。図 3.13 より、タイヤ車輪すべり特性の場合には、後輪の吸着力を増加させるに従い徐々に旋回半径は大きくなり、 $1.0\times 10^{-2}\text{[N]}$ 以上ではほとんど旋回半径は同じになることが分かる。一方、磁石車輪すべり特性では $1.26\times 10^{-2}\text{[N]}$ までは旋回半径は 10mm 程度で小さいが、それを超えると急激に大きくなり、その後も増加し続けることがわかる。この時の後輪吸着力と後輪スリップ角の関係を図 3.14 に後輪吸着力と前輪スリップ角の関係を図 3.15 に、後輪吸着力と前輪スリップ率の関係を図 3.16 に示す。また、タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の場合の後輪吸着力と各車輪に作用する摩擦力の関係をそれぞれ図 3.17 と図 3.18 に示す。

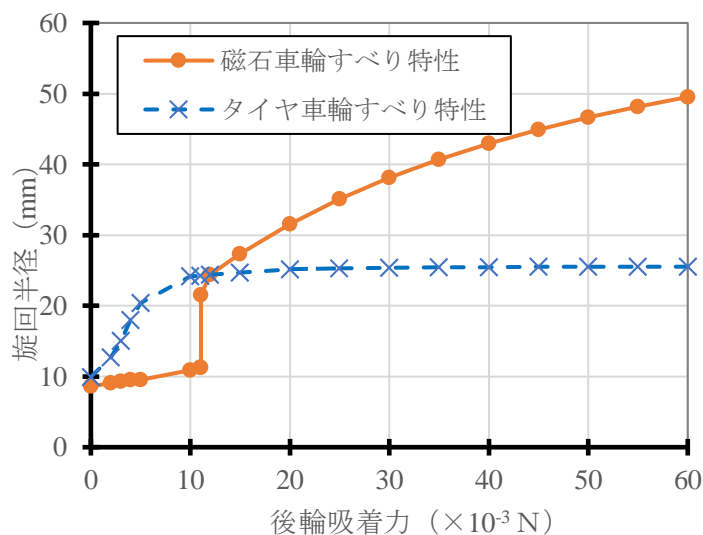


図 3.13 後輪吸着力と旋回半径の関係

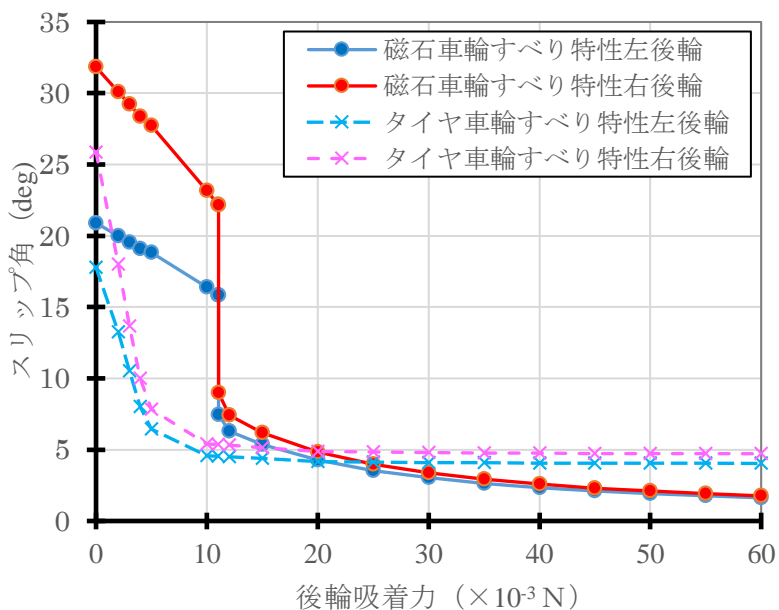
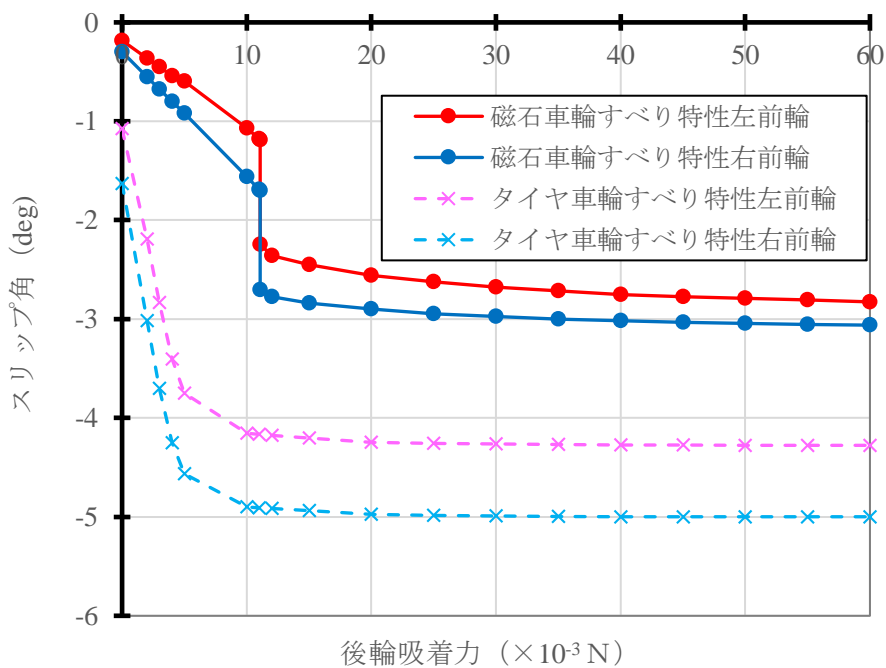


図 3.14 後輪吸着力と後輪スリップ角の関係



3.15 後輪吸着力と前輪スリップ角の関係

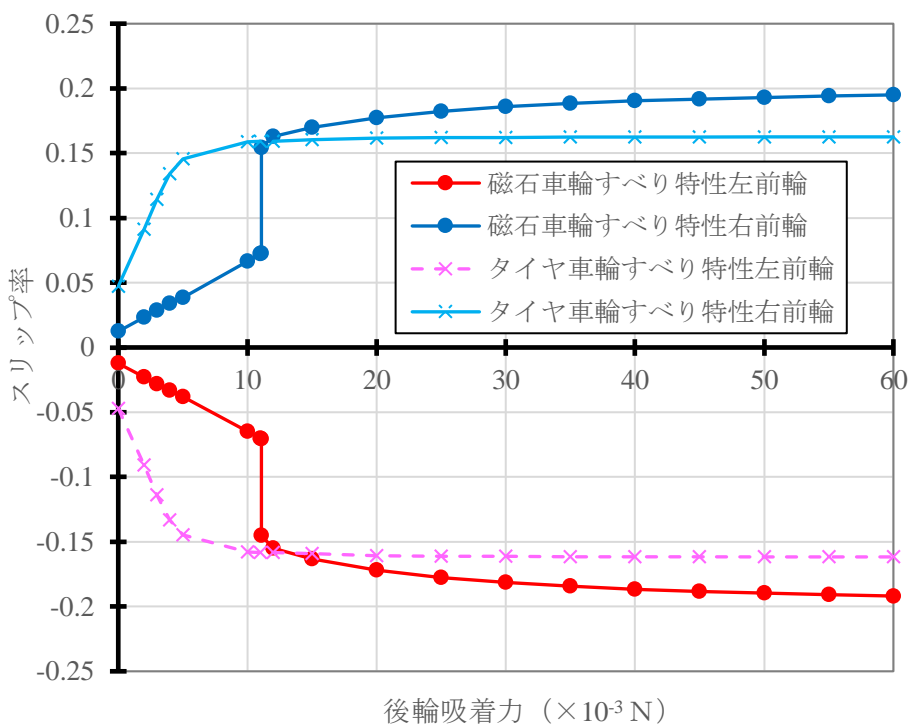


図 3.16 後輪吸着力と前輪スリップ率の関係

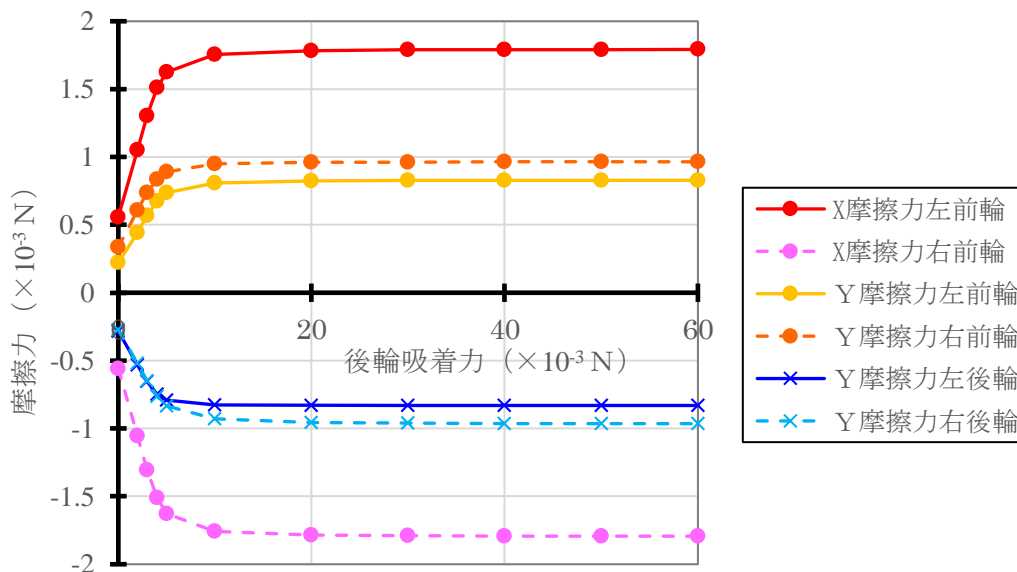


図 3.17 後輪吸着力と各車輪摩擦力の関係 (タイヤ車輪すべり特性)

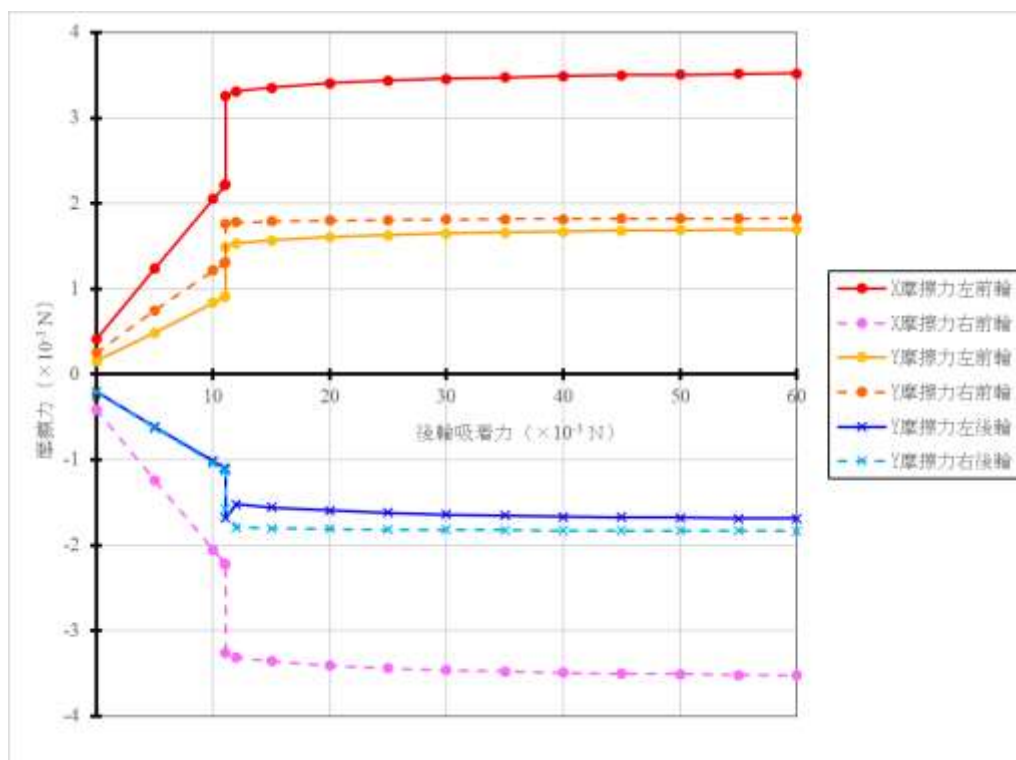


図 3.18 後輪吸着力と各車輪摩擦力の関係 (磁石車輪すべり特性)

図 3.14～図 3.18 に示すスリップ角，スリップ率，摩擦力に関しては，第 2 章の図 2.3 に示したように，前輪は旋回運動中には進行方向の右側へ頭を振る形となってマイナスのスリップ角をもってすべるが，それを矯正するように地面からは逆方向のプラスの Y 摩擦力が作用している．同じように後輪は，左側に振られる形となってプラスのスリップ角をもってすべるが，地面から逆方向のマイナスの Y 摩擦力が作用している．進行方向に関しては，左の駆動輪はすべりのため，マイナスのスリップ率で実際の速度は遅くなり，逆に，右の駆動輪はすべりのため，プラスのスリップ率で駆動デバイスからの回転による速度よりも実際の速度は速くなり，これの反作用として，地面からは左輪はプラスの X 摩擦力を右輪はマイナスの X 摩擦力を受け，これをグリップ力として右旋回走行を行っている様子が分かる．また，後輪吸着力が小さい場合には，前輪のスリップ角よりも後輪のスリップ角の方が大きくなっており，後輪が大きくすべり，小さい旋回半径での回転移動が可能になっていることも分る．タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性で大きく異なるのは，磁石車輪では，後輪吸着力が 1.1×10^2 [N] において，スリップ角，スリップ率とも大きく変動していることである．これは 2.4 節において計測した磁石車輪のすべり特性のスリップ角と横力の関係において，スリップ角が 7.5 度近辺にピークを有するため，同じ横力に対して異なるスリップ角になる可能性があり，摩擦力のつり合い条件により，スリップ角が大きくなる（つまり後輪が良くすべって旋回半径が小さくなる）場合とスリップ角が小さくなって，旋回半径が大きくなる場合に分かれるためである．このことより，磁石車輪では後輪の磁石吸着力を小さくすることで，その走行性能を向上できることがわかった．

後述する試作マイクロロボットでは、試行錯誤の結果として、従動輪にも若干の磁石吸着力を与えた方が従動輪の外乱への影響が強くなることから、トータルとしてマイクロロボットの自重 (0.5 g) の 10 倍の磁石吸着力を駆動輪と従動輪に 9 : 1 の比率で付加していた。試作マイクロロボットとの比較をするために、ここでは駆動輪 1 輪に対して自重の 4.5 倍の磁石吸着力 2.2×10^{-2} [N] を、従動輪 1 輪に対して自重の 0.5 倍の磁石吸着力 2.45×10^{-3} [N] を与えた場合に、図 A.6 及び図 A.7 で示すタイヤ車輪すべり特性と図 2.38 及び図 2.39 の樽型磁石車輪のすべり特性を与えた場合の旋回半径の比較を行った。左の車輪回転数を 100 rpm に固定し、右の車輪回転数を 80, 70, 60 rpm に変化させたときの旋回半径を、タイヤ車輪すべり特性を用いた場合と樽型磁石車輪すべり特性を用いた場合のシミュレーション結果を図 3.19 に示す。図 3.19 より、磁石車輪すべり特性を用いた方が、旋回半径が小さくなることが分かった。これは磁石吸着力で十分なグリップ力が確保されたため、より摩擦係数が小さく、よりすべりやすい磁石車輪すべり特性により走行性能が向上し、旋回半径が小さくなったためと考えられる。

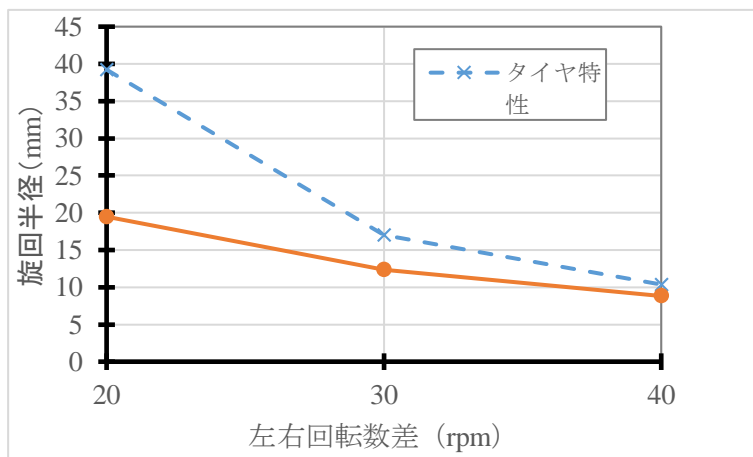


図 3.19 タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の比較

(5) 後輪磁石吸着力の効果

図 3.13 から定常状態の旋回半径を小さくするという観点では、後輪の磁石吸着力はゼロの場合が最も良い。しかしながら、上述したように、試作マイクロロボットでは、試行錯誤の結果として、従動輪の後輪にも若干の磁石吸着力を与えた方が従動輪の外乱へのロバスト性が強くなることから、トータルとしてマイクロロボットの自重 (0.5 g) の 10 倍の磁石吸着力を駆動輪と従動輪に 9 : 1 の比率で付加していた。このことに関して、以下に考察をする。

前進の場合には、磁石吸着力が大きく、そのためグリップ力の大きな駆動輪（前輪）が進行方向の前方に位置し、引っ張りながら進行しているので、進行に伴う外乱が作用しても、

問題なく走行できる。一方、後進の場合には、前方に位置しているのは、磁石吸着力の小さな従動輪（後輪）であり、グリップ力が弱い従動輪が駆動輪から押されて走行する。そのため、進行に伴いグリップ力を超える大きな外乱が作用した場合にはすべってしまって不安定になる可能性が高くなる。したがって、外乱への対応という観点から、後輪の磁石吸着力は大きいほど良いことになる。また、スキッドステア方式では、すべりが各車輪によって異なるため、後進の場合には従動輪の進む方向と異なる方向に駆動輪で押されることになるため、グリップ力が小さい場合には簡単にスリップして方向が安定しないことになる。このことから後進では磁石吸着力が大きいほど安定な走行が可能となる。

以上より、後進での外乱に対するロバスト性の観点からは、後輪の磁石吸着力は大きくする方が良いことになる。但し、図 3.13 から定常状態の旋回半径を小さくするという観点からは、後輪の磁石吸着力はゼロの場合が最も良い。この相矛盾する要求の妥協点としては、後輪の磁石吸着力は旋回半径が急激に大きくなる 1.1×10^{-2} [N] と 0N の中間である 6.3×10^{-3} [N] に設定するのが妥当と考えられる。これは前後輪の磁石吸着力の比としては、50 : 5.5 になり、試作ロボットで採用した 9 : 1 にほぼ一致する内容になっている。試作ロボット製作時には、経験則から磁石吸着力の配分を 9 : 1 に設定したが、今回の解析で理論的にも妥当なことが分かった。

(6) 駆動輪回転数と走行速度の関係

磁石車輪すべり特性を用いて、左右駆動輪の回転数が同じ場合にその回転数と直線走行速度との関係を求めた。磁石吸着力は試作マイクロロボットと同じ駆動輪が 2.2×10^{-2} [N]、従動輪は 2.45×10^{-3} [N] とした。結果を図 3.20 に示す。

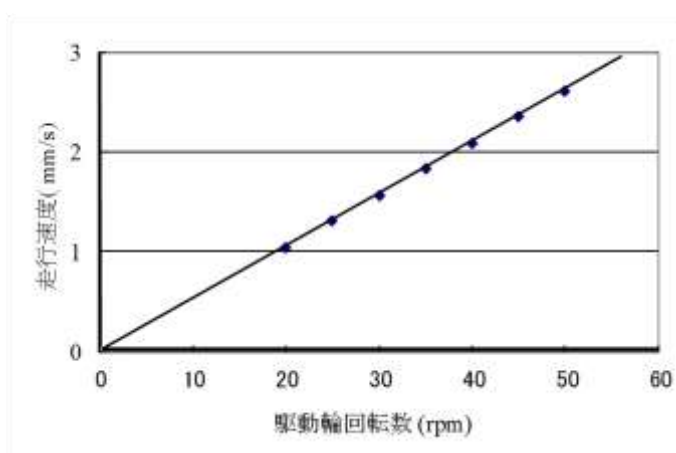


図 3.20 駆動輪回転数と走行速度の関係（直線走行）

図 3.20 より、駆動輪の回転数と走行速度は比例関係にあることが分かる。このデータより、駆動輪回転数を R (rpm)、走行速度を v (mm/s) とすると、両者には明らかに線形関係があるように見え、回帰直線を求めると、走行速度 v と、駆動輪回転数 R との関係は式(3.6)の通りとなる。

$$v = 0.0524 R + 0.00007 \quad \text{式 (3.6)}$$

この比例係数 0.0524 は 1 mm (車輪の半径) $\times \pi / 60(\text{s})$ と同じであり, すなわち, この結果は直線走行においては車輪にすべりのない状態であることを示している.

左駆動輪の回転数を固定し, 右駆動輪の回転数を変化させて, 左右駆動輪の回転数差と走行速度の関係をシミュレーションで求めた結果を図 3.21 に示す.

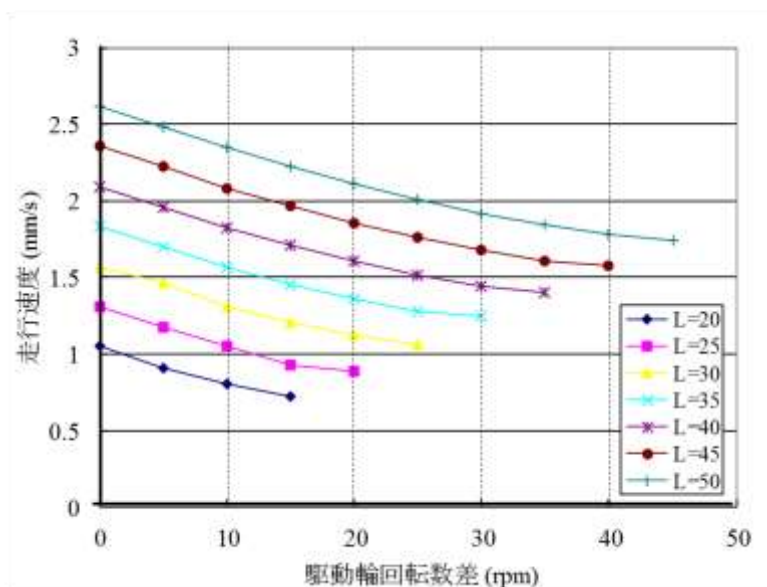


図 3.21 駆動輪回転数差と走行速度の関係

これからも, 特に回転数差が小さい領域では良い線形性が見られる. また, 回転数差によらず, その傾きもほぼ一定で -0.02 であるとの結果を得た. 以上の結果より, 左右の駆動輪回転数が異なる場合のマイクロロボット走行速度 v は, 左駆動輪回転数 R_l , 右駆動輪回転数 R_r とすると, 式(3.7)で書けることが分かる.

$$v = -0.02 \times |R_r - R_l| + 0.0524 \times \max\{R_r, R_l\} \quad \text{式 (3.7)}$$

(7) 駆動輪回転数差と旋回半径の関係

左右駆動輪の回転数を異なる値に設定した場合には, その回転数差によりマイクロロボットは定常旋回走行を行う. その際の左右駆動輪の回転数差と旋回半径の関係をシミュレーションにより調べた. シミュレーションでは, 左駆動輪の回転数を 20 rpm ~ 50 rpm まで 5 rpm 刻みで変化させ, 左駆動輪回転数から右駆動輪回転数を引いた値と旋回半径との関係を図 3.22 に示した.

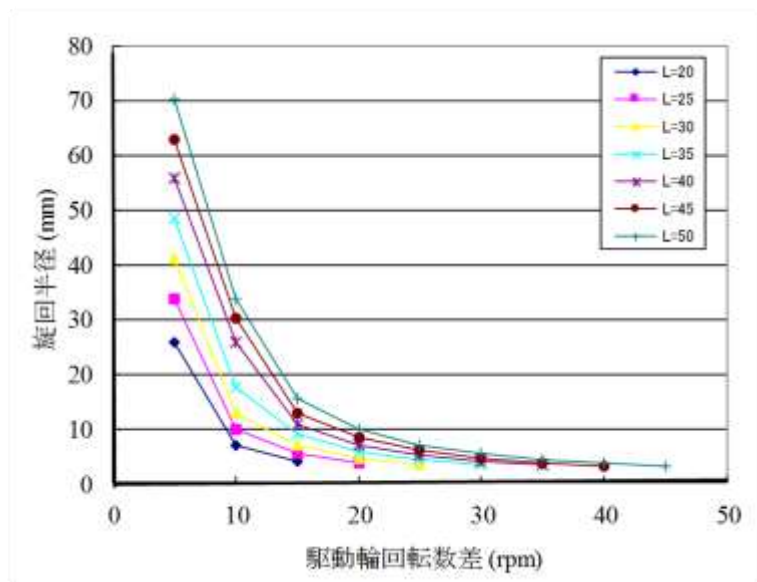


図 3.22 駆動輪回転数差と旋回半径の関係

どの回転数においても同様の性質が見られるので、横軸を左右駆動輪回転数差比（（左駆動輪回転数－右駆動輪回転数）／左駆動輪回転数）にとり、再プロットしたものを図 3.23 に示す。

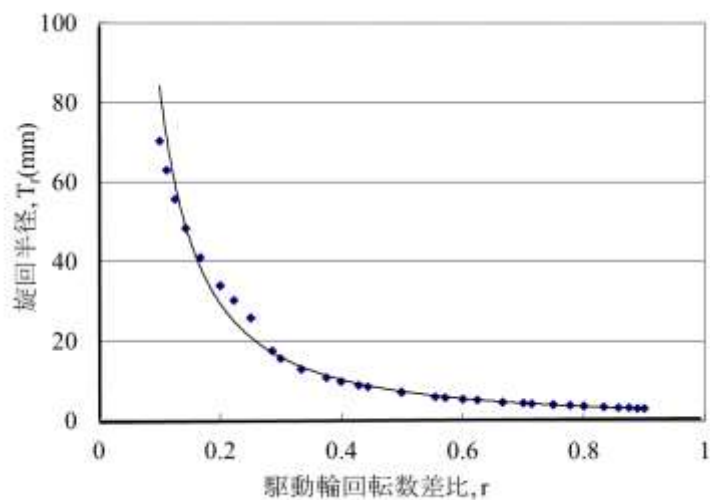


図 3.23 駆動輪回転数差比と旋回半径の関係

この図 3.23 より明らかに回転数差比と旋回半径との関係は回転数差の絶対値には依存しないことが分かり、回転数差比を r 、旋回半径を T_r とすると、式(3.8)のように、べき関数で近似できることが導かれた。

$$T_r = 2.5735r^{-1.5141} \quad \text{式 (3.8)}$$

これに、走行速度 v を用いると、与えられた駆動輪回転数で t 秒間走行した際の旋回角 θ は、式(3.9)のように書ける。

$$\theta = \frac{vt}{T_r} \tag{式 (3.9)}$$

以上の計算により、シミュレーションにおける入力となる、駆動輪回転数と走行時間を与えることにより、走行時の速度、旋回半径を求めることが出来る。これを逆解きすることにより、経路（旋回半径と旋回角、もしくは直進距離）とその走行時間を与えることにより、左右の駆動輪の回転数を求めることが出来ることが分かった。すなわち、旋回半径 T_{rg} 、旋回角 θ_g 、走行時間 t_g を与えることにより、回転数差比の関係式(3.8)と、走行速度の関係式(3.7)より、次の連立方程式(3.10)を解く問題に帰着することができる。

$$\frac{R_r - R_l}{\max\{R_r, R_l\}} = 0.9439T_{rg}^{-0.66} \tag{式 (3.10)}$$

$$-0.02 \times |R_r - R_l| + 0.0524 \times \max\{R_r, R_l\} = \frac{T_{rg}\theta_g}{t_g}$$

ここで、旋回角 θ の正方向を左旋回とした。これは通常の2元連立1次方程式であるので解くのは容易である。このことからすべりがある4輪スキッドステア方式マイクロロボットを任意の走行軌跡と走行速度で駆動させてことが可能なことが分かった。

図 3.23 は左右駆動輪が同じ方向に回転している場合であるが、左右駆動輪が逆回転している場合も含めた式 (3.8) で表される駆動輪回転数差比と旋回半径の関係を図 3.24 に示す。 $r=2$ が左右駆動輪を同じ回転数で逆に回転させた場合に相当し、その時の旋回半径は $0.9[\text{mm}]$ になっている。4輪固定のスキッドステア方式のマイクロロボットは全方向移動車ではないため、完全なその場回転にはなっていないが、 $0.9[\text{mm}]$ という小さい旋回半径で回転できるものと思われる。

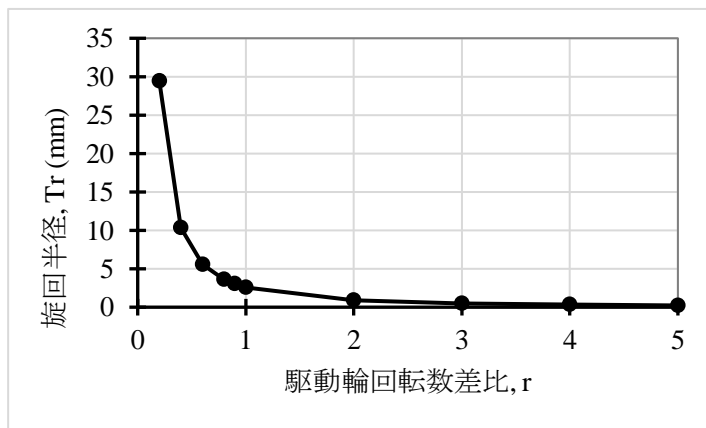


図 3.24 駆動輪回転数差比と旋回半径の関係

3.4 スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行性能計測

3.4.1 マイクロロボット水平走行性能評価システム

マイクロロボット水平走行性能評価システムの構成を図 3.25 に示す。走行性能評価システムは走行用プレート（磁性 SUS430，表面粗さ：1s），コントローラ，CCD カメラ，画像処理装置（QuickMAG:OKK 製），モニタ，パソコンより構成される。評価用のマイクロロボットの上面には図 3.26 に示すような計測用のカラーマークを 2 つ付加した。マークの直径は 1 mm で，マイクロロボット中心位置から 1.55 mm 後方に 3.6 mm の間隔をあけて，マイクロロボットの位置だけでなく進行方向も計測するために 2 色のマークを用い，抽出しやすいように緑と黄の蛍光色にするとともにバックを黒色塗装した。1/60 秒のビデオレートでマークの動きを検出することが可能である。これによってマイクロロボットの旋回時の挙動を計測し，マイクロロボットの走行軌跡や速度等を解析してマイクロロボットの水平走行性能の評価を行った。

計測にあたり，先ずカラーマークを高精度に等間隔に正方配置した校正治具で校正するとともに計測範囲を決めた。次に，マイクロロボットに付したマークの色抽出，測定時間等の設定を行い，マイクロロボットを駆動して計測を行った。

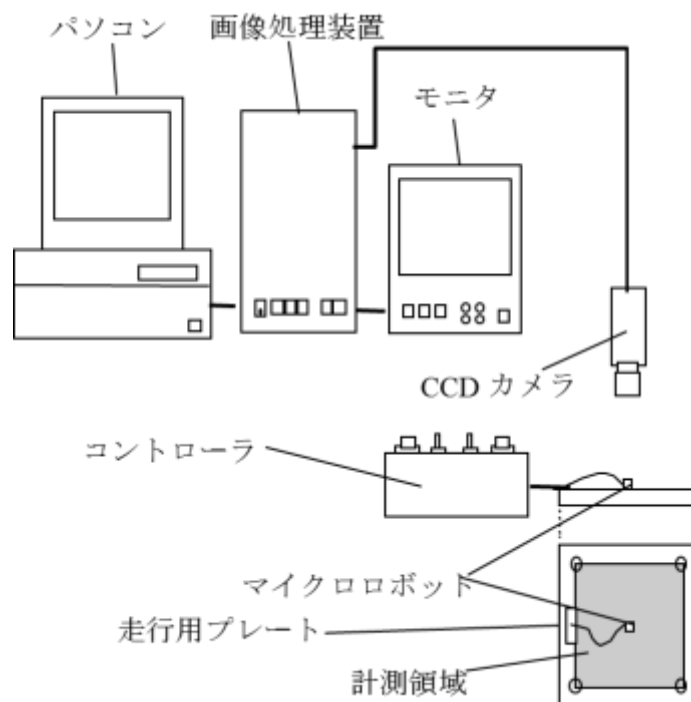


図 3.25 マイクロロボット水平走行性能評価システム

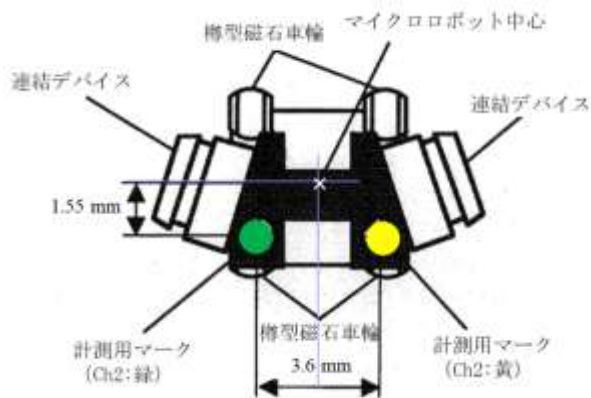


図 3.26 樽型磁石車輪マイクロロボットの平面図

3.4.2 直線走行性能計測結果

試作マイクロロボットの左右の駆動デバイスを同一回転数で駆動させ、走行用プレート上の試作マイクロロボットの直線走行の様子を 3.4.1 項で説明したマイクロロボット水平走行性能評価システムで計測した。駆動電圧は一定（左 1.0V, 右 0.7V）とし、駆動デバイス回転数を種々変化させたときの前進及び後進での試作マイクロロボットの走行軌跡をカメラシステムにて計測した。駆動デバイス回転数は 600 rpm, 1200 rpm, 3000 rpm, 6000 rpm, 9000 rpm, 12000 rpm, 18000 rpm の 7 通りで、前進及び後進をそれぞれ 1 回計測した。減速比が 1/200 であるため、駆動輪回転数としては、3 rpm, 6 rpm, 15 rpm, 30 rpm, 45 rpm, 60 rpm, 90 rpm になる。また、測定は配線の影響を考慮して走行用プレートの同一位置で行い、10 秒程度前進させたのち、停止した位置から後進させた。

前進及び後進での駆動輪回転数と速度（左右マーカの位置）の関係を求めた結果を図 3.27 に示す。

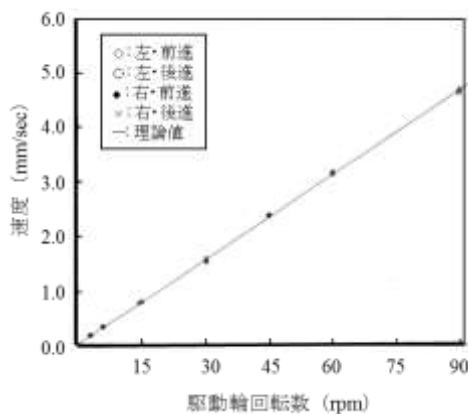


図 3.27 駆動輪回転数と速度の関係（前進と後進）

なお、図中の直線は理論速度である。左右マーカ位置及び前進と後進での速度差は殆どなく、理論値からのずれも殆どないことが分かる。図 3.27 では重なって良く分からないので、左右マーカ位置及び前進・後進のそれぞれの場合での駆動輪回転数と速度の関係を図 3.28 に示す。図中の直線は測定結果を最小二乗法により原点を通る直線に近似した結果であり、近似直線の式及び R^2 値（ピアソンの積率相関係数）を併せて示している。図 3.28 より駆動輪回転数と速度には極めて良好な比例関係があり、また近似直線の傾きの理論値（0.01562）からのずれも最大でも 1%と小さく、理論値とほぼ一致しており、配線の影響を無視できる十分なトルクが得られていることが分かる。

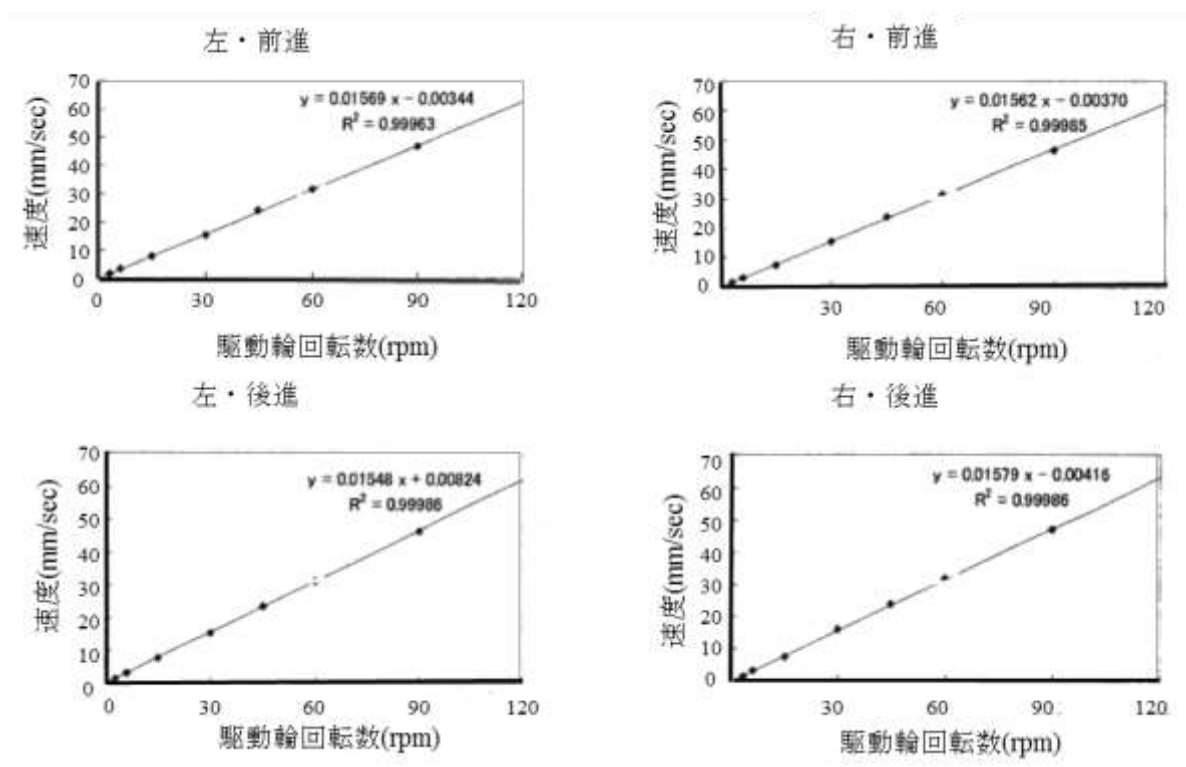


図 3.28 駆動デバイス回転数と速度の関係（左右マーカ位置及び前進・後進個別）

3.4.3 旋回性能計測結果

旋回性能の計測結果の一例として、左車輪及び右車輪の入力回転数をそれぞれ 14.4 rpm, 33.3 rpm で駆動した場合のマイクロロボットの走行軌跡及び旋回半径を図 3.29 に示す。図 3.29 において、(a)が前進時の走行軌跡、(b)が後進時の走行軌跡を示している。マイクロロボットの中心位置が(X,Y)=(52,33)から左車輪及び右車輪の入力回転数をそれぞれ 14.4 rpm, 33.3 rpm で 20 秒間前進移動させた結果が図 3.29(a)で、マイクロロボットの中心は(X,Y)=(45.6,45.2)に到達している。この状態から左車輪及び右車輪の入力回転数をそれぞれ 14.4 rpm, 33.3 rpm で 20 秒間後進移動させた結果が図 3.29(b)で、マイクロロボットの中心は(X,Y)=(35.2,34)に到達している。走行軌跡は 2 つの計測用マークとマイクロロボット中心の軌跡を示している。図 3.29 に示すよう

に、後進よりも前進の方が滑らかな動きをしており、旋回半径は前進よりも後進の方が若干小さくなっている。これは、前輪駆動と後輪駆動の違いにより、前進・後進でマイクロロボットの走行性能が異なるためである。つまり、後進の場合には後輪駆動となるため、旋回時は前輪（試作マイクロロボットの後輪）を押しながらの旋回運動となり、また試作マイクロロボットの後輪の磁石吸着力が前輪の1/9になっているため、頭が振られて移動しているためと考えられる、一方、前進の場合には、前輪駆動となり、磁石吸着力の大きい前輪でしっかりグリップしながら、旋回しているためと考えられる。このように、マイクロロボットの旋回状況が計測できているのが分かる。

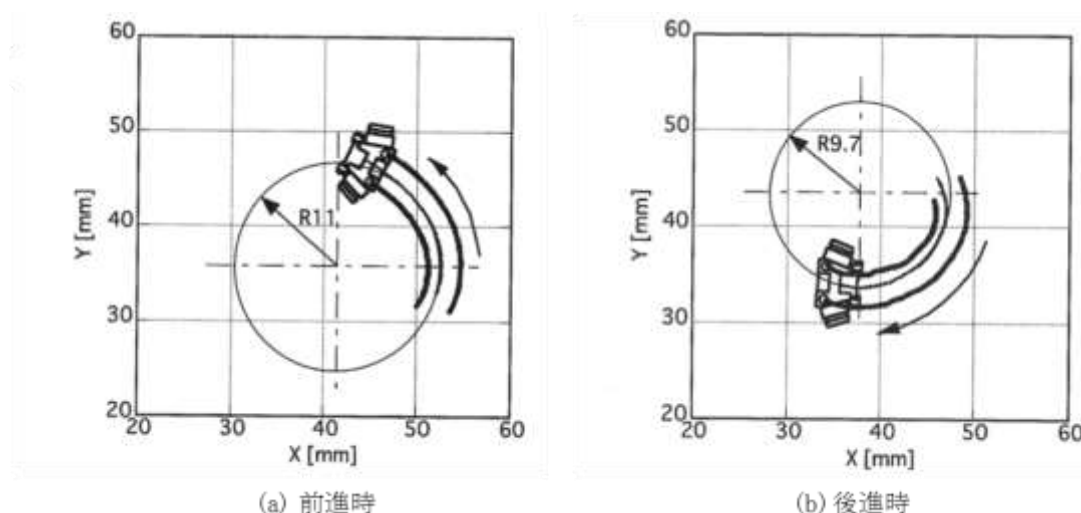


図 3.29 旋回軌跡

3.4.4 前進と後進の旋回特性の相違

図 3.30 に左に旋回している前進の場合の各車輪の状態と作用する摩擦力（縦力、横力）を示す。前進の場合は、前が駆動輪、後ろが従動輪の前輪駆動になっている。①の駆動輪はすべりのため、実際の速度は速くなる。逆に、②の駆動輪はすべりのため、駆動デバイスからの回転による速度よりも実際の速度は遅くなる。また、モデルの仮定により、従動輪は進行方向にはすべりは生じない。横方向に関しては、各車輪は旋回中心からの旋回半径が異なり、前輪はプラス方向のすべりが、後輪はマイナス方向のすべりが発生する。すべりと摩擦力の定義より、すべりと逆方向に摩擦力が作用する。左前輪（①）は進行方向へ回転しているが、すべりのため、結局制動力として働いている。前輪は旋回運動中には進行方向の左側へ頭を振る形となってすべるが、それを矯正するように地面からは逆方向の力が作用する。同じように後輪は、右側に振られる形となるが、地面から逆方向の力が作用する。マイクロロボットに作用するモーメントは、これらの摩擦力とマイクロロボット重心との距離から大きさが決まる。樽型磁石車輪を用いた場合には、各車輪には、図 2.38 及び図 2.39 のすべり特性に従って、それぞれのスリップ率、スリップ角に合致する縦力、横力が作用する。なお、従動輪の磁石吸着力は駆動輪の磁石吸着力の1/9で、小

さい摩擦しか作用していないため、前進の場合には後輪がすべり易い。しかし、前輪は磁石吸着力が大きく、十分なグリップ力があるため、後輪を引っ張って安定な走行が可能で、その場回転的な動きをしている。

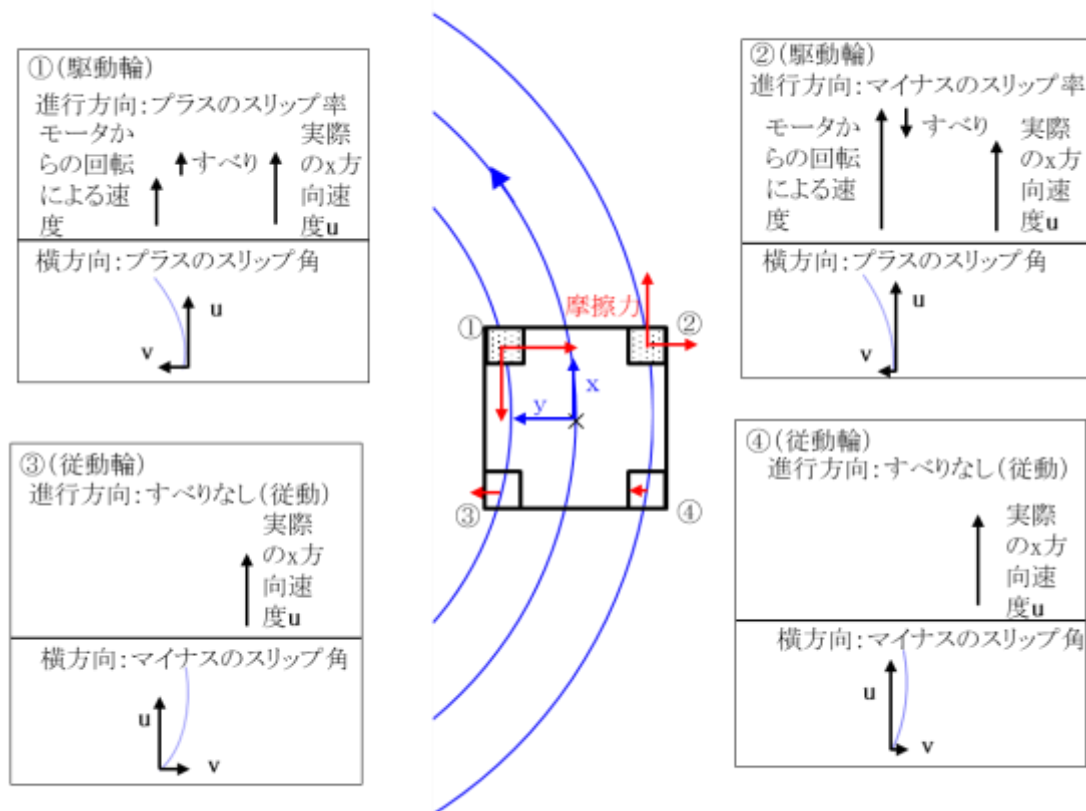


図 3.30 前進左旋回の場合の各車輪の状態と作用する摩擦力

一方、図 3.31 に右に旋回している後進の場合の各車輪の状態と作用する摩擦力（縦力、横力）を示す。後進の場合は後ろが駆動輪、前が従動輪の後輪駆動になっている。前進の場合と同じように、①の駆動輪はすべりのため、実際の速度は速くなる。逆に、②の駆動輪はすべりのため、駆動デバイスからの回転による速度よりも実際の速度は遅くなる。また、モデルの仮定により、従動輪は進行方向にはすべりは生じない。横方向に関しては、各車輪は旋回中心からの旋回半径が異なり、進行方向の後ろに位置する前輪にはマイナス方向のすべりが、進行方向の前に位置する後輪はプラス方向のすべりが発生する。すべりと摩擦力の定義より、すべりと逆方向に摩擦力が作用する。左前輪（①）は進行方向へ回転しているが、すべりのため、結局制動力として働いている。前輪（①、②）は旋回運動中には進行方向の左側へ振る形となってすべるが、それを矯正するように地面からは逆方向の力が作用する。同じように後輪（③、④）は、進行方向右側に振られる形となるが、地面から逆方向の力が作用する。マイクロロボットに作用するモーメントは、これらの摩擦力とマイクロロボット重心との距離から大きさが決まる。樽型磁石車輪を

用いた場合には、各車輪には、図 2.38 及び図 2.39 のすべり特性に従って、それぞれのスリップ率、スリップ角に合致する縦力、横力が作用する。なお、従動輪の磁石吸着力は駆動輪の磁石吸着力の 1/9 と小さい摩擦力しか作用していないため、後進の場合には駆動輪（前輪①、②）で押される形で前に位置する従動輪の後輪（③、④）がすべり易い、また、従動論の進行方向と駆動輪の進行方向が必ずしも一致しないため、前進に比べて不安定な走行になる。また、前が大きく振られた形で、磁石吸着力が大きく、十分なグリップ力がある前輪で押して走行するため、図 3.29(b)では前進よりも旋回半径が小さくなったものと考えられる。これらは自動車の前輪駆動と後輪駆動の特性と同じである。

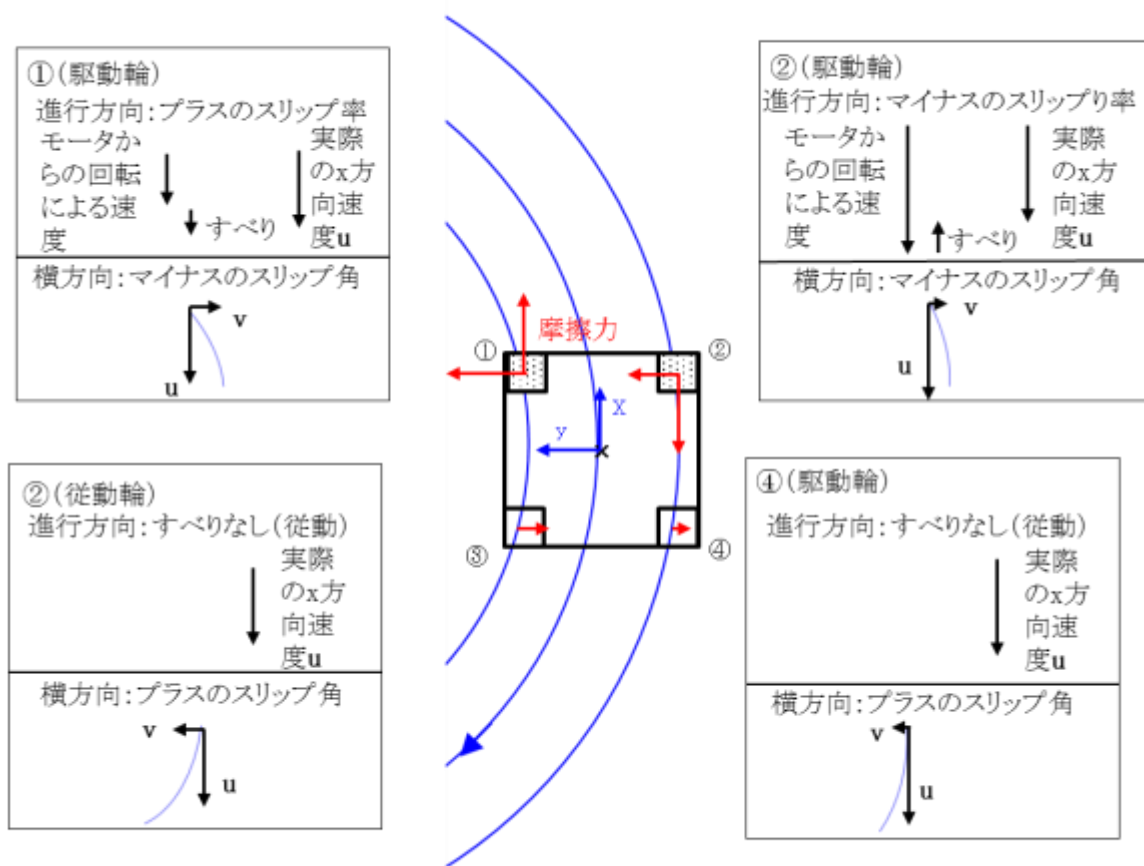


図 3.31 後進右旋回の場合の各車輪の状態と作用する摩擦力

3.4.5 実機とシミュレーションの比較

左車輪の回転数を 33 rpm に固定し、右車輪の回転数を 29 rpm, 14 rpm, 5 rpm に変化させた時のシミュレーション及び実機で計測した旋回半径 (N=1) を図 3.32 に示す. 図 3.32 より, 実機とシミュレーションとの結果が非常によい一致をみていることが分かる. このことから, 本研究において実施したすべりと磁石吸着力の効果の妥当性が検証されたと言える.

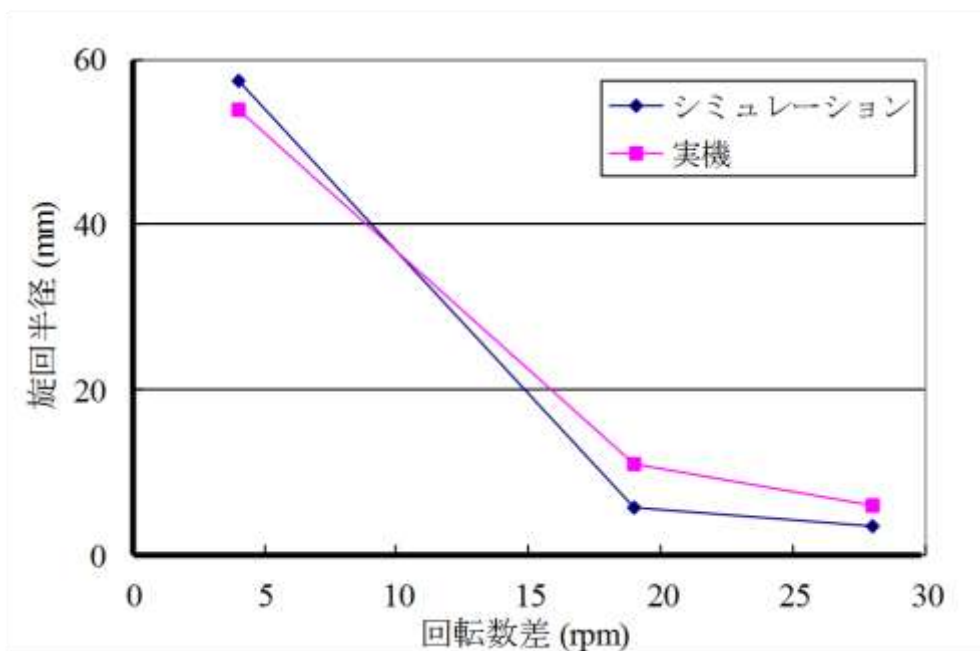


図 3.32 回転数差と旋回半径の実機とシミュレーションの比較

3.4.6 円筒型磁石車輪と樽型磁石車輪の旋回性能の比較

円筒型磁石車輪と樽型磁石車輪の旋回性能の比較を行うため, 右の駆動輪回転数を 33.1 rpm, 28.1 rpm, 14.0 rpm, 4.6 rpm の 4 種類, 左の駆動輪回転数を 33.4 rpm, 28.3 rpm, 14.0 rpm, 4.6 rpm の 4 種類とした. これを右旋回では左を 33.4 rpm で固定して右を変化させ, 左旋回では右を 33.1 rpm に固定して, 左を変化させて計測した. 図 3.33 に左旋回時の樽型磁石車輪マイクロロボットの旋回半径と車輪回転数差の関係を, 円筒型磁石車輪マイクロロボットの結果と比較して示す.

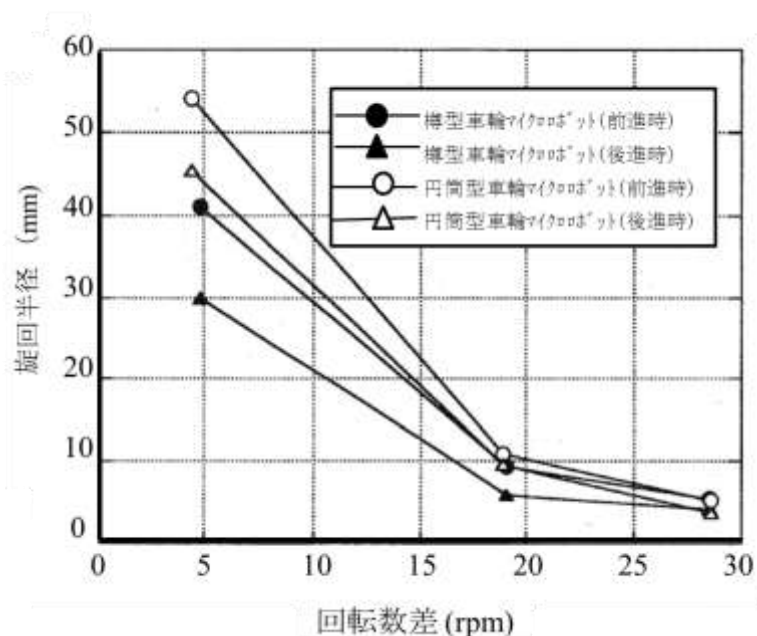


図 3.33 回転数差と旋回半径の関係（円筒型磁石車輪と樽型磁石車輪の比較）

まず、マイクロロボットの前進時と後進時を比較すると、樽型磁石車輪、円筒型磁石車輪ともに後進時の方が、旋回半径が小さい。これは、3.4.4 項において説明したように、前進時は前輪駆動で、後進時は後輪駆動になる駆動方法によるものと考えられる。また、前進時後進時とも、回転数差が小さい場合には樽型磁石車輪マイクロロボットの方が円筒型磁石車輪マイクロロボットよりも旋回半径が小さいが、回転数差が大きい場合にはそれほど差がないことが分かった。つまり、樽型磁石車輪にした効果は旋回半径の大きい場合に顕著で、旋回半径が小さい場合には差がなくなる。これは回転数差が小さい場合には、円筒型車輪に作用する摩擦力が小さいため、すべりの不安定性が大きくなるため滑らかに旋回できないが、回転数差が大きくなると車輪の摩擦力が大きくなるため、円筒型車輪のすべりの不安定性の影響が小さくなるためと考える。

3.5 結言

本章では、車輪の動力学やすべりを考慮した車輪式移動ロボットの運動学及び動力学の定式化をベースにスキッドステア方式4輪磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行動力学モデルを構築した。また、前節の磁石車輪のすべり特性計測結果を踏まえて構築したすべりを考慮したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの走行シミュレータを用いて、駆動輪と従動輪への磁石吸着力の配分、磁石吸着力大きさの効果、タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の比較、駆動輪回転数と走行速度の関係及び駆動輪回転数差比と旋回半径の関係について考察した。さらに、試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットを用いた水平走行性能の計測結果について、シミュレーション結果とも比較しながら考察し、構築した磁石車輪の動力学やすべりを考慮した動力学モデルが妥当であることを実証した。

第4章 垂直走行性能の解析

4.1 緒言

壁面移動ロボットは点検、検査、建設、清掃、輸送、セキュリティ等の分野への応用が期待されている。壁面移動を行うためには、移動機構と壁面吸着機構が必要である。移動方式としては、クローラ方式、車輪方式、脚方式、推進方式等が、壁面への吸着方式としては吸引方式、磁力方式、把持方式、吸着方式等種々の方式が開発されている [13], [14], [15], [16]。また、発電プラントの細管群の点検等狭所空間での適用のためのマイクロ壁面移動ロボットも開発されている [2], [3], [4], [40], [41], [42], [43], [39]。マイクロ壁面移動ロボットでは複雑な機構を構成するのが困難なため、壁面への吸着方式としては、吸着方式と磁石車輪方式の2方式が主に採用されている。このうち磁石車輪方式は移動機構と吸着機構が1つの磁石車輪で実現でき、2.3.4項でも述べたが、車軸方向に着磁された磁石車輪は、回転しても磁力が変動することなく、効率的に回転することが可能であるとともに、壁面を移動する場合にも、引き剥がし機構を用いることなく、壁面に吸着しながらの連続走行が可能となっているので、磁性面での壁面移動マイクロロボットの吸着・移動方式としては最も有望な方式となっている。また、マイクロロボットは小さいため、多くの機能を搭載することは困難であることから、複数のマイクロロボットが協調して作業する群としての研究が今後必要になると考えられるが、この時複数のマイクロロボットが連結して移動する連結移動の条件を求めることが重要になると考えられる。本章では、4.2節において3.2節で検討した磁石吸着力とすべりを考慮した動力学モデルの3次元化を図る。さらに、スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの壁面移動における動力学モデルを組み込んだ単独及び複数個連結移動のための垂直走行シミュレータについて詳述する。複数個連結移動シミュレータでは複数個のスキッドステア方式マイクロロボットが連結して細管を昇降する状態をシミュレートするため、フープ力や隣接するマイクロロボットからの外力も考慮されている。さらに、4.3節で開発したシミュレータを用いた解析から、単独及び複数個連結壁面移動に必要な磁石吸着力の条件等について議論する。そして、4.4節ではスキッドステア方式試作マイクロロボットによる単独での垂直走行性能及び10台連結移動での垂直走行性能について議論し、4.5節でまとめる。

4.2 垂直走行シミュレータの開発

4.2.1 スキッドステア方式6輪走行モデル

ここでは、水平面及び垂直面での移動が可能な、1.3節で説明した図4.1に示すスキッドステア方式6輪走行モデルを考える。水平面に4つの磁石車輪、垂直面に4つの磁石車輪を有する。前輪（下輪）が駆動輪であり、後輪及び上輪は従動輪となっている。壁面移動を行う場合には、図4.2に示すように、自重等による回転モーメントに括抗させるように、上輪(従動輪)に磁石吸着力 (F_{mu}) を作用させるとともに、下輪(駆動輪)にも走行可能なグリップ力 (摩擦力 F_l) を作用させるために磁石吸着力 (F_m) を作用させることが必要となる。上輪は従動輪で進行方向にはすべりが発生せず、摩擦力は作用しないため、静的なつりあいとしては鉛直方向の力のつりあいと下輪周りのモーメントのつりあいから次式が成り立つ。

$$F_l = mg \quad \text{式 (4.1)}$$

$$mg \cdot H = F_{mu} \cdot L$$

ここで H は重心までの距離、 L は上下車輪間距離である。しかし、動的には、上下動では作用する加速度の向きが異なること及びすべりも発生することから、必要な磁石吸着力の決定には動力学を考慮した検討が必要になる。そこで、オブジェクト指向言語をベースとした運動解析プログラム (SilTools) を用いて、すべりを考慮した独自の垂直走行シミュレータを開発した。なお、座標系としては、次節で詳述するが、水平走行シミュレータを活用することから、図4.2に示すように、壁面上下方向を x 軸、壁面左右方向を y 軸、壁面に垂直な方向を z 軸とした。

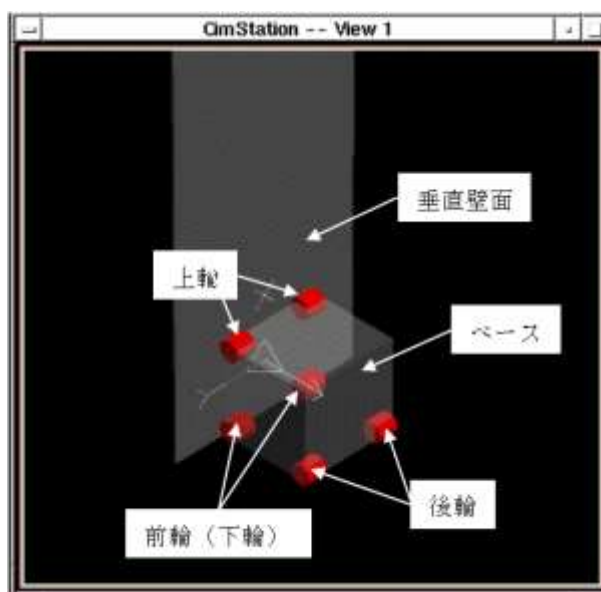


図 4.1 6輪走行モデル

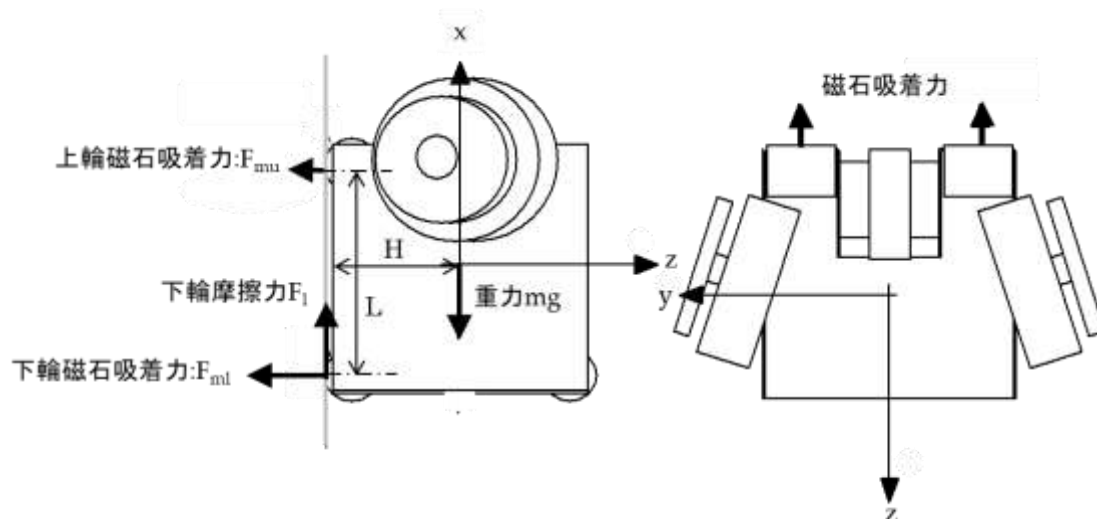


図 4.2 壁面走行時にマイクロロボットに作用する力

4.2.2 動力学モデルの3次元化

3.2節の理論は2次元平面の運動に限定されたものであったが、壁面移動マイクロロボットの解析を行うためには、3次元の運動方程式へ拡張する必要がある。

基礎となった2次元の運動方程式は、一般的なマルチリンクに適用することを想定したものであり、非常に複雑な式となっている。したがって、そのまま3次元に拡張すれば、さらに複雑で理解するのが困難な式となることが予想される。そのため、3次元化にあたっては、一般化した式の導出にこだわらず、以下に示す本シミュレーションモデルの特徴を活かして、スキッドステア方式6輪走行モデルに特化したかたちで式を導き出した。

- ① リンクはbaseと車輪のみである（リンク数、構成の限定）。
- ② 関節はすべて固定関節である。そのため、すべての関節変数が零となる。
- ③ したがって、baseと車輪の姿勢は、基準座標系に関して常に同一である。

あらかじめこれらの特徴を考慮することにより、式が必要以上に複雑になることを回避でき、導出した式の確認を容易に行うことができる。

(1) 変数と表記法

ここで使用する変数や表記法は、基本的に文献 [5]に従う。運動方程式に関係する主な変数を図 4.3 に示す。

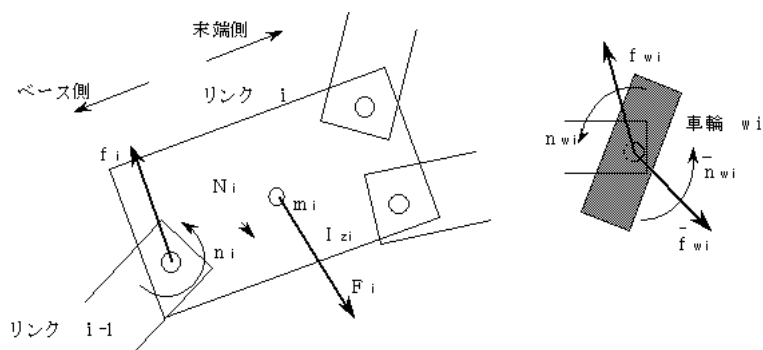


図 4.3 運動方程式に関する主な変数

- m_i : リンク i の質量
- I_{zi} : リンク i の z 軸重心回りの慣性モーメント
- f_i, n_i : リンク i の親リンクからユニット i に加えられる力, モーメント
- F_i, N_i : ユニット i に加わる全外力, 全モーメント
- $\bar{f}_{wi}, \bar{n}_{wi}$: 地面から車輪 wi に加えられる力, モーメント
(特に, $i \notin W$ のとき, $\bar{f}_i = 0, \bar{n}_i = 0$ とする.)

(2) 運動方程式の展開

① 基礎式

3 次元の運動方程式を展開する上で, 基礎となる式は付録 A の式(A.4)である. これらの式を式(4.2)に再度示す.

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_i &= \dot{\theta}_{i-1} + \dot{q}_i \\
 \ddot{\mathbf{p}}_i &= \ddot{\mathbf{p}}_{i-1} + [z_x] \cdot \mathbf{p}_{i-(i-1)} \cdot \ddot{\theta}_{i-1} + [z_x]^2 \cdot \mathbf{p}_{i-(i-1)} \cdot (\dot{\theta}_{i-1})^2 \\
 \ddot{\mathbf{p}}_{i*} &= \ddot{\mathbf{p}}_i + [z_x] \cdot \mathbf{p}_{i*-i} \cdot \ddot{\theta}_i + [z_x]^2 \cdot \mathbf{p}_{i*-i} \cdot (\dot{\theta}_i)^2 \\
 \mathbf{F}_i &= m_i \cdot \ddot{\mathbf{p}}_{i*} \\
 \mathbf{N}_i &= I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_i
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

- 第 1 式 : リンク i の角速度
- 第 2 式 : リンク i の持つローカル座標原点に関する加速度
- 第 3 式 : リンク i の重心に関する加速度
- 第 4 式 : ニュートン方程式
- 第 5 式 : オイラー方程式

これらは2次元問題を対象としており、x方向及びy方向の並進とz軸回りの回転のみである。したがって、姿勢を表現する角度は θ のみである。また、平面のベクトル同士の外積は、z軸方向のベクトルとなってしまったため、ここでは外積計算の部分をスカラーで表している。

これらの式は、基準座標系（グローバル座標系）に関するものである。

上記の式を基に、x, y, zの並進、回転の6自由度に関する運動方程式を導出する。簡単のため、図4.4のモデルで考える。前述のモデルの特徴から、①リンクはbaseと車輪のみで、③baseと車輪の姿勢は、基準座標系に関して常に同一である。したがって、リンク間で、座標変換のために変換行列を乗することなく、式を展開することができる。

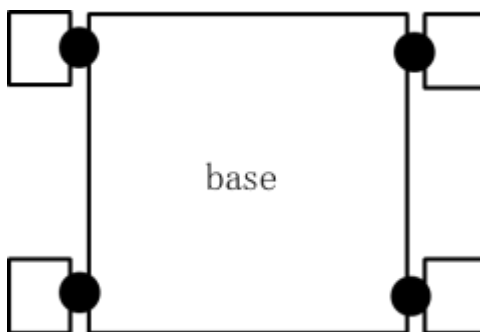


図 4.4 モデル

角速度を表すベクトルを $\omega_i = [\omega_{x,i} \ \omega_{y,i} \ \omega_{z,i}]^T$ とし、関節変数 q_i とすると、リンク i の角速度、角加速度は、式(4.3)の通りである。後々の式の展開を考慮して、ここで導出する式は base に固定されたローカル座標系に関するものとする。

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_{i-1} + \dot{q}_i \\ \dot{\omega}_i &= \dot{\omega}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times q_i + \ddot{q}_i \end{aligned} \tag{4.3}$$

図4.4のように、ここではbaseと車輪のみを考慮する。②関節はすべて固定関節であるため、すべての関節変数が零となる。

ここで、車輪について考える。車輪は、与えられた角速度で車軸回りに回転している。車輪の重心が回転軸上にあり、慣性主軸に一致しているため、回転軸に対して回転による慣性力の影響を及ぼすことなく回転しているものと考えられる。そのため、関節を介して連結するリンクとして車輪を見た場合、前述のように固定関節であり base との位置関係は不変である。

したがって、車輪 i について考えると、親リンクは base（リンク番号3）であり、

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_3 \\ \dot{\omega}_i &= \dot{\omega}_3 \end{aligned} \tag{4.4}$$

となる式(4.4)の関係から、加速度に関しては、

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_i &= \dot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{i3} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3}) \\
 \dot{p}_{i*} &= \dot{p}_i + \dot{\omega}_i \times p_{ii} + \omega_i \times (\omega_i \times p_{ii}) \\
 &= \dot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{i3} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3}) + \dot{\omega}_i \times p_{ii} \\
 &\quad + \omega_i \times (\omega_i \times p_{ii}) \\
 &= \dot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{i3} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3})
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

となる.

ここで, p_{ii} はリンク i のローカル座標原点と重心間のベクトルであるが, 車輪 i のローカル座標原点を重心にとることにより, $p_{ii} = [0 \ 0 \ 0]^T$ となる.

また, 各リンクの重心に関するニュートン方程式及びオイラー方程式は, 以下の式で示される.

$$F_i = m_i \cdot \dot{p}_{i*} \tag{4.6}$$

$$N_i = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i$$

式(4.4)~式(4.6)が式(4.2)に対応し, 基礎式となる.

② base に働く全外力

base に関する釣り合い式を考える. 力に関して以下の関係が成立する.

$$f_3 = F_{D_3} - \bar{f}_{D_3} \tag{4.7}$$

ここで, F_{D_3} は base に働く全外力, \bar{f}_{D_3} は地面から車輪に加えられる力の総和で, 末端が複数あるマルチリンクの考え方に従い, それぞれ子リンクに作用するものも含んでいる. また, f_3 は“リンク i の親リンクからユニット i に加えられる力”との定義であるが, base には親リンクはないため, $f_3 = [0 \ 0 \ 0]^T$ となる.

一方, 各リンクに作用する力は式(4.6)のニュートン方程式で示され, 以下となる.

$$\begin{aligned}
 F_3 &= m_3 \cdot \ddot{p}_3 \\
 F_4 &= m_4 \cdot \ddot{p}_{4*} = m_4 \{ \ddot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{43} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{43}) \} \\
 F_5 &= m_5 \cdot \ddot{p}_{5*} = m_5 \{ \ddot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{53} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{53}) \}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

base に働く全外力は全ての車輪を含めたものとなり, 式(4.8)の各方程式の総和をとることにより求めることができる.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{\bar{D}_3} &= (m_3 + m_4 + \dots) \ddot{\mathbf{p}}_3 + m_4 \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times \mathbf{p}_{43} + m_5 \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times \mathbf{p}_{53} + \dots \\
 &\quad + m_4 \boldsymbol{\omega}_3 \times (\boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{p}_{43}) + m_5 \boldsymbol{\omega}_3 \times (\boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{p}_{53}) \\
 &\quad + \dots \qquad \qquad \qquad \text{式 (4.9)} \\
 &= m_{\bar{D}_3} \ddot{\mathbf{p}}_3 + \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j \mathbf{p}_{j3} + \boldsymbol{\omega}_3 \times \left(\boldsymbol{\omega}_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j \mathbf{p}_{j3} \right)
 \end{aligned}$$

式(4.7)及び式(4.9)より, base に関して,

$$\begin{aligned}
 m_{\bar{D}_3} \ddot{\mathbf{p}}_3 + \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j \mathbf{p}_{j3} + \boldsymbol{\omega}_3 \times \left(\boldsymbol{\omega}_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j \mathbf{p}_{j3} \right) - \bar{\mathbf{f}}_{\bar{D}_3} &\quad \text{式 (4.10)} \\
 = \mathbf{0} &
 \end{aligned}$$

となる.

③ base に働く全モーメント

base に働く全外力と同様, base に関するモーメントは以下の関係にある.

$$\mathbf{N}_3 = \mathbf{n}_3 - \mathbf{n}_{C_3} - \mathbf{p}_{33} \times \mathbf{F}_3 - \sum_{j \in D_3} (\mathbf{p}_{j3} \times \mathbf{f}_j) \quad \text{式 (4.11)}$$

式(4.11)を基に, モデルの特徴を考慮して式を導出する. 式(4.6)のオイラー方程式より, 式(4.11)の左辺は,

$$\mathbf{N}_3 = \mathbf{I}_3 \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 + \boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{I}_3 \boldsymbol{\omega}_3 \quad \text{式 (4.12)}$$

となる.

また, 定義より, $\mathbf{n}_3 = [0 \ 0 \ 0]^T$ となる.

次に, 右辺第2項は以下のように展開することができる.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{n}_{C_3} &= \sum_{j \in C_3} \mathbf{n}_j = \sum_{j \in C_3} (\mathbf{N}_j - \bar{\mathbf{n}}_j) \\
 &= \sum_{j \in C_3} (\mathbf{I}_j \dot{\boldsymbol{\omega}}_j + \boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{I}_j \boldsymbol{\omega}_j) - \sum_{j \in C_3} \bar{\mathbf{n}}_j \quad \text{式 (4.13)}
 \end{aligned}$$

いま, base のローカル座標原点は重心位置と同一であり, $\mathbf{p}_{33} = [0 \ 0 \ 0]^T$ となるため, 式(4.11)の右辺第3項は零ベクトルとなる.

$$\mathbf{p}_{33} \times \mathbf{F}_3 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad \text{式 (4.14)}$$

最後に式(4.11)の右辺第4項は,

$$\begin{aligned}
 \sum_{j \in \mathcal{C}_3} (p_{j3} \times f_j) &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} \{p_{j3} \times (\mathbf{F}_{\bar{D}_j} - \bar{f}_{\bar{D}_j})\} \\
 &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} \{p_{j3} \times (\mathbf{F}_j - \bar{f}_j)\} \\
 &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} \{p_{j3} \times (m_j \cdot \ddot{p}_{j*} - \bar{f}_j)\} \\
 &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \ddot{p}_{j*} - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} p_{j3} \times \bar{f}_j \\
 &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \\
 &\quad \times \{\ddot{p}_3 + \dot{\omega}_3 \times p_{i3} + \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3})\} \\
 &\quad - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} p_{j3} \times \bar{f}_j \\
 &= \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \ddot{p}_3 + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times (\dot{\omega}_3 \times p_{i3}) \\
 &\quad + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \{\omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3})\} \\
 &\quad - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} p_{j3} \times \bar{f}_j
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

となり, 式(4.11)~式(4.15)より,

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{I}_3 \dot{\omega}_3 + \omega_3 \times \mathbf{I}_3 \omega_3 + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \ddot{p}_3 \\
 &\quad + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times (\dot{\omega}_3 \times p_{i3}) \\
 &\quad + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \{\omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3})\} \\
 &\quad - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} p_{j3} \times \bar{f}_j \\
 &= - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} (\mathbf{I}_j \dot{\omega}_j + \omega_j \times \mathbf{I}_j \omega_j) + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} \bar{n}_j
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

となる.

さらに,

$$\begin{aligned}
 I_3 \dot{\omega}_3 + \omega_3 \times I_3 \omega_3 + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} (I_j \dot{\omega}_j + \omega_j \times I_j \omega_j) \\
 = \sum_{j \in \bar{\mathcal{D}}_3} (I_j \dot{\omega}_j + \omega_j \times I_j \omega_j)
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

となる.

したがって, base に関して, 以下の関係が成立する.

$$\begin{aligned}
 \sum_{j \in \bar{\mathcal{D}}_3} (I_j \dot{\omega}_j + \omega_j \times I_j \omega_j) + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \ddot{p}_3 \\
 + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times (\dot{\omega}_3 \times p_{i3}) \\
 + \sum_{j \in \mathcal{C}_3} m_j p_{j3} \times \{\omega_3 \times (\omega_3 \times p_{i3})\} \\
 - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} p_{j3} \times \bar{f}_j - \sum_{j \in \mathcal{C}_3} \bar{n}_j = \mathbf{0}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

(3) 3次元問題への適用

ここでは, (2) ②及び③で導出した式(4.10)と式(4.18)を, 3次元の成分を持つ行列で表記するために整理する.

位置ベクトル \mathbf{p}_j , base の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_3$, 慣性テンソル \mathbf{I}_j は, それぞれ,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_j &= [x_j \quad y_j \quad z_j]^T \\
 \boldsymbol{\omega}_3 &= [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \\
 \mathbf{I}_j &= \begin{bmatrix} I_{xx,j} & I_{xy,j} & I_{xz,j} \\ I_{yx,j} & I_{yy,j} & I_{yz,j} \\ I_{zx,j} & I_{zy,j} & I_{zz,j} \end{bmatrix} \\
 \bar{\mathbf{f}}_j &= [\bar{f}_{x,j} \quad \bar{f}_{y,j} \quad \bar{f}_{z,j}]^T
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

とする.

式(4.10)の第1項は,

$$m_{\bar{\mathcal{D}}_3} \ddot{\mathbf{p}}_3 = \begin{bmatrix} m_{\bar{\mathcal{D}}_3} & 0 & 0 \\ 0 & m_{\bar{\mathcal{D}}_3} & 0 \\ 0 & 0 & m_{\bar{\mathcal{D}}_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix}
 \tag{4.20}$$

となる.

式(4.10)の第2項は,

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_3 \times m_j p_{j3} &= m_j \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} = m_j \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} \dot{\omega}_y z_{j3} - \dot{\omega}_z y_{j3} \\ \dot{\omega}_z x_{j3} - \dot{\omega}_x z_{j3} \\ \dot{\omega}_x y_{j3} - \dot{\omega}_y x_{j3} \end{bmatrix} && \text{式 (4.21)} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & m_j z_{j3} & -m_j y_{j3} \\ -m_j z_{j3} & 0 & m_j x_{j3} \\ m_j y_{j3} & -m_j x_{j3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

より,

$$\dot{\omega}_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j p_{j3} = \begin{bmatrix} 0 & (a_3^{D_3})_z & -(a_3^{D_3})_y \\ -(a_3^{D_3})_z & 0 & (a_3^{D_3})_x \\ (a_3^{D_3})_y & -(a_3^{D_3})_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.22)}$$

となる.

次に, 式(4.10)の第3項は,

$$\begin{aligned}
 \omega_3 \times (\omega_3 \times m_j p_{j3}) &= m_j \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_y z_{j3} - \omega_z y_{j3} \\ \omega_z x_{j3} - \omega_x z_{j3} \\ \omega_x y_{j3} - \omega_y x_{j3} \end{bmatrix} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} \omega_x \omega_y y_{j3} - \omega_y^2 x_{j3} - \omega_z^2 x_{j3} + \omega_x \omega_z z_{j3} \\ \omega_y \omega_z z_{j3} - \omega_z^2 y_{j3} - \omega_x^2 y_{j3} + \omega_x \omega_y x_{j3} \\ \omega_x \omega_z x_{j3} - \omega_z^2 z_{j3} - \omega_y^2 z_{j3} + \omega_y \omega_x y_{j3} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & -m_j x_{j3} & -m_j x_{j3} & m_j y_{j3} & 0 & m_j z_{j3} \\ -m_j y_{j3} & 0 & -m_j y_{j3} & m_j x_{j3} & m_j z_{j3} & 0 \\ -m_j z_{j3} & -m_j z_{j3} & 0 & 0 & m_j y_{j3} & m_j x_{j3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} && \text{式 (4.23)}
 \end{aligned}$$

より,

$$\begin{aligned}
 & \omega_3 \times \left(\omega_3 \times \sum_{j \in D_3} m_j p_{j3} \right) \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & -(a_3^{D_3})_x & -(a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_z & 0 & (a_3^{D_3})_z \\ -(a_3^{D_3})_y & 0 & -(a_3^{D_3})_x & (a_3^{D_3})_x & (a_3^{D_3})_z & 0 \\ -(a_3^{D_3})_z & -(a_3^{D_3})_z & 0 & 0 & (a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.24)}
 \end{aligned}$$

となる。

式(4.18)では、第1項に関して、

$$\mathbf{I}_j \dot{\omega}_j = \begin{bmatrix} I_{xx,j} & I_{xy,j} & I_{xz,j} \\ I_{yx,j} & I_{yy,j} & I_{yz,j} \\ I_{zx,j} & I_{zy,j} & I_{zz,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.25)}$$

より、

$$\sum_{j \in \bar{D}_3} \mathbf{I}_j \dot{\omega}_j = \begin{bmatrix} I_{xx,\bar{D}_3} & I_{xy,\bar{D}_3} & I_{xz,\bar{D}_3} \\ I_{yx,\bar{D}_3} & I_{yy,\bar{D}_3} & I_{yz,\bar{D}_3} \\ I_{zx,\bar{D}_3} & I_{zy,\bar{D}_3} & I_{zz,\bar{D}_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.26)}$$

となり、

$$\begin{aligned}
 \omega_3 \times \mathbf{I}_j \omega_3 &= \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx,j} \omega_x + I_{xy,j} \omega_y + I_{xz,j} \omega_z \\ I_{yx,j} \omega_x + I_{yy,j} \omega_y + I_{yz,j} \omega_z \\ I_{zx,j} \omega_x + I_{zy,j} \omega_y + I_{zz,j} \omega_z \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} I_{xz,j} \omega_x \omega_y + I_{yz,j} \omega_y^2 + I_{zz,j} \omega_y \omega_z - I_{xy,j} \omega_x \omega_z - I_{yy,j} \omega_y \omega_z - I_{yz,j} \omega_z^2 \\ I_{xx,j} \omega_x \omega_z + I_{xy,j} \omega_y \omega_z + I_{xz,j} \omega_z^2 - I_{xz,j} \omega_x^2 - I_{yz,j} \omega_x \omega_y - I_{zz,j} \omega_x \omega_z \\ I_{xy,j} \omega_x^2 + I_{yy,j} \omega_x \omega_y + I_{yz,j} \omega_x \omega_z - I_{xx,j} \omega_x \omega_y - I_{xy,j} \omega_y^2 - I_{xz,j} \omega_y \omega_z \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & I_{yz,j} & -I_{yz,j} & I_{xz,j} & I_{zz,j} - I_{yy,j} & -I_{xy,j} \\ -I_{xz,j} & 0 & I_{xz,j} & -I_{yz,j} & I_{xy,j} & I_{xx,j} - I_{zz,j} \\ I_{xy,j} & -I_{xy,j} & 0 & I_{yy,j} - I_{xx,j} & -I_{xz,j} & I_{yz,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.27)}
 \end{aligned}$$

より、

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in \bar{D}_3} \omega_3 \times I_j \omega_3 \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & I_{yz, \bar{D}_3} & -I_{yz, \bar{D}_3} & I_{xz, \bar{D}_3} & I_{zz, \bar{D}_3} - I_{yy, \bar{D}_3} & -I_{xy, \bar{D}_3} \\ -I_{xz, \bar{D}_3} & 0 & I_{xz, \bar{D}_3} & -I_{yz, \bar{D}_3} & I_{xy, \bar{D}_3} & I_{xx, \bar{D}_3} - I_{zz, \bar{D}_3} \\ I_{xy, \bar{D}_3} & -I_{xy, \bar{D}_3} & 0 & I_{yy, \bar{D}_3} - I_{xx, \bar{D}_3} & -I_{xz, \bar{D}_3} & I_{yz, \bar{D}_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.28)}
 \end{aligned}$$

となる。

次に式(4.18)の第2項は、

$$\begin{aligned}
 m_j p_{j3} \times \ddot{p}_3 &= m_j \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} = m_j \begin{bmatrix} y_{j3} \ddot{z}_3 - z_{j3} \ddot{y}_3 \\ z_{j3} \ddot{x}_3 - x_{j3} \ddot{z}_3 \\ x_{j3} \ddot{y}_3 - y_{j3} \ddot{x}_3 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & -m_j z_{j3} & m_j y_{j3} \\ m_j z_{j3} & 0 & -m_j x_{j3} \\ -m_j y_{j3} & m_j x_{j3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.29)}
 \end{aligned}$$

より、

$$\sum_{j \in C_3} m_j p_{j3} \times \ddot{p}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -(a_3^{D_3})_z & (a_3^{D_3})_y \\ (a_3^{D_3})_z & 0 & -(a_3^{D_3})_x \\ -(a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.30)}$$

となる。

式(4.18)の第3項は、

$$\begin{aligned}
 m_j p_{j3} \times (\dot{\omega}_3 \times p_{i3}) &= m_j \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\omega}_y z_{j3} - \dot{\omega}_z y_{j3} \\ \dot{\omega}_z x_{j3} - \dot{\omega}_x z_{j3} \\ \dot{\omega}_x y_{j3} - \dot{\omega}_y x_{j3} \end{bmatrix} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x y_{j3}^2 - \dot{\omega}_y x_{j3} y_{j3} - \dot{\omega}_z x_{j3} z_{j3} + \dot{\omega}_x z_{j3}^2 \\ \dot{\omega}_y z_{j3}^2 - \dot{\omega}_z y_{j3} z_{j3} - \dot{\omega}_x x_{j3} y_{j3} + \dot{\omega}_y x_{j3}^2 \\ \dot{\omega}_z x_{j3}^2 - \dot{\omega}_x x_{j3} z_{j3} - \dot{\omega}_y y_{j3} z_{j3} + \dot{\omega}_z y_{j3}^2 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} m_j (y_{j3}^2 + z_{j3}^2) & -m_j x_{j3} y_{j3} & -m_j x_{j3} z_{j3} \\ -m_j x_{j3} y_{j3} & m_j (z_{j3}^2 + x_{j3}^2) & -m_j y_{j3} z_{j3} \\ -m_j x_{j3} z_{j3} & -m_j y_{j3} z_{j3} & m_j (x_{j3}^2 + y_{j3}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.31)}
 \end{aligned}$$

より、

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in C_3} m_j p_{j3} \times (\dot{\omega}_3 \times p_{i3}) \\
 &= \begin{bmatrix} \sum_{j \in C_3} m_j (y_{j3}^2 + z_{j3}^2) & - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} & - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} \\ - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j (z_{j3}^2 + x_{j3}^2) & - \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} \\ - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} & - \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j (x_{j3}^2 + y_{j3}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.32)}
 \end{aligned}$$

となる。

式(4.18)の第4項は,

$$\begin{aligned}
 & m_j p_{j3} \times \left\{ \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{j3}) \right\} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \right) \right\} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_y z_{j3} - \omega_z y_{j3} \\ \omega_z x_{j3} - \omega_x z_{j3} \\ \omega_x y_{j3} - \omega_y x_{j3} \end{bmatrix} \right) \\
 &= m_j \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_x \omega_y y_{j3} - \omega_y^2 x_{j3} - \omega_z^2 x_{j3} + \omega_x \omega_z z_{j3} \\ \omega_y \omega_z z_{j3} - \omega_z^2 y_{j3} - \omega_x^2 y_{j3} + \omega_x \omega_y x_{j3} \\ \omega_x \omega_z x_{j3} - \omega_x^2 z_{j3} - \omega_y^2 z_{j3} + \omega_y \omega_z y_{j3} \end{bmatrix} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} \omega_x \omega_z x_{j3} y_{j3} - (\omega_y^2 - \omega_z^2) y_{j3} z_{j3} + \omega_y \omega_z (y_{j3}^2 - z_{j3}^2) - \omega_x \omega_y x_{j3} z_{j3} \\ \omega_x \omega_y y_{j3} z_{j3} - (\omega_z^2 - \omega_x^2) x_{j3} z_{j3} + \omega_x \omega_z (z_{j3}^2 - x_{j3}^2) - \omega_y \omega_z x_{j3} y_{j3} \\ \omega_y \omega_z x_{j3} z_{j3} - (\omega_x^2 - \omega_y^2) x_{j3} y_{j3} + \omega_x \omega_y (x_{j3}^2 - y_{j3}^2) - \omega_x \omega_z y_{j3} z_{j3} \end{bmatrix} \\
 &= m_j \begin{bmatrix} 0 & -y_{j3} z_{j3} & y_{j3} z_{j3} & -x_{j3} z_{j3} & (y_{j3}^2 - z_{j3}^2) & x_{j3} y_{j3} \\ x_{j3} z_{j3} & 0 & -x_{j3} z_{j3} & y_{j3} z_{j3} & -x_{j3} y_{j3} & (z_{j3}^2 - x_{j3}^2) \\ -x_{j3} y_{j3} & x_{j3} y_{j3} & 0 & (x_{j3}^2 - y_{j3}^2) & x_{j3} z_{j3} & -y_{j3} z_{j3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.33)}
 \end{aligned}$$

より,

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in C_3} m_j p_{j3} \times \left\{ \omega_3 \times (\omega_3 \times p_{j3}) \right\} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & - \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} & - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j (y_{j3}^2 - z_{j3}^2) & \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} \\ \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} & 0 & - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} & - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j (z_{j3}^2 - x_{j3}^2) \\ - \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} & \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} y_{j3} & 0 & \sum_{j \in C_3} m_j (x_{j3}^2 - y_{j3}^2) & \sum_{j \in C_3} m_j x_{j3} z_{j3} & - \sum_{j \in C_3} m_j y_{j3} z_{j3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.34)}
 \end{aligned}$$

となる。

式(4.18)の第5項は,

$$\begin{aligned}
 p_{j3} \times \tilde{f}_j &= \begin{bmatrix} x_{j3} \\ y_{j3} \\ z_{j3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{f}_{x,j} \\ \tilde{f}_{y,j} \\ \tilde{f}_{z,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{j3}\tilde{f}_{z,j} - z_{j3}\tilde{f}_{y,j} \\ z_{j3}\tilde{f}_{x,j} - x_{j3}\tilde{f}_{z,j} \\ x_{j3}\tilde{f}_{y,j} - y_{j3}\tilde{f}_{x,j} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & -z_{j3} & y_{j3} \\ z_{j3} & 0 & -x_{j3} \\ -y_{j3} & x_{j3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_{x,j} \\ \tilde{f}_{y,j} \\ \tilde{f}_{z,j} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

より,

$$\sum_{j \in C_3} p_{j3} \times \tilde{f}_j = \begin{bmatrix} \sum_{j \in D_3} y_{j3}\tilde{f}_{z,j} - \sum_{j \in D_3} z_{j3}\tilde{f}_{y,j} \\ \sum_{j \in D_3} z_{j3}\tilde{f}_{x,j} - \sum_{j \in D_3} x_{j3}\tilde{f}_{z,j} \\ \sum_{j \in D_3} x_{j3}\tilde{f}_{y,j} - \sum_{j \in D_3} y_{j3}\tilde{f}_{x,j} \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

となる.

式(4.19)~式(4.36)より, 式(4.10)と式(4.18)は以下に示す行列の形に整理できる.

$$\mathbf{A}_M \ddot{\mathbf{q}}_M + \mathbf{B} \mathbf{d}_M + \mathbf{f}_W = \mathbf{0} \tag{4.37}$$

ここで, ベクトルについては,

$$\ddot{\mathbf{q}}_M = \begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{z}_3 \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}_M = \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_z \omega_x \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

であり, マトリックスについては,

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} m_{\bar{D}_3} & 0 & 0 & 0 & (a_3^{D_3})_z & -(a_3^{D_3})_y \\ 0 & m_{\bar{D}_3} & 0 & -(a_3^{D_3})_z & 0 & (a_3^{D_3})_x \\ 0 & 0 & m_{\bar{D}_3} & (a_3^{D_3})_y & -(a_3^{D_3})_x & 0 \\ 0 & -(a_3^{D_3})_z & (a_3^{D_3})_y & {}^3I_{xx, \bar{D}_3} & {}^3I_{xy, \bar{D}_3} & {}^3I_{xz, \bar{D}_3} \\ (a_3^{D_3})_z & 0 & -(a_3^{D_3})_x & {}^3I_{xy, \bar{D}_3} & {}^3I_{yy, \bar{D}_3} & {}^3I_{yz, \bar{D}_3} \\ -(a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_x & 0 & {}^3I_{xz, \bar{D}_3} & {}^3I_{yz, \bar{D}_3} & {}^3I_{zz, \bar{D}_3} \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

$$B_M = \begin{bmatrix} 0 & -(a_3^{D_3})_x & -(a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_z & 0 & (a_3^{D_3})_z \\ -(a_3^{D_3})_y & 0 & -(a_3^{D_3})_z & (a_3^{D_3})_x & (a_3^{D_3})_z & 0 \\ -(a_3^{D_3})_z & -(a_3^{D_3})_x & 0 & 0 & (a_3^{D_3})_y & (a_3^{D_3})_x \\ 0 & {}^3I_{yz, \bar{D}_3} & -{}^3I_{xz, \bar{D}_3} & {}^3I_{xz, \bar{D}_3} & {}^3I_{zz, \bar{D}_3} & -{}^3I_{yy, \bar{D}_3} \\ -{}^3I_{xz, \bar{D}_3} & 0 & {}^3I_{xz, \bar{D}_3} & -{}^3I_{yz, \bar{D}_3} & {}^3I_{xy, \bar{D}_3} & {}^3I_{xx, \bar{D}_3} - {}^3I_{zz, \bar{D}_3} \\ {}^3I_{xy, \bar{D}_3} & -{}^3I_{xy, \bar{D}_3} & 0 & {}^3I_{yy, \bar{D}_3} - {}^3I_{xx, \bar{D}_3} & -{}^3I_{xz, \bar{D}_3} & {}^3I_{yz, \bar{D}_3} \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.40)}$$

である。

ここで、

$$\begin{aligned} {}^3I_{xx, \bar{D}_3} &= I_{xx, \bar{D}_3} + \sum_{j \in c_3} m_j (y_{j3}^2 + z_{j3}^2) \\ {}^3I_{yy, \bar{D}_3} &= I_{yy, \bar{D}_3} + \sum_{j \in c_3} m_j (z_{j3}^2 + x_{j3}^2) \\ {}^3I_{zz, \bar{D}_3} &= I_{zz, \bar{D}_3} + \sum_{j \in c_3} m_j (x_{j3}^2 + y_{j3}^2) \\ {}^3I_{xy, \bar{D}_3} &= I_{xy, \bar{D}_3} - \sum_{j \in c_3} m_j x_{j3} y_{j3} \\ {}^3I_{yz, \bar{D}_3} &= I_{yz, \bar{D}_3} - \sum_{j \in c_3} m_j y_{j3} z_{j3} \\ {}^3I_{xz, \bar{D}_3} &= I_{xz, \bar{D}_3} - \sum_{j \in c_3} m_j x_{j3} z_{j3} \end{aligned} \quad \text{式 (4.41)}$$

とする。

この式(4.41)は、ベース（リンク3）の重心におけるリンクjの慣性モーメント、慣性乗積の総和を意味する。

例えば、図4.5のリンク4を考える。

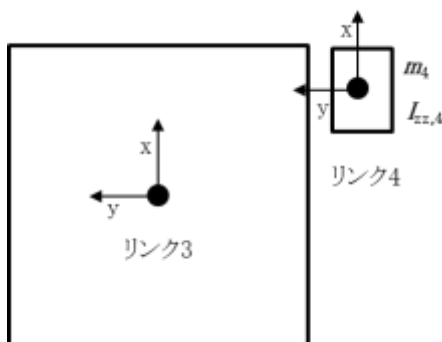


図 4.5 ベースにおける慣性モーメント

リンク4は質量 m_4 , z 軸回りの慣性モーメント（リンク4の重心に関して） $I_{zz,4}$ で、リンク

3 と $p_{43} = [x_{43} \ y_{43} \ z_{43}]^T$ の位置関係にある．このとき，リンク3の重心におけるz軸回りの慣性モーメントは次の式で表される．

$${}^3I_{zz,4} = I_{zz,4} + m_4(x_{43}^2 + y_{43}^2) \tag{4.42}$$

その他の子リンクも同様の式で表され，式(4.41)はそれらの総和をとったものである．

(4) 車輪外力と運動方程式

式(4.37)に示した行列形式の運動方程式において，車輪から base に作用する外力と重力は，以下の式で表すことができる．これらは車輪座標系によるものである．

$$f_w = \begin{bmatrix} -\sum_{j \in D_3} \dot{f}_{x,j} \\ -\sum_{j \in D_3} \dot{f}_{y,j} \\ m_{D_3}g - \sum_{j \in D_3} \dot{f}_{z,j} \\ -\sum_{j \in D_3} (y_{j3} \dot{f}_{z,j} - z_{j3} \dot{f}_{y,j} + \bar{n}_{x,j}) \\ -\sum_{j \in D_3} (z_{j3} \dot{f}_{x,j} - x_{j3} \dot{f}_{z,j} + \bar{n}_{y,j}) \\ -\sum_{j \in D_3} (x_{j3} \dot{f}_{y,j} - y_{j3} \dot{f}_{x,j} + \bar{n}_{z,j}) \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

走行平面との関係を考えて，2次元問題としての水平走行シミュレーションと異なり，3次元の運動方程式では，x軸及びy軸回りの回転成分が存在し，条件によっては，図4.6の例のような回転により，いくつかの車輪が走行平面から離れ，浮き上がる可能性がある．重心の位置が高い場合，慣性力や遠心力等の影響により，x軸あるいはy軸回りの傾きが大きくなって，最終的にマイクロロボットが転倒することも考えられる．

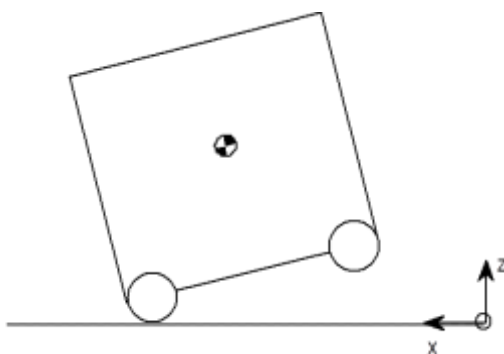


図 4.6 y 軸回りの回転

転倒する条件に関して，図 4.7 の 2次元問題で，(a)円形と(b)正方形の物体の転がりについて

考える.

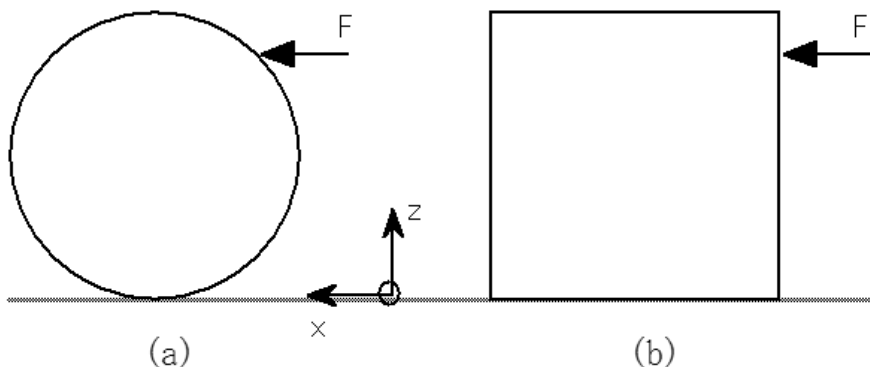


図 4.7 物体の転がりとすべり

(a)の円形の物体に図のような外力 F が加わる場合は、地面との間に外力 F と反対方向に摩擦力が発生して、 x 方向にすべりつつ重心位置を中心に回転する。

一方、(b)の正方形の物体の場合は、外力 F がある一定の大きさを越えない間は図 4.8(b-1)のように転がることはなく、地面を x 方向にすべって移動する。外力 F がある大きさを越えた場合は、図 4.8 の(b-2)のように、 A 点を回転中心として回転することになる。これらは重力及び地面との摩擦と、外力 F の関係で決定される。(b)では回転中心の位置が重心とは異なっている。図 4.8 の(b-1)では、結果的に重心回りの回転はない。

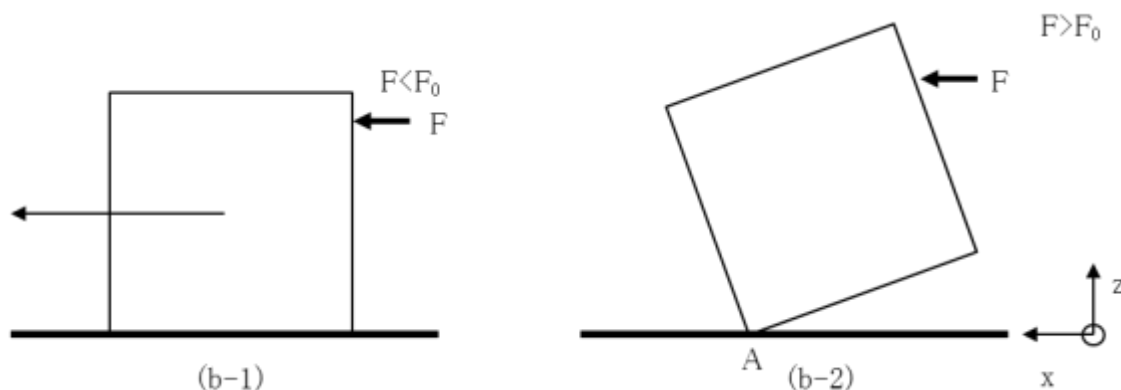


図 4.8 正方形の物体のすべりと転倒

以上のことを基に、車輪の浮き上がりについて考える。図 4.9 の y 方向から見た base において、車輪 2 が浮き上がる条件を検討する。車輪 2 が浮き上がった状態の回転の中心は車輪 1 の軸となる。

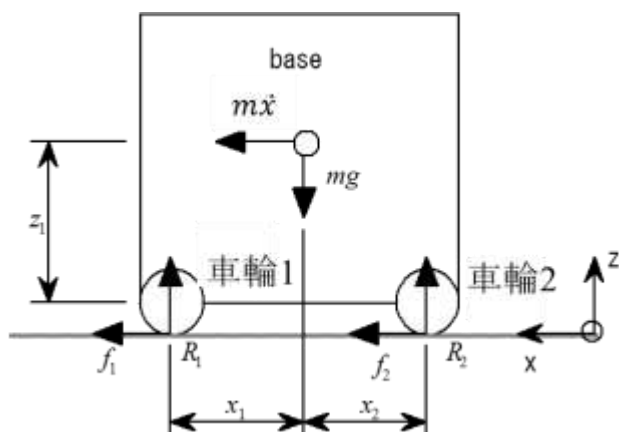


図 4.9 y 軸方向の回転の釣り合い

まず、静止状態の z 方向の釣り合いを考える。このときの垂直抗力 R_1 、 R_2 は、

$$R_1 = \frac{x_2}{x_1 + x_2} mg \quad R_2 = \frac{x_1}{x_1 + x_2} mg \quad \text{式 (4.44)}$$

となる。

いま、図 4.9 の base は加速度運動をしているものとする。このとき、この重心に作用する慣性力により、車輪 2 の軸の回りに頭下げのモーメントが発生する。このモーメントは、車輪 1 における垂直抗力の増加分 ΔR による頭下げのモーメント $\Delta R(x_1 + x_2)$ により、キャンセルされる。

したがって、垂直抗力が以下のようになることで、y 軸回りの釣り合いが保たれる。これは、重力の配分が変化することを意味している。

$$R'_1 = R_1 + \Delta R = \frac{x_2}{x_1 + x_2} mg + \frac{z_1}{x_1 + x_2} m\ddot{x}$$

$$R'_2 = R_2 - \Delta R = \frac{x_1}{x_1 + x_2} mg - \frac{z_1}{x_1 + x_2} m\ddot{x} \quad \text{式 (4.45)}$$

車輪が浮き上がらないためには、式(4.45)において、これらの垂直抗力は正の値を持たなければならない。慣性力 $m\ddot{x}$ が大きく、これが満足されないとき、車輪が浮き上がる。

すなわち、車輪 2 が浮き上がる条件は、 $R'_2 < 0$ より、

$$\ddot{x} > \frac{x_1}{z_1} g \quad \text{式 (4.46)}$$

となる。

また、車輪 1 が浮き上がる条件は、 $R'_1 < 0$ より、

$$\ddot{x} < -\frac{x_2}{z_1}g \tag{4.47}$$

となる。

このとき、 \ddot{x} は負の値を持つ。

同様に x 軸回りの釣り合いに関しても、base の車輪が浮き上がる条件を求めることができる。

図 4.10 に x 軸方向の回転の釣り合いを示す。

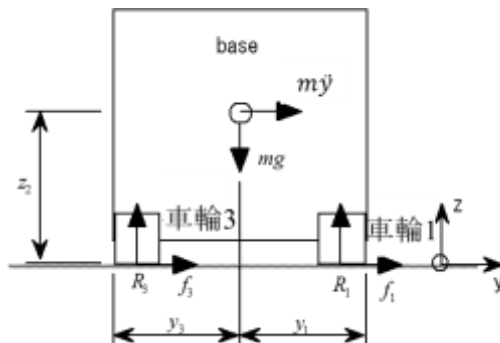


図 4.10 x 軸方向の回転の釣り合い

図 4.10 では、車輪 1 が浮き上がる条件は、

$$\ddot{y} < -\frac{y_3}{z_2}g \tag{4.48}$$

となる。

また、車輪 3 が浮き上がる条件は

$$\ddot{y} > -\frac{y_1}{z_2}g \tag{4.49}$$

となる。

したがって、各タイムステップにおいて、式(4.37)より base の加速度及び角加速度を求めた際、式(4.46)-式(4.49)に代入し、車輪の浮き上がりの可能性を判定する必要がある。

式(4.46)-式(4.49)の全ての条件が当てはまらない場合は、全車輪が走行平面に接地していることになり、x 方向と y 方向の回転はない。また、z 方向の並進の加速度が生じないことも自明である。

したがって、あるタイムステップにおいて、車輪が浮き上がらない場合は、式(4.37)の運動方程式で、

$$\ddot{z} = \dot{\omega}_x = \dot{\omega}_y = 0 \quad \text{式 (4.50)}$$

となる。

結局のところ，式(4.37)を解くことは， x ， y 方向の並進の加速度 (\ddot{x} ， \ddot{y}) と， z 方向の回転の加速度 ($\dot{\omega}_z$) を求めることになり，結果的には，従来の2次元の運動方程式を解く問題と，同じ意味を持つと見なすことができる．このとき，モーメントの釣り合いを保つため，各車輪に作用する base の重量の配分が変化する．これらは式(4.37)から求められる加速度による慣性力の効果であり，この配分変化は， x ， y 方向の回転の釣り合い式(式(4.37)) から求められる．これらはタイムステップ毎に再計算され，次のタイムステップの入力として使用する．

(5) 走行平面の変更

車輪駆動マイクロロボットは図 4.11 の(a)のように進行方向を x として， xy 平面を移動する．

さらに，壁面においては，図 4.11 の(b)のようなグローバル座標系の yz 平面の移動が発生する．この場合は以下の簡易的な方法で進行方向を切り替えることで垂直走行のシミュレーションを実現した．

- ① 重心位置の座標系を回転させ，グローバル座標系の z 方向を単体マイクロロボット座標系 x 方向とする．
- ② 車輪摩擦力の計算に必要な走行平面に対する垂直力を，自重及び地面方向の磁石吸着力から，細管方向磁石吸着力に切り替える．
- ③ 重力を考慮する．
- ④ xy 平面と同様にマイクロロボット座標系 x 方向に移動する．

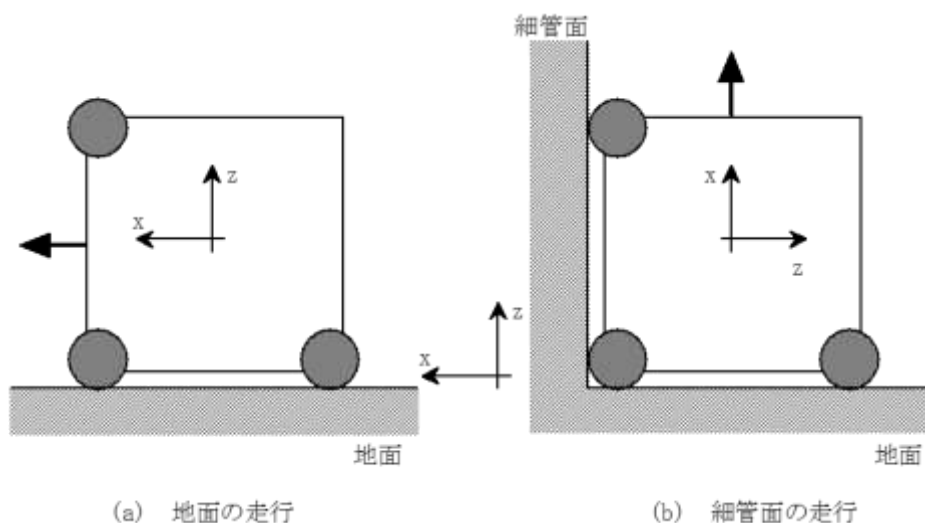


図 4.11 走行平面の変更

4.2.3 複数個連結移動シミュレータ

複数個連結移動シミュレータは細管の周囲に位置する 10 台のマイクロロボットが連結し、連結した状態を保ちながら上昇する状況を模擬する。連結デバイスの渦巻きばねの剛性や磁石車輪の磁石吸着力等を設定し、隣接するマイクロロボット間の作用力を考慮しつつ、上昇可否及び連結移動動作の評価を行うとともに、駆動用、探傷用等の仕様や質量の異なるマイクロロボットの細管周囲の配置を任意に変更して、連結移動マイクロロボットの仕様が決定できるようにした。複数個連結移動シミュレータの入出力パネルの例を図 4.12 に示す。以下に複数個連結シミュレータの詳細について述べる。

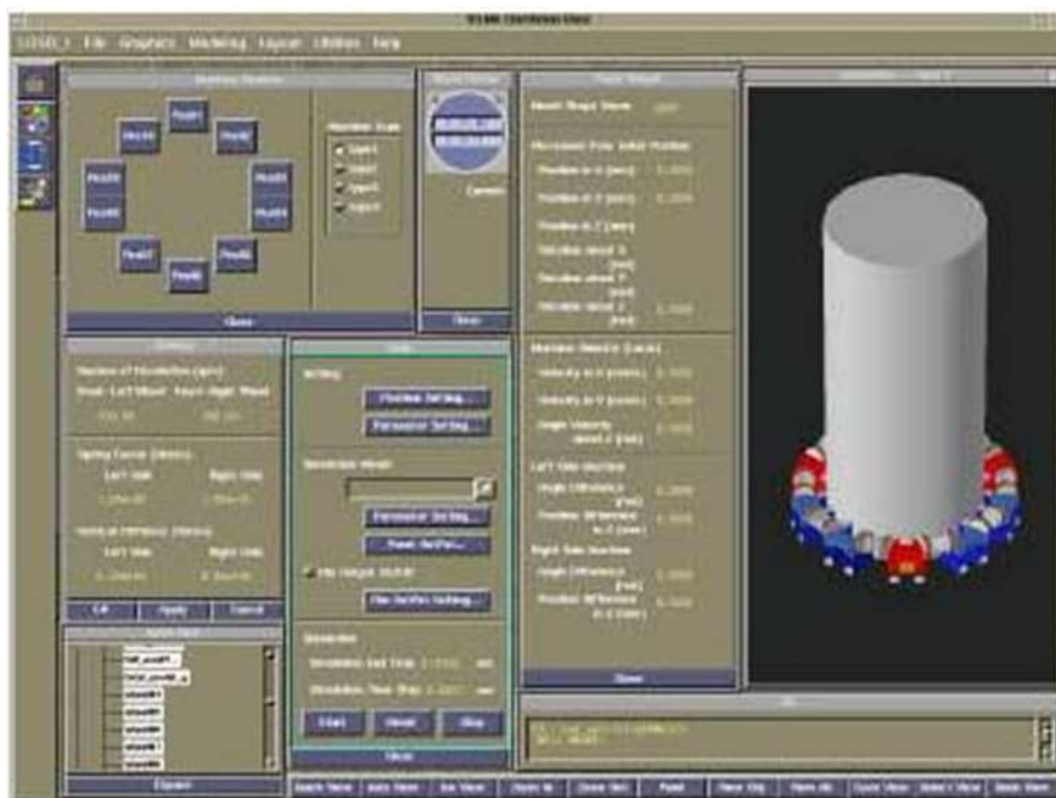


図 4.12 複数個連結移動シミュレータの入出力パネルの例

(1) マイクロロボットの細管まわりへの配置

本シミュレータでは試作マイクロロボットに合わせて、以下の 4 つのタイプのマイクロロボットを想定している。これらを図 4.13 に示す配置パネルによって、各位置で重量の異なる 4 つのタイプのマイクロロボットを指定することで、任意にマイクロロボットを配置することが可能になっている。

- マイクロロボットタイプ 1：駆動用マイクロロボット（親機）【重量：0.508 g】
- マイクロロボットタイプ 2：駆動用マイクロロボット（子機）【重量：0.508 g】

- マイクロロボットタイプ3：探傷用マイクロロボット【重量：0.318 g】
- マイクロロボットタイプ4：伝達マイクロロボット【重量：0.304 g】

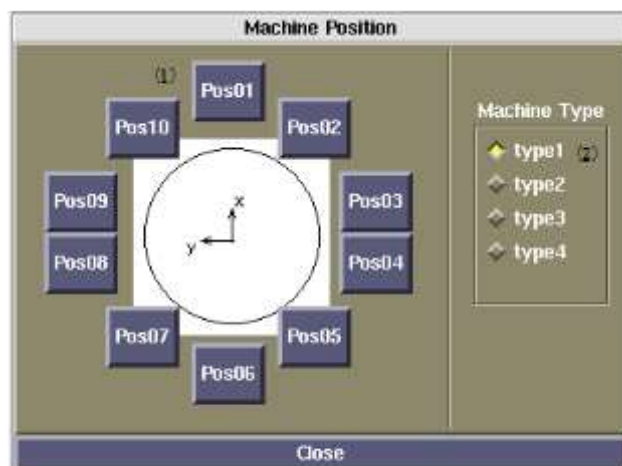


図 4.13 配置パネル

(2) マイクロロボットに作用するフープ力

図 4.14 に示すように、マイクロロボット同士が連結した状態では、マイクロロボット本体と連結デバイスとの間を繋いでいるジンバルバネは、自然長から伸びた状態である。したがって、ばねの伸びに比例したばね力がマイクロロボットに外力として作用する。力の向きは嵌合した連結デバイスに垂直方向となる。

ジンバルバネのばね力は、水平方向に関して、ばね定数 1.85×10^{-2} [N/mm]とし、伸びの関数として計算される。ばね定数は試作マイクロロボットの測定から決定した。また、最大ストロークは $800[\mu\text{m}]$ であるが、中央で連結デバイスが連結される場合のストロークは $500[\mu\text{m}]$ で設計されている。図 4.15 に示すようにマイクロロボット座標系 z 方向の成分がフープ力となる。10 台のマイクロロボットが細管の周りに均等に配置されると、 36° の間隔で配置される。マイクロロボット同士が中央で連結されるとするとばね力の $\sin 18^\circ$ が片側コネクタから作用するフープ力となる。したがって、マイクロロボットが細管周りに均等に配置されて連結した場合の 1 台のマイクロロボットからのフープ力は $1.85 \times 10^{-2} \times 0.5 \times \sin 18^\circ \times 2 = 5.74 \times 10^{-3}$ [N]となる。実際には、10 台のマイクロロボットは、ずれて配置される可能性があるので、各マイクロロボットの連結デバイスのジンバルばねのストロークに基づいてフープ力が計算され、マイクロロボット座標系に変換され、運動方程式に外力として与えられる。

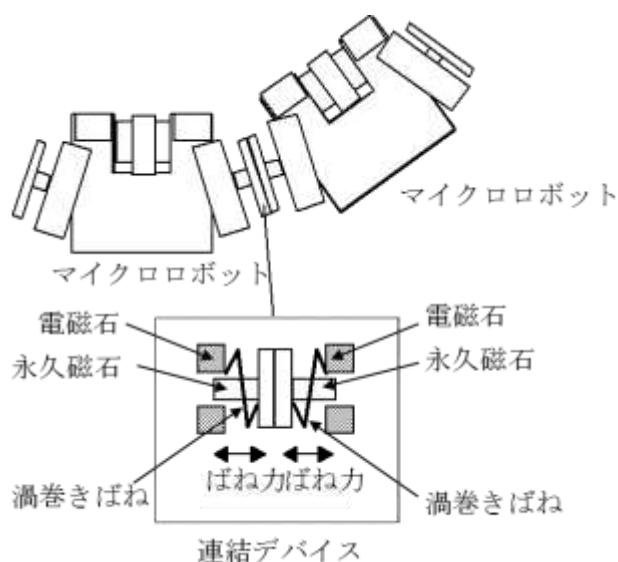


図 4.14 マイクロロボット間の相互作用

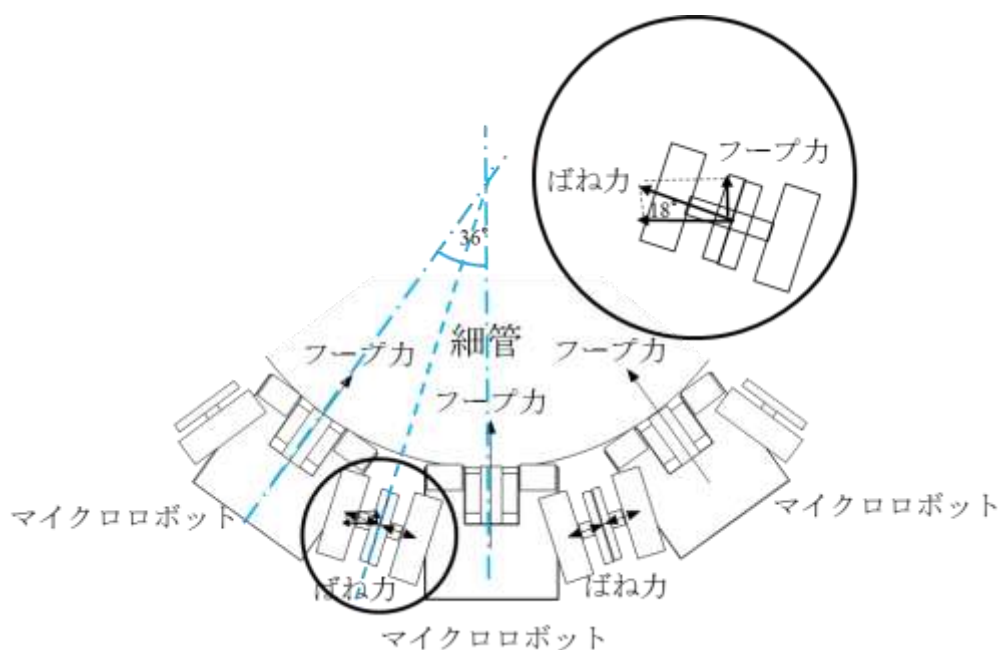


図 4.15 マイクロロボットに作用するフープ力

(3) マイクロロボット間に作用する垂直力

図 4.16 に示すように、駆動デバイスを持たないマイクロロボットが、駆動デバイスを持つマイクロロボットから引張上げられることにより、多数個連結状態での細管上昇が可能となる。このとき、駆動力を持たないマイクロロボットは、鉛直下向きに作用する重力の分だけ負荷となる。これらのマイクロロボット同士は、連結デバイスを介して繋がっており、ジンバルバネの伸縮方向に対して垂直に力が作用する。そのため、ジンバルバネの垂直方向の剛性の影響で、各マ

マイクロロボットの上昇位置がずれる可能性がある。垂直方向のばね定数は試作マイクロロボットの測定から $5.79 \times 10^{-2} \text{ N/mm}$ とした。

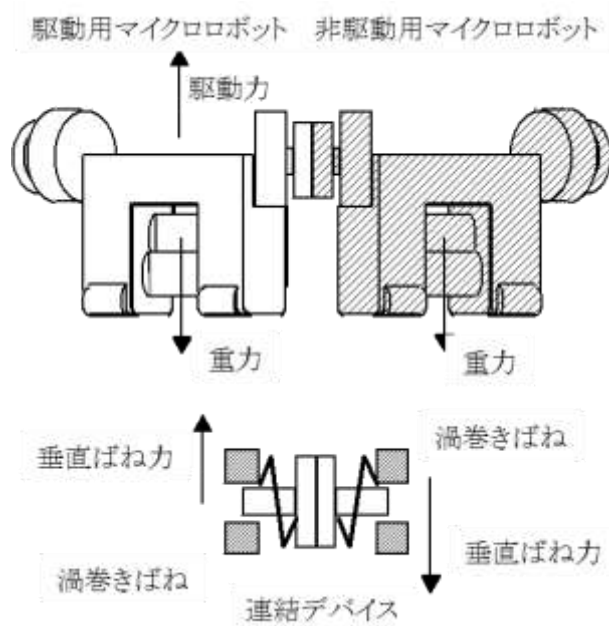


図 4.16 駆動用マイクロロボットによる非駆動用マイクロロボットの引き上げの様子

(4) 多数個連結運動

図 4.17 に多数個連結運動のイメージを示す。まず、個々のマイクロロボットに関する運動に着目すると、シミュレーション時間が t_0 、 t_1 、 t_2 と進むに従って、与えられた回転数及び作用する重力、車輪吸着力によりそれぞれが位置を変化させていく。このとき各マイクロロボットは、隣接するマイクロロボットと連結デバイスの磁石吸着力の働きによって連結状態を保持している。また、連結デバイスとマイクロロボットとの間にジンバルバネがあり、マイクロロボットの間隔はバネの伸びに伴って変化する。隣接マイクロロボットからのこれらの相互作用は、各マイクロロボットの位置変化に従ってシミュレーション時間毎に異なっている。本多数個連結移動シミュレータでは、全てのマイクロロボットの運動を一つの系として、全体の運動方程式を立てて解を導出するかたちは取らず、マイクロロボット毎に平行に運動方程式を立て、連結した隣のマイクロロボットの影響は、運動方程式の外力としてそれぞれに与えている。

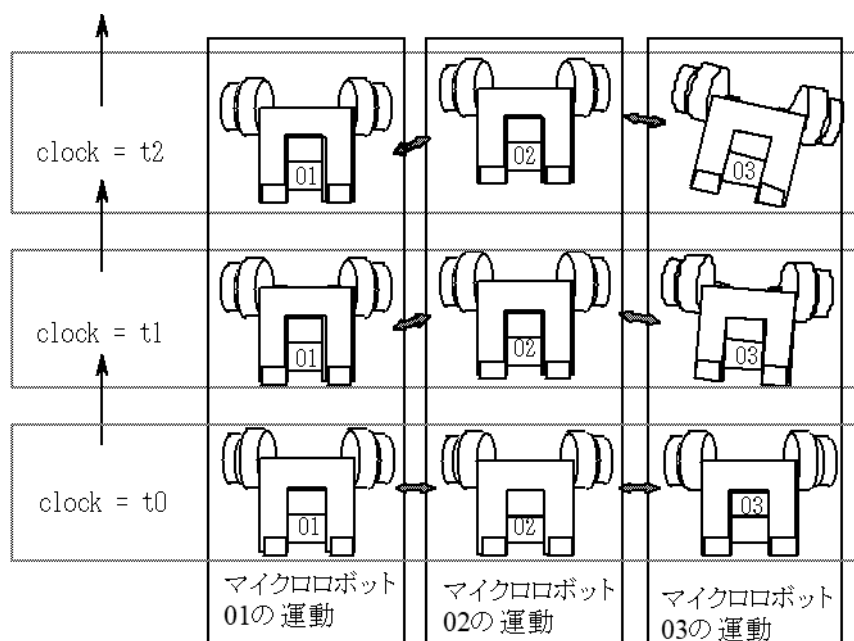


図 4.17 多数個連結運動のイメージ

(5) 連結移動の評価・判定

隣接するシミュレーションモデルとの間に発生するばね力は、モデル間の距離に比例するもので、外力として個々のモデルに作用する。したがって、各シミュレーションモデルは、細管上の自身の位置を常に把握し、隣のモデルとの距離からばね力を算出する必要がある。

隣接するモデル同士の相互作用の影響により、直進上昇ができない場合は、モデル同士の距離が広くなったり、あるいは狭くなったりする。このような状況で、連結デバイスの磁石吸着力を越えるばね力が発生して連結が分離した場合、もしくはシミュレーションモデルの斜行により、モデル同士の干渉が発生した場合等は、連結移動ができなかったと判定される。

4.3 磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行シミュレーション結果

4.3.1 車輪磁石吸着力と垂直走行可能性の関係

1台のマイクロロボットが、垂直走行可能な上輪と下輪の磁石吸着力の関係を図 4.18 に示す。図 4.18 より、下降時の方が上昇時よりも上輪磁石吸着力を大きくとる必要があることが分かる。また、上昇時には下輪磁石吸着力を大きくするほど上輪磁石吸着力は小さくて良いが、下降時にはその逆になっていることが分かる。これは下降時には下向きの加速度により、上輪が離

れるモーメントが大きくなるので、これに打ち勝つ磁石吸着力を上輪に作用させる必要があるためである。また、上昇時には1輪あたり下輪に 8.25×10^{-3} [N]、上輪に 1.15×10^{-3} [N]の、下降時には下輪に 7.6×10^{-3} [N]、上輪に 3.4×10^{-3} [N]以上の磁石吸着力を作用させないと垂直走行ができないことが明らかとなった。

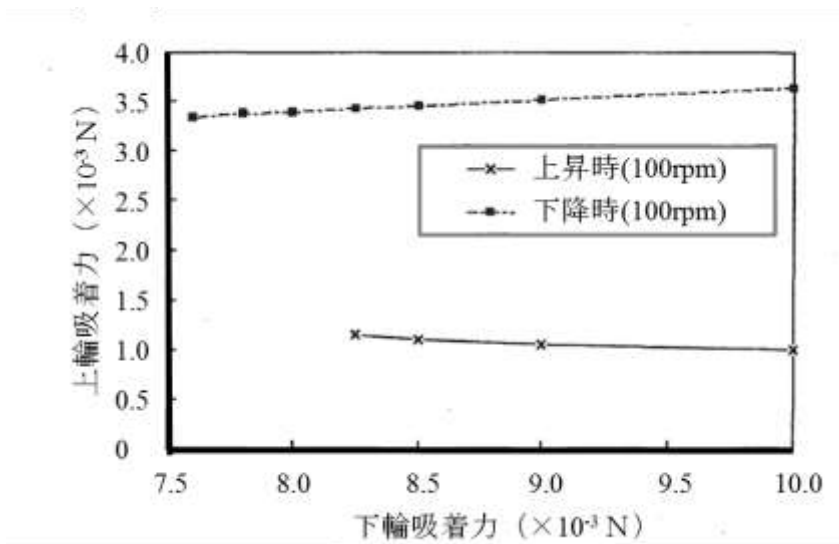


図 4.18 垂直走行可能な上輪，下輪磁石吸着力の関係

4.3.2 下輪磁石吸着力とスリップ率，上昇速度の関係

図 4.19 に 1 輪当たりの上輪磁石吸着力を 5.0×10^{-3} N とし，下輪磁石吸着力が 1.0×10^{-2} N と 2.0×10^{-2} N の時の車輪回転数と上昇速度の関係を示す。上昇時には重力の影響で理論速度より遅く，下降時には逆に理論速度より速くなっているのが分かる。車輪回転数に対する上昇速度の傾きは上昇と下降で異なるが，走行方向を限定すれば，車輪回転数に依存せず一定であり，すべりの状態も車輪回転数に依存せず一定と考えられる。また，下輪磁石吸着力を大きくすると理論速度に近づくが，その度合いは小さいことが分かる。

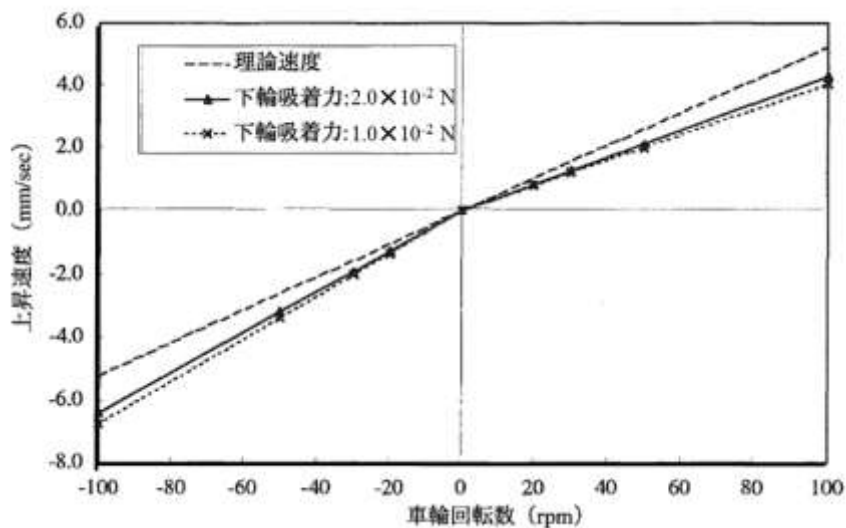


図 4.19 上昇速度と車輪回転数の関係

図 4.20 に 100 rpm で上昇及び下降させた場合の下輪磁石吸着力とスリップ率の関係を示す。上昇時には、車輪回転による速度の方がマイクロボットの速度よりも大きく、スリップ率は負の値となっているが、下降時にはその逆になっているのが分かる。また、上昇、下降とも下輪磁石吸着力を増加させるに従ってグリップカが増すため、スリップ率が減少している。ただし、ある値に収束しており、このため、上昇速度は理論速度に収束できないことが分かる。

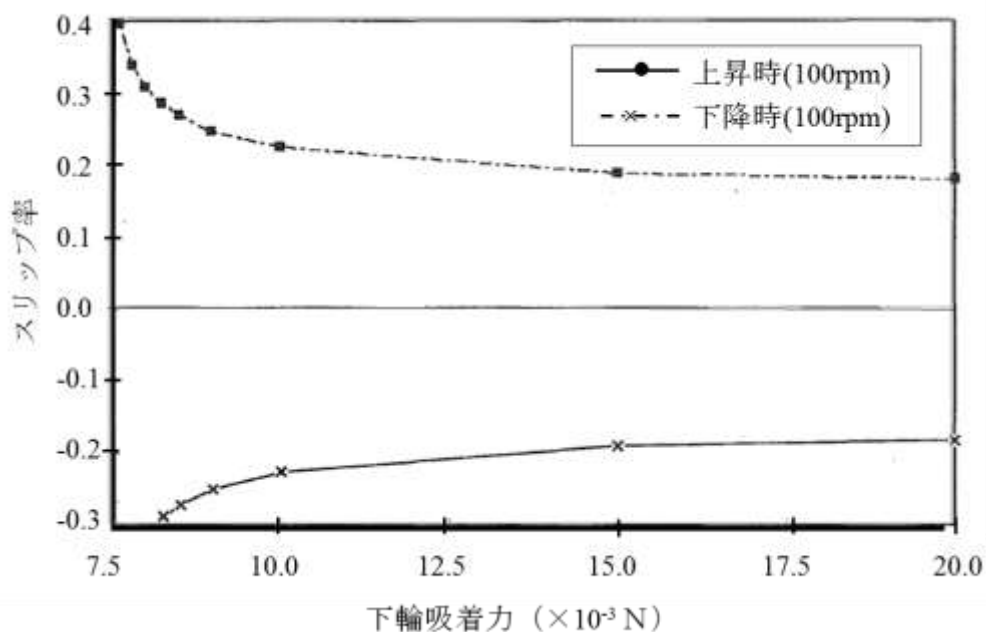





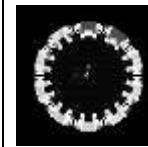



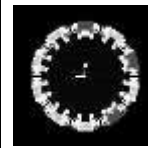







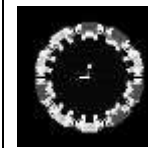




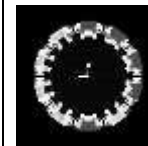




図 4.20 スリップ率と下輪磁石吸着力の関係







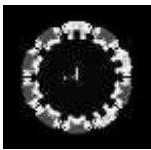
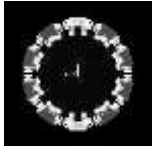
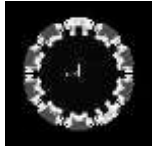
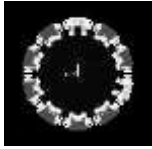
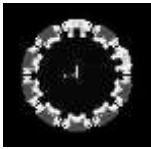
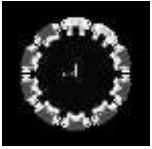
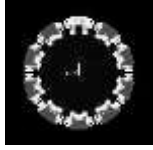
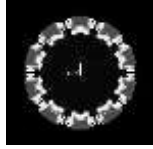
4.3.3 複数個連結移動シミュレーション結果

全10台からなるマイクロロボットを直径22[mm]の細管の周りで連結して移動させる場合の駆動マイクロロボットと非駆動マイクロロボットの配置について検討した。駆動マイクロロボットが1台～10台のすべての配置を図4.21(a), (b)に示す。

駆動 1台						
	1-01					
駆動 2台						
	2-01	2-02	2-03	2-04	2-05	
	駆動 3台					
		3-01	3-02	3-03	3-04	
		駆動 4台				
4-01			4-02	4-03		
駆動 5台						
	5-01	5-02	5-03	5-04	5-05	
						
	5-06	5-07	5-08	5-09	5-10	
						
	5-11	5-12				

(a) 駆動マイクロロボット1台～5台の場合

図 4.21 細管周りの配置パターン

駆動 6台					
	6-01	6-02	6-03		
駆動 7台					
	7-01	7-02	7-03	7-04	
駆動 8台					
	8-01	8-02	8-03	8-04	8-05
駆動 9台					
	9-01				
駆動 10台					
	10-01				

(b) 駆動マイクロロボット 6 台～10 台の場合

図 4.21 細管周りの配置パターン

ここで灰色のマイクロロボットは駆動マイクロロボットを白色のマイクロロボットは非駆動マイクロロボットを示す。それぞれの配置において、時間刻みを 0.001 秒とし、1 秒間の上昇シミュレーションを行った際の 10 台のマイクロロボットの上昇高さ平均値、上昇高さ標準偏差、横ずれ標準偏差、回転ずれ標準偏差のそれぞれのシミュレーション結果を表 4.1 に示す。表 4.1 より明らかなように、駆動マイクロロボットが 2 台以下の場合には連結が上昇途中に切断されてしまい、安定した複数個連結移動は実現することができないことが分かる。また、3 台と 5 台の駆動マイクロロボットを備えた系においても、それぞれ最も対称性が悪い、(3-04)と(5-12)においては、その対称性の悪さから切断するケースが発生した。

表 4.1 複数台連結移動シミュレーション結果

配置 No.	上昇高さ平均 (mm)	上昇高さ標準偏差 (mm)	横ずれ標準偏差 (mm)	回転ずれ標準偏差 (deg)	備考
1-01	0.41	0.6	0.05	2.22	切断
2-01	1.21	0.6	0.08	3.34	切断
2-02	1.03	0.68	0.06	2.72	切断
2-03	1.15	0.91	0.08	2.9	切断
2-04	1.09	1.05	0.09	3.21	切断
2-05	0.82	0.96	0.09	3.17	切断
3-01	9.13	0.42	0.07	2.67	
3-02	8.94	0.5	0.06	3.16	
3-03	8.02	1.22	0.23	4.89	
3-04	2.61	1.76	0.24	6.29	切断
4-01	9.54	0.25	0.04	1.58	
4-02	9.52	0.23	0.02	1.63	
4-03	9.34	0.59	0.11	2.64	
5-01	10.02	0.09	0	0	
5-02	9.94	0.21	0.04	1.1	
5-03	9.95	0.21	0.04	1.04	
5-04	9.71	0.52	0.14	2.36	
5-05	9.86	0.26	0.05	1.44	
5-06	9.86	0.25	0.04	1.56	
5-07	9.72	0.53	0.13	2.37	
5-08	9.23	1.04	0.28	4.07	
5-09	9.63	0.5	0.1	2.53	
5-10	9.24	1.05	0.28	4	
5-11	9.65	0.51	0.12	2.37	
5-12	1.74	1.11	0.11	3.52	切断
6-01	10.06	0.09	0.01	0.5	
6-02	10.06	0.09	0.01	0.5	
6-03	10.06	0.09	0.01	0.5	
7-01	10.11	0.09	0.01	0.63	
7-02	10.11	0.1	0.01	0.54	
7-03	10.11	0.1	0.02	0.53	
7-04	10.11	0.11	0.02	0.4	
8-01	10.15	0.09	0.01	0.55	
8-02	10.15	0.09	0.02	0.53	
8-03	10.15	0.1	0.02	0.4	
8-04	10.15	0.1	0.02	0.4	
8-05	10.06	0.27	0.06	1.24	
9-01	10.19	0.08	0.01	0.39	
10-01	10.23	0	0	0	

隣接するマイクロロボットの影響を評価するため、最も影響が大きくなる10台のマイクロロボットのうち3台のマイクロロボットだけが駆動マイクロロボットの場合について以下で検討を行う。7台の非駆動マイクロロボットの内2台は細管の探傷を行うための探傷マイクロロボットと残りの5台は連結機能だけを有する伝達マイクロロボットとすることを考える。駆動マイクロ

ロボット、探傷マイクロロボット、伝達マイクロロボットはそれぞれ重量が異なり、各マイクロロボットの細管周りでの配置により、10台連結移動が可能かをシミュレーションで検討することを考える。3台の駆動マイクロロボットを、2台、2台、3台の間隔で配置した際の、2台の探傷マイクロロボットの配置の影響を見るため、図4.22の4ケースでシミュレーションを行い、現行のばね剛性での各マイクロロボットのたわみ量を比較した。このときの各マイクロロボットの質量は、実機の計測から、駆動マイクロロボットは0.508 g、探傷マイクロロボットは0.318 g、伝達マイクロロボットは0.304 g とした。駆動マイクロロボットの駆動デバイス回転数を200 rpm とし、摩擦係数0.3、駆動輪の磁石吸着力は十分大きい 4.0×10^{-2} N とした。

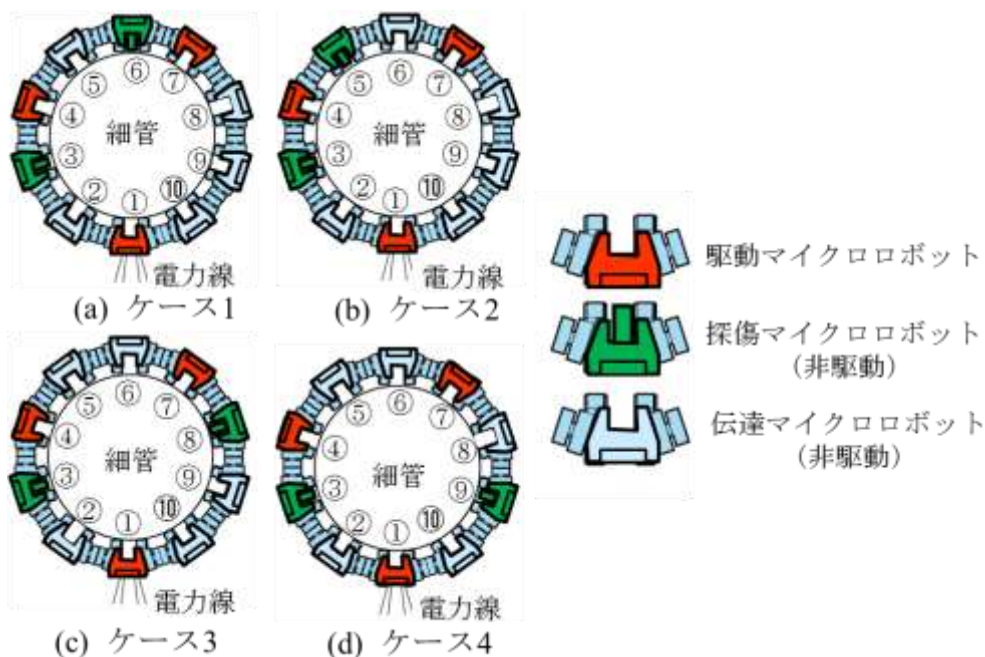


図4.22 細管回りのマイクロロボットの配置

電力線を有する親マイクロロボット（駆動マイクロロボット）の上昇位置を基準として、各マイクロロボットの上昇変位の差（ μm ）をそれぞれのケースで表4.2及び図4.23に示す。

表4.2 各マイクロロボットの上昇変位の親機からの差

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
ケース1	0.0	-48.9	-28.0	24.7	-37.0	-37.5	0.9	-72.8	-97.8	-74.1
ケース2	0.0	-37.5	-43.3	19.7	-42.4	-37.1	0.4	-72.7	-97.7	-73.2
ケース3	0.0	-45.1	-29.3	27.0	-33.7	-35.7	0.2	-74.9	-99.2	-74.0
ケース4	0.0	-44.8	-28.8	27.7	-32.9	-34.3	1.7	-73.5	-99.3	-74.3

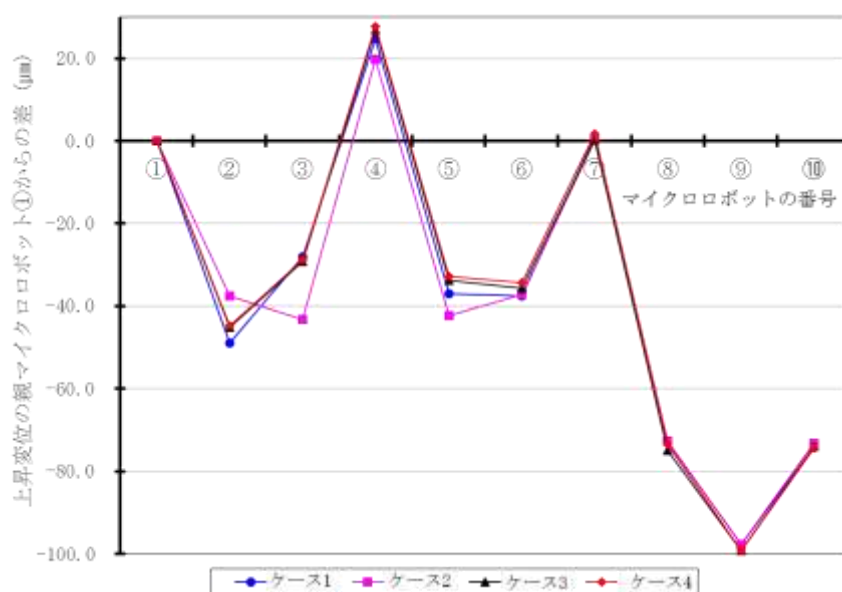


図 4.23 各マイクロロボットの上昇変位の親機からの差

これらの値は0.1秒毎に取得したデータの10回の平均を取ったものである。各ケースとも、図4.24に示すように、駆動マイクロロボットであるマイクロロボット1、マイクロロボット4、マイクロロボット7により、その他の非駆動マイクロロボットが引き上げられている状況が明らかである。探傷マイクロロボットは伝達マイクロロボットと比較して、若干質量が大きいため、各ケースとも駆動マイクロロボットからの差が大きい。ケース2では、マイクロロボット4の両隣に探傷マイクロロボットがあるため、他のケースと比較してマイクロロボット4の上昇位置が低くなった。逆にマイクロロボット4の負担が小さいケース3、ケース4では、マイクロロボット4の上昇位置が高くなり、マイクロロボット間の変位の差がより広がる結果となった。各マイクロロボット間の相対的な上昇位置の差をとると、マイクロロボット7とマイクロロボット8、マイクロロボット10とマイクロロボット1との間が最も大きい、最大で75 μm 程度であった。連結デバイスと電磁石コイルとの裕度100 μm よりも小さく、連結移動時に連結デバイスが電磁石コイルと接触することはないことが明らかとなった。

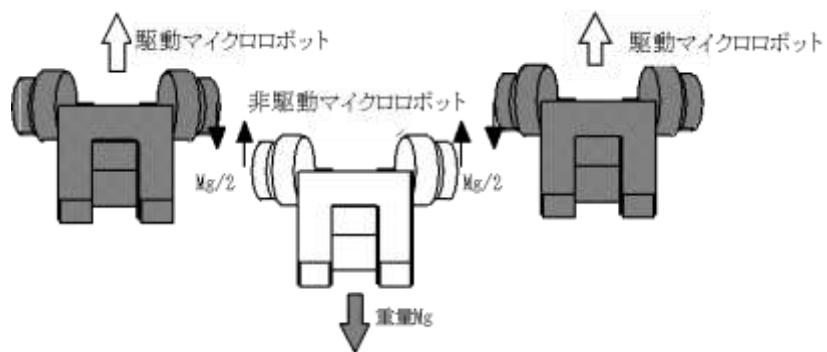


図 4.24 駆動マイクロロボットにより従動マイクロロボットが引き上げられる様子

これにより、3 台の駆動マイクロロボットで自重の 6 割程度の重量の非駆動マイクロロボット 7 台を垂直細管に沿って上下動させることが可能となった。10 台連結移動シミュレーション結果のアニメーション表示の一例を図 4.25 に示す。

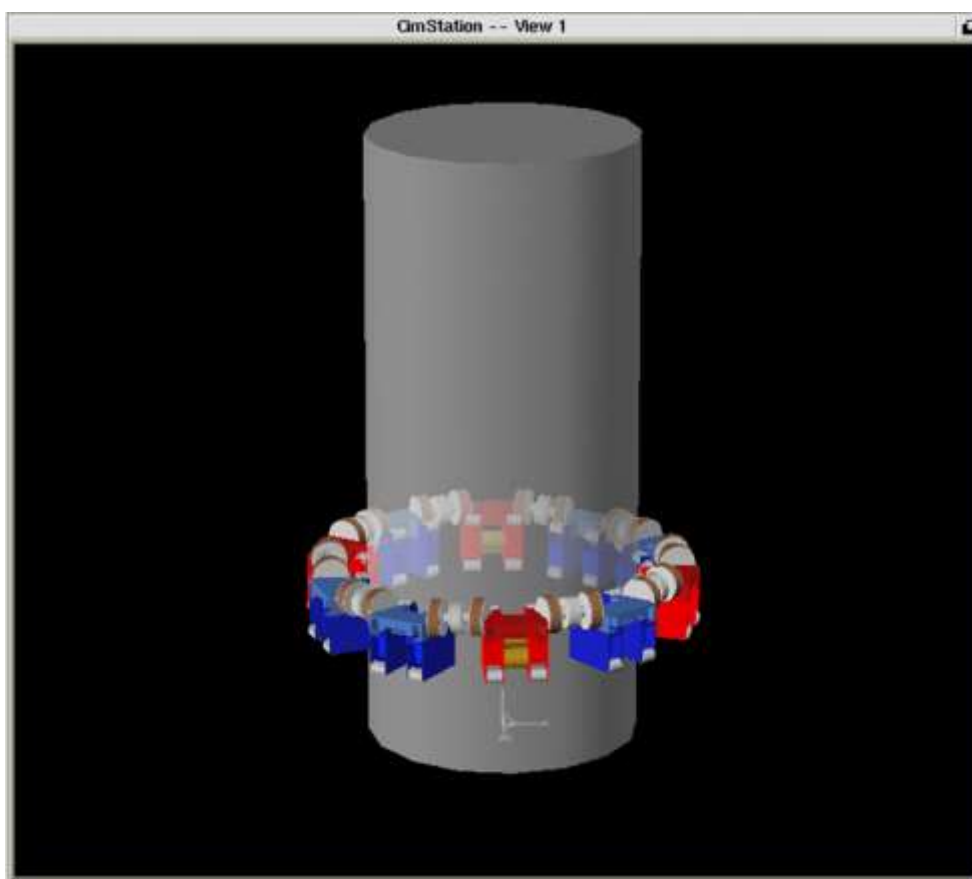


図 4.25 10 台連結移動シミュレーション結果一例(アニメーション表示)

4.4 磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能計測

4.4.1 マイクロロボット垂直走行性能評価システム

マイクロロボット垂直走行性能評価システムの構成を図 4.26 に示す。

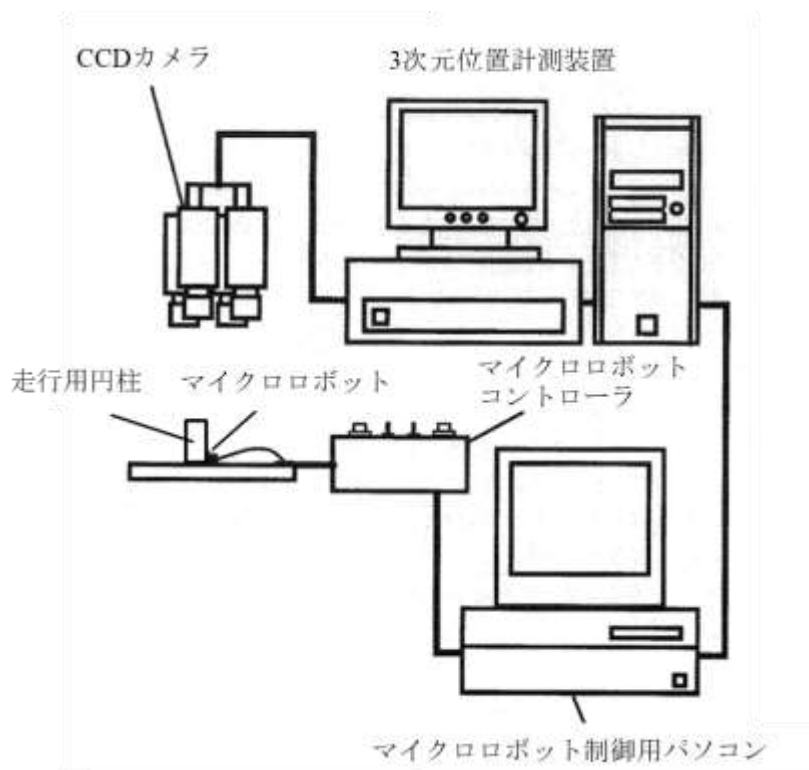


図 4.26 マイクロロボット垂直走行性能評価システム

このシステムは5つのパートから構成されている。まず、マイクロロボットの画像を取り込む4台のCCDカメラ、次にその画像から2つの色マークを抽出し、マイクロロボットの位置と向きを計測する3次元位置計測装置、そして、その位置情報をもとに制御プログラムを走らせ制御用信号を出力する走行マイクロロボット制御用パソコン、制御信号を受けマイクロロボットの駆動デバイスを駆動するためのマイクロロボットコントローラ、そして制御対象であるマイクロロボットとその走行用円柱である。CCDカメラは色マークを認識するためにカラーの3CCDカメラ（ELMO TN411）を使用し、有効画素数は768×494である。また、レンズは25mm, F1.4（酒井硝子エンジニアリング コンパクトITVレンズ）を使用した。10台のマイクロロボットの動きを同時に計測するため、CCDカメラを4台用いた。3次元位置計測装置は画像処理装置（OKK Quick MAGIV）とデータ処理用パソコン（EPSON DIRECT Endeavor Pro400）からなり、1/60のビデオレートで画像取り込みを行った。データ処理用パソコンと走行マイクロロボット制御用パソコン（NEX PC9821）の間はメモリンクで結び、リアルタイムのデータ受け渡しを行った。マイクロロボットコントローラは自作で、マニュアルモードと自動モードがあり、自動モー

ドでは制御用パソコンによってコントロールされる。また、色マークの直径は1 mm と小さいため、安定してマークを計測するために、外乱光の遮蔽と補助照明を使用した。なお、走行用円柱は磁性 SUS430 で直径約 23 mm，高さ 30 mm，表面あらさ 1s とした。

4.4.2 垂直走行性能評価用スキッドステア方式マイクロロボット

垂直単独移動性能を評価するための垂直単独移動用スキッドステア方式マイクロロボット（図 4.27）並びに 10 台連結状態での垂直走行性能を評価するための 10 台連結スキッドステア方式マイクロロボット(図 4.28)を試作した。

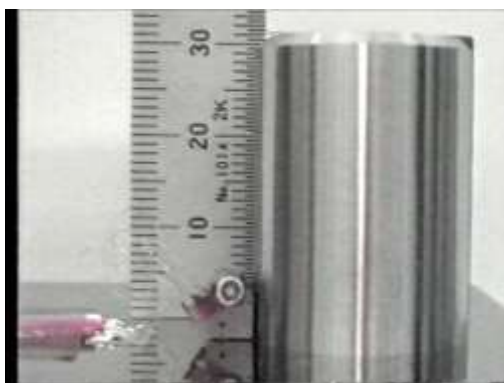


図 4.27 垂直単独移動用スキッドステア方式マイクロロボット



図 4.28 10 台連結スキッドステア方式マイクロロボット

上記スキッドステア方式マイクロロボットの基本構成は 1.3 節で述べた試作スキッドステア方式マイクロロボットと同じであるが、重量は駆動マイクロロボットが 0.508 g，連結マイクロロボットが 0.304 g で，下側（前輪）駆動輪の磁石吸着力は 7.1×10^{-2} [N]，上側従動輪の磁石吸着力は 1.1×10^{-2} [N] とした。垂直単独移動用スキッドステア方式マイクロロボットは垂直単独走行性能を評価するのが目的であるため，マイクロ連結デバイスはダミー品を搭載した。また，連結マイクロロボットは親機と子機 9 台のうち 2 台を駆動マイクロロボット，子機残り 7 台を動力のない非駆動マイクロロボットとし，電力は親機から供給した。

4.4.3 垂直走行性能計測結果

垂直単独移動用スキッドステア方式マイクロロボットの左右の駆動デバイスを同一回転数で駆動して、管壁を上昇、下降させたときの動きを図4.26のマイクロロボット垂直走行性能評価システムを用いて計測した。評価用マーカは3点とし、3次元の位置、姿勢を計測した。駆動デバイスの駆動電圧を0.5V、0.7V及び0.9Vの3種類とし、駆動デバイス回転数を種々変化（1200rpm～12000rpm、駆動輪回転数6rpm～60rpmに相当）させたときの上昇及び下降の動きを計測した。

測定結果から求めた駆動輪回転数と垂直方向の移動速度の関係を図4.29に示す。なお、下降は駆動輪回転数が負の値で示してあり、図中直線は車輪の回転速度の理論値、破線は測定結果を最小二乗法により、原点を通る直線に近似した結果である。また、駆動電圧0.5Vでは、30rpm以上で上昇できなかつたため、近似直線は示していない。図4.29より、駆動電圧0.5Vでは移動速度は上昇時では車輪の回転速度の理論値より遅く、下降時では速くなっているが、駆動電圧0.7V及び0.9Vでは両者の差異は殆どなく、移動速度は上昇時、下降時とも車輪の回転速度の理論値に近く、垂直走行に必要なかつ十分な走行性能が得られている。駆動電圧0.5Vでの速度が理論速度と一致しない原因として、駆動電圧が低くなると上昇時には必要なトルクが得られないため、駆動デバイスが回転と停止を瞬時に繰り返して見かけの回転速度が低下し、また、下降時には駆動デバイスが垂直マイクロロボットの自重を支えられないために駆動デバイスが余計に回転させられ、見かけの回転数が上昇したためと考えられる。

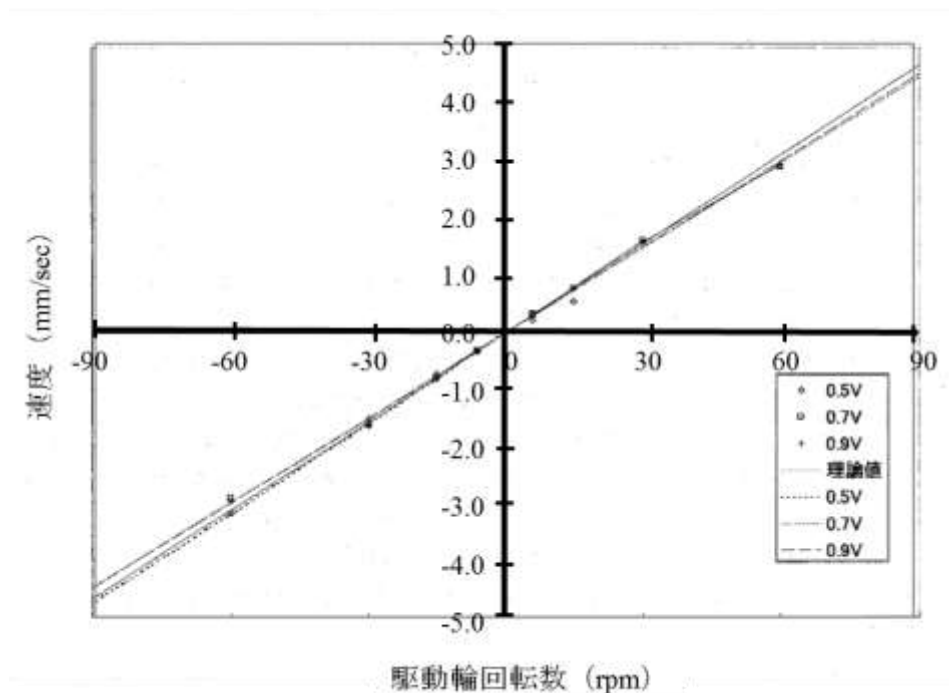


図 4.29 駆動デバイス回転数と垂直方向速度

4.4.4 垂直連結移動性能計測結果

図4.26に示したマイクロロボット垂直走行性能評価システムを用いて、10台のマイクロロボットが連結デバイスで連結されて管壁を上昇及び下降するときの連結移動性能を調べた。図4.30に測定時の10台連結マイクロロボットと計測用のマークの配置図を示す。

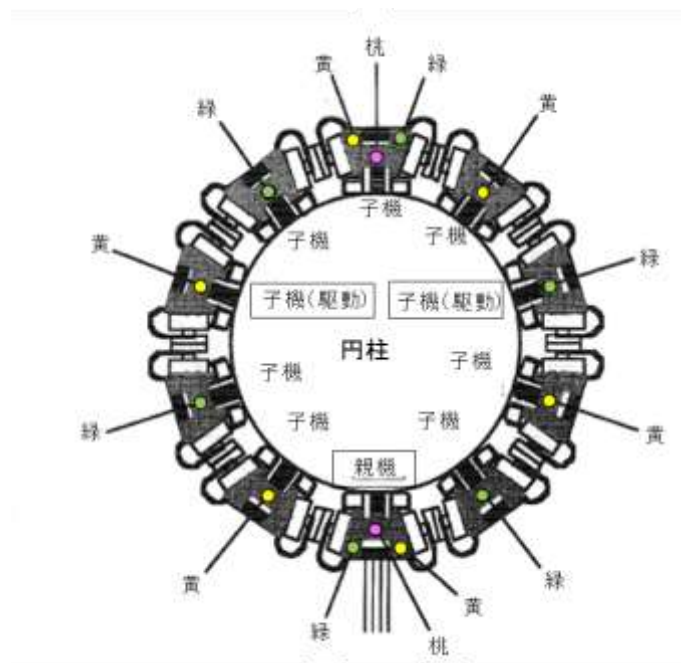


図4.30 10台連結マイクロロボット及び計測用マーク配置

図4.30に示すように、10台連結マイクロロボットの中で、駆動デバイスと減速・走行デバイスが組みこまれた移動可能な駆動マイクロロボットは、 \square で囲んだ電力の供給を受ける1台の親機と親機から連結デバイスを介して電力の供給を受ける2台の子機の3台である。親機とこれと対向するマイクロロボットに3個のマークを埋込んだ。3個のマークをこれらの2台のマイクロロボットに埋込んだのは、垂直走行時のマイクロロボットの姿勢変化を調べるためである。また、他の8台のマイクロロボットには、1個のマークを埋込み、これらのマークの色は、1台おきに色を変えるようにした。子機のマークをこのように選定したのは、3次元位置計測装置に入ってくる多数のデータを容易に処理できるようにするためである。実験は、親機と子機への電力供給時の周波数を106 Hz (磁石車輪の回転数に換算して約32 rpm) にして行った。

計測結果の一例として、10台連結マイクロロボットの垂直走行時のマークの軌跡を図4.31に示す。図4.31(a)が上昇時の軌跡を、同図(b)が下降時のそれを示す。図4.31から10台が連結して移動するときの位置の変化が計測できていることが分かる。また、図4.31(b)の太い矢印で示した箇所、軌跡が広がっているが、これは、ステージに到達した後もマイクロロボットが駆動されているために、ステージ上で車輪が空転し、マイクロロボットが振動していることによる。

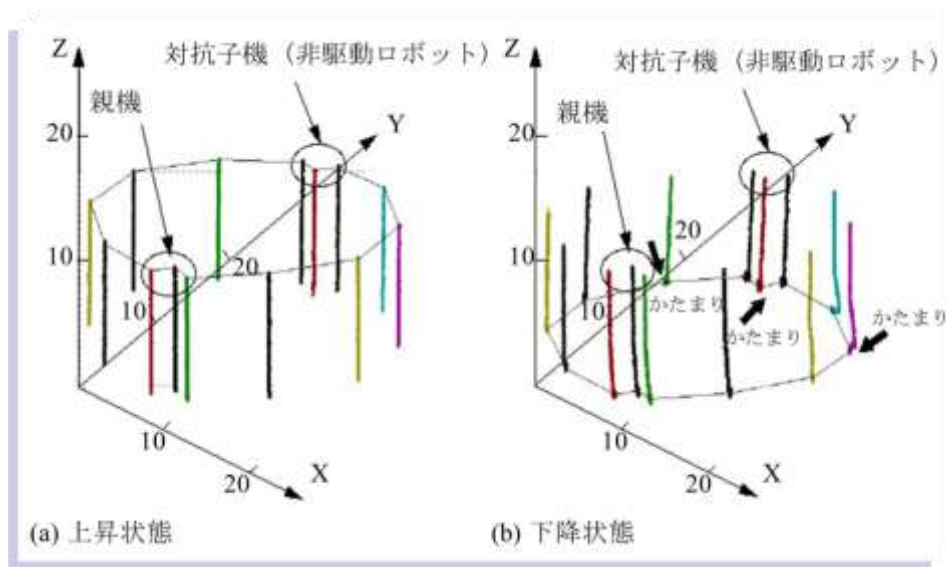


図 4.31 連結垂直移動時のマークの軌跡

図 4.31 に示した結果を基に、垂直連結移動時の位置と速度の変化を調べた。図 4.32(a)に、上昇時の 10 台のマイクロロボットの位置の測定結果を、図 4.32(b)に下降時のそれを示す。なお、X 軸は円柱の接線方向、Y 軸は円柱の半径方向、Z 軸は円柱の軸方向を表している。図 4.32(a)と同図(b)を比較すると、上昇時及び下降時ともステージの面内 (X 及び Y 方向) では、位置はほとんど変化していないことが分かる。また、図 4.32(b)から下降時には、約 6 秒で Z 方向の位置が変化せず、この時間の経過後には、マイクロロボットがステージの下面に到達していることが分かる。

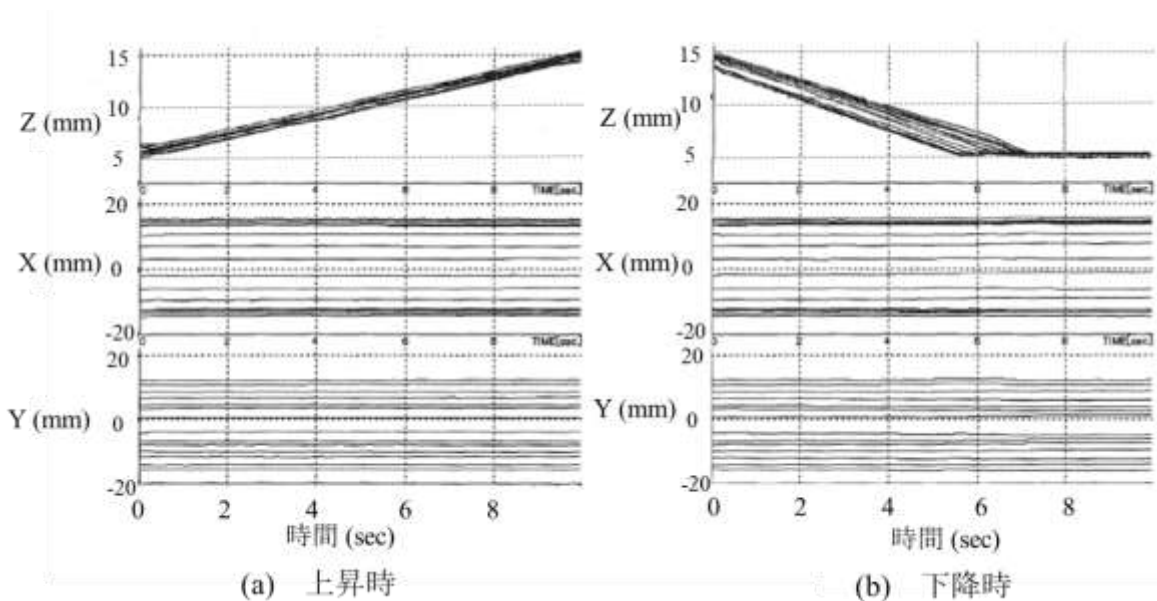


図 4.32 10 台のマイクロロボットの位置の測定結果

図 4.33(a) に、上昇時の各マイクロロボットの速度を、同図(b) に、下降時のそれを示す。図 4.33(a)と同図(b) を比較すると、下降時の Z 方向の速度は、上昇時のその 2 倍程度大きくなっており、図 4.32 に示したマイクロロボットの位置の測定結果と良く一致していることが分かる。すなわち、下降時には、速度が上昇時と比較して大きいため、短時間でステージ面に到達し、マイクロロボットの位置が 6 秒を越えると変化しなくなることを示している。図 4.33(b) で、下降時に X, Y, Z 方向とも約 6 秒の時間の経過後に速度が大きく変動しているが、これは、マイクロロボットがステージに到達して、振動しているためと考えられる。また、Y 方向の速度変化は他の 2 方向と比較して小さいが、これは、マイクロロボットの移動が管壁によって規制されていることによる。図 4.33(a)と同図(b)から、時間が 0~1 秒の時間の範囲で、3 方向の速度変動が大きくなっていることが分かる。また、0~6 秒の範囲の各方向の速度を比較すると、下降時よりも上昇時の方が速度の変動の割合が大きい。これは、上昇時には、それ自身は駆動できない 7 台の子機を持ち上げるために、負荷が大きくなっているため、下降時と比較してマイクロロボットが傾き易くなることによると考えられる。このような速度変動や姿勢の変化は、磁石車輪のガタなどの影響により、移動の初期に発生し易くなっていることに起因すると推測され、連結垂車走行性能の改善を図るためには、姿勢が変化し難い磁石車輪の形状を検討する必要があることが分かった。

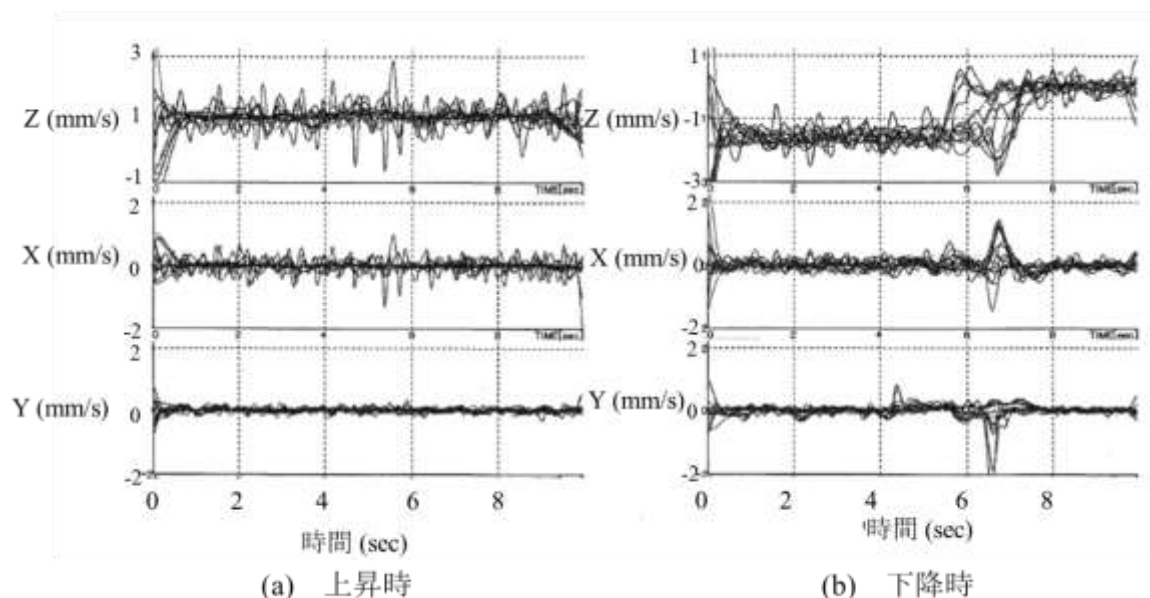


図 4.33 10 台のマイクロロボットの速度の測定結果

4.4.5 細管吸着時の磁石吸着力

細管への円筒型磁石車輪の接地状態を図 4.34 に示す。

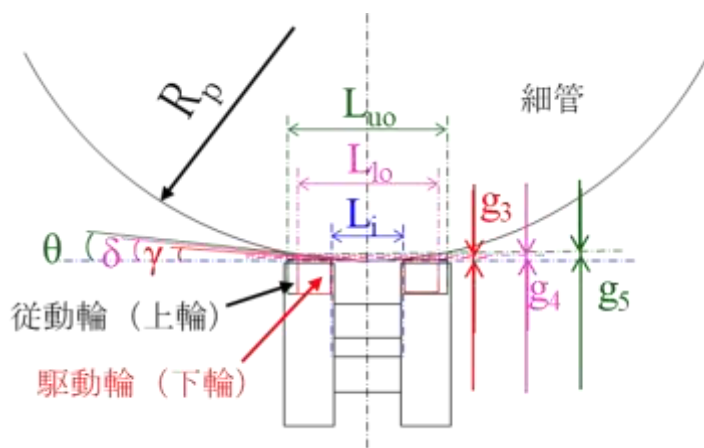


図 4.34 細管への円筒型磁石車輪の接地状態

細管にマイクロロボットが吸着した状態では、左右の磁石車輪の内側が細管表面に接触し、磁石車輪の外側と細管との間にギャップが発生する。また、駆動輪は減速・走行デバイスとギアで接続する必要があるため、車輪長は 1 mm に設計したが、従動輪はギアとの接続が不要なため、減速・走行デバイスの幅 (1.5 mm) に納めるように、車輪長は 1.3 mm に設計された。左右の磁石車輪の内側間隔を L_i (2.2 mm)、左右駆動輪 (下輪) の磁石間隔を L_{lo} (4.2 mm)、左右従動輪 (上輪) の磁石長さを L_{uo} (4.8 mm)、細管の半径を R_p (半径 11.5 mm)、とすると、細管最下面から磁石車輪内側と細管との接点の角度を γ 、ギャップを g_3 、細管最下面から下輪外側と細管までの鉛直交点の角度を δ 、ギャップを g_4 、細管最下面から上輪外側と細管までの鉛直交点の角度を θ 、ギャップを g_5 、とすると式(4.51)により、それぞれのギャップが計算できる。

$$\begin{aligned}
 R_p \sin \gamma &= L_i / 2 \\
 R_p - R_p \cos \gamma &= g_3 \\
 \therefore g_3 &= R_p (1 - \cos \gamma) \quad \gamma = \sin^{-1}((L_i / 2) / R_p) \\
 R_p \sin \delta &= L_{lo} / 2 \\
 R_p - R_p \cos \delta &= g_4 \\
 \therefore g_4 &= R_p (1 - \cos \delta) \quad \delta = \sin^{-1}((L_{lo} / 2) / R_p) \\
 R_p \sin \theta &= L_{uo} / 2 \\
 R_p - R_p \cos \theta &= g_5 \\
 \therefore g_5 &= R_p (1 - \cos \theta) \quad \theta = \sin^{-1}((L_{uo} / 2) / R_p)
 \end{aligned}
 \tag{4.51}$$

$$\gamma = \sin^{-1}(L_i / (2 * R)) = \sin^{-1}2.2 / (2 * 11.5) = 5.49 \quad \therefore g_3 = 11.5(1 - \cos 5.49) = 0.053$$

$$\delta = \sin^{-1}(L_{lo} / (2 * R)) = \sin^{-1}4.2 / (2 * 11.5) = 10.52 \quad \therefore g_4 = 11.5(1 - \cos 10.52) = 0.193$$

$$\theta = \sin^{-1}(L_{uo} / (2 * R)) = \sin^{-1}4.8 / (2 * 11.5) = 12.05 \quad \therefore g_5 = 11.5(1 - \cos 12.05) = 0.253$$

下輪のギャップは $g_4 - g_3 = 0.14$ 、上輪のギャップは $g_5 - g_3 = 0.2$ となる。このように、細管への垂直移動では、磁石車輪と細管は片当り状態で移動するため、磁石吸着力の減少を考慮する必要

がある。3倍モデルで考えても、ギャップは同じであるため、図2.23の片当りの磁石吸着力とギャップの関係から、細管への吸着力は下輪も上輪も設定した円筒型磁石の約1/2に減少する。

シミュレーションでは、磁石吸着力を外部入力値として、個別に与えていたため、このような片当りによる磁石吸着力は考慮されていなかった。実際の試作においては、このような現象に気が付いていなかったため、4.3.1項において、上輪は 3.4×10^{-3} [N]、下輪には 8.25×10^{-3} [N]以上の磁石吸着力を加えれば垂直移動が可能であったが、この磁石吸着力では移動ができなかったため、安全を見越して、下輪はフル着磁相当の 7.1×10^{-2} [N]、上輪に関しては、試行錯誤から 1.1×10^{-2} [N]の設定を行っていた。

4.5 結言

本章では、第3章で導出した動力学モデルの3次元化を行い、磁石車輪駆動マイクロロボットの壁面走行における動力学の解析を行い、壁面走行に必要な磁石吸着力の条件等を求めた。また、細管の周囲に位置する10台のマイクロロボットが連結し、連結した状態を保ちながら上昇・下降する状況を模擬する複数個連結移動シミュレータを開発し、複数個連結移動の条件を明らかにした。複数個連結移動の場合には、連結デバイスによるフープ力、隣接するマイクロロボットからの負荷や細管吸着時の磁石車輪と細管に発生するギャップによる吸着力の低下等を考慮する必要があることを明らかにした。さらに、試作スキッドステア方式マイクロロボットによる、スキッドステア方式マイクロロボット単独での垂直走行性能及び10台連結移動での垂直走行性能について評価し、3台の駆動マイクロロボットで自重の6割程度の非駆動マイクロロボット7台を垂直細管に沿って上下動させられることを示し、その有効性を明らかにした。

第5章 結論

5.1 結論

本論文では、スキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪における定常状態のすべりに関して明らかにした。そして、その結果をもとに、水平及び垂直移動が可能なミリメートルサイズのスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの実現可能性を示した。

まずは、磁石車輪の動力学として、車輪座標系と磁石車輪に作用する力、磁石車輪の運動学とすべりを考慮した動力学及び4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットにおける作用力について詳述した。また、磁石車輪の基礎特性として磁石車輪吸着力の計測及び解析を行い、磁石車輪を用いる場合には、磁石車輪形状や対象物形状により発生するギャップを考慮する必要があることを明らかにした。さらに、これまですべり特性が明らかでなかったSmCo磁石車輪のすべり特性を計測し、SmCo磁石車輪のすべり特性は、タイヤ車輪や鉄道車輪のすべり特性と異なること及び点接触する樽型磁石車輪の方が線接触する円筒型磁石車輪と比較し、すべり特性が安定していることを明らかにした。

次に、磁石車輪の動力学やすべり及び磁石吸着力の効果を考慮した車輪式移動ロボットの運動学及び動力学の定式化をベースに4輪スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行動力学モデルを構築した。また、計測したSmCo磁石車輪のすべり特性を踏まえて構築したすべりを考慮したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの水平走行シミュレータを用いて、駆動輪と従動輪への磁石吸着力の配分、磁石吸着力の効果、タイヤ車輪すべり特性と磁石車輪すべり特性の比較等について考察し、定常状態での旋回性能を向上させるためには、磁石車輪すべり特性を活かすように、従動輪の磁石吸着力を駆動輪の1/9程度にすることが有効であることを示した。さらに、試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットを用いた定常旋回性能の計測結果について、シミュレーション結果とも比較しながら考察し、構築したすべりを考慮した車輪の動力学モデルが妥当であることを実証した。

また、スキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能解析のための3次元動力学モデルを導出するとともに、単独及び複数個連結垂直移動シミュレーションによる垂直走行性能の解析を行った。その結果、細管等の曲率を有する壁面に対しては、磁石車輪と細管とのギャ

ップを考慮して、磁石吸着力を設計する必要があること及び複数個連結移動の条件について明らかにするとともに連結移動の場合には、連結デバイスによるフープ力や隣接するマイクロロボットからの負荷を考慮する必要があることを明らかにした。また、試作したスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの垂直走行性能の計測結果とシミュレーション結果の比較について検討し、その有効性を実証した。

以上のことから、本論文では、スキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪における定常状態のすべりに関して明らかにするとともに、水平及び垂直移動が可能なミリメートルサイズのスキッドステア方式磁石車輪駆動マイクロロボットの実現可能性を示せたと考える。

5.2 展望

本研究で、1996年から2000年のマイクロマシンプロジェクトで実施したスキッドステア方式マイクロロボットの磁石車輪におけるすべりに関して明らかにできたと考える。当時は理論的な解釈が完全にできず、試行錯誤的に研究開発を進めていたが、進めていたことが今回の研究で理論的にも妥当なものであったことが検証できた。本研究で用いたスキッドステア方式マイクロロボットは電源供給を有線で実施していた。最近は技術の進展により、小型のバッテリーや無線通信デバイス等の開発が進展し、完全自立型のマイクロ移動ロボットの実現もできるようになっている。また、群研究としてのマイクロ移動ロボットのニーズも起こってきており、本研究はこれらの一助になることを期待したい。

1987年に米国でシリコン基板上に機械部品である歯車が作製されてから発展してきたMEMS技術は、その成果として、ゲーム機のコントローラに搭載されている加速度センサ、自動車に搭載されている圧力センサ、加速度センサ、エアフローセンサやスマートフォンに搭載されているマイクロフォンやRFフィルタ等身近な製品の中にMEMSデバイスが入り込むようになってきた。しかし、現在実用化されているのは主に移動機能を持たないセンサ等の静的なデバイスであり、当初期待されたような広がりを持って発展したかということと必ずしもそうとは言えないと考える。特に、日本がいわゆるマイクロマシンプロジェクトとして、MEMS技術とは一線を画して、研究開発を行った移動機能を有するマイクロロボットに関しては、その技術的課題の多さから実現はこれまでできていなかったが、周辺技術の進展に伴って、ようやく環境が整ってきたように思う。マイクロ移動機構が実現できれば、パイプや種々機器内部の狭所での検査、清掃、輸送、セキュリティ、環境、健康・医療等の分野へマイクロロボットの応用はさらに拡大されると考える。実用的なマイクロ移動ロボットの発展に本研究が一助となることを期待したい。

付録

付録A 車輪式移動ロボットの運動理論

A.1 車輪式移動ロボットの運動理論

ここで取り上げる車輪式移動ロボットの運動理論は、築島ら [5]がマニピュレータの運動理論と自動車の運動理論を基礎として、多様な形態を持つ車輪式移動ロボットを統一的に一つの運動理論で扱うこと、車輪のすべりを定量的に処理することを目的として、2次元移動の運動理論の体系化を試みたものである。ここでは、その概要について紹介する。

(1) マニピュレータの運動理論

ここではまず、車輪式移動ロボットの運動理論の背景となるマニピュレータの運動理論と自動車の運動理論について簡潔に整理する。

一般的なマニピュレータの形態は、開ループ直列リンク機構と考えられる。関節を間に挟んで、ベースから複数の剛体リンクを経てエンドエフェクタまで、複数の剛体を直列に連結した機構と見ることができる。関節には拘束力が働くため、幾何的に運動の方向が決定され、運動学が成立する。高速に運動させる場合は、動力学まで考慮する必要がある。

動力学の運動方程式は、ラグランジェ法とニュートン・オイラー法からそれぞれ導かれる。ラグランジェ法は、一般座標として各関節の関節変数をとることで、いわゆる「閉じた形式」で最終的な式が得られる。一方、ニュートン・オイラー法では、各リンクに対して導き出した運動方程式から漸化的に解を得る。

(2) 自動車の運動理論

自動車をはじめとして航空機、船舶などの移動物体の運動方程式は、それらの移動物体自身に固定した座標系において導かれる。このとき外力として、ある運動状態における入力と力の関係式を導く。自動車の場合、タイヤ車輪の特性理論がこれにあたり、入力と移動物体の運動との間の基本関係式を得る。この運動方程式は、移動物体を一つの剛体と仮定して導出される。

自動車に関しては、従来から極低速時という限定された条件下において、各車輪の車輪面の方向と旋回中心との間に幾何的な関係が存在するものとして、車両の運動を運動学的に扱ってきた。これは、一般に「アッカーマン・ジャントー理論」と呼ばれている。

(3) 車輪式移動ロボットの運動理論

車輪式移動ロボットの運動理論は、マニピュレータと自動車の運動理論のそれぞれの特徴を合わせ持つ。はじめに、マニピュレータと自動車の運動理論に対する、車輪式移動ロボットの運動理論の共通点について整理する。

- マニピュレータとの共通点
 - ・ 剛体リンクの集合体としてモデル化する。

- ・ 多様な形態を統一的な理論として取り扱う.
- 自動車との共通点
 - ・ 地面と車輪の間に働く摩擦力で2次元移動を行う.
 - ・ 移動範囲が2次元の基準座標系の中で制限されない（基準座標系に固定されていない）.

一方、これらの2つの運動理論と際だって異なる特徴に関しても、以下のように整理することができる.

- マニピュレータと異なる点
 - ・ ベースから見て末端が複数ある.
 - ・ 一般に「作業空間」と「関節空間」の関係式とはならない.
- 自動車と異なる点
 - ・ 高速での運動は想定していない.
 - ・ 四輪車に限定されない.
 - ・ 自動車の理論は自動車を一つの剛体と見た運動方程式である.

車輪式移動ロボットの特徴は、以下のようにまとめることができる.

- 1) 基準座標系に対し、固定点をもたないこと.
- 2) 車輪と地面の間の摩擦力が必要不可欠であること.
- 3) マルチリンクと車輪の連立システムであること.
- 4) 駆動関節、非駆動関節、固定関節の三種類が混在していること.

A.2 マルチリンクの運動理論

車輪式移動ロボットには多様な形態が存在する. しかし、それらを構成する要素間の関係に注目すれば、いずれも木構造 (Tree Structure) により表現することが可能である. 車輪式移動ロボットを、剛体リンクと車輪からなり、木構造を持つ「マルチリンク」としてモデル化する.

ここで考える車輪式移動ロボットは、自動車のように高速で走行するわけではないので、 z 方向の関する並進や、ピッチング、ローリングの回転運動は、無視できるものとして、平面運動のみに限定する. すなわち x 方向及び y 方向の並進と、 z 軸回りの自由度のみを考慮する.

(1) モデルの構造

築島ら [5]が検討している図 A.1 のモデルを例にマルチリンク構造を考える. 図 A.1 (a)

の移動ロボットは、合計 8 つの駆動輪を持ち、3 つの剛体リンク間の関節の回転により運動を行う。木構造の考え方に従い、図 A. 1 (b) のように分解する。本体であるリンク 3 とリンク 4 及びリンク 9 との間には非駆動関節が存在し、これらのリンクはいわゆる親子関係にある。またリンク 4 とリンク 9 はそれぞれ 4 つの駆動輪が固定関節により連結されている。これらの関係から図 A. 1(c) のツリー図を描くことができる。

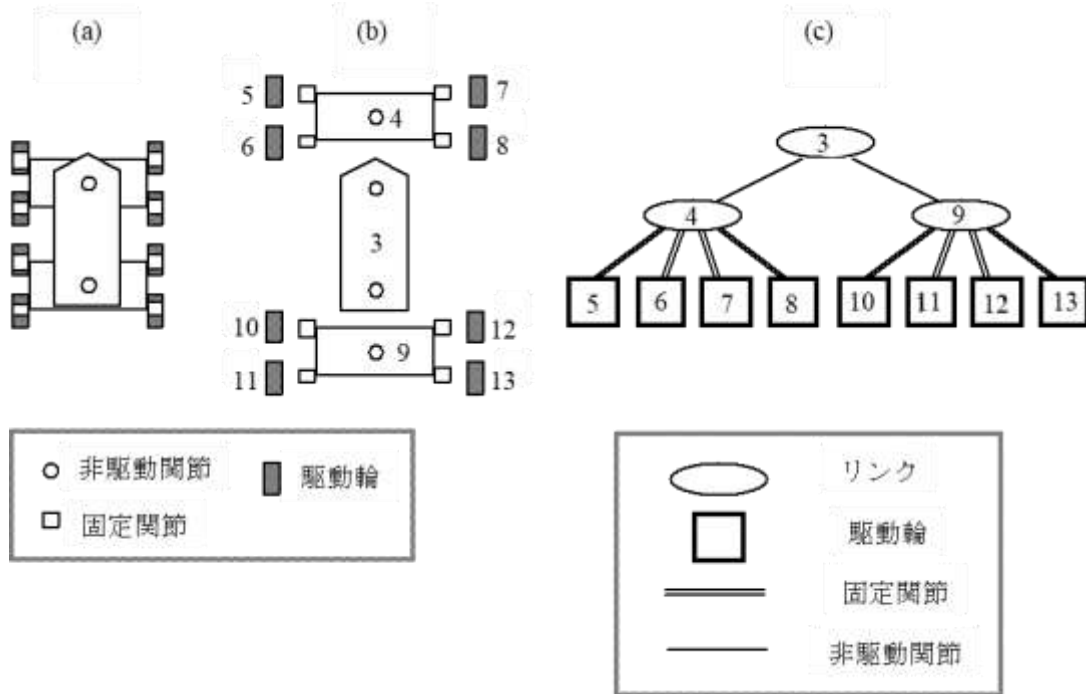


図 A. 1 木構造

(2) 構成要素

図 A. 1 に示した要素のほか、自動車というステアリング（操舵角）にあたる駆動関節や、キャスターのような非駆動輪（従動輪）も、木構造に表れる構成要素である。

マルチリンクを構成している各構成要素について説明する。

① リンク

リンクは図 A. 2 に示すように剛体リンクと車輪の総称である。車輪式移動ロボットは、木構造（親子関係）を持ち、剛体リンクと車輪から構成される。

リンクにはそれぞれに対してローカル座標系が定義される。リンク i の座標系は以下の手順に従って定める。原点は関節 i にとる。ベースではベース自身の重心にとる。走行平面に垂直上方を正として z 軸をとる。可動関節では z 軸と回転軸は一致する。ベースを含むリンクの x 軸は、任意に決定することができるが、効率よく計算できるよう考慮して選ぶ。基準座標系（グローバル座標系）の x 軸と、リンク固定のローカル座標の x 軸のなす角をリンク

の姿勢と表現する。

ある瞬間のリンク間の相対的な位置関係の軌跡がマルチリンクの運動と言える。

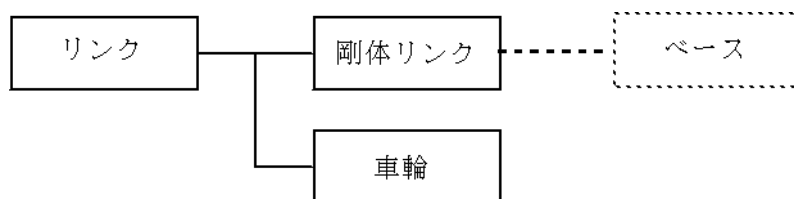


図 A.2 リンクの種類

② ベース

マルチリンクの運動では、マルチリンクを構成するすべてのリンク・車輪の位置姿勢が問題になるのではなく、ある特定のリンクのみが興味の対象となる。したがって、それ以外のリンクの情報は、必要に応じて求めればよい。このような特定のリンクをベースと呼ぶ。ベースは剛体リンクの中の特別な存在であり、マルチリンクの木構造は、ベースを頂点として、全ての末端に車輪が位置する形で構成される。図 A.1 の例ではリンク 3 がベースにあたる。

運動学、動力学の基本式は、関節の回転成分である関節変数を未知量として求解するが、ベースについてはその基準座標系における位置が問題であり、ベースの x 方向 y 方向の並進成分も基本式に取り込まれる。リンクの番号はベースの 3 から始まり、末端へと付けられる。これはベースの並進の変数に対して、番号 1 と 2 を割り付けるからである。

③ 車輪

車輪の存在が、マルチリンクの運動理論とマニピュレータの運動理論を異なるものにしていく。マルチリンクでは、木構造の末端は必ず車輪となる。車輪の座標系は、z 方向は走行平面に垂直上方を正とし、車輪面の方向を x 軸とする。

車輪の速度はローカル座標系で求められ、スリップ率、スリップ角の計算に使用される。

④ 関節

剛体リンクと、剛体リンクあるいは車輪間を、マルチリンクの「関節」と呼ぶ（図 A.1 (c)参照）。

関節は図 A.3 のように分類することができる。自動車でステアリング角（操舵角）と呼ばれてきた、操舵車輪と車両（剛体リンク）の間の角度も、マルチリンクの関節角として扱うことになる。キャスターの回転角も、連結車両の間の角度も、マルチリンクの関節角である。操舵角のように駆動可能な関節を「駆動関節」、キャスターの回転角のように駆動されず自由に動くことのできる関節を「非駆動関節」と呼ぶ。この二つの関節をあわせて、「可動関節」と呼ぶことにする。

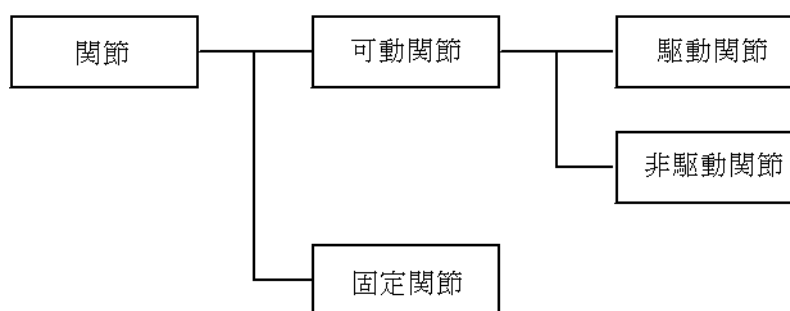


図 A.3 関節の分類

一方、操舵をすることがない車輪と剛体リンクの間も、マルチリンクの関節として取り扱われる。この関節を「固定関節」と呼ぶことにする。固定関節は、固定されているので自由度はない。いわば、モデル化の際に取り入れられた仮想的な自由度である。最終的には、これを消去して実際の自由度の式を得る。

マルチリンクの「関節変数」とは各関節の回転角度のことである。

全ての関節変数の値が決定し、基準座標系に対してあるリンク（ベース）の位置姿勢が判ればマルチリンクの関節角から残りのすべてのリンク・車輪の位置姿勢を求めることができる。この求め方はマニピュレータの場合と全く同様である。

(3) 運動理論

車輪式移動ロボットの運動理論では、マルチリンクの運動方程式を立て、車輪の車軸回りの回転運動方程式を考慮し、最終的にそれらを連立した形で、車輪式移動ロボットの運動方程式を得ることができる。運動学についても、全く同様の段階を経て基本式まで至る。ここではまず、マルチリンクの運動学及び動力学についてその理論体系について考察する。

① マルチリンクの運動学

マルチリンクの運動学を考える上で、マニピュレータの理論体系と大きく異なる以下の二点を考慮する必要がある。

- 基準座標系に対し固定点を持たないこと
- 一つのベースに対して、末端が複数存在すること

まず、基準座標系に対し固定点を持たないことに関して検討していく。

マルチリンクでは、ベースの位置姿勢が特定できれば、各関節の角度から全ての剛体リンク、車輪の位置姿勢を求めることが可能である。そのとき、固定点を持つマニピュレータにおいては、まず関節角と位置姿勢の関係が成立し、その微分としてヤコビ行列が導入されたが、基準座標系に対して固定点を持たないマルチリンクでは、ベースの位置姿勢自身は時間積分の形で表現されることになる。マルチリンクでは、速度についての関係としてヤコビ行列がまずあり、その積分として位置姿勢が求められることになる。

次に、1つのベースに対して、末端が複数存在することを考える。

マルチリンクは、複数の末端を持つが、1つの末端に対しては、ベースとの関係は直列リンクとして考えられ、固定点を持たないマニピュレータと同様な式が、末端の車輪に対して成立する。ところが、車輪式移動ロボットにおいて、興味の対象となるのはベースの位置姿勢であるため、前述の式がベースの位置姿勢を左辺として変形される。これらの式が車輪の数だけ存在する。

ベースの運動と関節の角速度から末端側の運動を求める運動学を「外向き運動学」、逆に末端側の運動と関節の角速度からベースの運動を求める運動学を「内向き運動学」として分けて考える。ベースが一つに対し末端が複数であるため、本質的には同一のはずのこれらの式が、結果的に異なった内容を表現してしまうことになる。

② マルチリンクの動力学

マニピュレータと同様に、内部に拘束力の働く系では、ラグランジェの運動方程式が有効であるが、マルチリンクの末端に位置する車輪には、粘性抵抗力である地面との摩擦力が働くため、ラグランジェの運動方程式を得るには、非線形の散逸関数を考えなければならない。したがって、ここでは、ニュートン・オイラー法により運動方程式を導く。

マニピュレータの運動理論において、ニュートン・オイラー法による運動方程式は、漸化形式で表現できるため、計算効率という点で非常に有効であった。駆動関節が可動関節よりも少ないことは、マルチリンクの特徴の一つに挙げられるが、そのためマルチリンクのニュートン・オイラー法では、一般に漸化形式のままでは計算できない。ここでは、前向き漸化式と後向き漸化式を考慮し計算する。

前向き漸化式は、各関節に角加速度が与えられたときに、ベースから末端に向かって順番に、各リンクの重心の加速度を求めていくものである。これにより各リンクに働く全外力及び全モーメントを求めることができる。すなわち、関節の結果からリンクの計算へ、ベースから末端という順序で計算する。

逆に後向き漸化式は、末端からベースの方へ向かって、各リンクの力、モーメントの釣合式を用いて関節に働く力、モーメントを求めていくものである。あるリンクにおいて、末端側の関節に働く力、モーメントは、一つ前のリンクの計算より与えられている。さらに、前向きの漸化式により全外力、全モーメントも既に与えられているため、ベース側の関節に働く力、モーメントを計算することができる。すなわち、リンクの結果から関節の計算へ、末端からベースの順序で計算する。

非駆動関節では、その関節で必要とされるトルクの計算ができたとしても、実際にそのトルクを得ることができない。可動関節すべてに角加速度を自由に設定すれば、モーメントの釣り合わないリンクが生じてしまう。これは、可動関節の角加速度間に拘束条件があることを意味しており、この拘束条件は、非駆動関節を持つリンクのモーメント釣合式で表現され

る。運動方程式は、拘束条件を満たしながら解かなければならないので、結局、連立方程式で計算することになる。

A.3 車輪の運動理論

2次元移動は移動面との摩擦によって可能となるため、車輪式移動ロボットは何らかの形で必ず接地部分を有する。この摩擦力の取り扱いにより、車輪の運動学と動力学は異なった立場をとる。

(4) 車輪の運動学

車輪のすべりと摩擦力の関係は非線形であり、すべりが零付近の力の勾配は極めて急峻で、正から負へ（負から正へ）と符号を変える。摩擦力を拘束力として見なすということは、この原点付近の力の勾配を無限大として扱うことである。勾配が無限大なので、すべりが零でも力は生じるし、逆に力がある大きさを越えない限りはすべりを生じない。

摩擦力を拘束力として近似した場合は、車輪の車軸方向の並進が許されず、進行方向の並進と鉛直方向の回転のみという拘束条件が成立する。従って車輪の運動学を考えることができる。その代わりすべりはないものとして無視される。

(5) 車輪の動力学

すべりを考慮するためには、摩擦力を拘束力として扱うことはできない。動力学では接地部分に働く摩擦力を、非線形の粘性抵抗力としてそのまま扱う。

運動学の場合のように、車輪の運動を車輪ごとにローカルに決めることは不可能である。車輪の平面運動に関する運動方程式は、マルチリンクの末端の平面運動として扱われ、マルチリンクの運動方程式の中に含まれる形となる。そのため、各車輪でのローカルな運動は、車軸回りの回転運動だけである。したがって、車輪の動力学では、車軸回りの回転角を車輪の関節角として、車軸回り運動方程式のみを考えることになる。

A.4 定式化

ここまで車輪式移動ロボットの運動理論の基本的な考え方が示された。ここではマイクロロボットシミュレータに適用された動力学モデルについて、具体的に数式を展開していく。

(6) 運動方程式

① 基本式導出の準備

マルチリンクの運動方程式の導出に際しては、文献 [5]で説明された以下の基本的な知識を要する。これらについての詳細は割愛する。

- 座標系の設定
- 各リンクへの名前付け

- リンク間の関係・集合のルール
- 変数の表記法

② ベクトル配列

マルチリンクの木構造は、車輪式移動ロボットに形態により、様々な構造となる。この木構造を行列の形式で表現するため、「表現行列」 $[\varepsilon]$ (式(A.1))を導入する。

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_{ij}]$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1: \text{if } J \in E_{3i} \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式 (A.1)}$$

N個のリンクからなるマルチリンクでは、行列の添字を表すi, jは、リンクの番号にしたがい、 $3 \leq i, j \leq N+2$ とする。

例としてリンク数5の木構造のマルチリンクとその表現行列を図A.4示す。リンク3をツリーの頂点として子供リンクが存在し、従動輪7がリンク6の子供となっている例である。

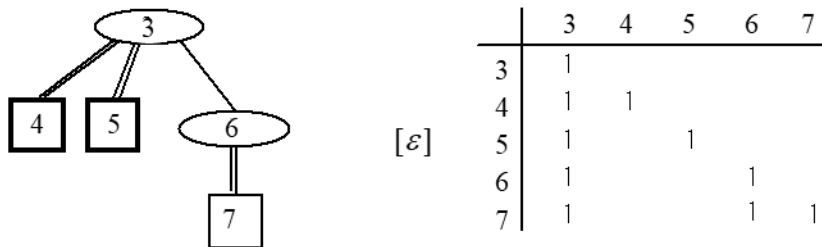


図 A.4 表現行列の例(リンク数5)

次にベクトルが要素となっている配列を二つ定義する。これらの配列は、前述の表現行列で1の入った要素に、それぞれベクトルが入ったものである。これらを「ベクトル配列」と呼ぶことにする。

$$[p] = [p_j^i]$$

$$p_j^i = \begin{cases} p_{uj(i)-j} : \text{if } J \in E_{3i} \text{ and } J \neq i \\ p_{i^*-j} : \text{if } J = i \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式 (A.2)}$$

$$[a] = [a_j^i]$$

$$a_j^i = m_i \cdot p_j^i \quad \text{式 (A.3)}$$

p_{j^*} : リンク i の重心位置ベクトル

\mathbf{p}_i : リンク i の座標原点位置ベクトル

\mathbf{p}_{i^*j} : リンク j の座標原点からリンク i の重心までのベクトル

\mathbf{p}_{ij} : リンク j の座標原点からリンク i の座標原点までのベクトル

m_i : リンク i の質量

同じくこれらの二つの「ベクトル配列」の例を以下に示す.

		3	4	5	6	7
[p]	3	\mathbf{p}_{3^*-3}				
	4	\mathbf{p}_{4-3}	\mathbf{p}_{4^*-4}			
	5	\mathbf{p}_{5-3}		\mathbf{p}_{5^*-5}		
	6	\mathbf{p}_{6-3}			\mathbf{p}_{6^*-6}	
	7	\mathbf{p}_{7-3}			\mathbf{p}_{7-6}	\mathbf{p}_{7^*-7}
		3	4	5	6	7
[a]	3	$m_3 \cdot \mathbf{p}_{3^*-3}$				
	4	$m_4 \cdot \mathbf{p}_{4-3}$	$m_4 \cdot \mathbf{p}_{4^*-4}$			
	5	$m_5 \cdot \mathbf{p}_{5-3}$		$m_5 \cdot \mathbf{p}_{5^*-5}$		
	6	$m_6 \cdot \mathbf{p}_{6-3}$			$m_6 \cdot \mathbf{p}_{6^*-6}$	
	7	$m_7 \cdot \mathbf{p}_{7-3}$			$m_7 \cdot \mathbf{p}_{7-6}$	$m_7 \cdot \mathbf{p}_{7^*-7}$

③ ニュートン・オイラー運動方程式

平面マニピュレータの漸化形式ニュートン・オイラー方程式から出発して、マルチリンクの運動方程式を導出する. 平面マニピュレータの前向き漸化式は式(A.4)で示される.

$$\begin{aligned}
 \dot{\boldsymbol{\theta}}_i &= \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} + \dot{\mathbf{q}}_i \\
 \ddot{\mathbf{p}}_i &= \ddot{\mathbf{p}}_{i-1} + [z_x] \cdot \mathbf{p}_{i-(i-1)} \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} + [z_x]^2 \cdot \mathbf{p}_{i-(i-1)} \cdot (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1})^2 \\
 \ddot{\mathbf{p}}_{i^*} &= \ddot{\mathbf{p}}_i + [z_x] \cdot \mathbf{p}_{i^*-i} \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i + [z_x]^2 \cdot \mathbf{p}_{i^*-i} \cdot (\dot{\boldsymbol{\theta}}_i)^2 \\
 \mathbf{F}_i &= m_i \cdot \ddot{\mathbf{p}}_{i^*} \\
 \mathbf{N}_i &= \mathbf{I}_{ij} \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i
 \end{aligned}
 \tag{A.4}$$

この式(A.4)から以下の手順に従い式を展開していく.

- (i) \mathbf{F}_i の式に $\ddot{\mathbf{p}}_{i^*}$ を代入する. さらに $\ddot{\mathbf{p}}_i, \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i$ を順に代入して 0 から i 番目までの関節の寄与を明らかにし, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_i$ と $\dot{\mathbf{q}}_i$ で整理する.
- (ii) (i) をもとにマルチリンクで考える. ベースの並進成分を代入し, リンク i に働く全外力の式を得る.
- (iii) さらに, リンク i を含めた子孫リンク全体まで考慮して, 全外力の式を得る.

次に、マルチリンクのリンク i での力及びモーメントの釣り合いから、ニュートン・オイラー方程式の後向き漸化式は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_i &= \mathbf{m}_i \cdot \ddot{\mathbf{p}}_{i*} \\
 \mathbf{N}_i &= \mathbf{I}_{ij} \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i \\
 \mathbf{F}_i &= \begin{cases} \mathbf{f}_i - \mathbf{f}_{ci} & : \text{if } i \notin W \\ \mathbf{f}_i + \bar{\mathbf{f}}_i & : \text{if } i \in W \end{cases} \\
 \mathbf{N}_i &= \begin{cases} n_i - n_{ci} + (-\mathbf{p}_i^i \times \mathbf{F}_i) - \sum_{j \in ci} (\mathbf{p}_i^j \times \mathbf{f}_j) & : \text{if } i \notin W \\ n_i + \bar{n}_i & : \text{if } i \in W \end{cases}
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

- (iv) 式(A.5)の \mathbf{F}_i に関する式を展開する。
(v) (iii)の式を(iv)に代入し、ベースの並進運動の式である式(A.6)を得る。

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{m}_{\bar{D}_3} \cdot \mathbf{i}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_1 + (\mathbf{m}_{\bar{D}_3} \cdot \mathbf{j}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_2 + \sum_{k \in \bar{D}_3} \{ [z_x] \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_k}^{\bar{D}_3} \} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_k \\
 + \sum_{k \in \bar{D}_3} \{ [z_x]^2 \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_k}^{\bar{D}_3} \} \cdot (\dot{\mathbf{q}}_{E_{3k}})^2 - \bar{\mathbf{f}}_{\bar{D}_3} = \mathbf{0}
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

- (vi) 次に車輪を除くリンクに関するモーメントの式を展開し、式(A.7)が得られる。

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{a}_{\bar{D}_i}^{\bar{D}_i} \times \mathbf{i}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_1 + (\mathbf{a}_{\bar{D}_i}^{\bar{D}_i} \times \mathbf{j}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_2 \\
 + \sum_{k \in E_{3i}} \left\{ \mathbf{I}_{zi} + \mathbf{p}_j^i \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_k}^i + \sum_{j \in ci} [\mathbf{p}_i^j \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_k}^{\bar{D}_i}] \right\} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_k \\
 + \sum_{k \in \bar{D}_i} [\mathbf{p}_i^k \cdot \mathbf{a}_{\bar{D}_k}^{\bar{D}_i}] \cdot \ddot{\mathbf{q}}_k \\
 - \sum_{k \in E_{3i}} \left\{ \mathbf{p}_i^i \times \mathbf{a}_k^i + \sum_{j \in ci} [\mathbf{p}_i^j \times \mathbf{a}_k^{\bar{D}_i}] \right\} \cdot (\dot{\mathbf{q}}_{E_{3k}})^2 \\
 - \sum_{k \in \bar{D}_i} [\mathbf{p}_i^k \times \mathbf{a}_k^{\bar{D}_i}] \cdot (\dot{\mathbf{q}}_{E_{3k}})^2 - \sum_{k \in \bar{D}_i} (\mathbf{p}_i^k \times \bar{\mathbf{f}}_k) = \mathbf{n}_i \\
 - \mathbf{n}_{ci} \quad : \text{if } i \notin W \\
 \sum_{k \in E_{3i}} (\mathbf{I}_{zi} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_k) - \bar{\mathbf{n}}_i = \mathbf{n}_i \quad : \text{if } i \in W
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

上記の並進運動の方程式である式(A.6)と、関節の回転運動の方程式である式(A.7)をまとめ、一般マルチリンクの運動方程式が、行列形式として式(A.8)で示される。

$$\mathbf{A}_M \ddot{\mathbf{q}}_M + \mathbf{b}_M + \mathbf{C}_M \mathbf{f}_W + \boldsymbol{\gamma}_M = \mathbf{D}_M \mathbf{n} \quad \text{式 (A.8)}$$

\mathbf{A}_M : 慣性行列

\mathbf{b}_M : 遠心力・コリオリ力項

\mathbf{C}_M : 車輪外力項の行列

$\boldsymbol{\gamma}_M$: 可動関節・車輪に働く摩擦力

\mathbf{D}_M : 可動関節・車輪へのトルク項の行列

(7) 車輪摩擦力

非粘性抵抗力である地面と車輪の間の摩擦力により，車輪式移動ロボットの運動は平面移動を行うことができる．これはマニピュレータにはない大きな特徴である．

① 車輪座標系

図 A.5 のように車輪面方向を x 軸として車輪座標系を考える．図 A.5 には x 軸に働く摩擦力「縦力」，y 軸に働く摩擦力「横力」，z 軸回りの摩擦モーメント「アライニングトルク」が示されている．

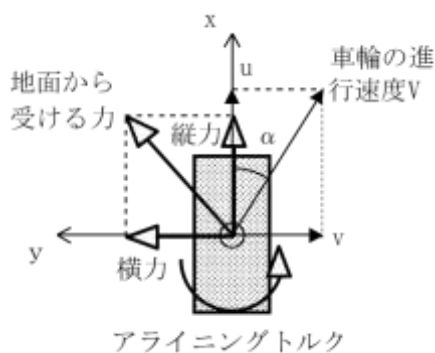


図 A.5 車輪座標系

このとき，車輪 w_i のスリップ率 s_{wi} ，スリップ角 α_{wi} は式(A.9)で定義される．

$$s_{wi} = \frac{u_{wi} - \bar{r}_{wi} \cdot \dot{\phi}_{wi}}{u_{wi}} \quad \text{式 (A.9)}$$

$$\alpha_{wi} = \tan^{-1} \frac{v_{wi}}{u_{wi}}$$

\bar{r}_{wi} : 車輪半径

$\dot{\phi}_{wi}$: 車軸回りの回転速度

② タイヤ車輪すべり特性モデル

ここではすべりと摩擦力の関係が明らかなタイヤ特性モデルについて説明する。

式(A.9)のスリップ率とスリップ角から全すべり量が式(A.10)で求められる。

$$\sigma = \sqrt{\sin^2 \alpha + \left(K_x / K_y \cdot s \cdot \cos \alpha \right)^2} \quad \text{式 (A.10)}$$

K_x : ドライビングステイフネス

K_y : コーナリングステイフネス

摩擦係数 μ は、式(A.11)のように全すべり量 σ により減少するものとする。

$$\mu = \mu_0 (1 - K_u \cdot \sigma) \quad \text{式 (A.11)}$$

μ_0 : 最大静止摩擦係数

K_u : 静摩擦から動摩擦へ移行するときの減少係数 (=0.2)

タイヤ車輪の特性関数は以下の式 (A.12) で定義される。

$$f(\sigma, f_z) = \mu \cdot f_z \cdot \sin(a \cdot \tan^{-1}(b \cdot \sigma)) \quad \text{式 (A.12)}$$

a : 関数の概形を決め定数 (=1.2)

$$b = \frac{K_y}{\mu_0 \cdot f_z}$$

最終的に縦力、横力は、式(A.9)のスリップ率 s 、スリップ角 α と z 方向の力 f_z の関数として、次式(A.13)で示される。

$$\begin{aligned} \bar{f}_x(s, \alpha, f_z) &= -\frac{K_x}{K_y} \cdot \frac{s \cdot |\cos \alpha|}{\sigma} \cdot f(\sigma, f_z) \\ \bar{f}_y(s, \alpha, f_z) &= -\frac{\sin \alpha}{\sigma} \cdot f(\sigma, f_z) \end{aligned} \quad \text{式 (A.13)}$$

マイクロロボットの自重が、四輪に均等に配分されるものとして、車輪に作用する z 方向の力 f_z を仮定し、ドライビングステイフネスとコーナリングステイフネスを式(A.14)の値とした場合、式(A.13)の摩擦力とすべりの関係として、次の図 A.6 と図 A.7 のようなタイヤ車輪すべり特性が得られる。

$$K_x = K_y = 10 \times f_z$$

式 (A.14)

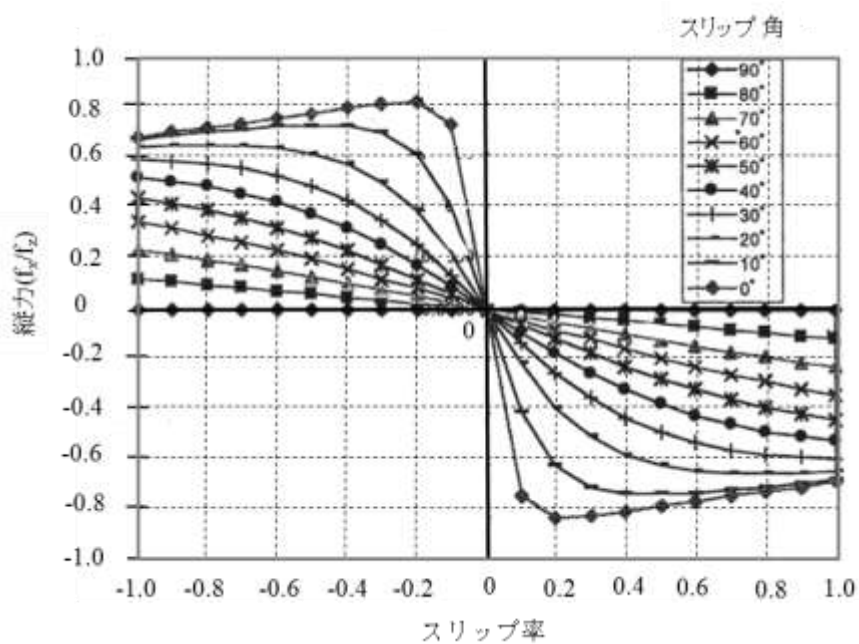


図 A.6 スリップ率と縦力の関係 (タイヤ車輪すべり特性)

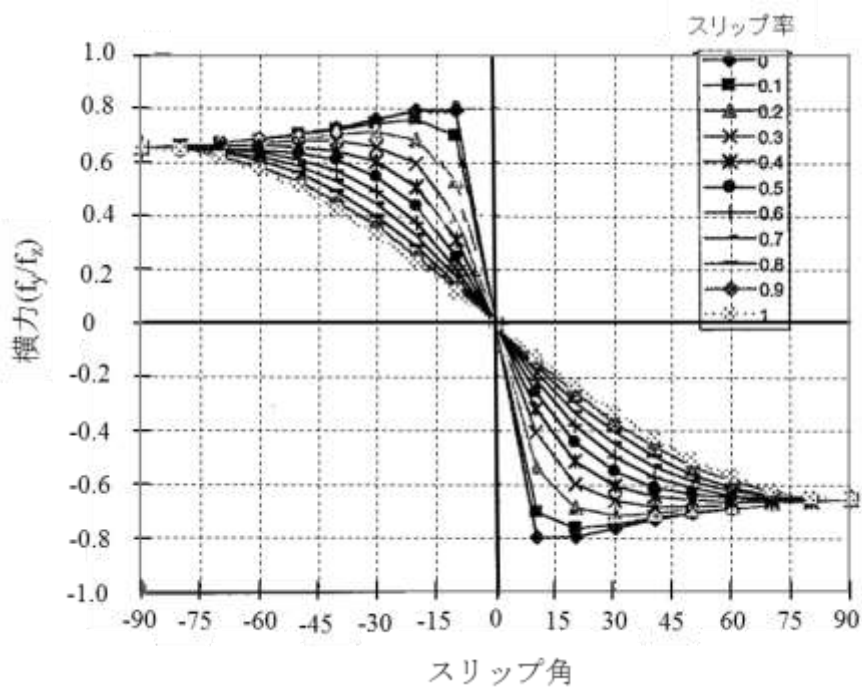


図 A.7 スリップ角と横力の関係 (タイヤ車輪すべり特性)

③ 速度入力運動方程式

車輪式移動ロボットは、大半が速度制御されるものであり、トルク入力の運動方程式は、そのままでは扱いにくい。そこで非駆動関節のみの運動方程式として、速度入力の運動方程式を採用する。駆動関節は、入力された速度の通りに運動をするものとして考慮しない。

以下に速度入力運動方程式の導出過程を示す。

- (i) マルチリンクの運動方程式において、駆動関節と非駆動関節を分離する。
- (ii) 非駆動関節の方程式の適当な行に、駆動関節の方程式の適当な行を加えることにより、非駆動関節の関節モーメント項を零することができる。
- (iii) さらに、関節変数に関しても駆動関節と非駆動関節を分離する。
- (iv) 車輪に関しても同様の処理を行い、駆動関節と非駆動関節を分離する。

上記により、式(A.15)が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{dp} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{p-dyn} + \mathbf{A}_{da} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{b}_{dp} + \mathbf{C}_{dp} \mathbf{f}_W(\dot{\mathbf{q}}_{p-dyn}, \mathbf{u}) + \boldsymbol{\gamma}_{dp} &= 0 \\ \dot{\mathbf{q}}_{a-dyn} &= \mathbf{u} \end{aligned} \quad \text{式 (A.15)}$$

さらに非駆動輪に関して、転がり抵抗が無視でき、かつ慣性項が十分小さいければ、縦力が零と考えることができ、x方向のすべりは生じないと見なすことができる。

最終的にはマルチリンクの非駆動関節だけの運動方程式として取り扱うことが可能となる。

参考文献

- [1] Y. Jin et al., “A Magnetic Wheel Structure for an Omni-Directional Microrobot to Limit Slip Effect,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.6, No.4, pp277-284, 2009.
- [2] X. Tang et al., “An Omni-Directional Wall-Climbing Microrobot with Magnetic Wheels Directly Integrated with Electromagnetic Micromotors,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9,99. 1-9, 2012.
- [3] M. Takeda et al, “Development of Chain-Type Micromachine for Inspection on Outer Tube Surfaces (Basic Performance of the 1st Prototype),” *Proc. of 13th IEEE International Conference of MEMS*, pp90-91, 2000.
- [4] 武田宗久, “細管群外部検査システム,” *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.3, pp1-4, 2001.
- [5] 築島隆尋, 高野政晴, 佐々木健, 井上健司, “車輪式移動ロボットの運動学および動力学の一般理論に関する研究,” *日本ロボット学会誌*, 1990年12月.
- [6] R. L. Williamset al., “Dynamic Model with Slip for Wheeled Ominidirectional Robots,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.18, No.3, June 2002.
- [7] J. Yi et al., “Adaptive Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robots,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p2605 - 2610, 2007.
- [8] N. Sidek et al., “Dynamic Modeling and Control of Nonholonomic Mobile Robot with Lateral Slip,” *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, pp66-74, 2008.
- [9] R. Balarkrishna et al., “Modeling of Slip for Wheeled Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No.1, pp126-132, 1995.
- [10] C. Ordonez, N. Gupta, B. Reese, N. Seegmiller, A. Kelly , E. Collins Jr, “Learning of skid-steered kinematic and dynamic models for motion planning,” 第 卷 95, pp. 207-221, 2017.
- [11] I. Matraji, A. Al-Durr, A. Haryono, K. Al-Wahedi , M. Abou-Khousa, “Trajectory tracking control of Skid-Steered Mobile Robot based on adaptive Second Order Sliding Mode Control,” *Control Eng. Pract.*, 第 卷 73, pp. 167-176, 2018.
- [12] S. Dogru , L. Marques, “Improving Dead-Reckoning Performance of Skid-Steered Wheeled Robots Using an Improved Kinematic Model.,” 著: *In Proceedings of the Third Iberian Robotics Conference*, Seville, Spain, 12 November 2017.
- [13] M. F. Silva et al., “A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion,” *Climbing and Walking Robots*, Chapter: Chapter 1, Publisher: INTECH, Editors:

- Behnam Miripour, pp.1-22, 2010.
- [14] R. D. Dethe et al., “Development in Wall Climbing Robots: A Review,” *International Journal of Engineering Research and General Science*, Vol. 2, Issue 3, 2014.
- [15] J. Jose, D. Dinakaran, M. M. Ramya , D. G. Harris, “A Survey on Magnetic Wall-Climbing Robots for Inspection,” *Transstellar Journal*, 2018.
- [16] S. Nansai , R. E. Mohan, “A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges,” *Robotics* 5(3), 2016.
- [17] J. Kim, A. Kashino, T. Colaco, G. Nejat , B. Benhabib, “Design and Implementation of a Millirobot for Swarm Studies- mROBerTO.,” *Robotica*, 2018.
- [18] D. Lee et al., “Design of Centimeter-scale Inchworm Robots with Bidirectional Claws,” *IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA)*, pp3197-3204, Shanghai, 2011.
- [19] R. Yeh et al., “Single Mask, Large Force and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motors,” *Proc. of the 14th Annual International Conference on Microelectromechanical Systems (MEMS2001)*, pp260-264, 2001.
- [20] J. M. Kahn et al., “Mobile Networking for Smart Dust,” *ACM/IEEE International Conference on Mibile Computing and Networking (MobiCom99)*, 1999.
- [21] B. R. Donald et al., “Power Delivery and Locomotion of Untethered Microactuator,” *Journal of Microelectromechanical Systems* 12 (2), pp947-959.
- [22] S. Ueno el al., “Micro Inchworm Robot using Electro-conjugate Fluid,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.216, pp36-42, 2014.
- [23] K. Jung el al., “Micro Inchworm Robot Actuated by Artificial Muscle Actuator based on Nonprestrained Dielectric Elastomer,” *Proc. SPIE 5385, Smart Structures and Materials*, 2004.
- [24] A. T. Nguyen el al., “Locomotion of a Miniature Robot Based on Synchronized Vibrating Actuation Mechanisms,” *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Zurich, September 4-7, 2007.
- [25] H. H. Hariri el al., “Miniature Piezoelectric Mobile Robot Driven by Standing Wave,” *The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015*.
- [26] K. Ioi, “Study on Turning Motion of Micro Robot Drivend by Cyclic Force,” *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp1319-1324, 2001.
- [27] C. Yu et al., “Novel Electromagnetic Actuation System for Three-Dimensional Locomotion and Drilling of Intravascular Microrobot,” *Sensors and Actuators A*161, 2010.
- [28] SRI International, “MicroFactory Platform for Smart Manufacturing,” [オンライン]. Available: <http://www.sri.com/>.
- [29] 安井真人, 生内真志, 生田幸士, “遠隔手術用 3 次元磁気駆動マイクロマシンの開発,” 日

- 本機械学会論文集 (C編), 79 卷 802 号, 2013.
- [30] H. Xie, M. Sun, X. Fan, Z. Lin, W. Chen, L. Wang, L. Dong, Q. He, “Reconfigurable magnetic microrobot swarm: Multimode transformation, locomotion, and manipulation,” 著: *Sci. Robot.*, 2019.
- [31] K. Saito et al., “Biomimetics Micro Robot with Active Hardware Neural Networks Locomotion Control and Insect-Like Switching Behavior,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9, 226, 2012.
- [32] R. Casanova et al., “An Optically Programmable SoC for an Autonomous Mobile mm3-Sized Microrobot,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol.58, No.11, pp2673-2685, 2011.
- [33] S. Bergbreiter et al., “Design of an Autonomous Jumping Microrobot,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp447-453, 2007.
- [34] P. Dario et al., “A Mobile Microrobot Actuated by a New Electromagnetic Wobble Micromotor,” *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics* 3 (1), pp9-16, 1998.
- [35] G. Caprari et al., “The Autonomous Micro Robot Alice: A Platform for Scientific and Commercial Applications,” *MHS’ 98*, pp231-235, Japan, 1998.
- [36] R. H. Byrne et al., “Miniature Mobile Robots for Plume Tracking and Source Localization Research,” *Journal of Micromechanics, VSP*, Vol.1, No.3, pp253-260, 2002.
- [37] Z. Li et al., “An Omnidirectional Mobile Millimeters Size Micro-Robot with Novel Duel-Wheels,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 3, No. 3, pp223-230, 2006.
- [38] Z. Li et al., “Omni-Directional Mobile Microrobots on a Millimeter Scale for a Microassembly System,” *Mobile Robots Towards New Applications*, ISBN 3-86611-314-5, pp513-534, 2006.
- [39] D. Zhang et al., “Design and Optimization of an Omnidirectional Permanent-Magnetic Wheeled Wall-Climbing Microrobot with MEMS-Based Electromagnetic Micromotors,” *Advanced Robotics* 26(2012), pp197-218, 2012.
- [40] M. Greuler et al., “Toward Micro Wall-Climbing Robots using Biomimetic Fiber Adhesives,” *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment, Fukui*, pp. 39-46, 2006.
- [41] M. Sitti et al., “Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano-Structures for Future Wall-Climbing Robots,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1, pp1164-1170, 2003.
- [42] W. Fischer et al., “Foldable Magnetic Wheeled Climbing Robot for the Inspection of Gas Turbines and Similar Environments with very Narrow Access Holes,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol.37, pp.244-249, 2010.
- [43] F. Rochat et al., “Cy-mag3D: A Simple and Miniature Climbing Robot with Advance Mobility in Ferromagnetic Environment,” *Industrial Robot: An International Journal*, vo. 38, pp.229-233, 2011.
- [44] 太田斎, 山中広美, 笹倉久泰, 武田宗久, “マイクロマシンングによる超小型電磁モータの

- 開発 (第1報 低残留応力の厚膜形成法の検討),” 日本機械学会 論文集 C編, 68巻, 665号, pp276-283, 2002.
- [45] 太田斎, 小田拓嗣, 武田宗久, “マイクロマニシングによる超小型電磁モータの開発 (第2報 絶縁層のエッチング条件の検討),” 日本機械学会 論文集 C編, 68巻, 665号, pp284-291, 2002.
- [46] 太田斎, 小原隆雄, 前川直孝, 武田宗久, “マイクロマニシングによる超小型電磁モータの開発 (第3報 可撓性積層コイルの試作),” 日本機械学会 論文集 C編, 68巻, 665号, pp292-299, 2002.
- [47] 太田斎, 荒木健, 唐田行庸, 西岡章, 武田宗久, “マイクロマニシングによる超小型電磁モータの開発 (第4報 モータの試作と評価),” 日本機械学会 論文集 C編, 68巻, 665号, pp300-307, 2002.
- [48] N. SHIMIZU et al., “Mechanical Planetary Gears for a Micro-Reducer,” Proc. of the 4th International Micromachine Symposium, PP177-181, 1998.
- [49] 羽賀剛, 奥山浩, 平田嘉裕, 芳賀孝吉, 高田博史, “放射光を用いたマイクロコネクタの開発,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol.4, No.3, 2001.
- [50] 高田博史, 奥山浩, 羽賀剛, 平田嘉裕, “マイクロコネクタの自動着脱機構,” 電気学会論文誌 E, 123巻, 11号, 2003.
- [51] 丸山昌明, 磁気吸着力の理論, 丸山昌明 (自費出版), 2002.
- [52] H. Pacejka, E. Bakker, “The MAGIC formula tyre model,” 著: *Proceedings of the of the 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Supplement to Vehicle System Dynamics*, The Netherlands, 21-22 October 1992.
- [53] 石田誠, “車輪/レール接触問題の最前線”, Railway Research Review (RRR), pp2-5, 2008.8,
- [54] 陳樺, “走る基本 - 粘着とは何か -”, Railway Research Review (RRR), pp2-5, 2008.7,

謝辞

本論文の内容は、1996年から2000年に実施したマイクロマシンプロジェクト後期の内容をベースに2012年から2016年にかけて東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻マイクロ知能システム研究室で行った研究をまとめたものである。

指導教員である下山勲教授及び竹内昌治教授には、現象の解明及び論文のまとめ方等の研究の進め方に対する具体的アドバイスから研究者としての姿勢まで丁寧にご指導頂いた。

東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻の中村仁彦教授、岡田慧教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻の鎌田実教授、伊藤寿浩教授には、論文をまとめるに当たり大変有益なご助言を頂いた。

本論文でまとめた4輪スキッドステア方式の磁石車輪駆動マイクロロボットは通産省工技院産技プロジェクト(1991-2000年)の一環として、NEDOからの委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として三菱電機(株)、松下技研(株)(当時)、住友電気工業(株)が共同で開発したものである。この開発に携わった三菱電機(株)の太田斎氏、相澤淳一氏、横山吉典氏ら、松下技研の中村邦彦氏ら、住友電気工業の平田嘉裕氏、羽賀剛氏ら関係各位に感謝する。また、走行シミュレーションに関しては(株)三菱総合研究所の浜辺智氏らのご協力に感謝する。

社会人ドクターとしての博士取得に関しては、三菱電機(株)の堤和彦現特任技術顧問の後押しがあり、三菱電機(株)開発本部並びに(一財)マイクロマシンセンターの青柳桂一元副理事長、長谷川英一専務理事、技術研究組合NMEMS技術研究機構の今仲行一理事長をはじめとする出向先の皆さまのご理解と温かいご支援があって始めて成し得られたものであり、ここに感謝する。

これら研究室内外の多くの方に支えられ本論文をまとめることができた。最後に50歳を過ぎてからの博士課程進学を理解し、支えてくれた家族、特に妻に感謝し、本論文の結びとする。