

図・本館

# 制御系と機構系間の相互作用を活用した モジュラーロボットの創発的形態制御

清水 正宏

名古屋大学図書



11605104

# 目次

<b>第1章 緒論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 従来的人工物の抱える問題	1
1.1.2 生物における高次脳機能と生存脳機能	2
1.1.3 生存脳機能理解のためのツールとしてのロボット	5
1.1.4 生物の原初性に着目したアプローチ	6
1.1.5 形態可変性を有するモジュラーロボット	7
1.2 形態可変性における問題	11
1.3 本研究の目的	13
1.4 本論文の構成	14
<b>第2章 生存脳機能を有するシステムの理解・構築に向けた作業仮説の導出</b>	<b>17</b>
2.1 物理的・計算的資源の有限性という制約を受ける行動主体	17
2.2 無限定環境における実時間適応問題	18
2.3 制御系－機構系－環境間の相互作用から創発する振る舞い	19
2.4 採用する作業仮説	19
2.5 まとめ	20
<b>第3章 制御系と機構系間の相互作用を活用したモジュラーロボット Slimebot</b>	<b>23</b>
3.1 機能性素材の有する力学的特性を活用した機構系	23
3.1.1 ベルクロープによる自発的結合機構	23
3.1.2 モジュールの機構系	24
3.2 非線形振動子間の相互引き込みを活用した制御系	27
3.2.1 アクティブモードとパッシブモード	27
3.2.2 van del Pol 振動子による周期的なモード切替	29
3.2.3 振動子間の拡散的な相互作用	29
3.2.4 相互引き込み現象による位相勾配の形成	31
3.2.5 ロコモーションの生成	31
3.3 まとめ	35

<b>第4章</b>	<b>シミュレーションによる創発的形態制御に関する検証</b>	<b>37</b>
4.1	分子動力学法に基づく動力学シミュレータ	37
4.1.1	分子動力学法	37
4.1.2	モジュールのモデル化	38
4.1.3	ベルクロテープのモデル化	38
4.1.4	環境のモデル化	39
4.2	生存脳機能の発現に関する検証	39
4.2.1	環境適応性と拡張性の検証	39
4.2.2	耐故障性の検証	44
4.3	形態維持機能の発現に関する検証	53
4.3.1	機構系の工夫による自発的な結合制御の検証	53
4.3.2	制御系の工夫による表面張力的効果の検証	56
4.3.3	Beniの提唱した群知能発現の特徴に基づく考察	61
4.4	まとめ	62
<b>第5章</b>	<b>Slimebot 実機の開発</b>	<b>65</b>
5.1	実機実現に要請される仕様	65
5.2	モジュール実機的设计	68
5.2.1	機能性素材による自発的な結合機構	68
5.2.2	空気圧駆動型のアクチュエーション機構	70
5.2.3	赤外線通信による局所通信機構	76
5.2.4	搭載する制御回路	77
5.3	モーフオロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計	84
5.4	まとめ	87
<b>第6章</b>	<b>Slimebot 実機による創発的形態制御に関する検証</b>	<b>89</b>
6.1	異なる初期形態からのロコモーション生成	89
6.2	実機による環境適応性の検証	92
6.3	実機による拡張性の検証	94
6.4	実機による耐故障性の検証	94
6.5	まとめ	96
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>99</b>
7.1	本研究で得られた成果	99
7.2	今後の展望	101
	<b>参考文献</b>	<b>102</b>

研究業績

107

謝辭

113



# 第1章 緒論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 従来的人工物の抱える問題

科学技術の長足の発展に伴い、人類はこれまでに様々な機能を有する高度な人工物を構築してきた。今日では、ナノスケールでの加工も可能となり、工学の分野のみにとどまらず、医学、生物学等の分野においてもその発展に貢献している。半導体技術は、その微細加工の限界が指摘されて久しいが、いまだにムーアの法則を維持しつつ高集積化の一途をたどり、原子のスケールにまで至ろうとしている。これに伴い、今日のさまざまな人工物に内蔵されているCPUの処理速度も飛躍的に高速化してきた。

このような技術発展の恩恵に浴するのにはロボティクスの分野も例外ではなく、CPUの高速化・高密度化はロボット設計の際に課される制約を劇的に緩和させた。このような背景から、近年では緻密かつ正確な制御方策の実装が可能となり、2脚歩行ロボットに代表されるような高度で複雑な機能を有する様々なロボットが開発されている。これらの中で特筆すべきロボットとしては、本田技研工業(株)が開発した2脚歩行ロボットASIMOが挙げられる。このASIMOは当初プロトタイプの「P2」という名称で1996年12月に発表された。当時の研究者の間では、半ば不可能視されていた完全自律型の2脚による歩行動作を実現させた点において、ASIMOの功績は多大なものがある。

しかしながら、このような「高速なCPUにより高度化された頭脳」による精緻な知能システムが現実稼働している一方で、非構造的で予測不能的に変動する環境（以降、無限定環境と呼ぶ）下で、知能システムの適応的な振る舞いが要請される分野においては、たとえ単純なタスクであっても工学的に十分実現されていないのが現状である。事実、ASIMOにおいては、高速なCPUと大容量メモリなどを背景に、歩行を

はじめ、階段の昇降、台車を押すといった複雑な動作実現したが、無限定環境においてはたとえ歩行のみであったとしても安定な動作が保証されていない。

以上の背景から、CPUの高速化だけでは解決のままならない、従来の人工物の多くが抱える問題が浮き彫りになってくる。この問題を模式的に表したものが図1.1, 1.2である。これらの図は、人工物における環境変動に対する機能発現の特性を表す。前者は従来の人工物に関する図を、後者は適応的な人工物に関する図を表す。従来の人工物においては、特定環境に最適なシステムを構築することを目的とされてきたために、その環境下においては高度な機能を発現する。一方、適応的な人工物においては、特定環境下の機能発現の最適性は従来の人工物に劣るが、様々な環境下に対処可能である。

すなわち、従来の人工物は、想定環境では高度で複雑な機能を発現するものの、そこから逸脱すると劇的に発現する機能が低下するという、著しい脆弱性を示す問題点を有している（図1.1参照）。それでは、図1.2のような、無限定環境下において適応的に振る舞う人工物はどのように設計されるべきであろうか。

### 1.1.2 生物における高次脳機能と生存脳機能

近年、ロボティクスの分野では、無限定環境下における適応的な人工物の設計論の問題に関して、その解決の糸口を生物の行動生成に求めるアプローチが注目を集めている[1]。生物はきわめてプリミティブな種と分類されるものであっても、無限定環境下で実時間適応的かつ合目的に振る舞いを自己組織化しながら対処する知を有している。それでは、生物においてこのような「実時間適応的な知」はどのようにして獲得されているのであろうか。

これまでは、生物における知の発現メカニズムの解明を目的として、認知、記憶、学習などに関わる高次脳機能の観点から議論が行われてきた。多くの研究では、このような知の発現においては脳単体での議論が可能であり、無限定な環境変動とは独立に脳機能が発現されると言われてきた。そのため、これまでの脳科学研究においても、生物の動きを拘束して実験条件を再現可能なように構成することで、実際の生物を用いた脳機能の解析が可能であった。このような背景から、高次脳機能に関しては、その情報処理の仕組みについて多くの知見が得られてきた。以上からわかるとおり、従来

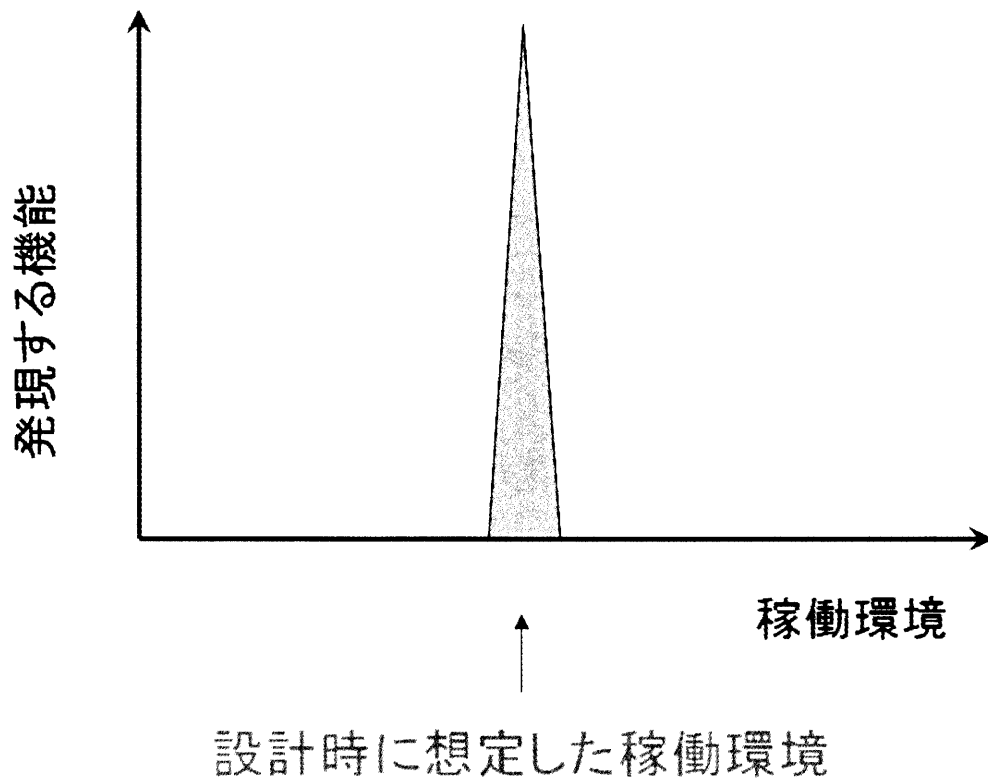


図 1.1: 従来の人工物における環境変動に対する機能発現の特性

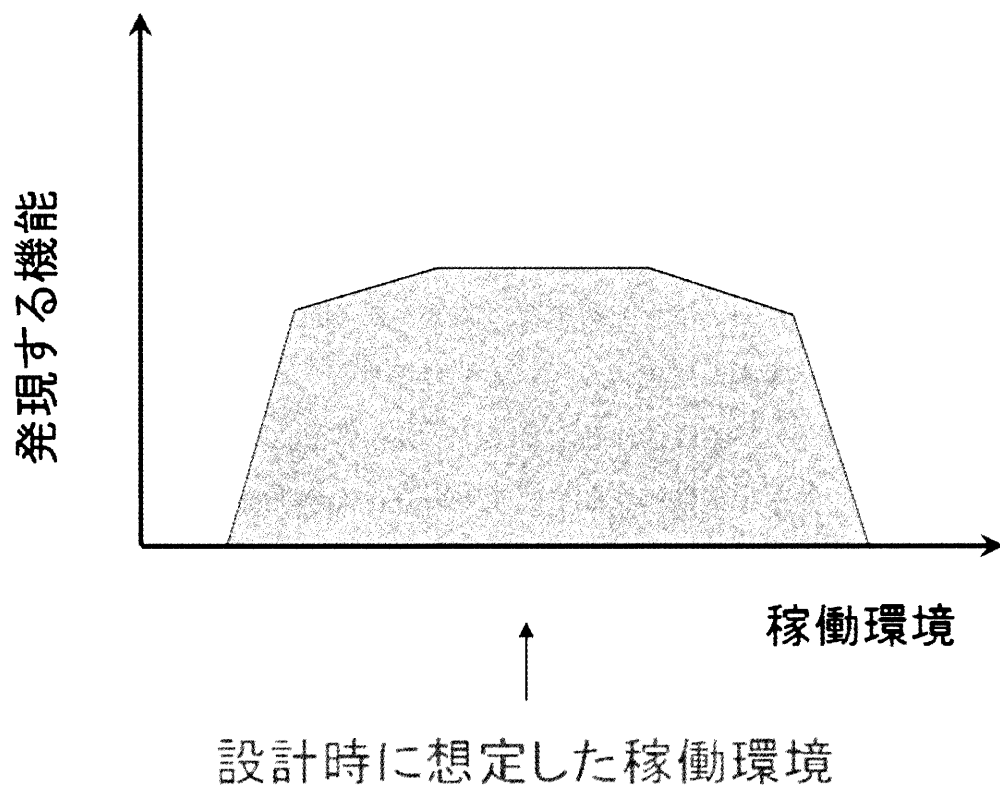


図 1.2: 適応的な人工物における環境変動に対する機能発現の特性

の研究においては高次脳機能の発現メカニズムの原理解明を目的として、脳単体での議論に終始してきたと言える。

しかしながら、本研究で解明すべき、生物の「実時間適応的な知」の発現においては、行動主体と環境との関わりが必然的に存在するため、従来のような脳単体での議論が不可能である。そこで、生物が行動することにより、その「身体」という物理的な実体を介して、脳、身体、環境が相互作用してはじめて知が発現する(以降、このような発現様式を「創発」と呼ぶ。)という観点からの議論が重要となる。高次脳機能に対して、このようにして発現する知は、生存脳機能と呼ぶべきものである。

### 1.1.3 生存脳機能理解のためのツールとしてのロボット

生存脳機能の理解を目的とした、脳(制御系)、身体(機構系)、ならびに環境を切り離して議論する従来のアプローチによる研究には限界がある。このような背景から、近年ではロボットを生存脳機能の発現メカニズムを解明するためのツールとして採用した、構成論的なアプローチが注目されるようになってきた[2][3]。ロボットであっても生物であっても、同一の力学法則に支配されている3次元物理世界に存在している行動主体という点では共通である。このような考えに基づくと、ロボットと生物は、同様の法則に支配される単なる「種」の異なる行動主体である捉えられるため、ロボットを実際の生物に代わる生存脳機能理解のためのツールとして採用することが可能となる。

ロボットを生存脳機能理解のためのツールとして採用した構成論的アプローチに期待される利点を以下にまとめる:

**1. 実験可能なパラメータの多様性** 生物は、長い進化の過程を経て、現在のような姿を獲得した。これは、環境に適応できないような種が淘汰され、適応できたもののみが生き残った結果である。しかしながら、進化過程を経て獲得した姿は、あくまで「知られている生物 (life-as-we-know-it)」であり、異なった進化過程を経ることによる、他の「ありえた生物 (life-as-it-could-be)」が存在できた可能性を否定できない。換言すれば、「知られている生物」は生存脳機能が発現するための「必然の要因」と「偶然の要

因」を同時に含んだ種である考えられる。そのため、現代の「知られている生物」のみを解析しても、一般性のある原理の抽出が困難であると言えよう。このことから、実験パラメータの変更が容易なロボットを用いることで、様々な「ありえた生物」の実験・シミュレーションが可能となり、生存脳機能が発現するための「必然の要因」に関する一般的な知見を効率的に抽出できることが期待される。

**2. 実験結果の高い再現性** 従来の生物学・脳科学研究における脳機能の解明が困難であった要因の1つは、実験結果の再現性の低さであった。ロボットを用いることで、実験結果の再現性の確保が容易になることが期待される。

**3. 脳 (制御系), 身体 (機構系), 環境間の相互作用の明示性** 生物実験においては、脳や身体の働きを解析するために環境を可能な限りシンプルにする必要があった。これに対し、ロボットによる実験・シミュレーションでは、制御系、機構系、環境を明示的に指定可能であるため、これらの間の相互作用ダイナミクスの解析が比較的容易になることが期待される。

**4. システム規模の拡張性** 多数の行動主体が形成する社会性等、システムの規模の大きさの違いが重要であるような問題に対して、生物実験では規模の拡大、縮小の再設定が困難である。このような場合に、ロボットを用いることで異なったシステム規模間の違いの解析等が容易になることが期待される。

**5. 実験環境の保守性** 生物実験を継続するためには、生物の飼育等、実験環境の保守に注意を払う必要がある。ロボットを用いた実験では、多くの場合にこのような実験環境の保守性が容易になることが期待される。

#### 1.1.4 生物の原初性に着目したアプローチ

生存脳機能は、行動主体のロコモーション (移動運動) を介して自発的に顕在化する環境との相互作用のダイナミクス無しには発現しえない知の形態である。自然界には、様々なロコモーション様式が存在し、それぞれの種に対応した生存脳機能が個々に存

在していると考えられる。これらは、進化の過程で多様化・複雑化した種であるため、前節でも述べたように生存脳機能の発現のための「必然の要因」以外にも「偶然の要因」を多分に含んでいると想像される。そのため、「必然の要因」を効率よく抽出するためには、進化の過程を遡って可能な限り原初的な生物をモデルとして採用するべきであると言えよう。そこで本研究では、意図的に原初的な生物に着目することで、基本的な生存脳機能の抽出を試みるアプローチを採用する。

具体的には、最も原初的なロコモーション様式であるアメーバ様ロコモーションを行うロボットを構築することにより、構成論的に生存脳機能の発現原理の抽出を試みる。アメーバ様のロコモーション様式は、ヒトやその他の高度に進化した種のそれとは異なり、関節を有する脚によりもたらされるものではない。自然界のアメーバ様の生物は、自身の原形質を体内で流動させることによる形態変形を伴ったロコモーション(原形質流動)を行う。現代では、このようなアメーバ様ロコモーションは、粘菌等に見ることができる [4][5]。

### 1.1.5 形態可変性を有するモジュラーロボット

アメーバ様のロコモーションは、工学的には複数の機械ユニットから構成されるモジュラーロボットとして構成可能である(図1.3参照)。モジュラーロボットは、状況の変化に応じてモジュール間の相対位置関係を改変することにより、形態変形が可能なシステムである。また、モジュール間の相対位置関係の改変そのものがモジュラーロボットとしての移動を生み出す仕組みとなっている。

そこで、本研究では、形態変形を伴うアメーバ様ロコモーションを行うモジュラーロボット開発し、生存脳機能の発現を試みる。一般的にモジュラーロボットには、次のような「環境適応性」、「拡張性」、「耐故障性」といった優れた特長の発現が期待されている(図1.4参照)。

**環境適応性** モジュラーロボットは、固定形態に基づくロボット(たとえば、ASIMO等の2脚ロボット)とは異なり、形態を環境適応的に変形可能であるため、高い環境適応性が期待されている。

**拡張性** 制御スキームを変えることなく、モジュラーロボットを構成するモジュール数を増減可能であるといった拡張性が期待されている。

**耐故障性** モジュラーロボットを構成する一部のモジュールが故障して動作不能となっても、他のモジュールで代替可能である、もしくは、その故障したモジュールをシステムに内包した状態でも発現する機能の大幅な低減はないといった耐故障性が期待されている。

これらのモジュラーロボットに期待される優れた特長は、その形態の可変性に起因しており、固定形態のロボットには見られない興味深い現象である。また、これらの特長は、モジュールの移動をとおして発現することから生存脳機能であると言える。そのため、これらの特長の観点から本研究では生存脳機能の検証を試みる。具体的な提案モデルの概要については第3章で述べる。



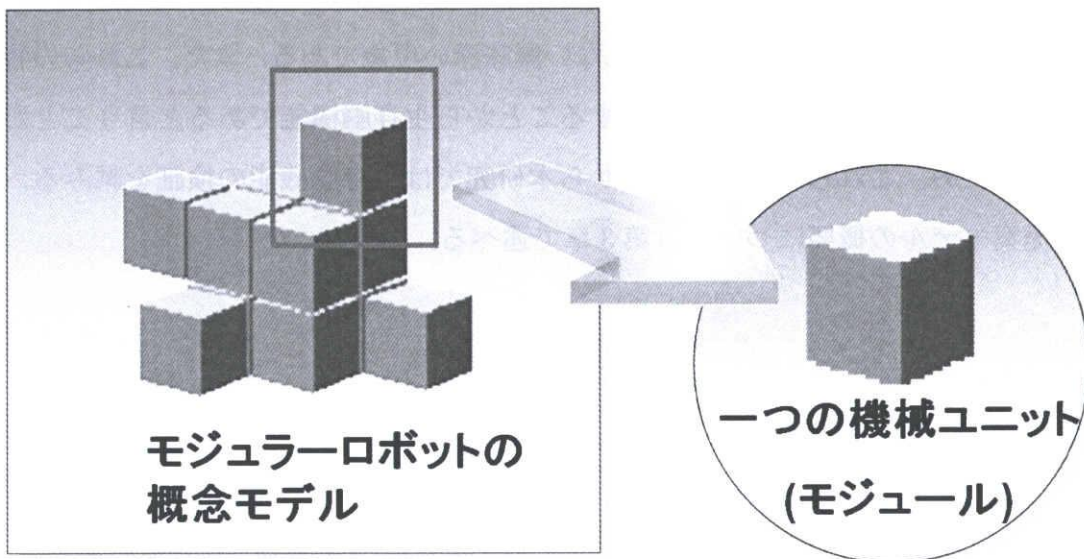
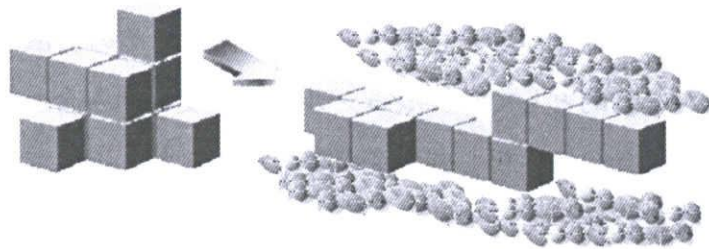
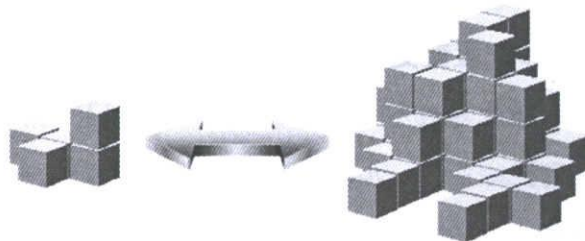


図 1.3: モジュラーロボットの概念モデル

環境適応性



拡張性



耐故障性

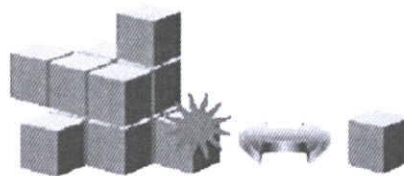


図 1.4: モジュラーロボットに期待される優れた特長

## 1.2 形態可変性における問題

モジュラーロボットは、前節で挙げた優れた環境適応性、拡張性、耐故障性を期待されて、これまでに幾つかの研究が行われてきた。この分野の先駆けとなったのは、福田らによる CEBOT (Cellular robotic system) である [6]。CEBOT とは、自己組織型の再構成可能なロボットシステムであり、数多くの「セル」と呼ばれる、単機能の自律型ロボットによって構成される。福田らは、このような構造を有するロボットによって、タスクや環境にあわせて形態を自己組織的に再構成できるシステムを提唱した。

現在までモジュラーロボットの分野では、その特徴である形態可変性をいかに実現するかを目的として、「モジュール配置変更の組み合わせ問題の最適化」、「モジュールの機構設計」に注視して研究が行われてきた。そこで、以下ではこれらの観点から従来研究を紹介する:

**1. モジュール配置変更の組み合わせ問題の最適化** モジュラーロボットは複数のモジュールから構成されるため、「設計者の意図どおり」の目標形態の実現方を考える場合には、常にモジュール群の幾何学的な配置問題を解くアルゴリズムが重要となる。この問題を解決する先行研究として村田らの研究 [7] や Stoy らの研究 [8] がある。

村田らは、シミュレーションと実機実験の両面から、2次元モジュラーロボットの自己組み立て・自己修復を実現する分散アルゴリズムを開発した。具体的には、各モジュールに目標形態時の局所結合様式を記憶させておき、初期配置から段階的に移動させることにより最終的な目標形態を構成するような方を提案した。Stoy らは、シミュレーションを用いて、自己組み立てを実現するようなアルゴリズムを提案した。このモジュラーロボットは、ランダムな初期形態から自己組み立てを開始し、目標形態を CAD データとして用意し、その CAD データ領域の内部にモジュールを配置することで形態形成アルゴリズムを構築している。

**2. モジュールの機構設計** モジュラーロボットの設計においては、モジュール間の配置変更が必要となるため、固定形態のロボットには存在しないモジュール間結合に関する特殊な機構を組み込む必要がある。そのため、モジュール実機的设计・構築に関する

研究は数えるほどしか存在しないのが現状である。ここでは、黒河らの M-TRAN[9], Yim らの PolyBot[10], Lund らの ATRON[11] を結合機構の違いの観点から概観する。

M-TRAN では、モジュール間の着脱が、形状記憶合金 (SMA) バネと、永久磁石の併用により行われている (最新仕様ではフックを結合面においてかみ合わせる結合方策が採用されている。ここでは、結合方策の違いを概観する目的で旧型の機構を紹介した。)。具体的には、永久磁石で結合したモジュール間の脱離のために、加熱による SMA バネの伸張を利用した手法が採用されている。PolyBot では、モジュール間の結合がビス止めにより行われる (最新仕様では SMA 動力のフックを結合面においてかみ合わせる結合方策が採用されている。ここでは、M-TRAN の場合と同様に結合方法の違いを概観する目的で旧型の機構を紹介した。)。したがって、このような場合には、形態変形のために人間の手による組み換えが必要不可欠である。ATRON では、モジュール間の結合はフックのかみ合わせにより実現される。

ここで紹介したモジュラーロボットでは、モジュール間の結合機構といった特殊な機構が、電磁的・機械的に剛性の高い結合機構を用いて実現されている。また、いずれの結合機構においても、その結合の着脱は設計者の意図どおりのタイミングで予定調和的に実行されるシステムである。

前項で述べたとおり、モジュラーロボットにおける形態変形に関しては、「モジュール配置変更の組み合わせ問題の最適化」, 「モジュールの機構設計」の観点に注視して研究が行われてきた。これらの従来研究における問題点は以下の2点に集約される:

**1. 中央集権的・計画的な制御方策の採用** 従来手法においては、モジュラーロボットの形態変形をモジュール配置変更の組み合わせ問題に帰着させている。すなわち、モジュラーロボットの結合制御に中央集権的・計画的な制御方策が採用されている (たとえば、モジュールの制御自体は分散的に行われていたとしても、目標形態に関する情報が大局的に与えられている。)。そのため、「制御系」, 「機構系」, 「環境」間の相互作用は考えられておらず、制御系が全ての振る舞いを指定するシステムである。このことから、設計者の想定しない状況下においては、システム全体の整合性が損なわれる可能性がある。

本来、無限定環境下での稼働が望まれるモジュラーロボットにおいて、各モジュールの制御は完全に自律分散的に行われるべきである。

**2. 電磁的・機械的に剛性の高い結合方策の採用** 従来手法においては、モジュール間の着脱は「設計者の意図どおり」のタイミング以外では起こらない。これは、上述のとおり、モジュール間結合機構に電磁的・機械的に剛性の高い結合方策が採用されていることに起因する。このような結合方策においては、結合の着脱を行うモジュールを明示的に指定することが可能である。このため、設計者の意図に沿った制御を行うことができるが、モジュール間結合に関するすべての設定を制御する必要があるため計算負荷が大きくなるおそれが否めない。

そこで、環境適応的かつ、計算負荷の小さいモジュール間結合方策を実現するためには、環境との相互作用をとおして状況依存的な振る舞いが創発する余地を残しておくような設計が必要不可欠である。

モジュラーロボットが本質的に有するべき優れた特長を引き出すためには、構成要素である各モジュールの制御は自律分散的に行われるべきであり、さらに発現する形態はモジュール間ならびにモジュール群とそれを取り巻く環境との相互作用の中から「創発」することが望ましい。また、設計論の観点からは、設計者が明示的に設計可能であるのは、制御系と機構系のみであるということに注意を払わなければならない。

## 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、従来研究とは立場を異にして、研究の初動段階から創発という概念を強く意識することにより、制御系と機構系の相互作用を通して創発的かつ状況依存的に形態改変が可能な2次元モジュラーロボットを開発し、生存脳機能の観点からその有効性を検証することである。この要請に対して、本研究では、「物理的・計算的資源の有限性という制約を受ける行動主体が無限定環境下において実時間適応的に振る舞うためには、創発現象を活用する以外に方策はない。そして、行動主体の制御系と機構系間の相互作用ダイナミクスの調和のとれた状態において生存脳機能等の興味

深い現象が創発する」という作業仮説を採用する。この作業仮説に基づいて、本研究では、制御系と機構系間の相互作用を活用したモジュラーロボット Slimebot を構築する。本論文では、シミュレーション、実機実験を用いて、構築した Slimebot に関する生存脳機能(環境適応性, 拡張性, 耐故障性)を検証する。

## 1.4 本論文の構成

本論文「制御系と機構系間の相互作用を活用したモジュラーロボットの創発的形態制御」は、多数の機械ユニットから構成されるモジュラーロボットの形態制御問題を事例として採り上げ、無限定環境下での生存脳機能の発現原理の解明とその人工物への実装方策を考察したものであり、全7章からなる。

第1章の緒論では、本研究の背景・目的を説明した。本研究では、従来の人工物における環境変動に対する脆弱性を解決するために、研究の初動段階から創発という概念を論じることが重要であると述べた。そして、制御系と機構系の相互作用を通して創発的な形態制御を行うモジュラーロボット Slimebot を開発し、生存脳機能の観点からその有効性を検証することが本研究の目的であると述べた。

第2章では、生存脳機能を有するシステムの理解・構築に向けて、「有限な物理的・計算的資源に制約を受ける行動主体が無限定環境下において実時間適応的に振る舞うためには、創発現象を活用する以外に方策はない。そして、行動主体の制御系と機構系間の相互作用ダイナミクスの調和のとれた状態において生存脳機能等の興味深い現象が創発する」といった作業仮説を導出することにより本研究の立場を明確にしている。

第3章では、提案するモジュラーロボット Slimebot について述べている。第2章で導出した作業仮説に基づき、機構系の工夫として機能性素材を用いたモジュール間の自発的結合制御機構を、制御系の工夫として非線形振動子の相互引き込み現象を活用した自律分散的なロコモーション生成機構を考案し、モジュラーロボットとしてコヒーレントなロコモーションを生成することを述べている。

第4章では、Slimebot について、シミュレーションによる創発的形態制御に関する検証を行っている。シミュレーションの結果、優れた実時間適応性, 拡張性, 耐故障

性などの特性が実現されることを確認している。

第5章では，Slimebot について，実環境における有効性を調べるために開発した実機に関して説明している．完全自律型としての実機設計ならびに，Morphological computation を活用した機構設計に関して述べている．

第6章では，Slimebot 実機による創発的形態制御に関する検証を行っている．開発した実機においても，初期形態によらないロコモーション生成，自発的なモジュール間結合，環境適応的な形態変形が可能であることを示している．

第7章では，論文全体のまとめと今後の展望を述べている．





## 第2章 生存脳機能を有するシステムの理解・構築に向けた作業仮説の導出

### 2.1 物理的・計算的資源の有限性という制約を受ける行動主体

生存脳機能を発現するシステムの理解・構築のためには、行動主体が無限定環境の中でどのような制約に基づいて振る舞いを生成しなければならないかについて考察する必要がある。最も甚大な制約として、非構造的で予測不能的に変動する無限定環境に対して、行動主体は自身の物理的・計算的資源が有限であるということに注意しなければならない。

行動主体においては、身体という限られた物理的空間内部に制御系や駆動系、知覚系といったあらゆる資源を実装する必要がある。これに対して、実世界における環境の変化をあらかじめ定義することはできない。この意味において、行動主体にとって環境の変化は予測が不可能であると言える。行動主体の計算資源の有限性から明白なとおり、行動主体は、全ての環境変動の様子を知識として蓄えておくことができない。そこで、生存脳機能の発現においては、知識に頼る必要のない適応的なプロセスが必然的に必要とされるはずである。このため、物理的・計算的資源の有限性という制約をどのように解決すべきかは重要な問題である。

この問題の解決の糸口を与える興味深い事例として、昆虫の翅の構造が挙げられる。昆虫は驚異的な飛翔能力を示すが、この優れた能力の実現のためには、1回の翅の上下運動から空気力学的に妥当な力をできるだけ多く産出する必要がある。このため、昆虫の翅は、ストロークの最中に「ねじれ」や「しなり」といった複雑な挙動を見せる。

Wootton は、昆虫の翅の材質が図 2.1(a) に示すような構造になっていること (硬い材質の配置が、前後非対称になっていることに注意されたい。) に着目し、この材質の構成が優れた飛翔能力の実現に寄与していることを明らかにした [12][13]. 同図 (b) に示すような前後対称的な材質の配置からは、飛翔に適した力を生み出すことはできないのである. このような材質の配置は、昆虫が四六時中絶妙なストロークの制御を行うことから解放し、飛翔制御を司る神経系の構造を劇的に単純化することに寄与していると考えられる. 周知のとおり、昆虫が有する神経細胞の数はたかだか  $10^4 \sim 10^5$  程度であり、ヒトの神経細胞の数が  $10^{11} \sim 10^{12}$  個程度であることを考えると、その数はきわめて少ない. したがって、このような限られた計算資源を有効に活用するために、身体系 (機構系) の工夫が著しく顕在化していると推察される [14][15].

## 2.2 無限定環境における実時間適応問題

物理的・計算的資源の有限性という制約を受ける行動主体が、無限定環境に対処するためには、機構系の工夫が重要であることは前節で示したとおりである. それでは、さらに「実時間」で適応するためにはさらに何が重要となるのであろうか?

近年、ロボティクスの分野では、この問題を解決する可能性があるとして進化ロボティクス [16][17] が注目を集めた. この手法の特長は、設計者が陽に意識しなくても、身体性のみならず環境との相互作用が構築される制御系に反映される点である. しかしながら、現在のところ、無限定環境への実時間適応の観点からは完全な成功を収めてはいない. この手法のもとでは、ある特定の環境もしくは幾つかの環境に適性の高い制御系は構築されるが、創発的な振る舞いの可能な制御系の構築が困難である結果に終わる研究が多いのが現状である. また、遺伝的操作をオンラインで実行することによる対処も考えられるが、常に実時間で変動する無限定環境に対して、進化的プロセスの反映は必然的に後手になるため、最終的に破綻することは想像に難くない.

以上のことから、実時間で適応的な振る舞いを創発するシステムを構築するためには、研究の初動段階から「制御系」、「機構系」、「環境」間の相互作用ダイナミクスから振る舞いが創発するといった観点に立脚することが重要である.

## 2.3 制御系－機構系－環境間の相互作用から創発する振る舞い

実時間で適応的な振る舞いを創発するシステムを構築するための設計指針は、依然として暗中模索の段階にある。しかしながら、無限定環境の中で振る舞う行動主体を設計する観点からは明白な事実がある。すなわち、設計者がその仕様を直接的に指定可能であるのは、制御系ならびに機構系のみであるといった事実である。そこで、必然的に、制御系、機構系間の相互作用ダイナミクスを注意深く設計する必要性が出てくる。このことは、行動主体を設計する際には、与えられた機構系のダイナミクスを積極的に活用するような制御系を採用するのみならず、制御系の潜在能力を引き出すように機構系のダイナミクスも併せて改変することの重要性を示唆している。これは、換言すれば、ロボットの制御系と機構系の設計は分離独立して行うことができない、ということになる。

したがって、機構系のダイナミクスと制御系のダイナミクスの間には、「適切なミーティングポイント」とでも呼ぶべき組み合わせがあるはずであり、このような両ダイナミクスの調和のとれた状態を考慮することによって、生存脳機能等の興味深い現象が創発する可能性がある [15][18]。

## 2.4 採用する作業仮説

以上から、本研究では、「有限な物理的・計算的資源に制約を受ける行動主体が無限定環境下において実時間適応的に振る舞うためには、創発現象を活用する以外に方策はない。そして、行動主体の制御系と機構系間の相互作用ダイナミクスの調和のとれた状態において生存脳機能等の興味深い現象が創発する」といった作業仮説を採用する。特に、本研究で取り扱うアメーバ様のロコモーションを行うモジュラーロボット Slimebot の設計においては、(1) 機能性素材の有する力学的特性の活用、ならびに制御系に関して、(2) 非線形振動子の相互引き込みを活用したロコモーションの誘起、という2つの工夫を主として導入する。そして、Slimebot の機構系、制御系の相互作用ダイナミクスの中から生存脳機能(環境適応性、各縮性、耐故障性)が発現することを期

待する。Slimebotの詳細については、3章で述べる。

## 2.5 まとめ

本章では、本研究で採用する生存脳機能を発現するシステムの理解・構築に向けた作業仮説の導出を行った。生存脳機能を発現するシステムの設計指針については、依然明らかにはされてはいないが、行動主体が無限定環境の中で適応的に振る舞うための必要条件を列挙することで、構成論的なアプローチを採用するための指針を設定した。

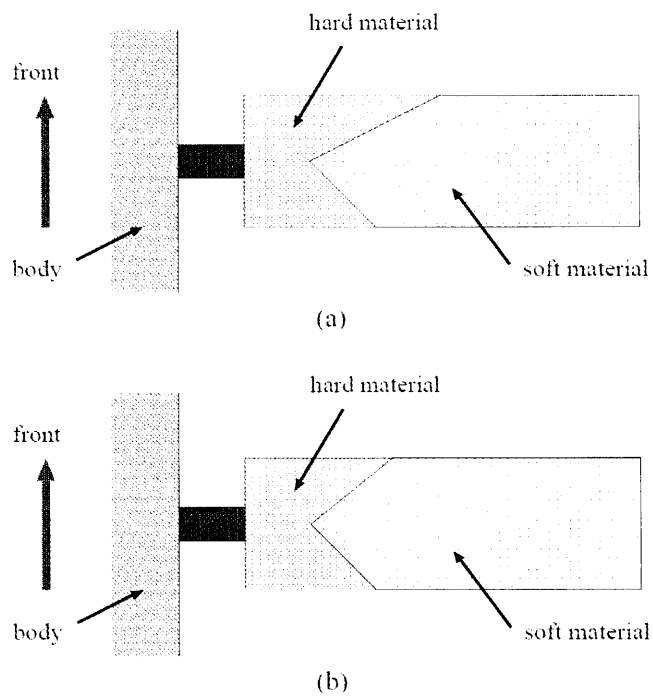


図 2.1: 昆虫の翅の構造



# 第3章 制御系と機構系間の相互作用を活用したモジュラーロボット Slimebot

本章では、第2章で導出した作業仮説に基づき開発した、制御系と機構系間の相互作用を活用したモジュラーロボット Slimebot のモデルについて述べる。本研究では、Slimebot にアメーバ様ロコモーションを発現させるために、機構系に関して、(1) 機能性素材の有する力学的特性の活用、ならびに制御系に関して、(2) 非線形振動子の相互引き込みを活用したロコモーションの誘起、という2つの工夫を主として導入する。前者をモジュール間の自発的な結合制御機構として、そして後者をシステムとしてコヒーレントなロコモーションパターンの生成機構として活用することにより、モジュラーロボットの創発的な形態制御方策の構築を試みる。

## 3.1 機能性素材の有する力学的特性を活用した機構系

### 3.1.1 ベルクロテープによる自発的結合機構

従来のモジュラーロボットでは、モジュールどうしを剛性の高い結合機構によって、電磁的・機械的に接続する手法が多用されている。しかしながら、このような結合形態の下では、モジュールどうしの接続も明示的に制御しなければならないため、最終的に必要とされる制御アルゴリズムは大規模かつ複雑なものとなることが不可避となる。さらに、剛性の高い結合機構を介してモジュール群を接続させると、モジュラーロボットが本質的に有する環境変化に対する柔軟性といった優れた特徴を低減させてしまう可能性も否めない。

そこで本研究では、接着力を有する機能性素材としてベルクロテープに着目する。ベ

ルクロテープは、テープどうしが接触すると容易に結合し、さらに結合したものどうしに降伏応力以上の負荷がかかると自動的に脱離するという特性を有している。この素材自体が有する力学的特性を活用することで、形態制御に自発的かつ創発的特性が発現することが期待される。すなわち、降伏応力以上の力がかかる結合部は自動的に脱離するため、モジュラーロボットと環境との間で生じた力学的な条件の変化に応じた結合の着脱が期待できる。

剛性の高い結合機構の下では、このような状況が起こらないように四六時中絶妙な制御を行うことが要求され、必然的にその制御の負荷はきわめて大きくなるであろう。本研究ではある意味、機能性素材にモジュールどうしの脱着の制御を担わせている、と換言することもできる。近年、ソフトロボティクスの分野に代表されるように、制御系と機構系のダイナミクスを有機的に干渉させる重要性が認識されつつある [15][18]。筆者の知る限り、本研究は、モジュラーロボットの制御にその思想を明示的に導入したはじめての研究と言える（モジュラーロボットのような本質的に超多自由度が存在することが前提である機構系には、このような思想はそもそも必須となるはずである）。

### 3.1.2 モジュールの機構系

各モジュールは図 3.1 に示すような機械構造を持ち、モジュール間の結合は機能性素材（ベルクロテープ）を介して行われる。ここで、結合したモジュール間においては局所的な通信が可能であると仮定している。また、各モジュールは、伸縮可能な複数の腕と地面との接地摩擦の大小を制御できる機構を有している。

各モジュールの移動は、腕の伸縮と地面との摩擦を活用することにより生成される。したがって、各モジュールは自走機能を持たず、複数のモジュールが協調してはじめてモジュールの移動が可能となる。さらに、目的方向を示す光を検知するセンサも併せて有しているものとした。また、モジュール実機に必要な詳細仕様については、第5章にて述べる。



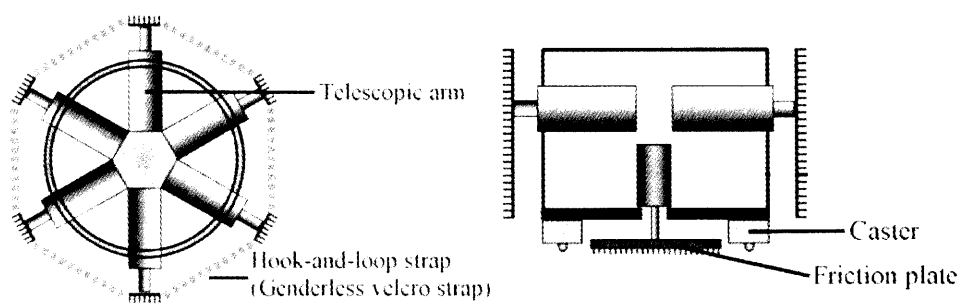


図 3.1: モジュール機構系の上面図 (左) と側面図 (右)

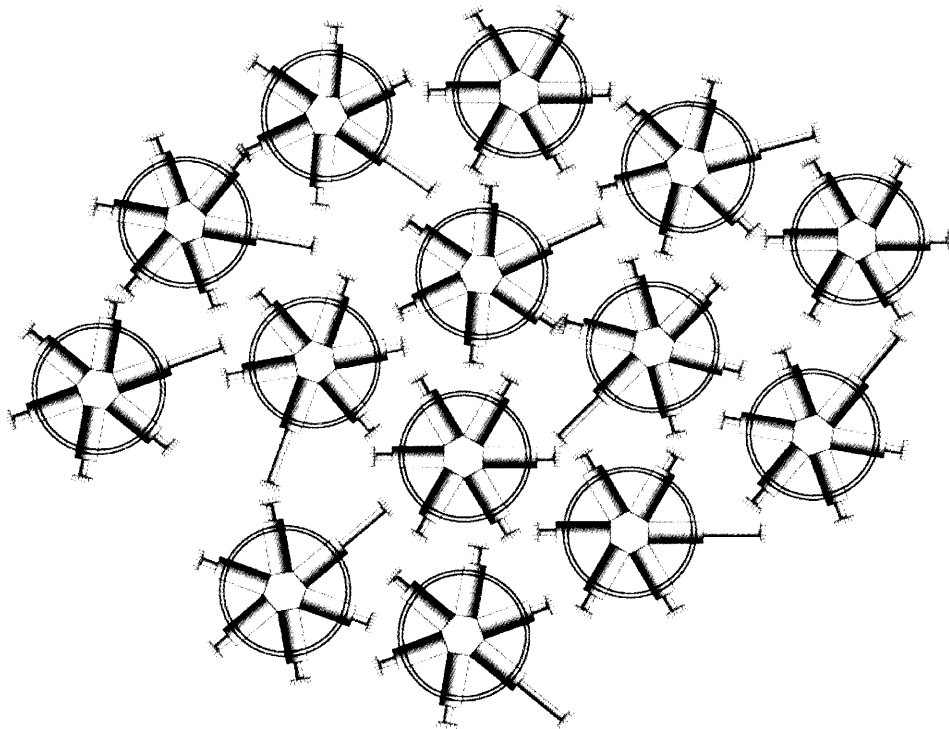


図 3.2: モジュラーロボット Slimebot の概念図

## 3.2 非線形振動子間の相互引き込みを活用した制御系

本節では、提案するモジュール (図 3.1 参照) を複数個集めて図 3.2 のようなモジュール群を形成した場合、これを群としてのまとまり (コヒーレンシー) を維持しながら合目的的に形態を改変可能な制御方策を考える。ここで注意すべきことは、実装すべき制御方策は群の形態やモジュール数に依存してはならない、ということである。この要請 (すなわち拡張性) を満たすために、筆者は、非線形振動子群が発現する相互引き込み現象に着目した。具体的には、各モジュールに非線形振動子を実装し、これら振動子間 (結合したモジュール間) の相互引き込みを通して、各モジュールが有する腕の伸縮ならびに接地摩擦制御のタイミングの整合、群内部での伝搬を図る。以下、その制御方策を説明する。

### 3.2.1 アクティブモードとパッシブモード

次に、各モジュールの基本動作を定義する。各モジュールは、自身が移動する「アクティブモード」と、自身は移動しない「パッシブモード」と呼ばれる二つの動作モードを持つ。アクティブモードでは、各モジュールは結合している腕の伸縮を意図的に行うと同時に、地面との摩擦を低くすることで群内における移動を生成する。一方、パッシブモードでは、各モジュールは腕を自然長 (最大長と最小長の間長の長さ) に戻すと同時に地面との摩擦を高くするモードである。このモードにあるモジュール自身が動くことはないものの、アクティブモードにあるモジュール群が効率よく進むための「支点」として機能する (図 3.3 参照)。これは、群全体が推進力を地面からの外力として得るために必須の機構である。この機構がない場合には、各モジュールの腕の伸縮によるアクチュエーションはモジュール群内部における内力としてしか作用しないため、群全体としての移動は不可能である。

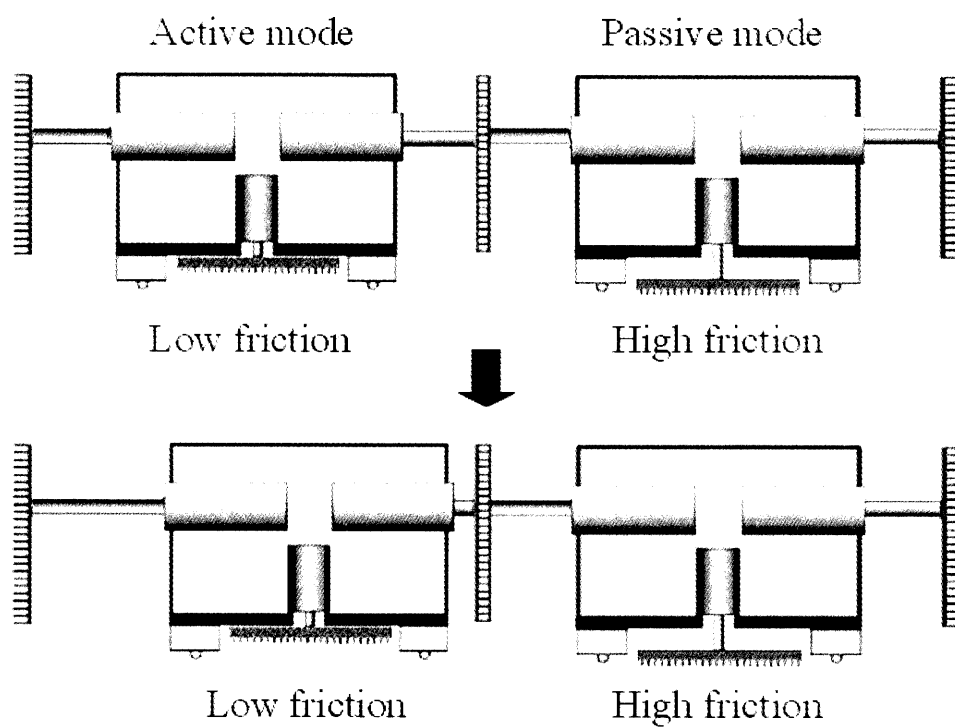


図 3.3: アクティブモードとパッシブモード (側面図)

### 3.2.2 van del Pol 振動子による周期的なモード切替

二つの動作モード（アクティブモードとパッシブモード）の切り替えタイミング生成の為に、各モジュールに次式のような VDP (van der Pol) 振動子を導入した：

$$\alpha_i \ddot{x}_i - \beta_i (1 - x_i^2) \dot{x}_i + x_i = 0 \quad (3.1)$$

ここで、 $\alpha_i$  は振動数を、そして  $\beta_i$  は非線形振動のリミットサイクルに収束する速度をそれぞれ規定するパラメータである。また、式 (3.1) は、図 3.4 のようなアトラクタを有するリミットサイクルを描く非線形振動子系である。

### 3.2.3 振動子間の拡散的な相互作用

次に、非線形振動子間の相互作用を規定する。相互作用として求められる要請は、拡散的な振る舞いを導入することである。より複雑な相互作用を想定することもできるが、理解の容易さから、結合した振動子間の互いの位相差を平均化するように作用する、単純な相互作用を採用する。説明の便宜上、相互作用前のモジュールの振動状態を  $x_i^{\text{tmp}}$ 、相互作用によって更新された状態を  $x_i$  と表すことにする。具体的に用いた式を以下に示す：

$$x_i = x_i^{\text{tmp}} + \varepsilon \left( \frac{1}{N_i} \sum_j x_j^{\text{tmp}} - x_i^{\text{tmp}} \right) \quad (3.2)$$

式中の  $N_i$  は、時刻  $t$  においてモジュール  $i$  に隣接するモジュールの数を表している。ここで、 $N_i$  は形態変形に伴って、動的かつ離散的に変化するという事に注意されたい。隣り合うモジュール群が最密充填構造を形成したときに、もつとも多い  $N_i = 6$  となり、結合しているモジュールが無い場合には、式 (3.2) は計算されない。従来の非線形振動子間の相互引き込みを議論する多くの研究においては、非線形振動子群のトポロジーは不変であるとされている。本研究においては、この点に関して多くの従来研究とは異なり、非線形振動子群のトポロジーが動的に変化する。また、この仕組みが制御系、機構系、環境間での相互作用ダイナミクスを生成していることに注意されたい。

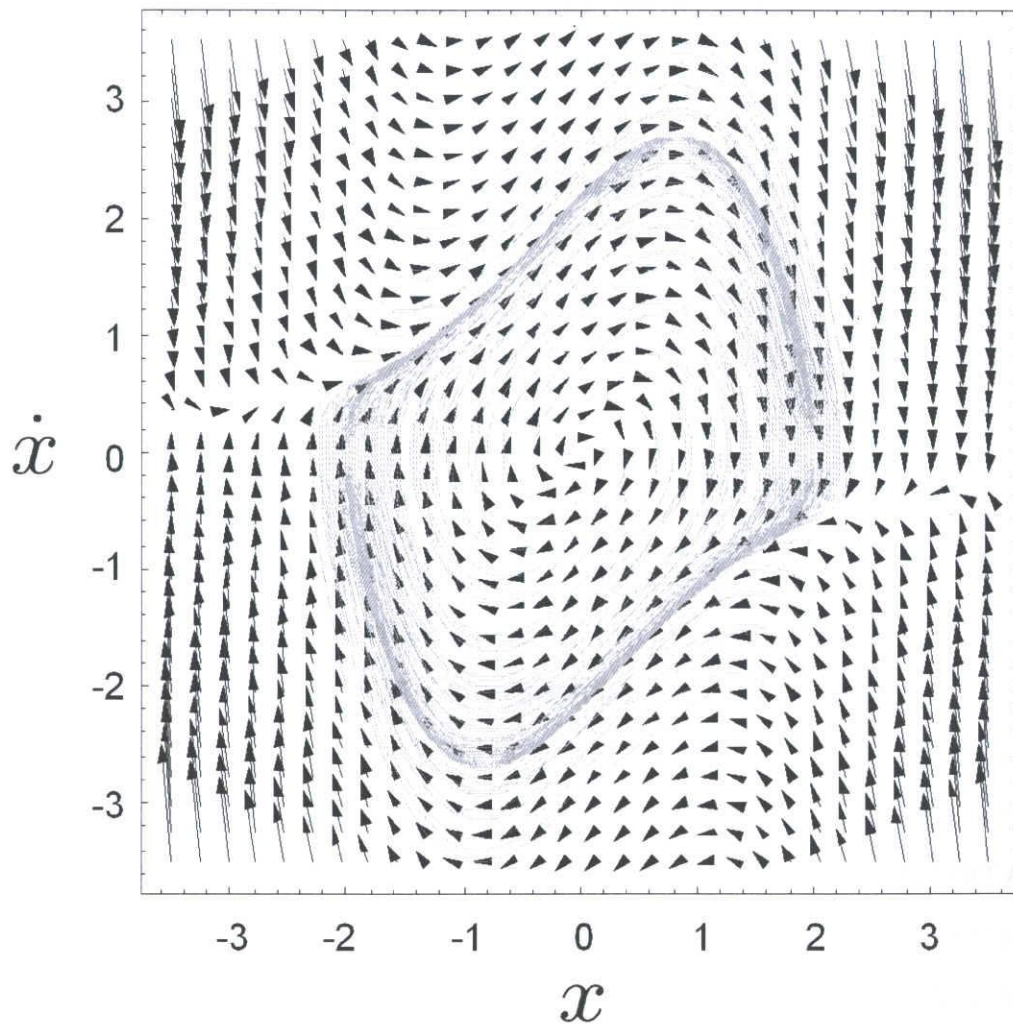


図 3.4: VDP 振動子のアトラクタとリミットサイクル ( $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$ )

### 3.2.4 相互引き込み現象による位相勾配の形成

ここで、複数の VDP 振動子が式 (3.2) に従って相互作用する際に、一部の振動子に対して式 (3.1) における  $\alpha_i$  の値に変化を与えることで、振動子間に有意な位相勾配を効果的に構成することができる。そこで、モジュール群を円状に配置して、目的光を紙面上方から照射した際の等位相面の様子を図 3.5 に示す。原形質流動を効果的に発現させるために、次式のように  $\alpha_i$  の値を設定した：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7 & : \text{目的光を検知したモジュール} \\ 1.3 & : \text{外縁モジュール} \\ 1.0 & : \text{その他(群の内部)のモジュール} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで矢印は位相勾配方向を表している。また、同図上方はモジュラーロボットにとって前方を意味している。

### 3.2.5 ロコモーションの生成

システム全体としてコヒーレントなロコモーションの生成のために、二つの動作モードの切り替えタイミングは、式 (3.1) による VDP 振動子の位相  $\theta_i$  と対応づけられる。本研究では、図 3.6 に示すように、VDP 振動子の一周期  $T$  における位相  $2\pi$  は  $N_p$  等分され、各位相区間に相当する時間  $T/N_p$  において、アクティブモードとパッシブモードのデューティ比  $\gamma$  が設定されるものとした。すなわち、回転数  $n$  の一般角を考慮した、任意の VDP 振動子の位相  $(n-1)\pi \leq \theta_i(t) < (n+1)\pi$  を  $N_p$  等分し、各区間におけるアクティブモードとパッシブモードの期間がそれぞれ  $T_a/N_p$ 、 $T_p/N_p$  であるとすると、デューティ比  $\gamma$  の定義式は式 (3.4) となる：

$$\begin{aligned} \frac{T}{N_p} &= \frac{T_a}{N_p} + \frac{T_p}{N_p}, \\ \gamma &= \frac{T_a}{T_a + T_p} \end{aligned} \quad (3.4)$$

次に、二つの動作モードと VDP 振動子間の相互引き込みにより発現した位相勾配を対応づける。図 3.5 のような等位相面の下で、式 (3.4) の定義に従ってデューティ比  $\gamma$  を設定すると、動作モード切り替えのタイミングが進行波としてモジュール群内部

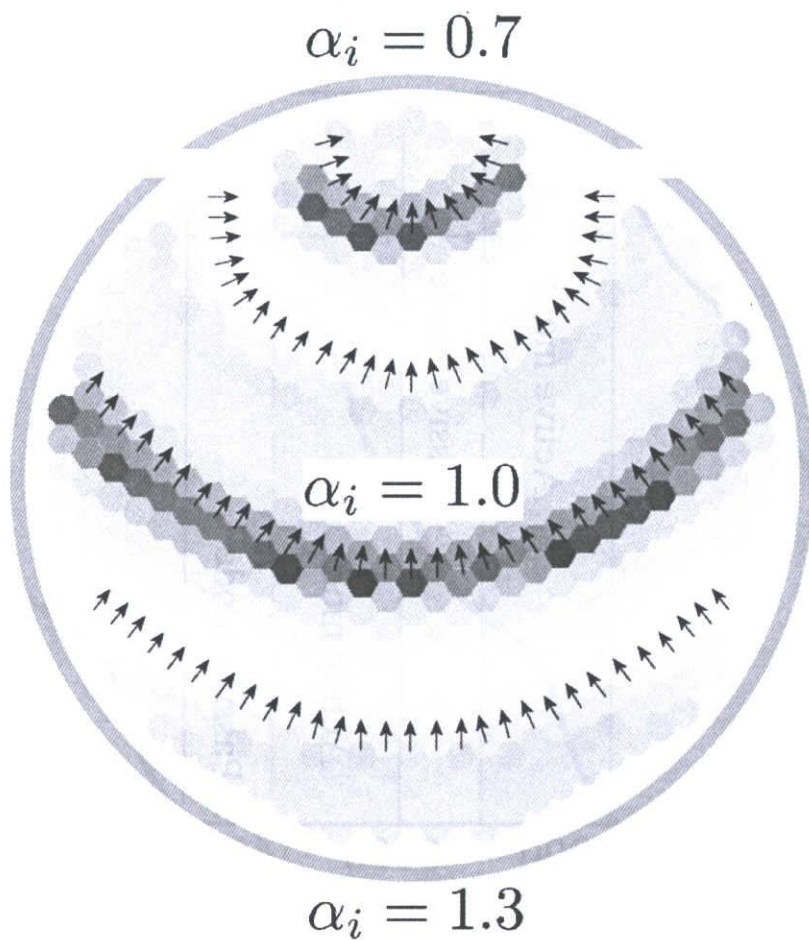


図 3.5: 500 個のモジュールを円盤状に配置して  $\alpha_i$  に式 (3.3) の分布を与えた際の, 結合 VDP 振動子群が作る等位相面



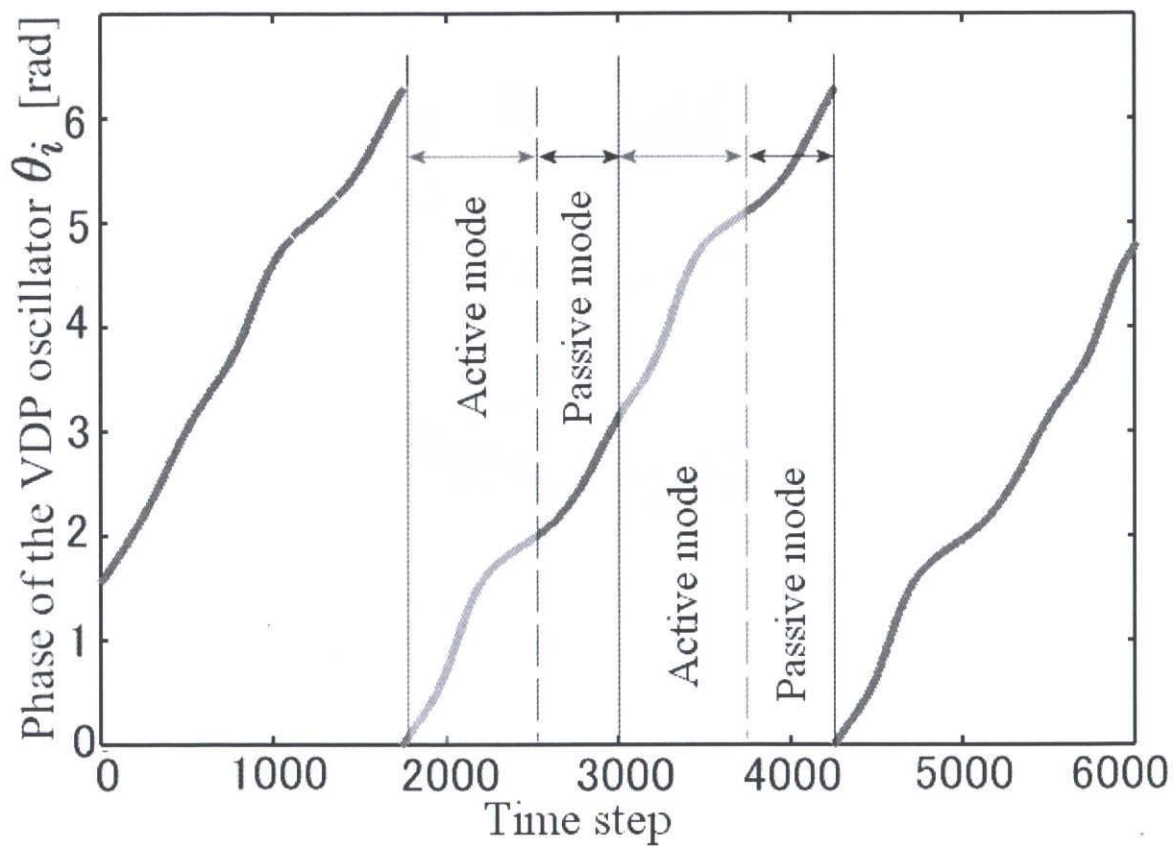


図 3.6: アクティブモードとパッシブモード間のデューティ比

の位相が最も進んだ点（VDP 位相勾配の頂上）からその周囲へ伝播する．この際，モジュール  $j$  と結合しているモジュール  $i$  の腕による伸縮力  $\mathbf{F}_i^{\text{Arm } j}$  を，次式のように結合しているモジュール  $j$  との位相差に比例するように与える：

$$\mathbf{F}_i^{\text{Arm } j} = -k\{\theta_j - \theta_i\}\mathbf{e}_{ij}, \quad (3.5)$$

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{x}_i}{x_i}\right), \quad (3.6)$$

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i||\mathbf{r}_j|}$$

ここで， $k$  は正の定数である． $\theta_j$  は，モジュール  $i$  に結合した近傍モジュール  $j$  の VDP 振動子の位相を表す．この結果，各モジュールの実効的な腕の伸縮量は等位相面の法線方向で最も顕著となり，図 3.5 の状況下ではモジュールは VDP 位相勾配の頂上に向かって自律分散的に移動しようとする．

各モジュールの腕の伸縮からモジュラーロボット全体の動きへの変換プロセスを，以下，より詳細に説明する．VDP 振動子の位相勾配により，モジュール  $i$  における各腕  $m$  は，式 (3.5) にしたがって伸縮力を出力する．その結果，勾配の急峻な方向の腕に関してはより強い伸縮力を出力し，勾配のなだらかな方向の腕に関しては弱い伸縮力を出力することになる．さらに，勾配が正（モジュール  $j$  がモジュール  $i$  よりも位相が進んでいる）の場合には腕を縮め，勾配が負（モジュール  $j$  がモジュール  $i$  よりも位相が遅れている）の場合には腕を伸ばすことになる．したがって，腕の伸縮方向とモジュール  $i$  にかかる正味の合力の結果，図 3.5 にも示すような位相勾配の等位相面の法線方向に対して，モジュール  $i$  が移動しようとする傾向が顕在化する．このような最終的に顕在化した方向を持つベクトルのことを，便宜上，「運動方向ベクトル」と呼ぶことにする．モジュール群内部で，この運動方向ベクトルがそろっている部分では，各モジュールはより効率的に腕を伸縮することが可能となっていることに注意されたい．すなわち，同じ等位相面上に位置するモジュール群であっても，その位置関係によって各モジュールの移動しやすさは大きく異なる．この等位相面上における運動方向ベクトルの分布の不均一性（両側部は群内部に向かい，中心部付近は進行方向を向く）によって，群全体としてのコヒーレンスを維持しながら，モジュラーロボット全体を目的光に向かって推進することが可能となるのである．

### 3.3 まとめ

本章では、提案するモジュラーロボット Slimebot について、モデルにおける機構系、制御系の仕様を説明した。第2章で導出した作業仮説に基づき、機構系の工夫として機能性素材を用いたモジュール間の自発的結合制御機構を、制御系の工夫として非線形振動子の相互引き込み現象を活用した自律分散的なロコモーション生成機構を考案し、モジュラーロボットとしてコヒーレントなロコモーションを生成することを述べた。以降では、本モデルについて生存脳機能に関する検証をシミュレーション(第4章)、実機実験(第5章, 第6章)の両面から行う。



## 第4章 シミュレーションによる創発的形態制御に関する検証

本章では、第3章で構築した Slimebot モデルに関して、創発的形態制御に関する検証をシミュレーションにより、次の2つの観点から行う。第1に Slimebot に期待される生存脳機能の発現に関する検証を、第2にその発現に大きく関わる形態維持機能の発現に関する検証を行う。

### 4.1 分子動力学法に基づく動力学シミュレータ

本研究では、Slimebot のモデルの動力的な解析を行うために、分子動力学法に基づく動力学シミュレータを構築した。本節では、構築したシミュレータ、ならびに Slimebot のモデル化について説明する。

#### 4.1.1 分子動力学法

分子動力学法とは、多数の粒子から成る力学系の運動方程式を差分方程式で近似して数値積分し、粒子の位置と速度(あるいは運動量)を時間の関数として求める数値解析手法である [19][20]。通常は、ミクロな系の物理現象のダイナミクスを解析するために用いられる手法であるが、一般の多体系の運動方程式を解くことが可能であるため、本研究においても、モジュラーロボットの動力学シミュレータとして採用した。本研究においては、運動方程式の時間発展を速度 Verlet 法により数値的に計算している。

### 4.1.2 モジュールのモデル化

シミュレーションにおいては、各モジュールは質点に近似して表現される。モジュール半径は、等方的なソフトコアポテンシャルの有効距離により表現される。また、提案手法においては、2つの動作モード(アクティブモード、パッシブモード)が存在するため、両モードにおける運動方程式の振る舞いを設定する。具体的には、パッシブモードにおいては、モジュールと接地面との摩擦が非常に大きいと設定しモジュールは全く動かないと仮定して、位置の時間発展を止めて、モジュールの速度、作用する外力をゼロにする。反対に、アクティブモードにおいては、接地摩擦が全くないと仮定して、接地摩擦の作用しない運動方程式を解く。モジュール*i*のアクティブモードにおける運動方程式は、次式のように表現される。

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i + c_i \dot{\mathbf{r}}_i = \sum_j \left\{ \mathbf{F}_i^{\text{Arm } j} - \mathbf{F}_j^{\text{Arm } i} - \nabla \phi_{ij}^{\text{Mod}} \right\} + \mathbf{F}^{\text{Env}} \quad (4.1)$$

ここで、 $m_i, c_i$  はそれぞれモジュール*i*に関する、質量、機構系の仕様に依存する粘性抵抗係数を表す。インデックス*j*はモジュール*i*と結合しているモジュールの番号を表す。 $\mathbf{F}_i^{\text{Arm } j}$  は、式(3.5)で述べたモジュール*j*と結合しているモジュール*i*の腕による伸縮力を表す。また、 $\phi_{ij}^{\text{Mod}}$  は、モジュールの半径内の領域に入れないことを保証するソフトコアポテンシャルを表す。 $\mathbf{F}^{\text{Env}}$  は、環境(障害物)から受ける外力を表す。

### 4.1.3 ベルクロテープのモデル化

ベルクロテープによる結合機構のモデル化について説明する。ベルクロテープの力学特性は、降伏応力の設定により特徴付けられモデル化される。したがって、脱離は、結合部位間における脱離方向への応力が設定された降伏応力を超えた際に起こる。一方、結合は、各モジュールの腕が接触する位置で自発的に起こるものとした。具体的には、運動方程式にベルクロテープによる引力相互作用を導入しているわけではなく、モジュール間が腕の結合可能距離まで近づくと腕の伸縮力(式(4.1)右辺の $\mathbf{F}_i^{\text{Arm } j} + \mathbf{F}_j^{\text{Arm } i}$ )を作用させて、脱離方向への応力が降伏応力を超えた際には、腕の伸縮力がゼロなるように設定した。

#### 4.1.4 環境のモデル化

シミュレーションにおいては、環境は障害物の配置により特徴付けられる。障害物はソフトコアポテンシャルを有する粒子を複数配置することにより、自由な配置(障害物の形状)が可能ないように設計し、障害物からの外力  $F^{Env}$  を設定した。

## 4.2 生存脳機能の発現に関する検証

本節では、Slimebot における生存脳機能の発現に関して、環境適応性、拡張性、耐故障性の観点から検証した。

### 4.2.1 環境適応性と拡張性の検証

ここでは、障害物の存在する空間において目的の光源に向かうことを Slimebot にタスクとして与え、環境適応性の検証を行った。目的の光源は後述するシミュレーション結果の図の上方から与えられ、モジュラーロボットは上方に移動するものとする。シミュレーション条件を以下に示す：

**モジュール数**：100,500

**初期配置**：円盤状配置(各モジュールの間隔は、腕の自然長であり、各モジュールは最密充填構造を形成するように配置される)

**障害物**：円筒状障害物×2

**デューティ比**：0.6

**VDP 振動子のパラメータ**：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7 & : \text{目的光を検知したモジュール} \\ 1.3 & : \text{外縁モジュール} \\ 1.0 & : \text{その他(群の内部)のモジュール} \end{cases}$$

$$\beta_i = 1.0$$

$$\varepsilon = 0.01$$

シミュレーションの結果を図 4.1, 4.2 に示す. 左から順に, 時間推移にしたがったスナップショットとなっている. それぞれ, モジュール数 100, 500 のシミュレーション結果を表す. どちらの結果においても, Slimebot は, 群全体のコヒーレンスを失うことなく環境適応的に行動している様子が見てとれる. これらの結果から, Slimebot が優れた環境適応性, 拡張性を有していることがわかる. 以下に, 本結果について4つの観点からさらに議論する:

**無限定環境に対する適応性** 第1に無限定環境に対する適応性が挙げられる. 本検証においては, Slimebot があらかじめ環境を把握しているものではない. Slimebot は, 自身が移動して, 障害物に接触することにより環境の状態を認識する. その結果が, モジュールの配置変更 (機構系の改変) として現れ, VDP 振動子群の等位相面の変化 (制御系の改変) として反映される. この結果は, 制御系, 機構系間の相互作用のあるべき姿を端的に現すものではないが, 相互作用が適切に働いたために無限定環境に対する適応性が表れたであろうことは示唆される.

**創発的な行動選択** 第2にモジュール数の違いにより, 異なった環境適応行動が創発しているということが挙げられる. 図 4.1 においては, 円筒状の障害物間をとおり抜けるよう行動しているのに対し, 図 4.2 においては, 障害物を取り囲むよう行動している. ここで, これらの行動は, あらかじめプログラムされているものではなく, 完全に創発していることに注意されたい.

**形態維持のための表面張力的効果** 第3に表面張力的な効果が, モジュラーロボットとしての群全体のコヒーレンスの維持に寄与していることが挙げられる. 図 4.1 に示されるシミュレーションにおいては, 時間ステップ 30,000 の周辺において, 目的光を一時的に遮断している. このような状況下では, モジュラーロボットは, 円盤状の形態に変形している. これは, 群の外側のモジュールが内側に向かって移動していることにより生じる表面張力効果によるもので, モジュラーロボットの表面積を最小にしようとする影響により円盤状の形態を形成する. シミュレーションにおいて, この効果を含まないような  $\alpha_i$  の設定の下では, 群のコヒーレンスを保つことができない. こ



の表面張力的な効果に関しては、後述する 4.3 節にて検証を行う。

**局所相互作用から生成される大域情報** 第 4 に局所情報からの大域情報の生成が挙げられる。図 4.1, 4.2 においては、既に述べたように創発的な行動が発現しているが、どのモジュールについても、あたかも目的光の位置を知っているかのように動いている。これは、VDP 振動子間の相互引き込みという局所情報から目的方向という大域情報が生成されたことを意味している。

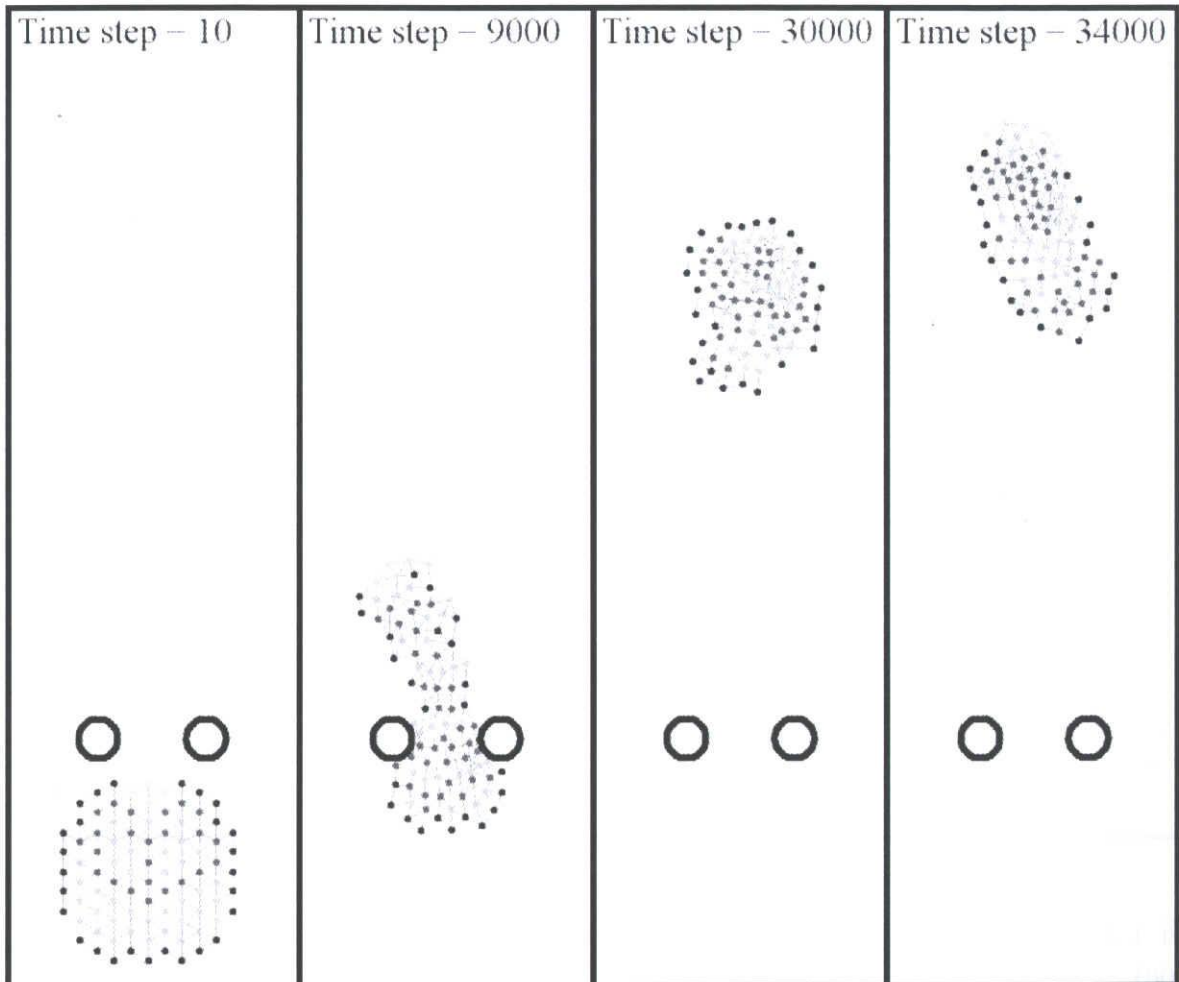


図 4.1: 障害物の存在する環境下における Slimebot の形態の時間発展 (モジュール数 100)

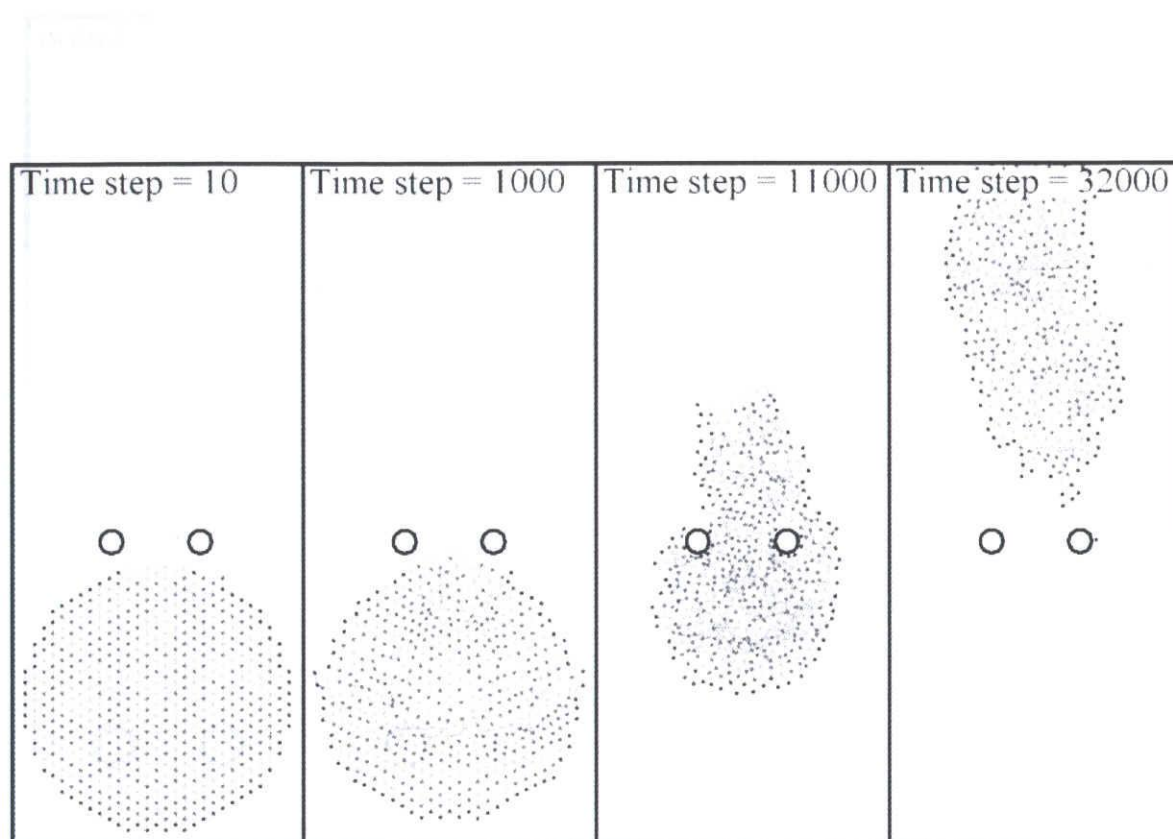


図 4.2: 障害物の存在する環境下における Slimebot の形態の時間発展 (モジュール数 500)

### 4.2.2 耐故障性の検証

これまでの検証を通して、提案するモジュラーロボットは、優れた実時間適応性、拡張性を有していることを示してきた。一方、モジュラーロボットに要請される別の重要な特性として耐故障性が挙げられる。そこで本節では、Slimebot における耐故障性を検証する。

耐故障性の検証を行うためには、モジュールの故障の様式を定義する必要がある。故障の様式にはさまざまな形態が考えられるが、ここではもともと甚大な「モジュール内電源の機能不全」による影響を想定する。Slimebot モデルの仕様から、電源関係の故障は次に示すとおり、モジュールを構成する3種類の機能単位により特徴付けられる:

#### 1. 腕の伸縮機能の停止 (モジュール単位のアクチュエーションに関わる故障)

当該モジュールは腕の伸縮力を失い、モジュール単位のアクチュエーションが不可能となる。

#### 2. モジュール間通信機能の停止 (モジュール間の協調に関わる故障)

各モジュールに実装されている VDP 振動子間の相互引き込みが不可能となり、位相勾配が生成されない状態となる。

#### 3. 接地摩擦制御機能の停止 (モジュール群における外力の伝達に関わる故障)

各モジュールの設置摩擦制御機能が停止した場合、接地摩擦の高低の切り替えが不可能となる。このような場合、次の2とおりの停止の仕方が考えられる。

(a) 低 接地摩擦状態, (b) 高 接地摩擦状態

以上のような3種類の機能停止に関して、すべての組み合わせを想定すると7とおりの故障の様式が定義できる。しかしながら、様式の特徴を考慮することで、検証すべき様式のパターン数を減少させることができる。まず、1の機能停止のみが起こることを想定し、これを「故障の様式A」と呼ぶ。次に、2の機能停止が起こると、隣接モジュール間との VDP 振動子の位相差が計算不可能となるために、同時に1の機能停止も誘発される。そこで、これを「故障の様式B」と呼ぶ。最後に、様式Bの状態では、3の機能

停止が起こることを想定し、これを「故障の様式 C」と呼ぶ。以上をまとめると次のようになる:

故障の様式 A	{	腕のアクチュエーション機能	: 故障
		モジュール間通信機能	: 正常
		接地摩擦機能	: 正常
故障の様式 B	{	腕のアクチュエーション機能	: 故障
		モジュール間通信機能	: 故障
		接地摩擦機能	: 正常
故障の様式 C	{	腕のアクチュエーション機能	: 故障
		モジュール間通信機能	: 故障
		接地摩擦機能	: 故障

これらの様式 A, B, C に関して、具体的な計測方法を述べる。本検証では、モジュール数を 10 に固定した状態において、故障モジュールの個数の増加に対する Slimebot のパフォーマンスの推移を計測する。Slimebot のパフォーマンスを表す指標として、障害物の存在しない環境下における、全モジュール群の重心速度 (Slimebot の重心速度) を採用する。この速度は、故障モジュールを含まない Slimebot の重心速度を基準として正規化される。シミュレーションでは、4.2.1 節と同様にモジュールを円盤状に初期配置する。その際の故障モジュールの配置組み合わせは、一様乱数により決定される。

**故障の様式 A に関する耐故障性の検証** 上記故障の様式 A, すなわち腕のアクチュエーション機能のみが停止した場合の、故障モジュール数の増加に対する Slimebot のパフォーマンス変化を計測する。このときの故障モジュールにおいては、ロコモーション生成に関して、接地摩擦機構は非線形振動子間の相互引き込みにより生成されたりズムにしたがって機能するが、腕の伸縮は機能しない。すなわち、2つの動作モード切り替えは故障モジュールにおいても正常動作するため、パッシブモード時には正常時と同様に他のモジュールが移動するための支点として機能する。これとは異なり、アクティブモード時には、モジュール単位のアクチュエーションが行えず、他のモジュ

ルから押されるのみとなるため、故障の様式 A が Slimebot の重心速度に影響すると予想される。

結果を図 4.3 に示す。縦軸は、Slimebot の重心速度を表す。また、横軸は正常なモジュール数に対しての故障モジュール数の割合を示す。測定データは、100 回の計測における平均値である。また、これらの設定は様式 B, C に関する検証においても同様に使用する。このような様式 A のモジュールを含む際には、約 20% のモジュールが故障した場合であっても、Slimebot のパフォーマンスは約 50% までは維持可能であることが見てとれる。また、故障モジュール数が約 50% まで増加しても、約 10% のパフォーマンスで動作可能であることが確認された。すなわち、約半数のモジュールが故障した場合であっても、Slimebot はモジュラーロボットとしてコヒーレントな動作が可能である。このように腕のアクチュエーション機能のみが停止した場合には、Slimebot は高い耐故障性を有していることがわかる。

**故障の様式 B に関する耐故障性の検証** 上記故障の様式 B、すなわち腕のアクチュエーション機能とモジュール間通信機能が停止した場合の、故障モジュール数の増加に対する Slimebot のパフォーマンス変化を計測する。このときは、モジュール間の通信が不可能であるため、非線形振動子間の相互引き込みが引き起こされず、ロコモーションに必要な VDP 振動子間の位相勾配が形成されない。すなわち、故障モジュールは自身の VDP 振動子のリズムに基づき 2 つの動作モードを切り替えることが可能ではあるが、モジュール群は協調的に動作しない。したがって、パッシブモード時の故障モジュールは、他のモジュールが移動するための支点として機能するとは限らない。また、様式 A と同様にアクティブモードのモジュールは、他のモジュールから押されるのみとなる。これらのことから、故障の様式 B が Slimebot の重心速度に影響すると予想される。

結果を図 4.4 に示す。このような様式 A のモジュールを含む際には、約 20% のモジュールが故障したときであっても、様式 A の場合と同様にパフォーマンスは約 50% を維持していることがわかる。ところが、様式 A とは異なり、故障モジュール数が約 50% を超えると、Slimebot はモジュラーロボットとしてのコヒーレントな動作を失うことが確認された。このことから、様式 B は、様式 A と比較して厳しい様式であることがわか

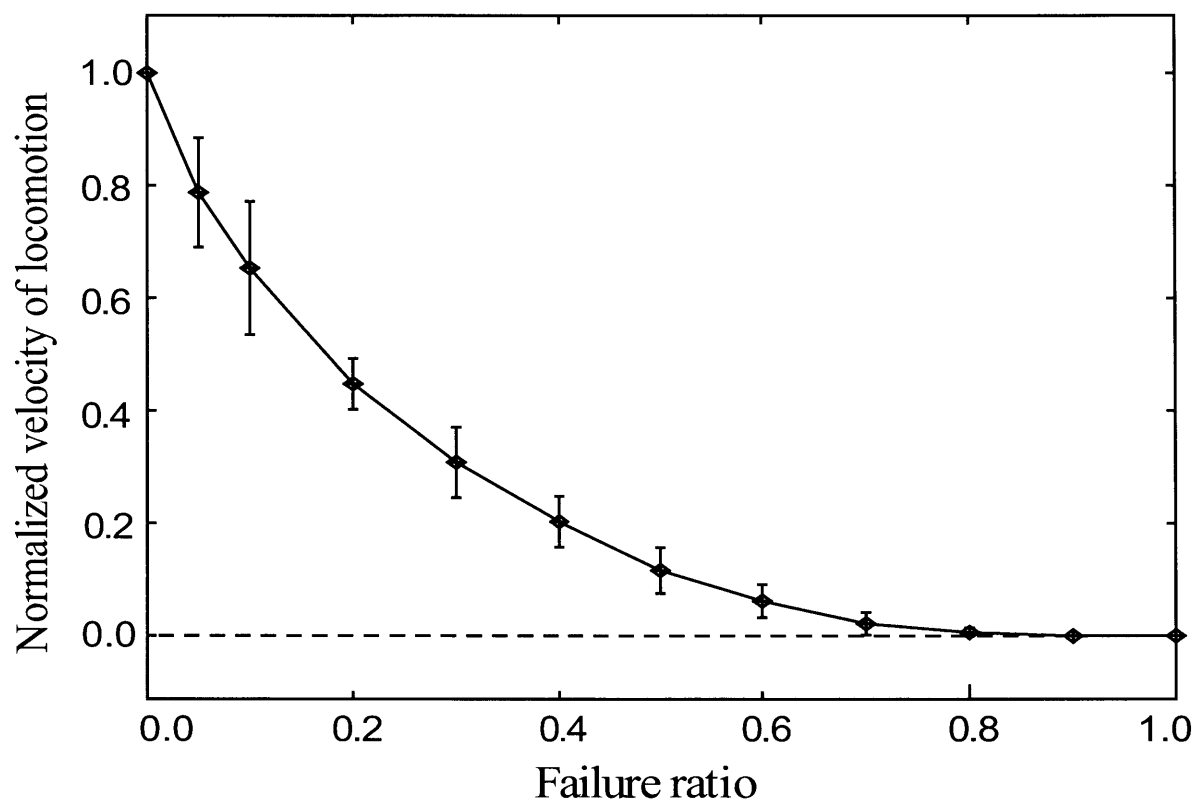


図 4.3: 様式 A の故障モジュールを含む Slimebot における, 故障モジュール数の増加に対するパフォーマンス変化

る。しかしながら、全モジュール数の半数近くが故障した場合であっても、Slimebotは動作可能であることから、このように、アクチュエーション機能とモジュール間通信機能が停止した場合であっても、Slimebotは高い耐故障性を有していることがわかる。

**故障の様式 C に関する耐故障性の検証** 上記故障の様式 C，すなわち制御可能な全ての機能が停止した場合 (腕のアクチュエーション機能とモジュール間通信機構および接地摩擦機構が停止した場合) の，故障モジュール数の増加に対する Slimebot のパフォーマンスの変化を計測する。このときは，接地摩擦制御機能がどのタイミングで停止したかに依存して，実質的に次の 2 とおりの異なった故障の様式が現れると予想される：

- (a) **低接地摩擦状態**: 他のモジュールとの物理的接触により押されて動くのみの状態。モジュール間通信がないため，故障したモジュールは，「接地摩擦の全くない錘のような物体」として扱われる。
- (b) **高接地摩擦状態**: 故障モジュールは完全に地面に固定されており，腕の伸縮，モジュール間通信も行われない。そのため，他のモジュールからは，「粘着性の障害物 (ベルクロテープによる引力相互作用を有する円筒状障害物)」と同等に扱われる状態。

そこで，これら 2 つの異なった状態についてそれぞれ検証する。

様式 C(a) に関する結果を図 4.5 に示す。このような故障モジュールを含む際には，様式 A, B と同様に，約 20% のモジュールが故障したときであっても，パフォーマンスは約 50% を維持していることがわかる。さらに，全モジュール数の半数近くが故障した場合であっても，Slimebot は動作可能であることから，Slimebot は高い耐故障性を有していることがわかる。

次に，様式 C の状態 (b) に関する結果を図 4.6 に示す。このような故障モジュールを含む際には，これまでの結果 (様式 A, B, C(a)) とは全く異なる結果が計測された。これまでの結果においては，どの場合であっても約 20% のモジュールの故障程度では，パフォーマンスは約 50% を維持していることが観測されたが，様式 C(b) においては，



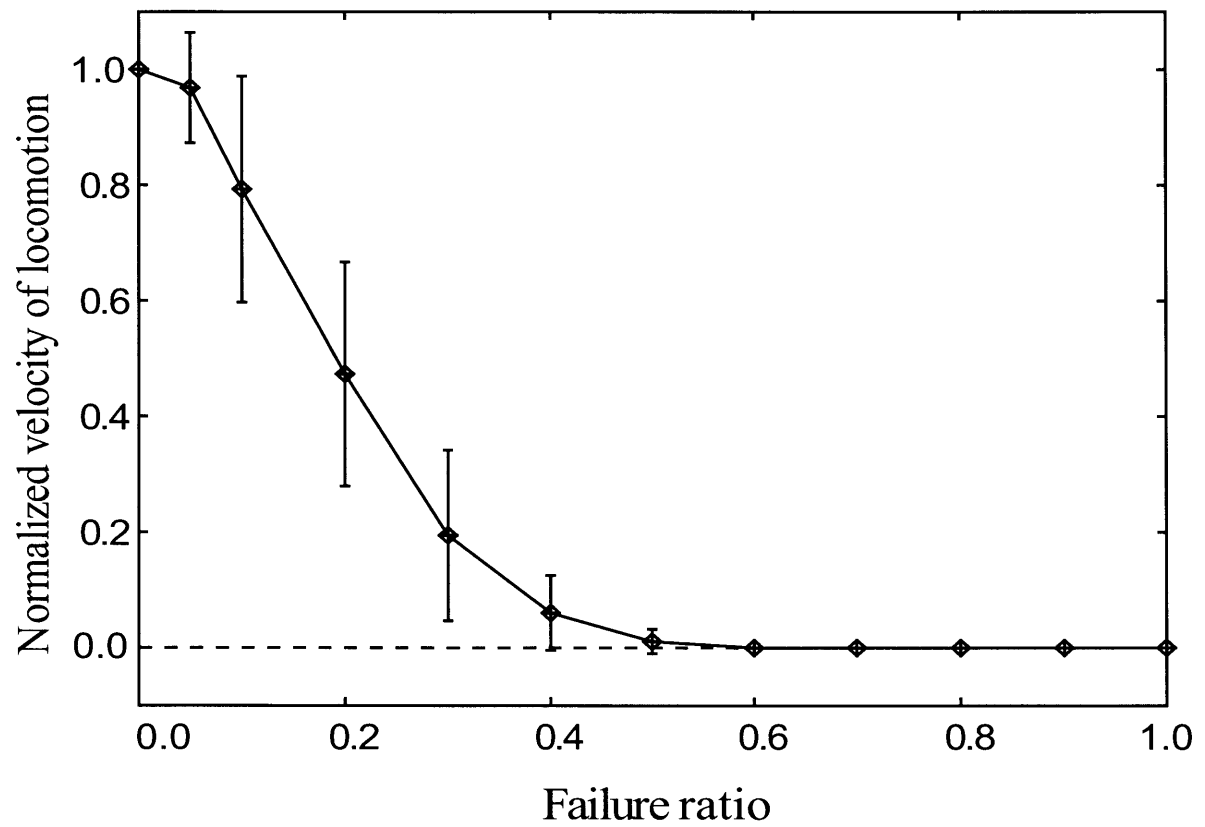


図 4.4: 様式 B の故障モジュールを含む Slimebot における, 故障モジュール数の増加に対するパフォーマンス変化

約20%のモジュールが故障すると、Slimebotの動作は全く不可能となる。そのため、様式C(b)のような故障モジュールを群内部に含むSlimebotにおいては、耐故障性に関しての脆弱性が確認された。

以上のように、同じ機能停止状態(腕のアクチュエーション機能とモジュール間通信機構および接地摩擦機構が停止)であっても、接地摩擦の低い状態(様式C(a))で故障したか、接地摩擦の高い状態(様式C(b))で故障したかによって、全く異なった結果が得られたため、その原因を考察する。すでに述べたように、様式C(a)と様式C(b)の間には、「接地摩擦の全くない錘のような物体」と「粘着性の障害物」といった違いが存在する。すなわち、故障モジュールが移動可能(様式C(a))であるか移動不可能(様式C(b))であるかといった違いである。この違いがもたらすSlimebotのパフォーマンス変化への影響は、それぞれ次のように説明が可能である:

**移動可能な故障モジュール(様式C(a))がもたらす影響** 様式C(a)の場合は、Slimebot内部において故障モジュールを介した力の伝達が行われる。そのため、故障モジュールもSlimebotのロコモーションに対して寄与することが可能である。

**移動不可能な故障モジュール(様式C(b))がもたらす影響** 様式C(b)の場合は、Slimebot内部において故障モジュールを介した力の伝達が行われず、故障モジュールはSlimebotのロコモーションに対して寄与することが不可能である。またこの場合、正常なモジュール群から構成されるSlimebotは、故障したモジュールがあたかも障害物であるかのように振る舞うが、通常の障害物回避とは異なり「粘着性の障害物」を回避する必要があるため、ロコモーションのためにはより大きな腕の伸縮力が必要となる。

これらの影響から、様式C(b)の場合には、他の様式の場合と異なり、劇的にSlimebotのパフォーマンスが低下したと考えられる。

以上の考察から、耐故障性の観点から高い生存脳機能を示すモジュラーロボットを構築するためには、様式C(b)のような故障が起こらないように各モジュールが設計されることが重要となる。ここでは、Slimebotのモデルに関する検証を取り扱ったため

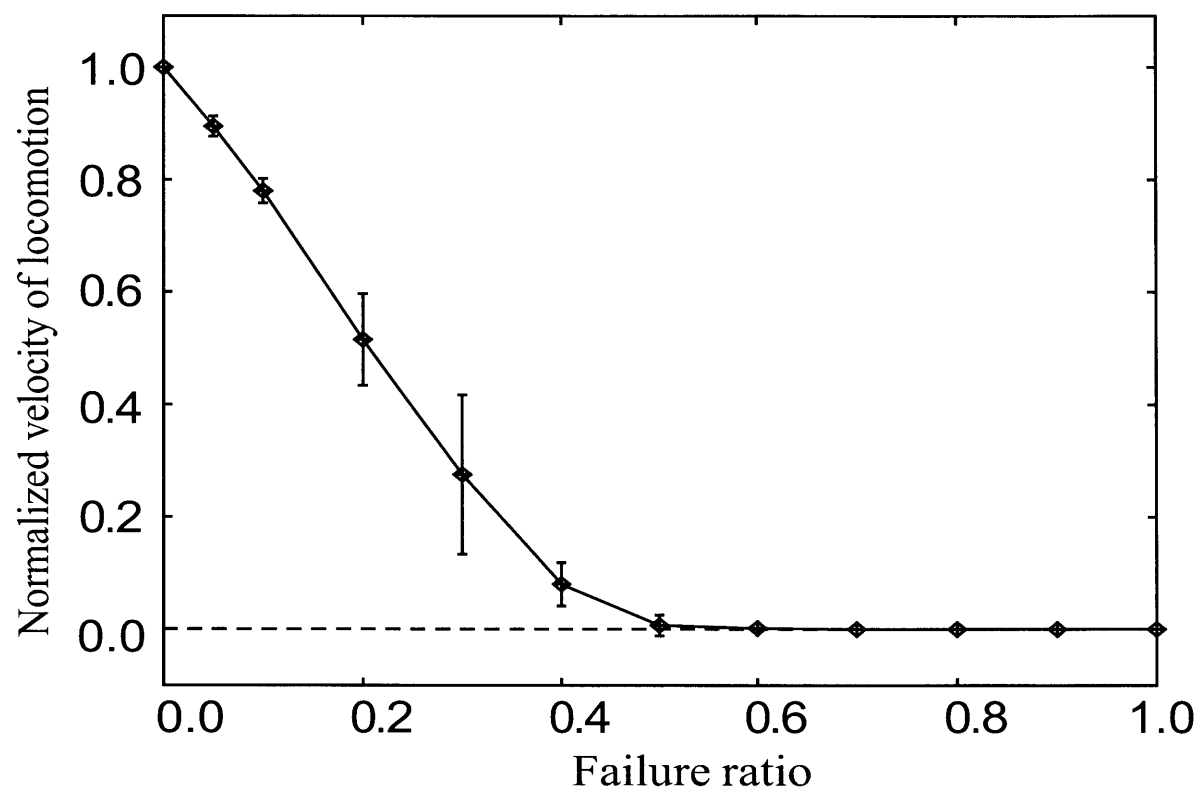


図 4.5: 様式 C の故障モジュールを含む Slimebot における, 故障モジュール数の増加に対するパフォーマンス変化 (低接地摩擦状態).

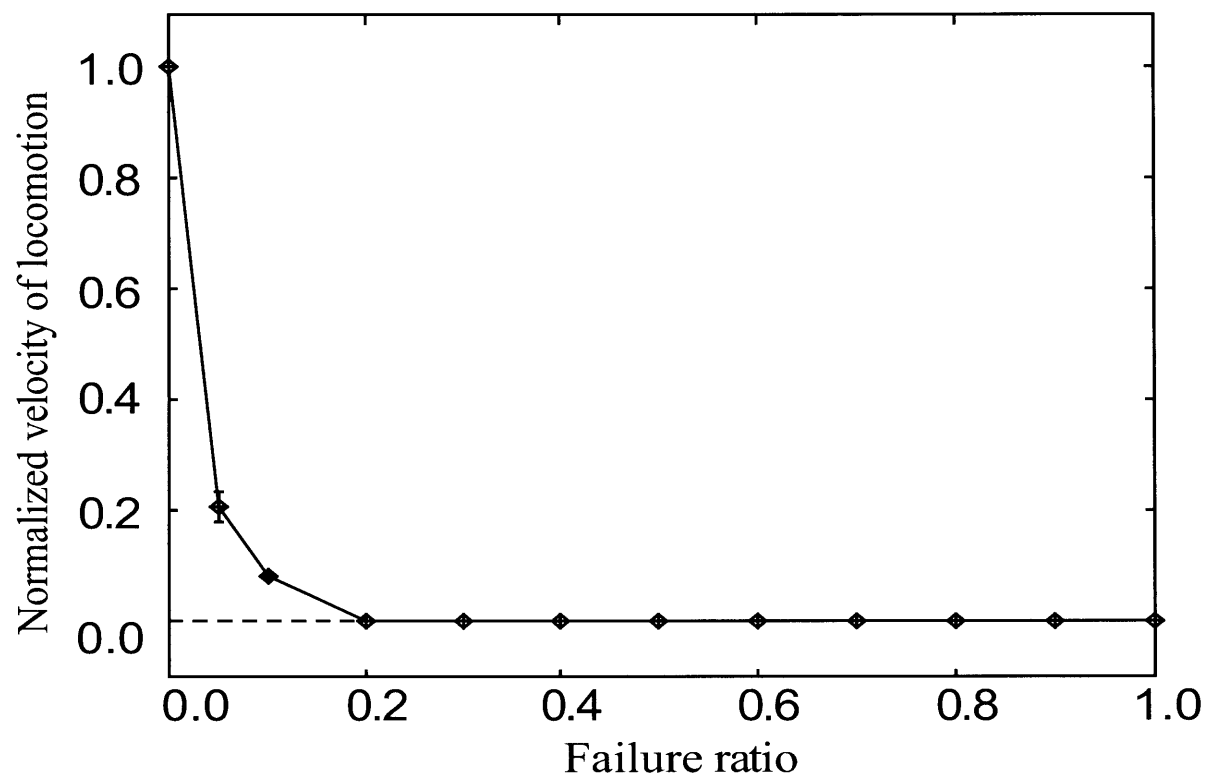


図 4.6: 様式 C の故障モジュールを含む Slimebot における, 故障モジュール数の増加に対するパフォーマンス変化 (高接地摩擦状態).

に、任意に故障の様式を C(a), C(b) として設定可能であったが、実機の場合には、任意に故障の様式の設定は不可能である。そこで、どのような故障の様式のモジュールを内包していたとしても、良い耐故障性を有する Slimebot を実機実現するためには、モジュールは、故障時に C(b) のような様式をとりえないように設計されるべきである。本研究では、そのような設計方法としてモーフォロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計を行った。この設計により、Slimebot は耐故障性の観点からも高い生存脳機能を示すことが確認された。詳細については第 5 章で述べる。

## 4.3 形態維持機能の発現に関する検証

ここまで、本研究で提案するモジュラーロボット Slimebot が高い生存脳機能 (環境適応性, 拡張性, 耐故障性) を発現することを確認してきた。Slimebot の発現する生存脳機能には、制御系, 機構系, 環境間の相互作用を通して発現する形態維持機能が不可欠である。具体的には、第 3 章で述べた「機構系の工夫による自発的な結合制御」と、「制御系の工夫による表面張力的効果」が大きな役割を果たしている。そこで以降では、この 2 点の観点から Slimebot における形態維持機能の発現に関する検証を行う。また、Slimebot の形態維持機能は、一定以上のモジュール数が存在しモジュール群に位相勾配が形成されると顕著になるという特性を持つ。そこで、Beni の提唱した「群知能の発現に関わる個体の臨界数」が、Slimebot の形態維持機能にも存在することを併せて検証する。

### 4.3.1 機構系の工夫による自発的な結合制御の検証

4.2.1 節において、Slimebot が形態変形を伴いながら環境適応的な振る舞うことを示した。ここでは、形態変形のために機能性素材 (ベルクロテープ) による自発的なモジュール間の着脱が活用されていたと予想されるが、明示的には確認をしなかった。そこで、本節では、Slimebot が障害物を回避する間に、モジュール間の脱離回数の時間発展を計測することで、機構系の工夫による自発的な結合制御に関する検証を行う。

具体的な計測方法を以下に述べる．シミュレーション条件は，モジュール数を64に設定し，他のパラメータに関しては，4.2.1節で採用した条件と同様に設定する．この条件下では，およそ14,000ステップのシミュレーション時間において，モジュラーロボットは，円筒状障害物の間をとおり抜けるようにして乗り越えることができる．次に，モジュール間の脱離回数の時間発展を計測であるが，シミュレーションの間，各1,000ステップの時間枠の間にモジュール間の脱離回数を計測し，その時間発展を観察する．

結果を図4.7に示す．同図において，横軸はシミュレーションの時間ステップを表し，縦軸はモジュール間の脱離回数の時間発展を表す．ここでは，単純には，障害物を乗り越える際に，モジュール間の脱離回数が増加することが見てとれる．次に，時間発展に沿って，モジュール間の脱離回数とSlimebotの行動との対応付けを行う．1,000ステップ付近では，シミュレーションを開始した直後であり，かつ障害物の干渉が無いために，モジュール間の脱離が起こることはほとんど無い．2,000ステップ付近において，Slimebotは障害物に接触する．そして，環境適応的に自己の形態を変形させる過程においては，自発的なモジュール間の脱離回数が増加するようすが見てとれる．やがて，8,000ステップ付近において，脱離回数の増加がピークを迎える．次に，9,000ステップに至るまでに大幅なモジュール間の脱離回数の減少が見られる．これは，障害物によりモジュールの移動可能な空間が制限され，Slimebotの横幅が円筒状の障害物間の間隔程度に改変されたことに起因すると思われる．ここでは，Slimebotの形態は目的光の方向に長軸が向くような長方形形態をしており，大部分のモジュールにおける等位相面の法線が長軸と平行に近い方向を向いている．そのため，Slimebot全体としてモジュール群はほぼ同一の方向に動いており，モジュール間の結合が脱離する方向には応力がかからないためであると思われる．14,000ステップ以降では，一定のモジュール間脱離を繰り返しつつSlimebotはロコモーションを続ける．

以上のようにして，Slimebotは，環境変動に対して実時間で適応するために，自発的なモジュール間の着脱を行っている．ここで注意されたいのは，モジュール間の着脱に関する，明示的なタイミング，着脱モジュールの選定に関する制御は行われていないということである．本研究における提案手法により，その場その場の状況に応じて，

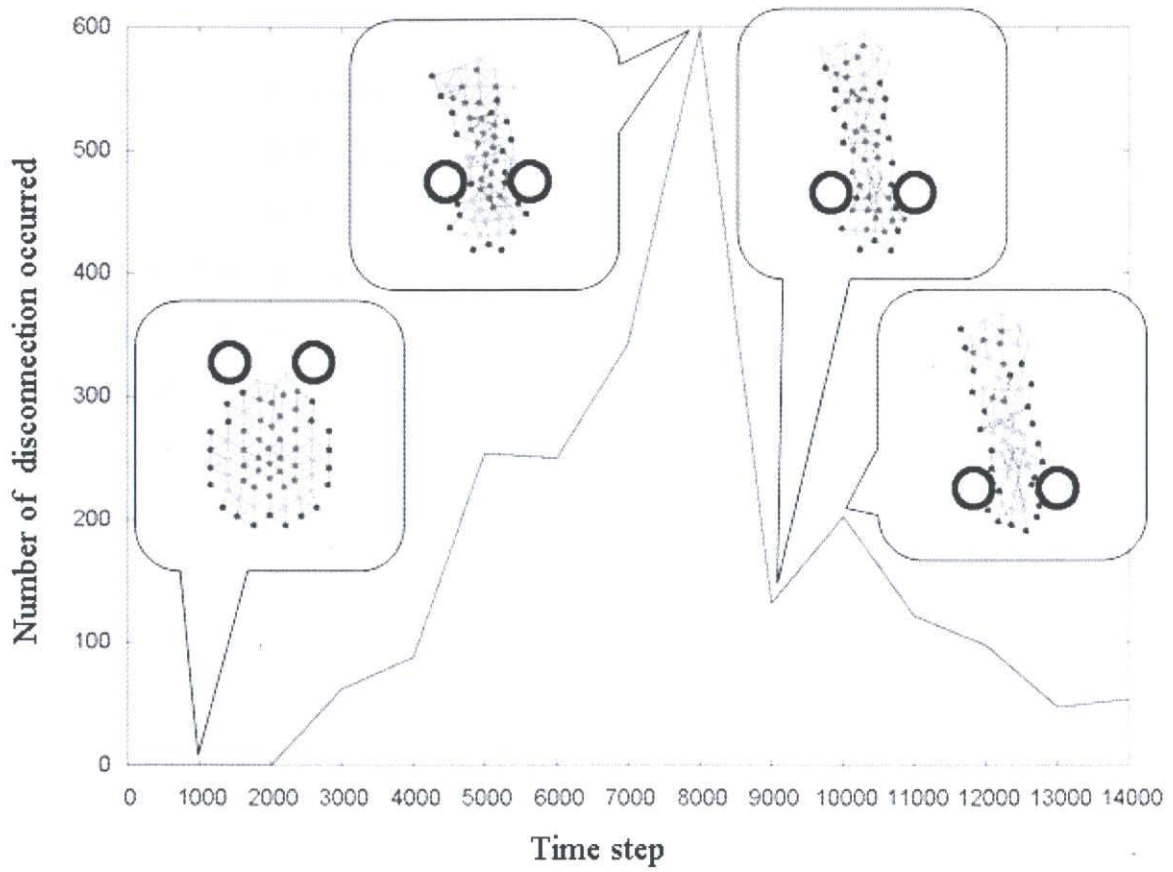


図 4.7: モジュール間の自発的脱離回数の時間発展

力学的に妥当なようにモジュール間の着脱が実現されているのである。また, Slimebot においても, ベルクロテープの降伏応力等, パラメータの調整は必要ではあるが, このパラメータのバランスがとれている領域, すなわち, 制御系と機構系間のバランスが良い時にだけ創発的でコヒーレントな振る舞いが現れるという観点からは興味深い。この制御系と機構系間のバランスに関する検証は, 今後の課題である。

### 4.3.2 制御系の工夫による表面張力的効果の検証

Slimebot の形態維持機能には, 3.2 節で述べたように制御系の工夫として採用した非線形振動子間の相互引き込みから形成される位相勾配に基づく表面張力的効果も大きく関わっている。そこで, 本節では, VDP 振動子群における  $\alpha_i$  を意図的に操作することにより, 表面張力的効果のある場合と無い場合で, Slimebot の形態の時間発展を観察した。表面張力的効果のある Slimebot については式 (3.3) のとおりに設定し, 表面張力効果のない Slimebot に関しては次式のとおり設定した:

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7 & \text{目的光を検知したモジュール} \\ 1.0 & \text{その他のモジュール} \end{cases} \quad (4.2)$$

この式は, 式 (3.3) と比較して外縁モジュール検知時の  $\alpha_i = 1.3$  の設定を取り除いた設定を表している。また, その他のシミュレーションの設定に関しては, 目的光が紙面上方から照射されるとし, 環境中に障害物は存在しないと設定した。Slimebot の初期配置は円盤状であるとし, モジュール数は 100 とした。

結果を図 4.8, 4.9 に示す。それぞれ表面張力効果のない場合と, 表面張力効果のある場合の Slimebot における形態の時間発展を示している。これらの結果から, 表面張力的効果が Slimebot の形態維持に大きく寄与していることが見てとれる。



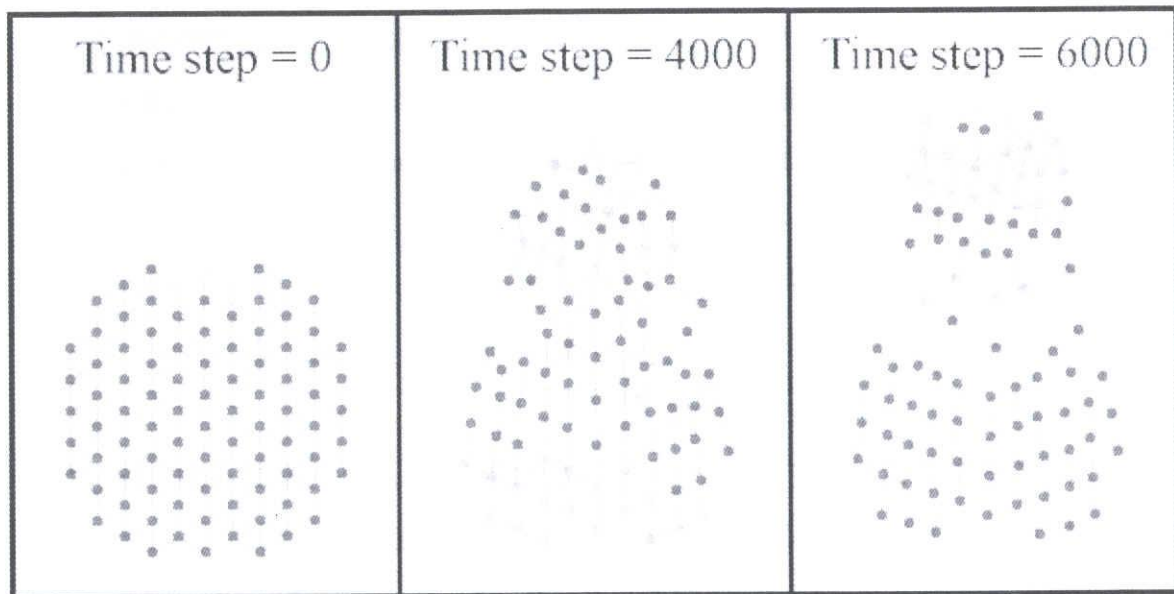


図 4.8: 表面張力効果のない場合の Slimebot 形態の時間発展

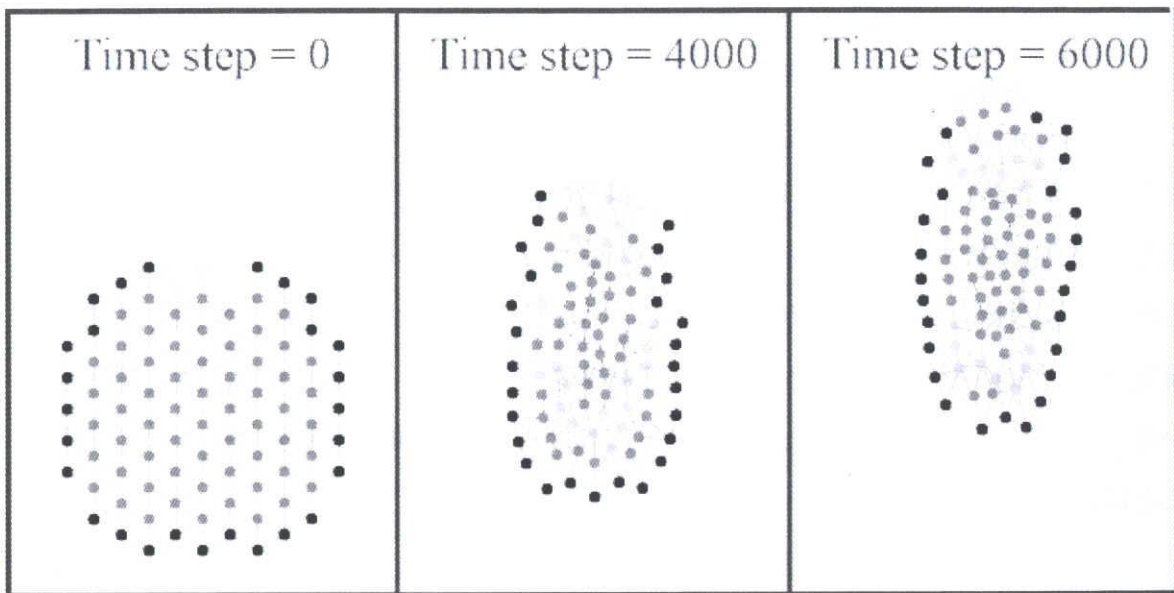


図 4.9: 表面張力効果のある場合の Slimebot 形態の時間発展

また、ここで示した表面張力的効果は、VDP 振動子間の相互引き込みにより生成される位相勾配に起因する。この位相勾配は、モジュール群最外部だけではなく、群全域にわたって生成される。したがって、モジュール群全体として表面積を最小にする効果が現れる。

そこで、位相勾配の観点から表面張力的効果のある場合と無い場合の比較を行う。ここでは、目的光を照射しないようにした。結果を図 4.10 に示す。同図 (a), (b) にそれぞれ表面張力効果のない場合と、表面張力効果のある場合の Slimebot における位相勾配を示して比較した。ここでは、位相勾配を色の違いにより表現した。色が明るくなるに  
したがって VDP 振動子の位相が進んでいることを意味している。(a) では、モジュール群における VDP 振動子が完全に同期し位相勾配が生じていない様子が、そして (b) では、モジュール群の中心付近から、位相勾配が形成されている様子が見てとれる。これらの結果において、前者の場合は、位相勾配がないことから各モジュールは腕の伸縮力を出力しない。後者の場合は、位相勾配がモジュール群の中心方向に生起しているため、群全体として表面積を最小にしようとする方向に腕の伸縮力を出力する。本論文では、「表面積を最小にする」という特徴をとらえて、表面張力的効果と呼称している。そのため、この効果は、物理現象におけるそれと同じ起源を持つものではないことに注意されたい。

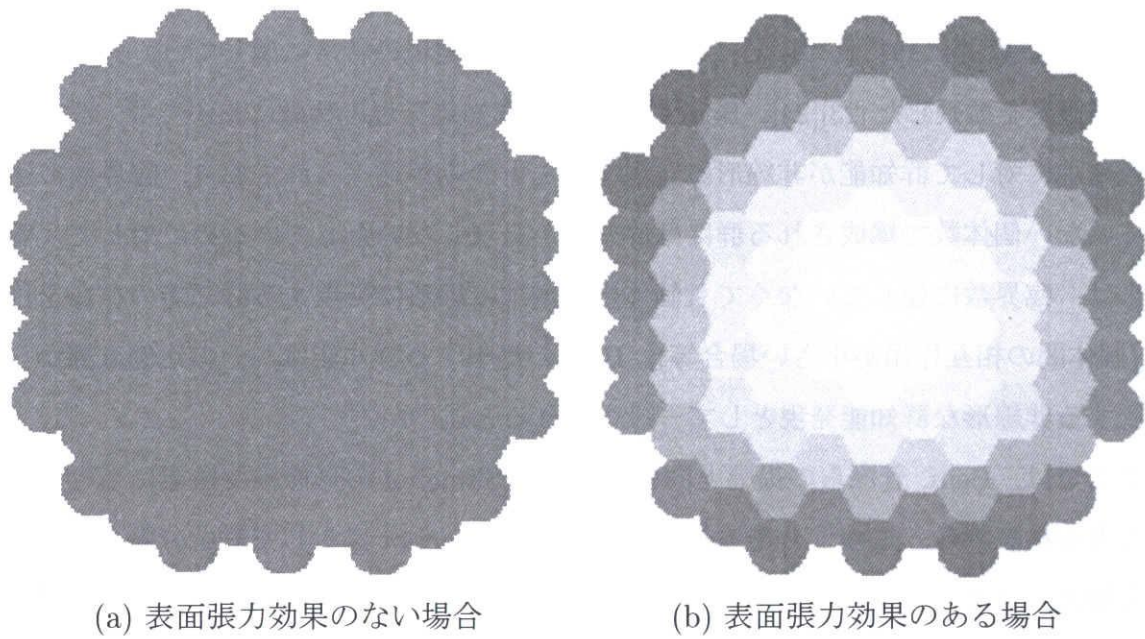


図 4.10: 表面張力効果のある場合とない場合の位相勾配の比較

### 4.3.3 Beniの提唱した群知能発現の特徴に基づく考察

前節で述べたように、Slimebotが発現する表面張力的な効果は、図4.10(b)に示すような等位相面により形成される、外縁部から内側へと向かう位相勾配に起因するものである。したがって、位相勾配の存在しないモジュール群においては、そのような機能は発現されない。すなわち、本研究における表面張力的な効果は、モジュール数に依存して創発する機能であると考えられる。

ロボティクスにおける群に関する分野では、このような、「群知能の発現に関して、群における個体数にある臨界数が存在する」というBeniの提唱した群知能発現の特徴[21][22]が一般的に知られている。また、この群知能発現の特徴に関しては、近年、菅原らが概念を拡張した[23][24]。Beniの提唱した群知能発現の特徴においては、群の個体数増加に対して群知能が非線形に発現することのみが述べられており、臨界数に達していない個体数で構成される群には群知能が発現しないとしているのに対して、菅原らは、臨界数に達していなくても個体数の増加に線形に発現する群知能の存在を許し(個体間の相互作用が小さい場合等)、Beniの提唱する群知能は、その比例直線から逸脱する非線形な群知能発現として一般化されると述べた。

ここでは、Beni、菅原らの提唱と同様の特徴がSlimebotの形態維持機能にも存在することを検証する。このことを検証するために、Slimebotに対して群を分離させる外力を加え、コヒーレントな群形態を維持し続けることのできた時間を、モジュール数の変化に対して計測した。以下、その計測方法の詳細を述べる。本計測においては、目的光は設定されない。したがって、前述のとおり、表面張力効果を有するSlimebotは時間発展とともに円盤状の形態を構成する。このような状態は、Slimebotにおける力学的最安定状態[25][26]であることに注意されたい。この条件下において、Slimebotの重心に対して点对称となるような最外縁部の2モジュールを選択し、それらに対して、群の重心から動径方向外向きに一定の外力を加え続けた。このときの、外力を加え始めてからモジュール群が分離するまでの時間を、Slimebotを構成するモジュール数の増加に対して計測した。なお、個々のモジュール数における計測については、力を印加するモジュールを一様乱数で選択しながら、20回試行した。計測された時間は、20

回の平均をとったものである。

結果を図 4.11 に示す。縦軸の群形態の維持時間の長さは、換言すると Slimebot の群形態の維持能力の高さを示す。モジュール数の増加に対して、モジュール数 10 の付近を境に、形態を維持している時間が大幅に長くなっていることが見てとれる。すなわち、このモジュール数 10 の付近を境に、群形態の維持能力が非線形に高くなっていることを示す。またここでは、臨界モジュール数 10 をはさんだ両側の領域の代表として、モジュール数 6 と 14 におけるシミュレーションのスナップショットを示した。同図において、白抜きのない黒色のモジュールは外縁モジュールであること ( $\alpha_i = 1.3$ ) を示している。一方、白抜きのあるモジュールは、内部モジュールであること ( $\alpha_i = 1.0$ ) を示している。モジュール数 6 のスナップショットからは、全モジュールが外縁モジュールとなっていることが見てとれる。ここでは、すべてのモジュールに関して  $\alpha_i = 1.3$  であるため、Slimebot 内部に位相勾配が形成されないことに注意されたい。したがって、Slimebot に表面張力的な効果は発現されない。これとは異なり、モジュール数 14 のスナップショットにおいては、Slimebot が外縁モジュールと内部モジュールに分かれて構成されていることが見てとれる。これにより、Slimebot 内部には位相勾配が形成され、結果として Slimebot に表面張力的効果が発現されることになる。

以上の結果は、Slimebot の形態維持機能においても、「機能の発現に関して、群における個体数にある臨界数が存在する」という Beni の提唱した群知能発現の特徴が現れていることを示している。またこの結果は、モジュール数の「量的な変化」が表面張力的効果の発現という「質的な変化」を示すことに他ならず、創発性の一つの重要な属性が存在していることも併せて示している。

## 4.4 まとめ

本章では、第 3 章で構築した Slimebot モデルに関して、創発的形態制御に関する検証をシミュレーションにより行った。Slimebot に期待される生存脳機能の発現に関する検証として、環境適応性、拡張性、耐故障性の検証を行い、Slimebot が優れた環境適応性、拡張性を有していることが確認された。耐故障性に関しては、ほとんどの故

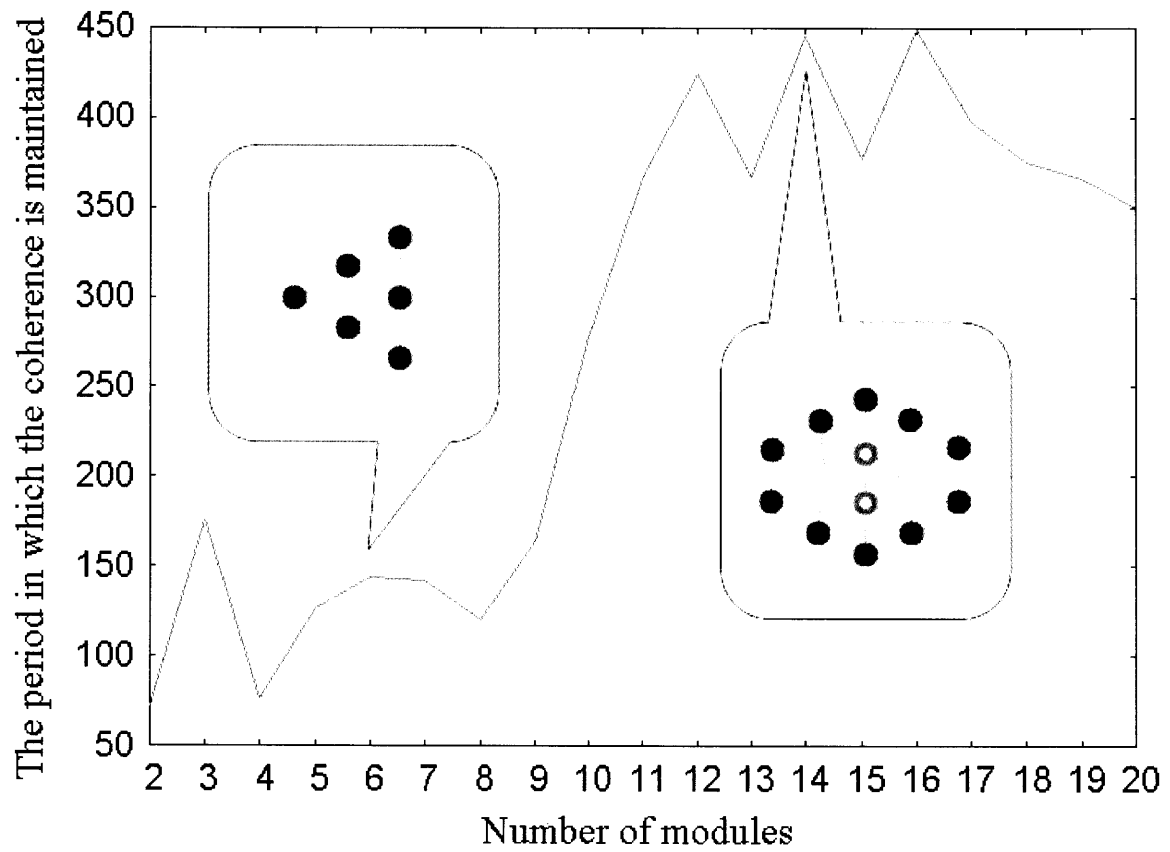


図 4.11: 形態維持機能の検証

障の様式に関しては頑健であることを確認したが、唯一、接地摩擦機能に関わるある種の様式に関しては脆弱性を示すことが確認された。この脆弱性に対しては、第5章で Morphological computation を活用した解決法を述べる。

また、Slimebot の生存脳機能発現に大きく関わる、形態維持機能の発現に関する検証を行った。ここでは、Slimebot が環境適応的に振る舞う際に機構系の工夫による自発的な結合制御が活用されていること、形態をコヒーレントに維持するために制御系の工夫による表面張力的効果が活用されていることを確認した。さらに、Beni の提唱した「群知能の発現に関わる個体の臨界数」が、Slimebot の形態維持機能にも存在することを確認した。



## 第5章 Slimebot 実機の開発

第4章において、シミュレーションの結果、Slimebotは優れた生存脳機能(環境適応性、拡張性、耐故障性)を示すことが確認された。しかしながら、本提案手法の妥当性を高い信頼性を持って確認するためには、シミュレーションのみならず実機を用いた検証実験が必要不可欠である。そこで本章では、優れた環境適応性、拡張性のみならず、どのような故障の様式においても高い耐故障性を示すSlimebot実機の開発を試みる。

### 5.1 実機実現に要請される仕様

3章で説明した自発的な結合機構を活用し、自律的な形態変形が可能なモジュラーロボットを完全自律型として実機実現するためには、動作に必要なすべての機構が各モジュールに内蔵されている必要がある。また、実機実験で採用されることの多い、外部もしくは他のモジュールとの有線接続は、形態変形を阻害する要因となるため排除されるべきである。この要請を満足するために、本研究ではアクチュエーション機構として直動型エアシリンダを、ワイヤレスの局所通信機構として赤外線通信機構を実装した。前者は、Slimebotのモジュールに必要とされる伸縮する腕を比較的単純な機構で実現し、後者は、モジュール間の非接触による局所通信を可能とした。これらの機構を用いて開発した完全自律型のモジュール実機の写真を図5.1に示す。また、設計のために作成したCADによるイメージを図5.2に示す。以降では、モジュールの仕様を説明する。

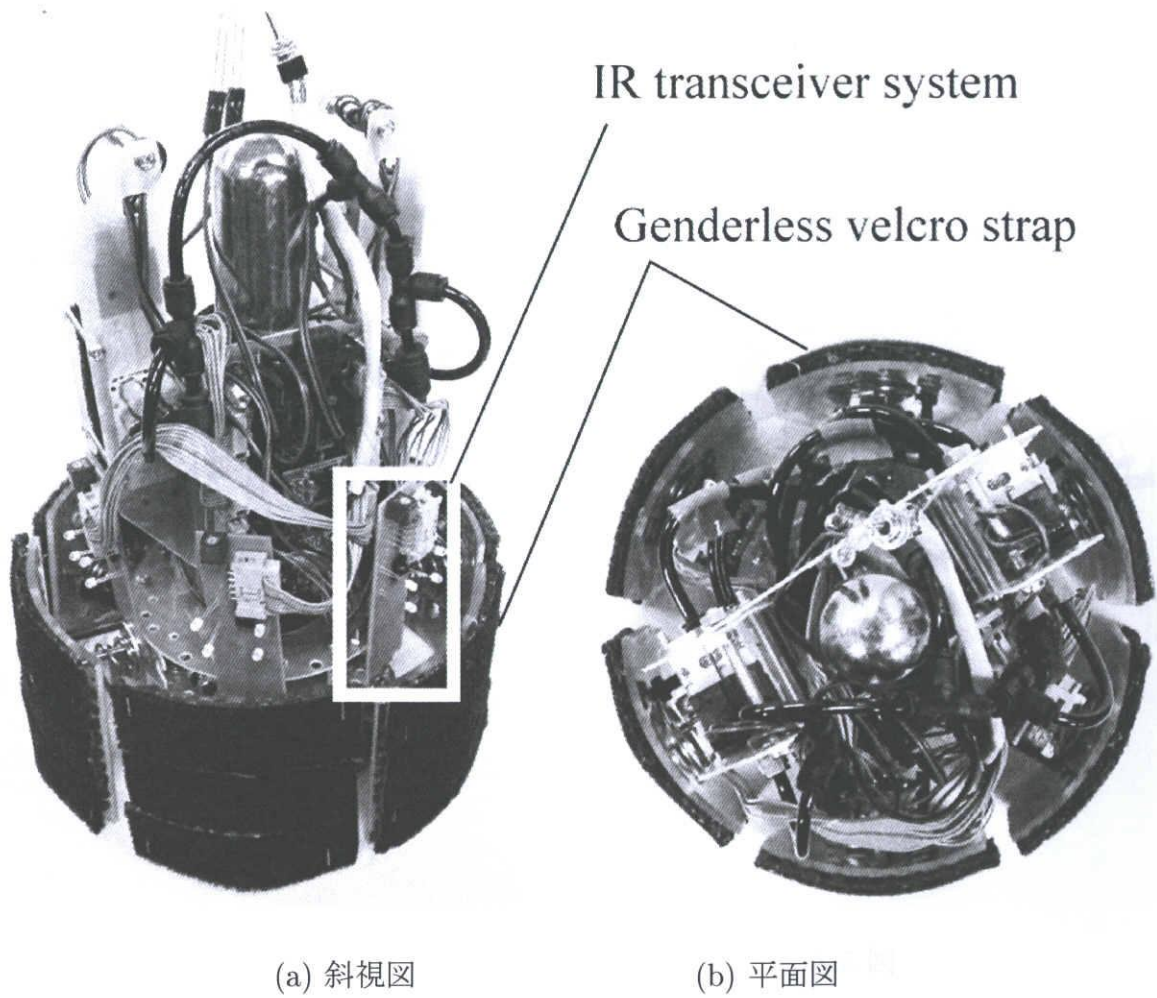
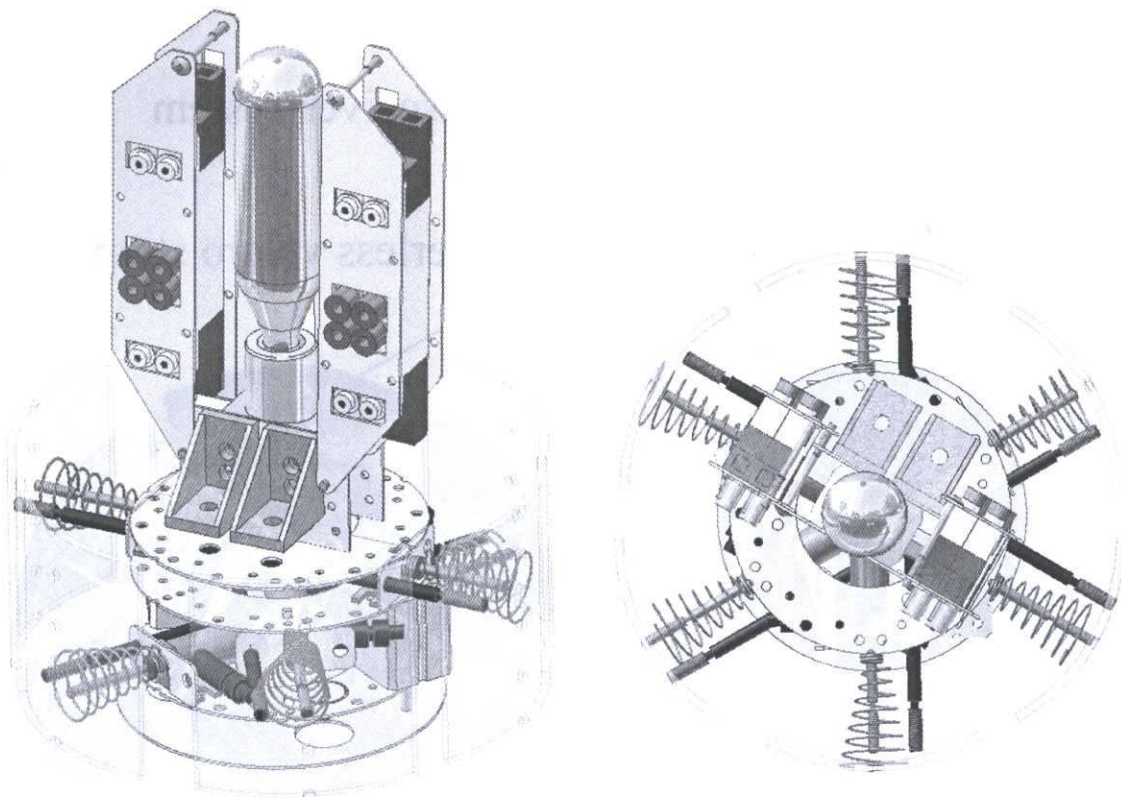


図 5.1: モジュール実機



(a) 斜視図

(b) 平面図

図 5.2: モジュールの CAD によるイメージ図

## 5.2 モジュール実機的设计

### 5.2.1 機能性素材による自発的な結合機構

これまでのモジュラーロボットでは、モジュールどうしを剛性の高い結合機構によって、機械的・物理的に接続する手法が多用されている。しかしながら、このような結合形態の下では、モジュールどうしの接続も明示的に制御しなければならないため、最終的に必要とされる制御アルゴリズムは大規模かつ複雑なものとなることが不可避となる。さらに、剛性の高い結合機構を介してモジュール群を接続させると、モジュラーロボットが本質的に有する環境変化に対する適応性といった優れた特徴を低減させてしまう可能性も否めない。

そこで本研究では、第3章で述べたように機能性素材に着目し、卑近なものとしてベルクロテープを採用した。この素材自体が有する力学的特性を活用することで、形態制御に自発的かつ創発的特性が発現することが期待される。また、機能性素材の自発的な結合・脱離は、機能性素材にモジュールどうしの脱着の制御を担わせている、と換言することもできる。近年、ソフトロボティクスの分野に代表されるように、制御系と機構系のダイナミクスを有機的に干渉させる重要性が認識されつつある。筆者の知る限り、本研究は、モジュラーロボットの制御にその思想を明示的に導入し、実機実現したはじめての研究と言える（モジュラーロボットのような本質的に超多自由度が存在することが前提である機構系には、このような思想はそもそも必須となるはずである）。

図5.3に機能性素材として採用した(株)クラレのナイロン製ベルクロテープ「フリーマジック」を示す。この素材は、一つの面にHookとLoopの機能を備えた両極性ベルクロテープである。同種のベルクロテープ間での結合が成立するため、その結合力を適切に選定することで、第4章におけるシミュレーション結果の反映が可能である。ベルクロテープを結合機構として採用するためには、このモジュールが複数結合した際に、互いに牽引可能な程度の実効的な法線方向剥離強さが必要とされる。結合力に関する特性に関しては、メーカー側で試験データが公開されており、本研究ではそのデータに基づいて、適切な結合力を有するベルクロテープを選定した。図5.1に示した

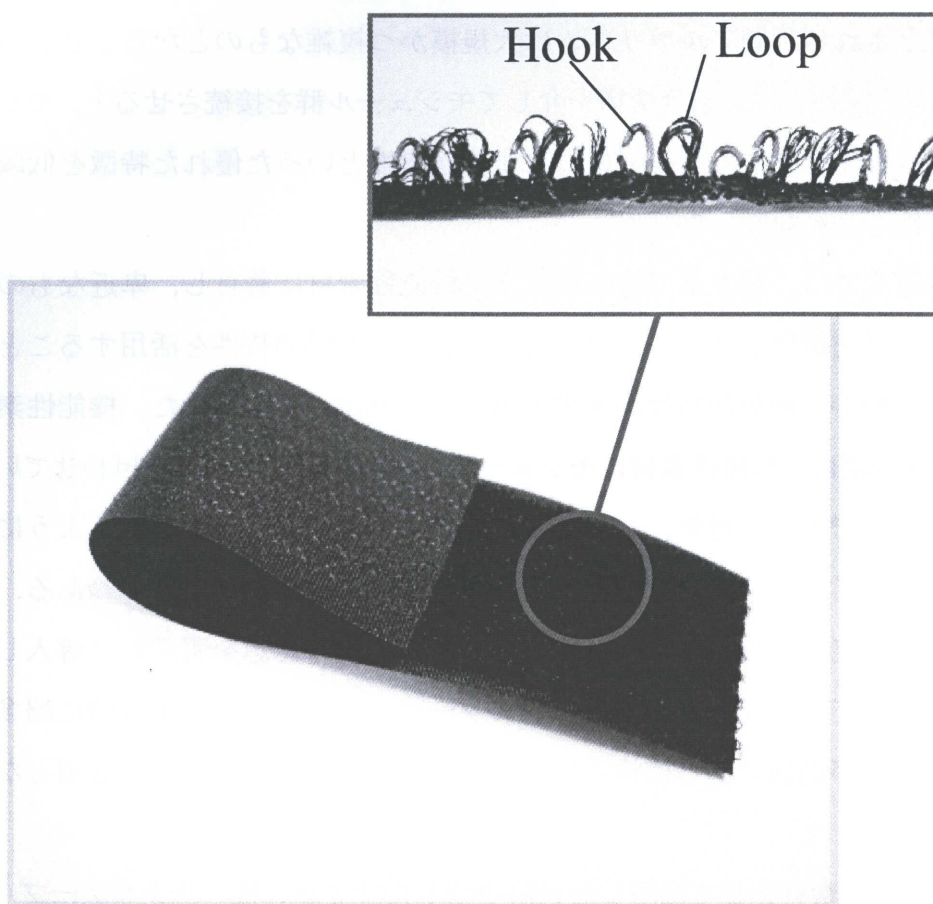


図 5.3: 機能性素材 : 両極性ベルクロテープ

モジュール実機の重量は約 1,600[g] である。そこで、テープの面に対して法線方向剥離強さが 1.01[ $\text{gf}/\text{mm}^2$ ] であるタイプのもを採用し、ベルクロテープによる結合部を、幅 20[mm]  $\times$  80[mm] = 1,600[ $\text{mm}^2$ ] を単位面積として構成した。この場合、結合時に実効的にベルクロテープにかかる法線方向剥離強さは 1,616[ $\text{gf}$ ] となる。以降では、必要とされるベルクロテープの面積を実験的に決定した。また、このベルクロテープを用いたモジュール実機における結合機構部を図 5.4 に示す。

### 5.2.2 空気圧駆動型のアクチュエーション機構

Slimebot のモジュールに必要とされる伸縮する腕を比較的単純な機構で実現するため、空気圧駆動型のアクチュエーション機構を採用した。アクチュエーション機構の CAD による分解図を図 5.5 に示す。このアクチュエーション機構は大きく分けて (1) 腕の伸縮機構、(2) 接地摩擦制御機構の 2 種類の機構により構成される。両者ともに、エアシリンダと呼ばれる空気圧アクチュエータが採用されている。エアシリンダは、空気圧制御による直動動作の可能なアクチュエータである。その動力源には、通常はエアコンプレッサが利用されるが、モジュールを完全自律型として構成するために、本研究では小型の炭酸ガスカートリッジ (日本炭酸瓦斯 (株) 製、ガス量 36[g]) が採用されている。このカートリッジは、モジュール実機上部に実装されており容易に交換可能である (図 5.5 参照)。エアシリンダは、炭酸ガスカートリッジから供給される炭酸ガスの流入量を電磁弁を用いて電氣的に制御することで駆動される。本研究では、電磁弁として黒田精工 (株) 製の「A05RE35-1P-C4-E」を採用した。この空気圧駆動型のアクチュエーション機構は、約 20 分の完全自律駆動が可能である。図 5.1 のモジュール実機から空気圧駆動型のアクチュエーション機構のみを抽出したものを図 5.6 に示す。以降では、2 種類の機構の詳細を述べる。その後、これら 2 種類の機構を組み合わせたモジュール実機におけるアクティブモードとパッシブモードを紹介する。



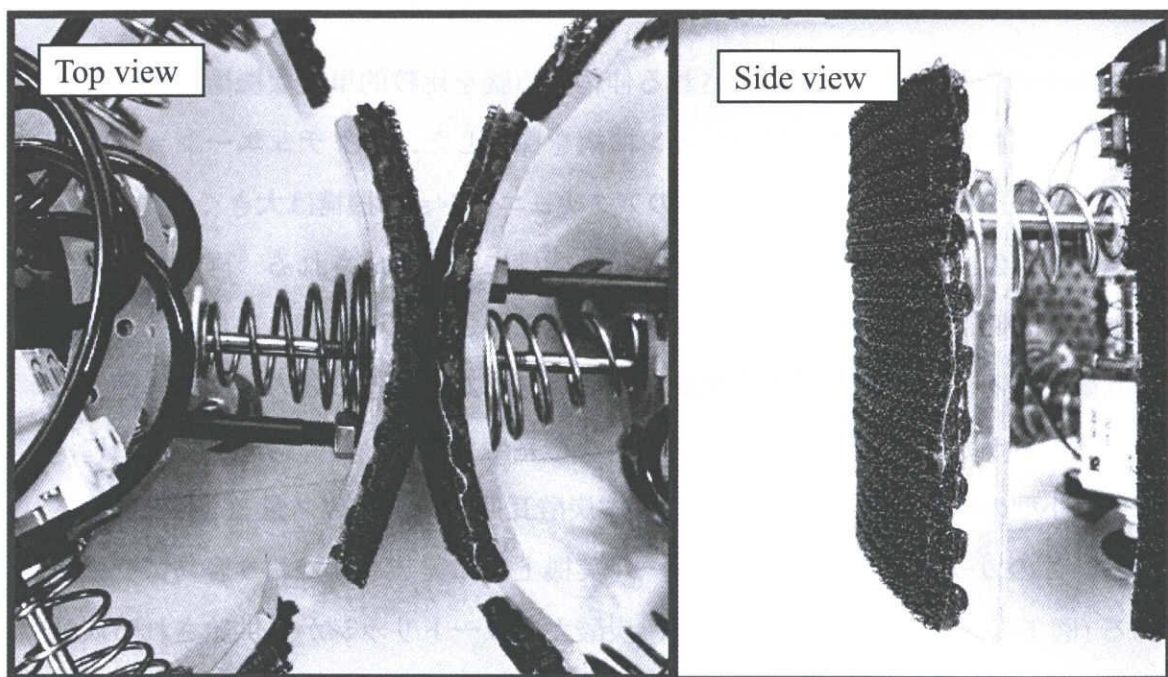


図 5.4: 自発的な結合機構

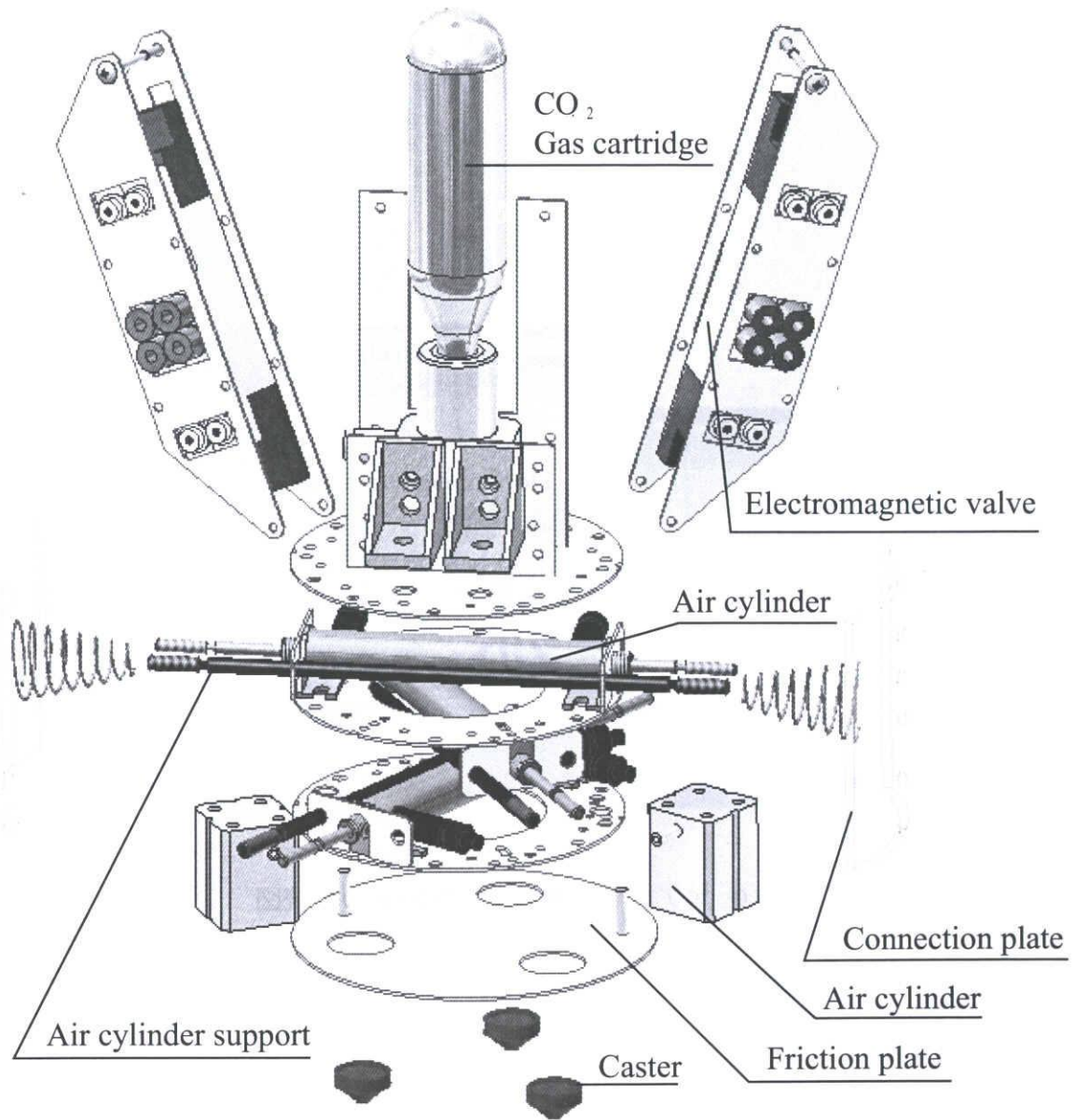


図 5.5: 3D CAD データによるアクチュエーション機構分解図



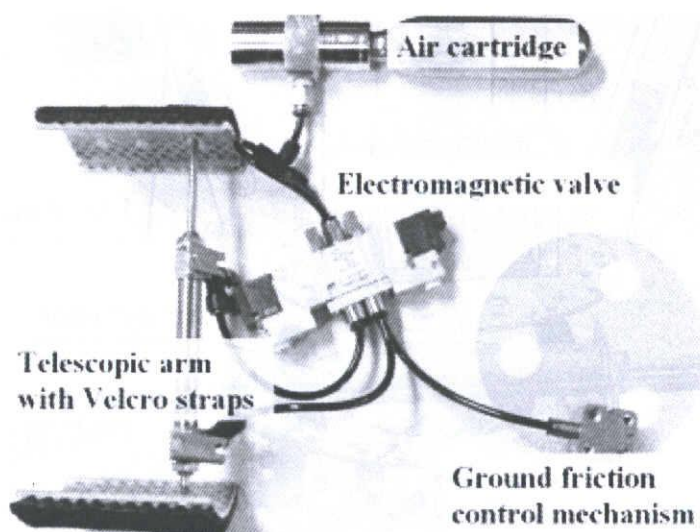


図 5.6: エアシリンダおよび電磁弁の接続図

**腕の伸縮機構** 各モジュールにおける腕の伸縮機構として、第3章で述べたモデルを反映するように、6方向に伸縮可能な腕を設置した(図5.1(b), 5.2(b)参照). 第3章で述べたモデルならびにシミュレーションにおいては、モジュール間結合は一定の距離に近づいたモジュールすべてと成立するように設定していたため、理論的には無限の腕を有することが可能であった. しかしながら、実機においてそのような腕を仮定することは不可能であるため、モデルを反映するような実機の詳細仕様を定める必要がある.

第4章のシミュレーションにおいては、モジュール間の物理的な干渉が等方的なソフトコアポテンシャルの効果により特徴付けられていたため、力学的最安定状態においてはモジュール群は細密充填構造を構成していた. そこで、実機においては、実質的に結合可能な腕の本数を6本に限定し、それらを60度ごとの角度の間隔をおいて動径方向に設置した. また、シミュレーションの結果から、各モジュールの腕の動作はVDP振動子の位相勾配に基づくため、6方向の腕のうちで、互いに反対方向を向く腕は片方が伸びると一方は縮むといった特性が明らかである. すなわち、モジュールの腕の伸縮機構において、実質的に制御しなければならない腕の本数は3本のみであることを意味する.

この考察から、腕の伸縮機構のために複動型の黒田精工(株)製直動型エアシリンダ「Z3G7-10-30-LW」を採用した(図5.5, 5.6参照). このエアシリンダは、ロッドがシリンダ内を貫通しており、空気圧制御により片側に伸びきった状態と、シリンダ内のロッドが抵抗なく動く状態(シリンダ内に空気圧を加えない状態)の計3状態を制御可能なアクチュエータとなっている. また、片側に伸びきった状態でのストロークは15[mm]である.

第3章で述べたSlimebotのモデルでは、その動作のためにアクティブモードとパッシブモードを設定した. そのため、エアシリンダにより腕の伸縮機構を実装する場合においても、これらのモードを反映するように機構を設計する必要がある. アクティブモードに関しては、エアシリンダの片側に伸びる機構を直接利用した. しかしながら、パッシブモードで必要とされる腕の自然長(中間の長さ)の生成のためには、採用したエアシリンダに追加の機構が必要となる. そこで、エアシリンダの「ロッドが抵

抗なく動く状態」を利用し、エアシリンダの両側から押しバネにより適切な外力を加えることで腕の自然長を生成する機構を追加した(図 5.5 参照). ここでは、円錐型の押しバネ(巻き数 8, 線径 1[mm], 自然長 50[mm])を採用した. 円錐型のバネを利用した理由を簡単に説明する. 本研究では、モジュール実機の小型化のために非常に小型のエアシリンダを採用しており、その動作ストロークは必然的に小さくなる. このような状況下で、通常の円筒型の押しバネを採用して上記の自然長の生成を行うと、バネをすべて押し込んだ状態であっても、バネの巻き数と線径に比例するバネ長が残り、小型エアシリンダの短いストロークがさらに短くなる. これに対して、本研究で採用したような円錐型のバネは、すべて押し込んだ状態でバネ長がほぼゼロになるという特徴を有している. すなわち、小型エアシリンダのストロークを最大限に活かすことが可能となる. また、モジュールの自然長生成に適切なバネの力学特性は実験的に決定された.

以上のように設計された腕の伸縮機構を図 5.7 に示す. モジュール実機では、この機構と次に述べる接地摩擦制御機構を組み合わせ、アクティブモードとパッシブモードを実現する機構系を構成した.

**接地摩擦制御機構** モジュール実機における接地摩擦制御機構は、黒田精工(株)製の直動型エアシリンダ「X1G1-12-10」により実装されている. このエアシリンダは、腕の伸縮機構とは異なり単動型エアシリンダである. そのため、片側にロッドの伸びた状態と縮んだ状態の 2 状態のみが制御可能である. このエアシリンダを用いて構成した接地摩擦制御機構を図 5.8 に示す. この図は、モジュール接地摩擦制御機構部分を側面から写真撮影したものである. 同図(a), (b)はそれぞれアクティブモードにおける接地摩擦、パッシブモードにおける接地摩擦を示す(図 3.3 参照). 図 5.8(a)においては、モジュール底面に設置されたキャスター(図 5.5 参照)により、低接地摩擦状態が生成されている. また、同図(b)においては、エアシリンダにより、高摩擦の素材を貼り付けられた板(以降、摩擦板と呼ぶ)を地面に押しつけることにより、高接地摩擦状態が生成されている(図では、見やすさのために高摩擦の素材は貼り付けられていないことに注意されたい).

この接地摩擦制御機構は、4.2.2節のシミュレーションで確認されたように、Slimebotにおける耐故障性に大きく関わる部分である。そのため、4.2.2節の結果を反映して、Slimebotが優れた耐故障性を有するように Morphological computation を活用して設計されている。この具体的な設計に関しては、5.3節で述べる。

**モジュール実機におけるアクティブモードとパッシブモード** 以上の、腕の伸縮機構と接地摩擦制御機構を組み合わせて構成されるモジュール実機におけるアクティブモードとパッシブモードを図 5.9 に示す。モジュール実機では、5.2.4節で述べる制御回路において、腕の伸縮機構と接地摩擦制御機構が2律背反的に動作することによりアクティブモードとパッシブモードが制御される。

### 5.2.3 赤外線通信による局所通信機構

モジュール実機で採用される局所通信機構は、前述したとおり有線通信であってはならない。では、どのようなワイヤレス通信機構を実装すべきであろうか？例えば、ワイヤレス通信として電波のような伝送距離の長い通信手段(大域通信)を使用することが考えられるが、このような通信手段では、その電波がどのモジュールから来ているのか判別する必要が生じる。すると、モジュール数が増加する度に、各モジュールが処理しなければならない情報量が爆発的に増えるため現実的ではない。また、拡張性、耐故障性に関する生存脳機能の低減に影響するという観点からもこのような大域通信手段は採用されるべきではない。このような理由から、本研究では、通信手段として伝送可能距離をモジュール実機の直径程度に調整可能な赤外線を採用した。これにより、結合したモジュール間のみで通信が可能となる局所通信機構を実装した。

実装した赤外線による局所通信機構を図 5.10 に示す。赤外線受信機構は、(株)東芝セミコンダクターの赤外線受光 IC TPS830 を採用して実装した。また、赤外線送信機構(赤外線発光 LED)は、同(株)東芝セミコンダクターの赤外線放射角の広い(半値角 160度)TLN103A を採用し、受光 IC の周囲に4個配置した。このような、送受信機構の配置、ならびに送信機構部分に設置した可変抵抗による出力調整を行うことで、自モジュールが発光する赤外線を誤検出しない送受信を実現した。

#### 5.2.4 搭載する制御回路

以上の、モジュール実機における機構系を制御するための制御回路を設計した。モジュール実機が搭載する制御回路を図5.11に示す。この制御回路にはモジュールのCPUとしてクロックが16MHzのH8/3664Fマイコンが搭載されている。制御回路の回路図を図5.12に示す。本制御回路は、空気圧駆動型のアクチュエーション機構のためのDC-DCコンバータとFET駆動回路、赤外線通信による局所通信機構のためのポーリング回路、アクティブモードとパッシブモードの制御等のための論理回路から構成される。電源として、薄型で耐久性が高いことから(株)K&S製のリチウムポリマーバッテリー「THUNDER POWER」(11.1V, 480mAh)が採用されている。

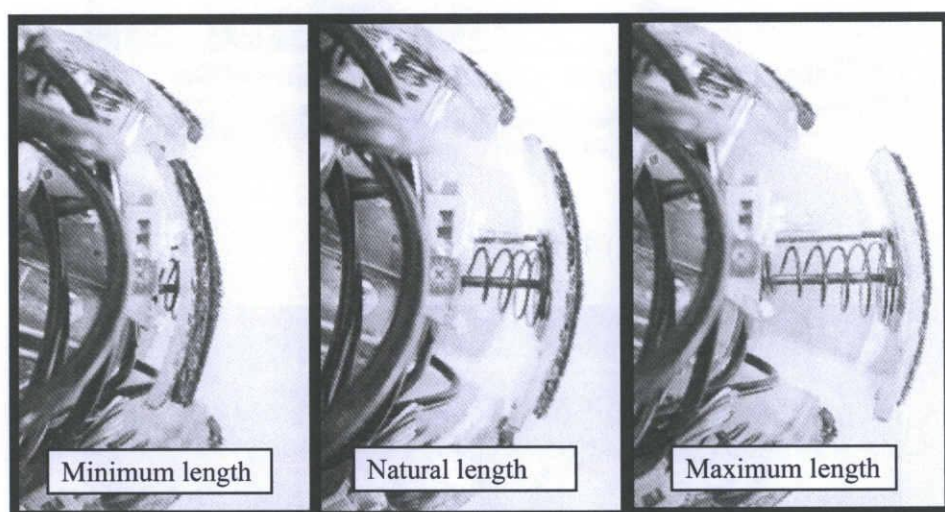
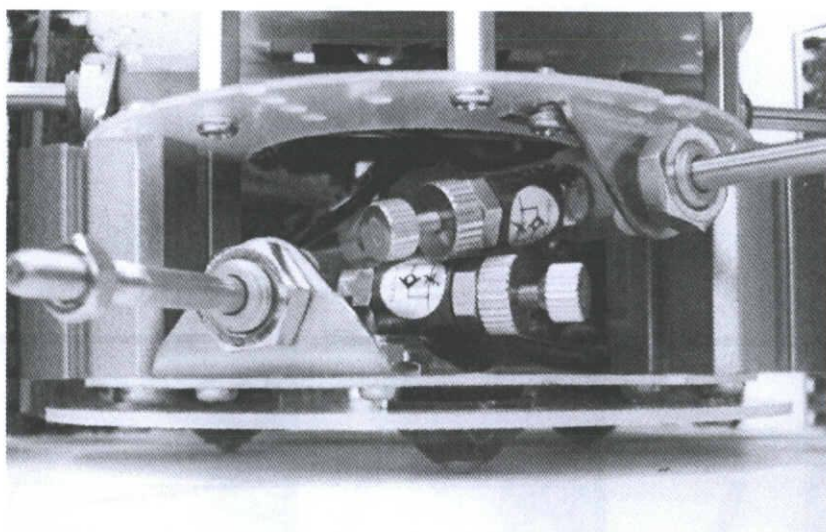
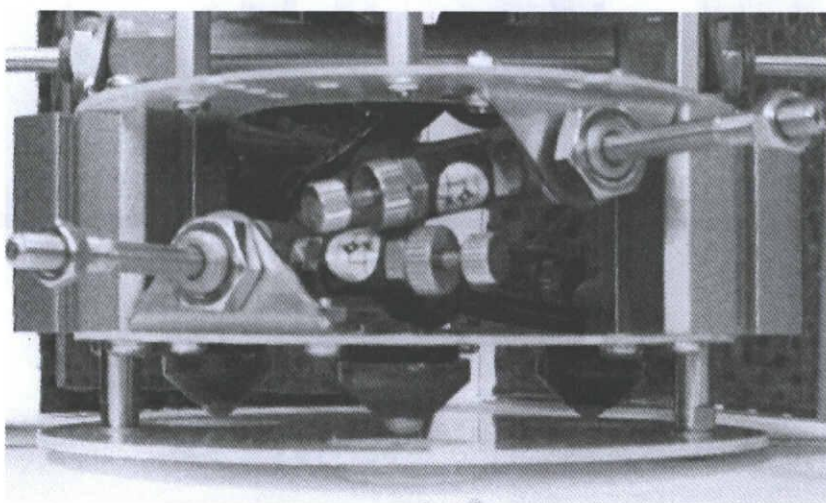


図 5.7: 腕の伸縮機構



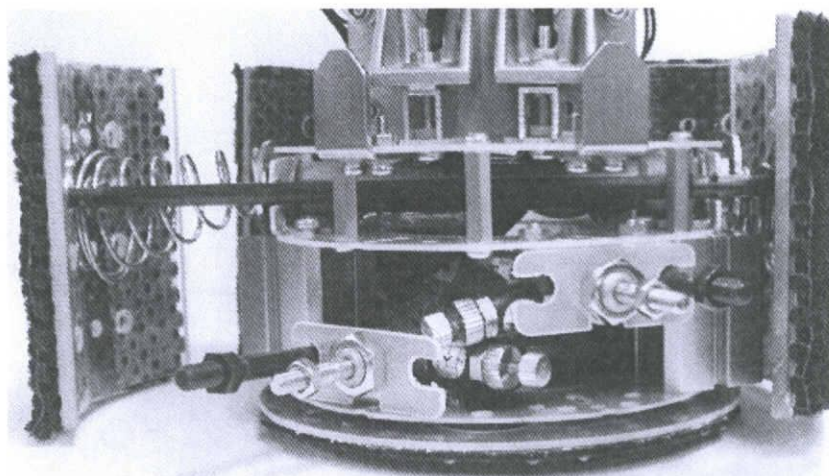
(a) 接地摩擦：低摩擦



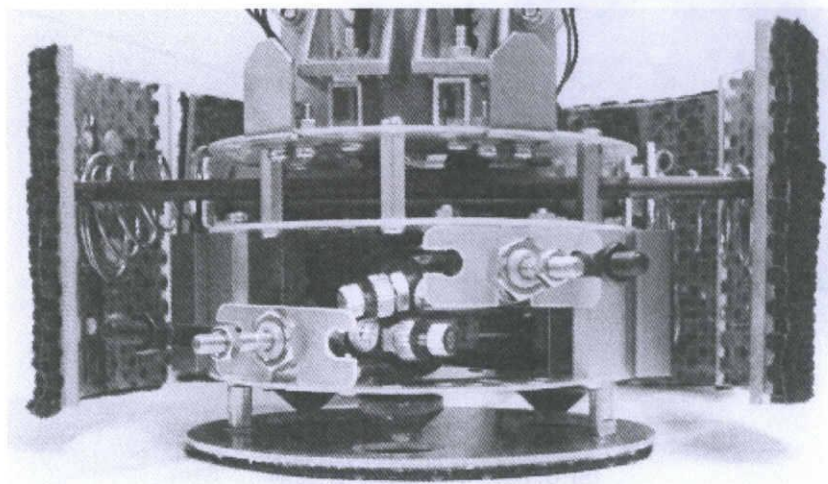
(b) 接地摩擦：高摩擦

図 5.8: 接地摩擦抵抗の制御機構





(a) モジュール実機のアクティブモード



(b) モジュール実機のパッシブモード

図 5.9: 接地摩擦抵抗の制御機構



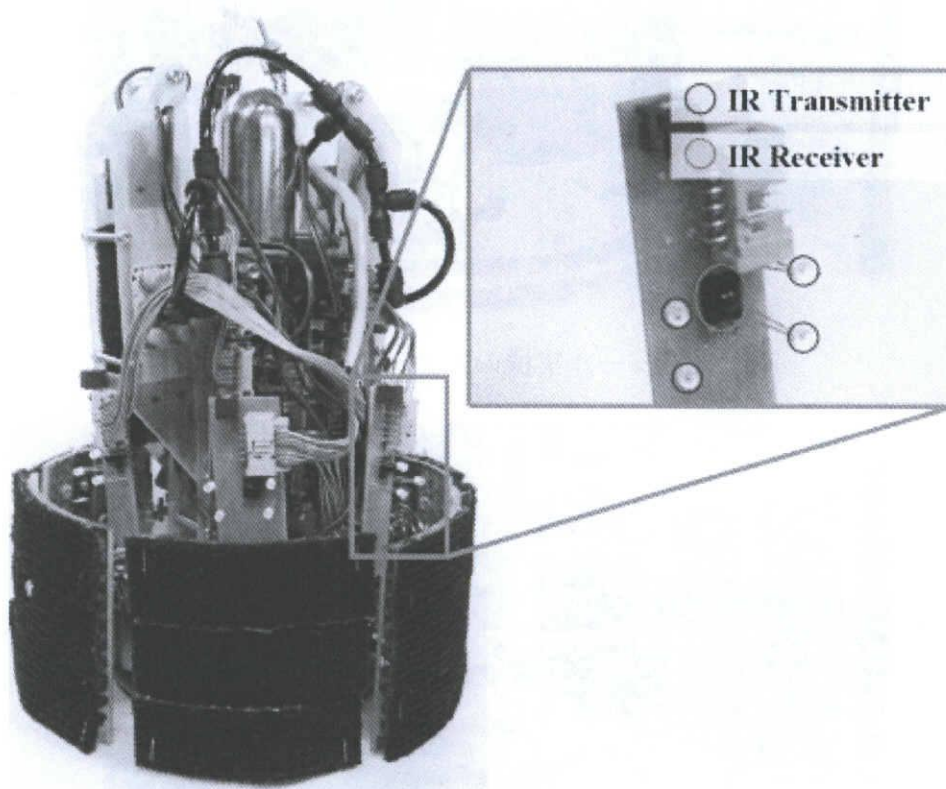


図 5.10: 赤外線通信機構

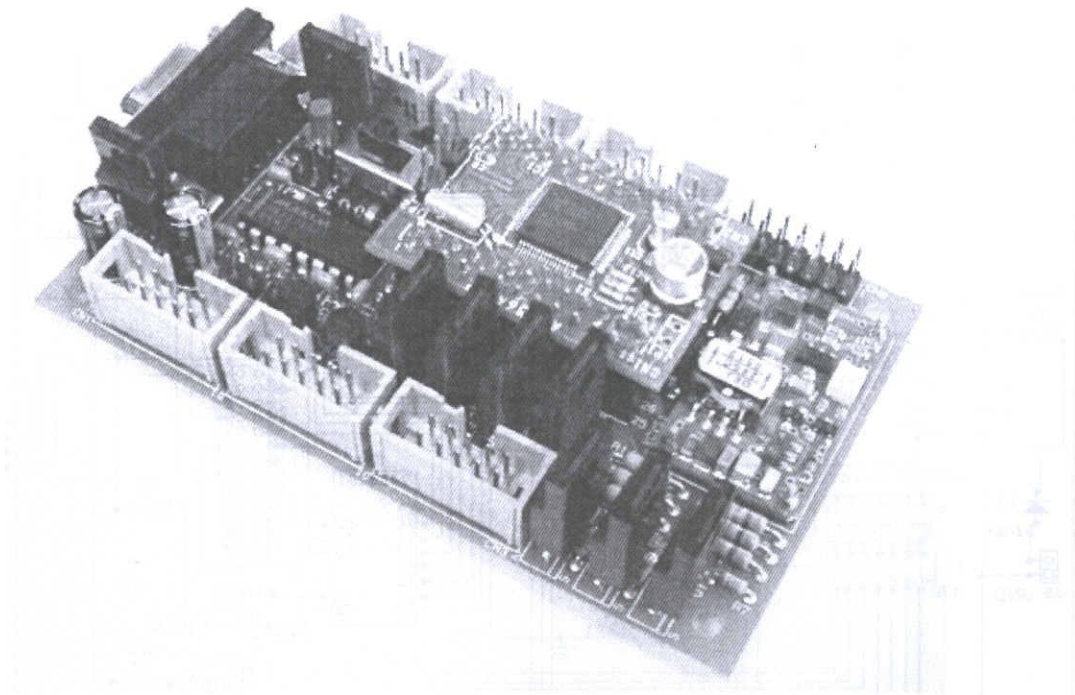


図 5.11: 制御回路

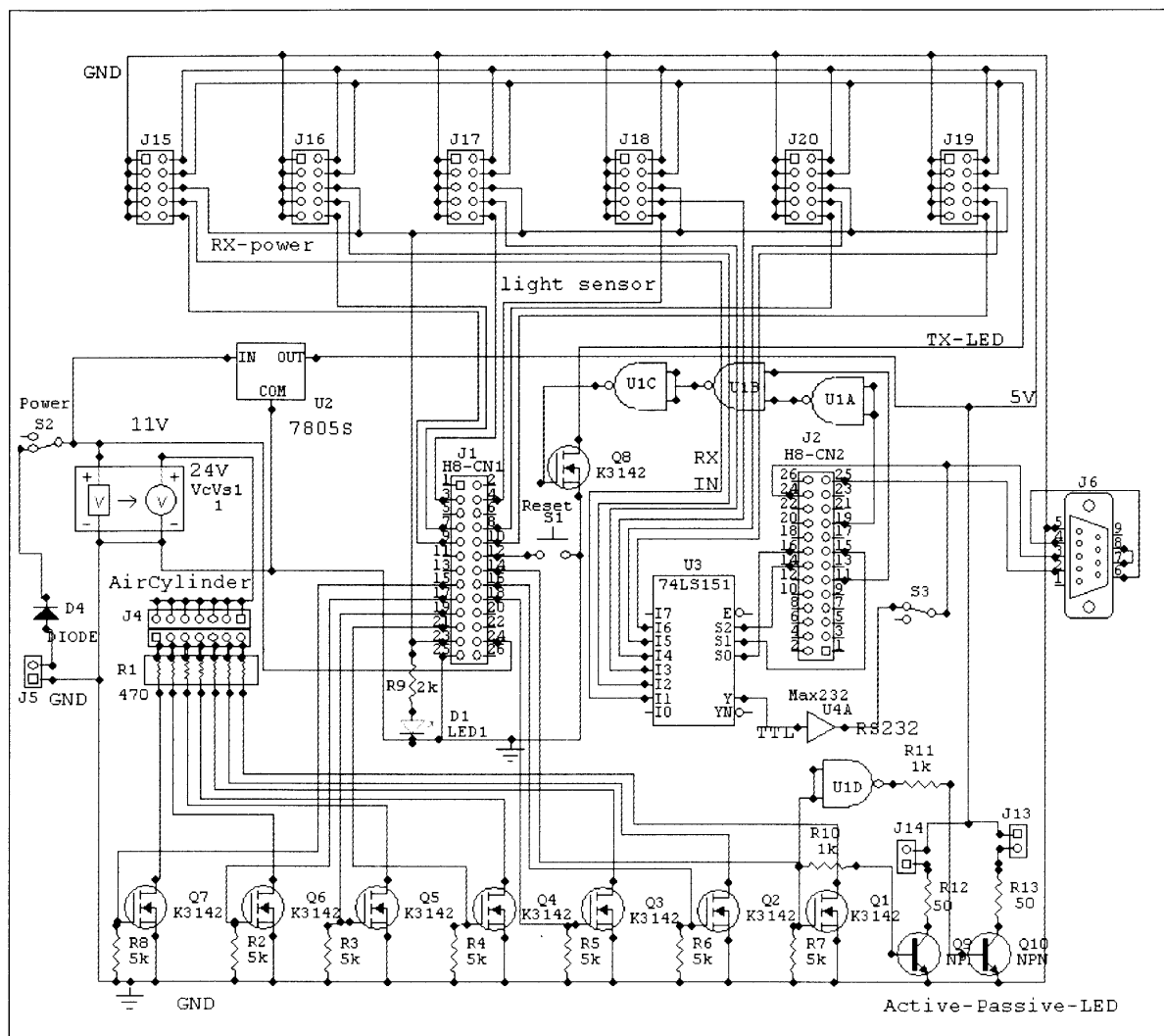


図 5.12: 回路図

### 5.3 モーフオロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計

本研究におけるモジュラーロボット Slimebot は、4.2.2 節のシミュレーションを通して腕の伸縮機構やモジュール間通信機構といった故障の様式に対しては、頑健であることが確認された。しかしながら、唯一、接地摩擦が高い状態で接地摩擦制御機能が停止してしまうといった故障様式に関しては著しい脆弱性を示すことが確認された。本研究では、モーフオロジカルコンピューテーション [27][28] の概念を活用することでこの脆弱性を解決した。以下に、その詳細を述べる。

4.2.2 節のシミュレーションでは、接地摩擦の高い状態を維持するような故障が起きた場合に (図 4.6 参照)、耐故障性に関する脆弱性が確認された。これを解決するためには、故障時には常に接地摩擦が低い状態となるようにモジュール実機が設計されるべきである。この目的のために本研究では、5.2.2 節で述べた接地摩擦制御機構において引きバネの内蔵されているエアシリンダを採用した。これにより、電源等の異常により機能停止した際には摩擦板が引き上げられ、必ず接地摩擦が低く保たれる。これは、換言すると表 5.1 を満たすようにモジュール実機が設計されるべきであることと同義である。

興味深いことに、機構系の工夫が論理的な演算と同様の結果を引き出した。このように、あたかも計算機演算のような振る舞いをする機構系の発現する機能は、モーフオロジカルコンピューテーションと呼ばれる。また、同様な概念として伊藤らが提唱している受動知能 [29] も知られている。第 2 章で述べたように、生存脳機能を発現するシステムを構築するためには、機構系と制御系間の相互作用ダイナミクスの調和が重要である。モーフオロジカルコンピューテーションは機構系と制御系を積極的に相互作用させることを目的としており、今後の作業仮説の検証のために必要不可欠な概念である。

一方で、本研究におけるモーフオロジカルコンピューテーションの利用目的は、フェールセーフに留まっている。しかしながら、モーフオロジカルコンピューテーションが非常に単純な機構系の改変のみでフェールセーフを達成していることに注意されたい。

### 5.3. モーフロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計85

すなわち、同様のフェールセーフを制御系により実装することも可能であるが、このような場合は計算負荷の増大につながる危険性が懸念される。また、制御系による方法は、制御回路ならびに電源系が正常に動作していることが前提であり、故障した箇所によっては正確に動作しない可能性がある。

本研究では言及するには至っていないが、今後は生存脳機能の発現に関して、モーフロジカルコンピューテーションがどのように影響するのかを明示的に議論することも重要な課題である。

表 5.1: モジュールの動作状態と接地摩擦に関する真理値表

アクティブモード	パッシブモード	動作状態	接地摩擦
False	False	故障	低
False	False	正常	低
False	True	故障	低
False	True	正常	高
True	False	故障	低
True	False	正常	低

## 5.4 まとめ

本章では、第3章で構築した Slimebot モデルに関して、実世界での有用性を検証するための Slimebot 実機の開発を行った。各モジュールに全機能を内蔵するための機構系の簡素化や、外部もしくは他のモジュールとの優先接続の排除といった、実機実現に要請される仕様を満足するために、アクチュエーション機構として、直動型エアシリンダを、ワイヤレスの局所通信機構として赤外線通信機構を実装した。また、優れた耐故障性を有する Slimebot 実機を実現するために、第4章における耐故障性検証のシミュレーション結果に基づいて、モーフォロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計を行った。





## 第6章 Slimebot 実機による創発的形態制御に関する検証

本章では、第5章で述べたモジュール実機から構成される Slimebot 実機による創発的形態制御に関する検証を行う。この目的のために、まず Slimebot の基本機能を実機上において確認するための予備的な実験を行う。次に、生存脳機能の発現に関して、環境適応性、拡張性、耐故障性の観点から検証を行う。

### 6.1 異なる初期形態からのロコモーション生成

Slimebot 実機による生存脳機能の検証の前に、予備的な実験として異なる初期形態からのロコモーション生成を確認する。本節では、4機のモジュールから構成される Slimebot 実機について、異なる初期形態からのロコモーション生成が可能であることを確認する。具体的には、ひも状の一次元形態と、ひし形の二次元形態を形成する二つの異なる形態を採用した。各場合の結果を、図6.1, 6.2に示す。同図において、円で囲まれているモジュールの  $\alpha_i$  を 0.7 に、他のモジュールの  $\alpha_i$  を 1.0 に設定した。また、スナッチショットは左から右へと時間発展している様子を示す。

両図から、異なった初期形態からであってもロコモーションが自己組織的に生成されることが確認された。ここでは、どちらの形態においても、各モジュールに実装されている VDP 振動子間の相互引き込みからコヒーレントなロコモーションが創発していることに注意されたい。

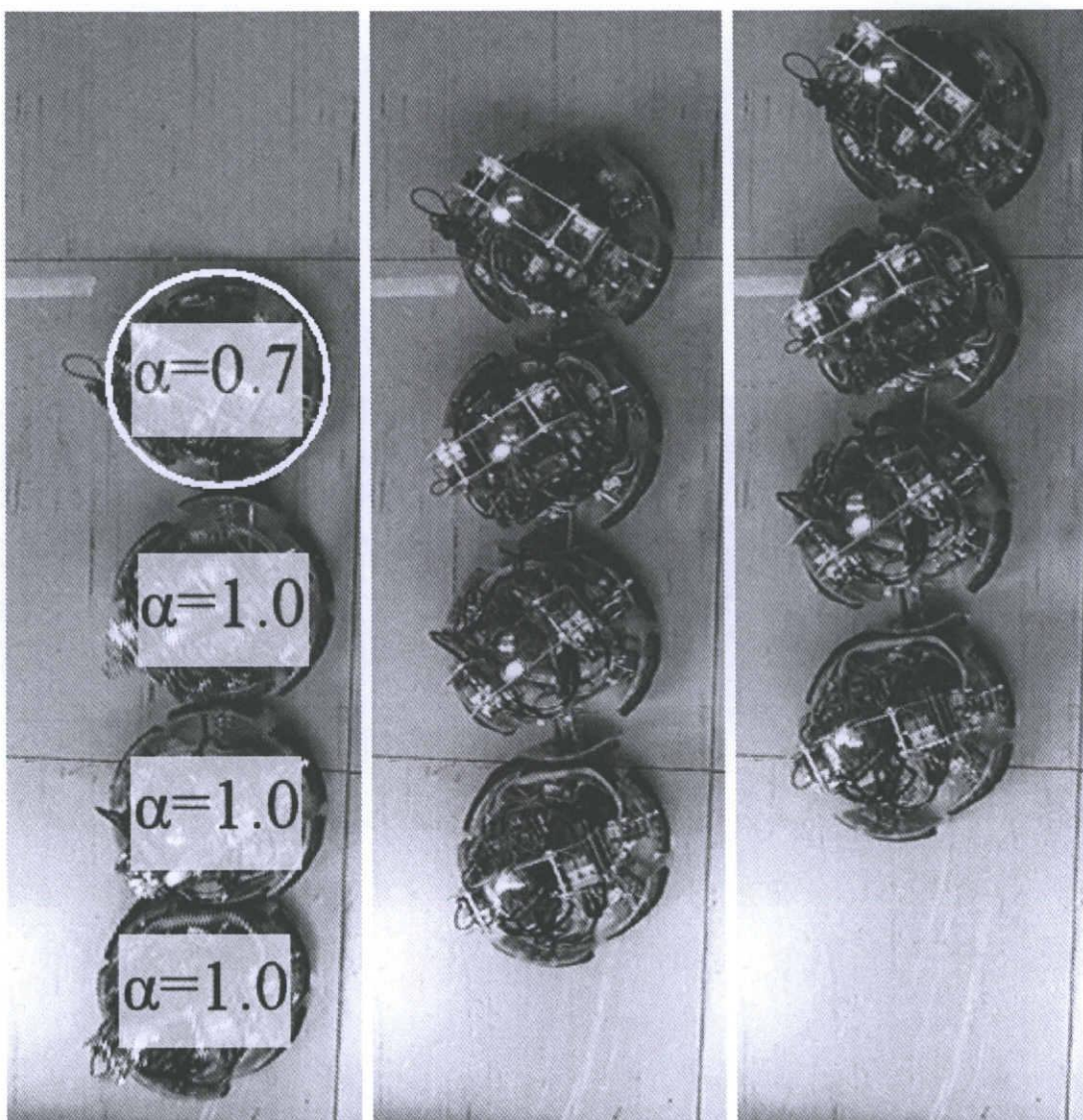


図 6.1: ひも状 Slimebot のロコモーション生成

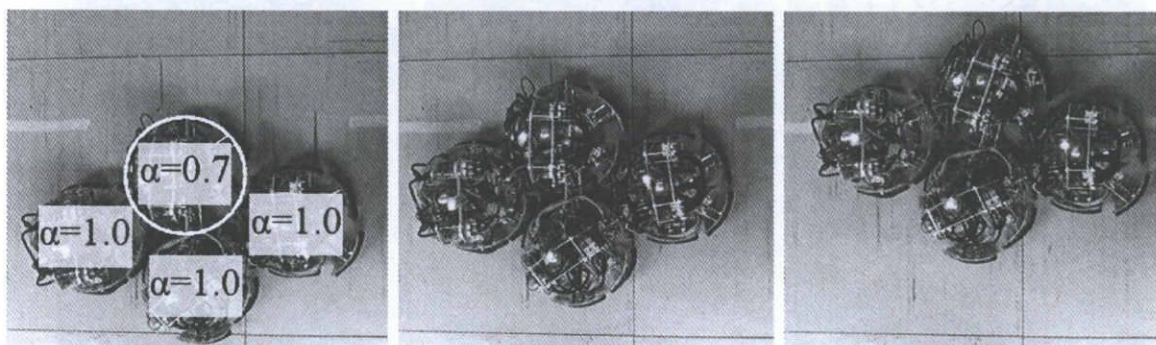


図 6.2: ひし形 Slimebot のロコモーション生成

## 6.2 実機による環境適応性の検証

本節では、Slimebot 実機による環境適応性の検証を行う。まず、本検証の設定を述べる。環境には、障害物が配置されており、それが狭窄空間を形成している。Slimebot に課されるタスクは、狭窄空間への進入である。4 モジュールから構成される Slimebot 実機は、L 字の初期形態を構成するようにモジュール間が結合されており、狭窄空間の入り口部分に配置された。このとき、個々のモジュールにおける  $\alpha_i$  は、狭窄空間内部に向かってロコモーションを生成するように、先頭のモジュールに関しては 0.7、それ以外のモジュールに関しては 1.0 と設定された。

結果を図 6.3 に示す。(a) から (f) に時間発展に沿ったスナップショットを示した。(a) は、L 字の初期形態を示す。Slimebot は L 字形態の状態のまま図中上方へと進むが、進行方向は狭窄空間となっているため初期形状のままでは進入することができない。(b) から (d) まで時間が推移する間に、機能性素材を活用した自発的なモジュール間結合の着脱が起こり、L 字形態を初期形態とした Slimebot は最終的に I 字形態となることが確認された。この間に Slimebot に起こった環境適応的な行動は次のようになる：

- 1. 機構系を反映した制御系によるロコモーション (制御系, 機構系間相互作用)** L 字形態の結合の仕方を反映するように、VDP 振動子間の位相勾配が形成され、移動を開始した。
- 2. 環境の状況に依存する機構系の改変 (機構系, 環境間相互作用)** モジュール機構系と環境間が物理的に干渉することにより、先頭のモジュールと 2 番目のモジュール間を結合している腕が、ベルクロテープの着脱により異なる腕に切り替わった。
- 3. 制御系の改変によるロコモーション方向の変更 (制御系, 機構系間相互作用)** VDP 振動子間結合トポロジーが変更され、Slimebot 内部の位相勾配の形状が変化し、Slimebot のロコモーション方向も変化した。



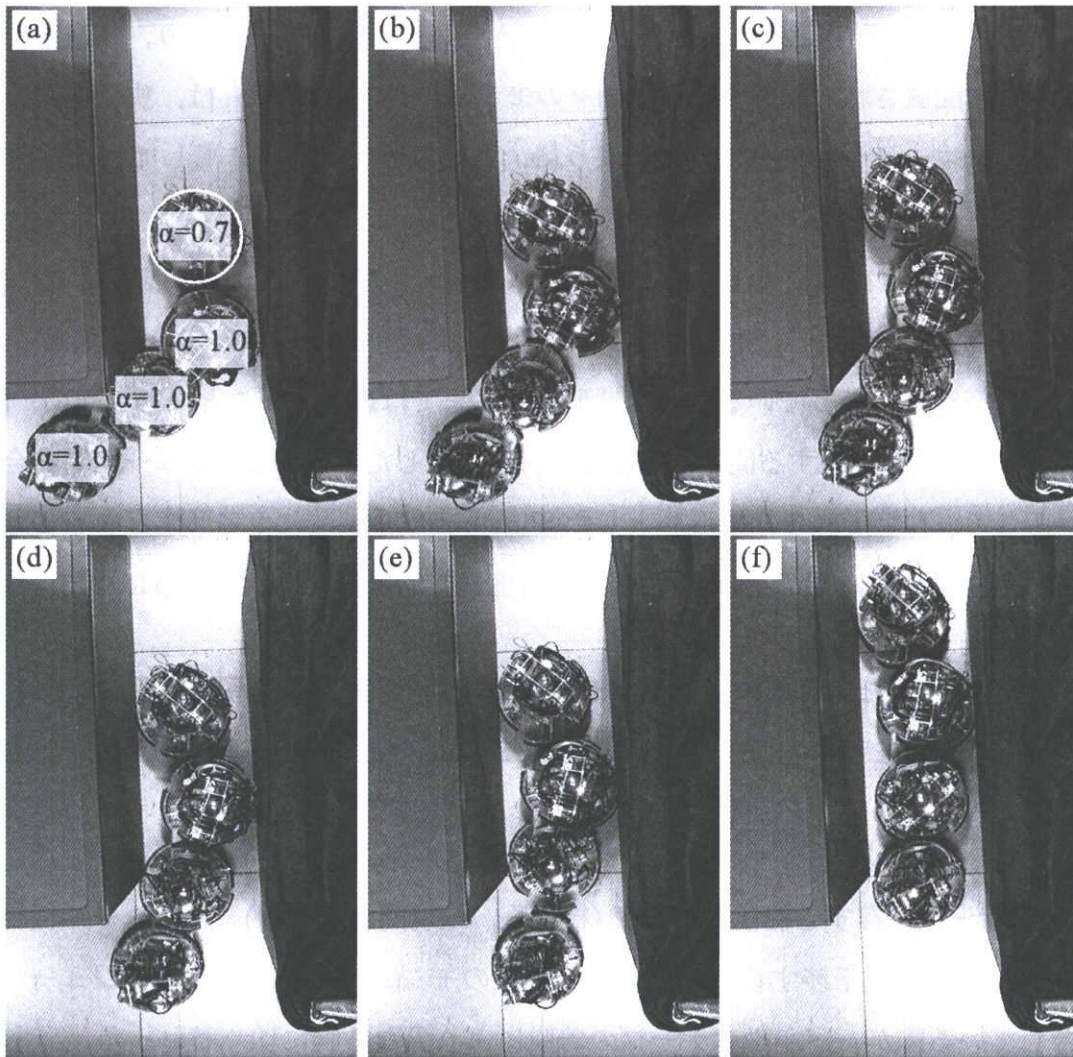


図 6.3: 環境適応的な形態変形.

### 6.3 実機による拡張性の検証

本節では、Slimebot 実機における拡張性の検証を行う。具体的には、機能性素材を活用した自発的なモジュール間結合を活用して、3モジュールによる協調動作から、4モジュールによる協調動作へのシームレスな変更を確認する。まず、本検証の設定を述べる。ここでは、3モジュールから構成される Slimebot と、1モジュールをそれぞれ離れた位置に配置した。単独で配置された1モジュールおよび、3モジュールの先頭の  $\alpha_i$  を 0.7 に、他のモジュールの  $\alpha_i$  を 1.0 に設定することで、3モジュールから構成される Slimebot のロコモーションによって、やがて離れて配置された1モジュールに衝突するように設定した。

結果を図 6.4 に示す。同図から、外部からの明示的な制御の介在を必要とせずにモジュール間が結合し、その後、4モジュールから構成される Slimebot として、ロコモーションを生成しているようすが見てとれる。ここではモジュール間の結合が成立した後に、つづいて VDP 振動子間の相互引き込みが起こり、最終的に4モジュールから構成される Slimebot としてのロコモーションが生成されている。また、この間に、モジュール間結合やロコモーションにかかわる明示的な制御は一切されてないことに注意されたい。

### 6.4 実機による耐故障性の検証

ここでは、Slimebot 実機による耐故障性の検証を行う。特に、5.3 節で述べたモーフロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計が、実機の耐故障性に影響を及ぼすことを確認する。

4.2.2 節のシミュレーションでは、接地摩擦が高い状態を維持するような故障が起きた場合に (図 4.6 参照)、耐故障性に関する脆弱性が確認された。そこで、意図的にこのような故障形態のモジュール実機を設定して、3モジュールから構成される Slimebot 実機によるロコモーション実験を行った。このとき、先頭モジュールと2番目のモジュールの  $\alpha_i$  の値をそれぞれ、0.7, 1.0 と設定した。また、最後尾のモジュールを故障モジュールとした。ここでは、接地摩擦の高い状態を維持する故障を想定した意図的な機構系

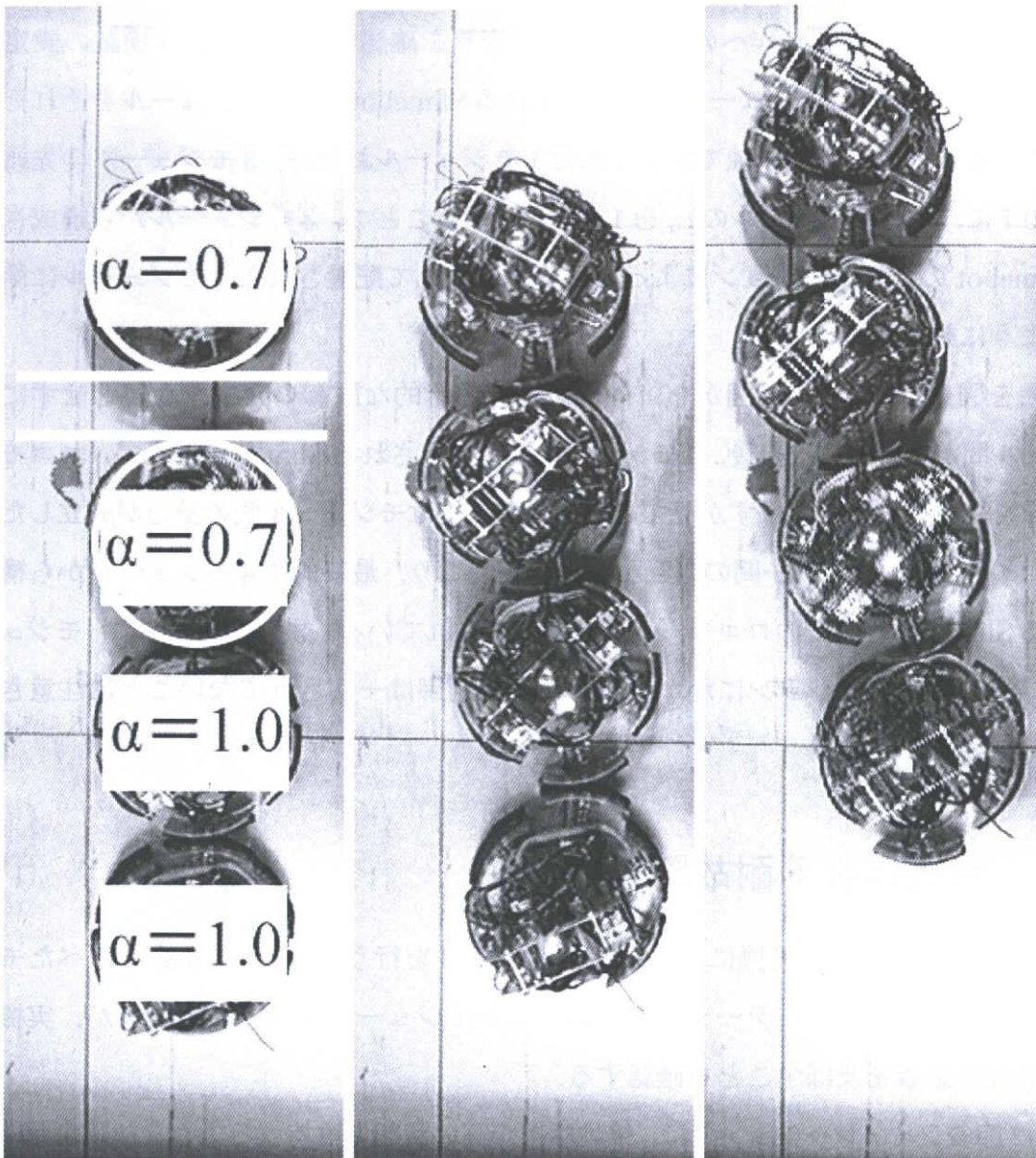


図 6.4: 3 モジュールからなる Slimebot とモジュールの間の自発的な結合

の設定を行った。

結果を図 6.5 に示す。スナップショットは左から右へ時間発展するようすを表している。同図から故障モジュールを含む Slimebot は、時間が経過しても移動できていないことが見てとれる。このように、接地摩擦の高い状態を維持する故障モジュールを含む Slimebot においては、耐故障性に関する脆弱性を確認することができた。

次に、モーフォロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計を行った場合の、耐故障性を検証する。ここでは先ほどとは異なり、故障時には常に接地摩擦の低い状態を維持するようにモジュールが設計されている。結果を、図 6.6 に示す。先ほどと同様に、スナップショットは左から右へ時間発展するようすを表している。同図から故障モジュールを含む Slimebot において、ロコモーションが可能であることが見てとれる。

これらの結果から、優れた耐故障性を有する Slimebot 実機を実現するためには、5.3 節で述べたモーフォロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計が重要であることが確認された。

## 6.5 まとめ

本章では、少数のモジュールから構成される Slimebot 実機に関して、創発的形態制御に関する検証を実験により行った。Slimebot に期待される生存脳機能の発現に関する検証として、環境適応性、拡張性、耐故障性の検証を行い、Slimebot 実機においても生存脳機能が確認され、提案手法の有効性が検証された。特に、第 4 章のシミュレーションでは示されなかった結果として、モーフォロジカルコンピューテーションを活用した実機設計による優れた耐故障性も定性的に確認された。一方で、Slimebot 実機を構成するモジュール数が少数であったため、第 4 章で示した表面張力効果、Beni の提唱した群知能発現の特徴が検証されなかった。今後は、さらなるモジュールの量産を行い、これらを検証することを検討している。



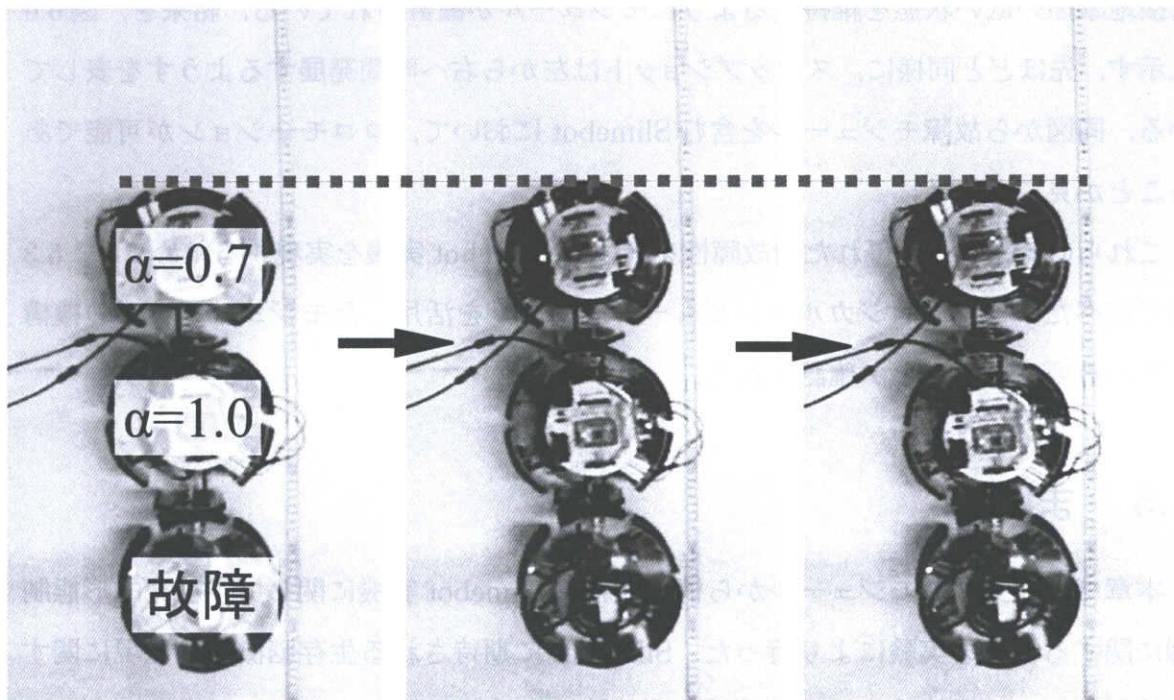


図 6.5: 実機による耐故障性の検証 (接地摩擦の高い状態を維持する故障の場合)

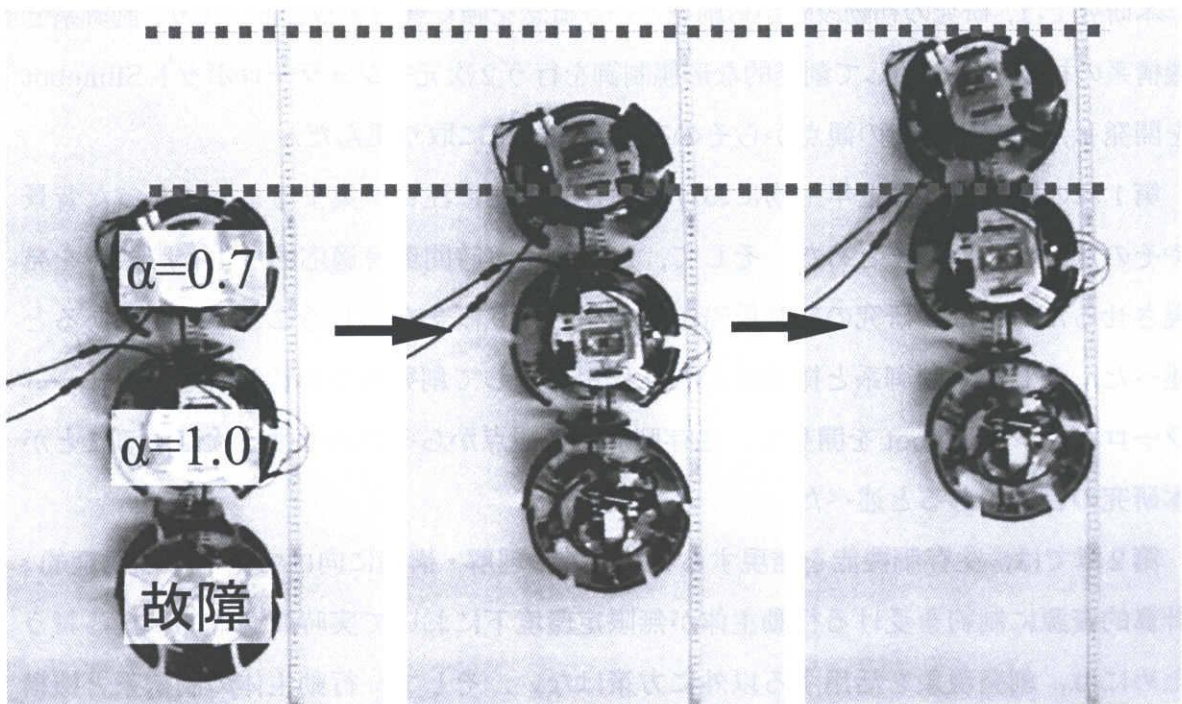


図 6.6: 実機による耐故障性の検証 (接地摩擦の低い状態を維持する故障の場合)

## 第7章 結論

### 7.1 本研究で得られた成果

本研究では，研究の初動段階から創発という概念を強く意識することにより，制御系と機構系の相互作用を通して創発的な形態制御を行う2次元モジュラーロボット Slimebot を開発し，生存脳機能の観点からその有効性の検証に取り組んだ。

第1章の緒論では，近年生物における生存脳機能に注目が集まるようになった背景やその意義についてまとめた。そして，人工物に実時間環境適応的な生存脳機能を発現させるためには，研究の初動段階から創発という概念を論じることが重要であると述べた。そして，制御系と機構系の相互作用を通して創発的な形態制御を行うモジュラーロボット Slimebot を開発し，生存脳機能の観点からその有効性を検証することが本研究の目的であると述べた。

第2章では，生存脳機能を発現するシステムの理解・構築に向けて，「有限な物理的・計算的資源に制約を受ける行動主体が無限定環境下において実時間適応的に振る舞うためには，創発現象を活用する以外に方策はない。そして，行動主体の制御系と機構系間の相互作用ダイナミクスの調和のとれた状態において生存脳機能等の興味深い現象が創発する」といった作業仮説を導出することにより本研究の立場を明確にした。

第3章では，提案するモジュラーロボット Slimebot のモデルの構築について述べた。第2章で導出した作業仮説に基づき，機構系の工夫として機能性素材を用いたモジュール間の自発的結合制御機構を，制御系の工夫として非線形振動子の相互引き込み現象を活用した自律分散的なロコモーション生成機構を考案し，モジュラーロボットとしてコヒーレントなロコモーションを生成する方法を述べた。

第4章では，Slimebot について，シミュレーションにより創発的な形態制御に関する検証を行った。シミュレーションの結果，Slimebot が優れた環境適応性，拡張性を有して

いることが確認された。耐故障性に関しては、ほとんどの故障の様式に関しては頑健であることを確認したが、唯一、接地摩擦機能に関わるある種の様式に関しては脆弱性を示すことが確認された。また、Slimebotの生存脳機能発現に大きく関わる、形態維持機能の発現に関する検証を行った。ここでは、Slimebotが環境適応的に振る舞う際に機構系の工夫による自発的な結合制御が活用されていること、形態をコヒーレントに維持するために制御系の工夫による表面張力的効果が活用されていることを確認した。さらに、Beniの提唱した「群知能の発現に関わる個体の臨界数」が、Slimebotの形態維持機能にも存在することを確認した。

第5章では、Slimebotについて、実環境における有効性を調べるために開発した実機に関して説明した。各モジュールに全機能を内蔵するための機構系の簡素化や、外部もしくは他のモジュールとの優先接続の排除といった、実機実現に要請される仕様を満足するために、アクチュエーション機構として、直動型エアシリンダを、ワイヤレスの局所通信機構として赤外線通信機構を実装した。また、優れた耐故障性を有するSlimebot実機を実現するために、4章における耐故障性検証のシミュレーション結果に基づいて、モーフォロジカルコンピューテーションを活用したモジュール実機の機構設計を行った。

第6章では、Slimebot実機による創発的形態制御に関する検証を行った。Slimebotに期待される生存脳機能の発現に関する検証として、環境適応性、拡張性、耐故障性の検証を行い、Slimebot実機においても生存脳機能が確認され、提案手法の有効性が検証された。また、第4章のシミュレーションにおいて発覚したSlimebotの耐故障性に関する脆弱性を、モーフォロジカルコンピューテーションが解決したことにも注意されたい。

本論文にて提案し、シミュレーション、実機実験の両面からその有効性を検証したモジュラーロボットSlimebotは、制御系と機構系の相互作用を通して創発的な形態制御を実現し、無限定環境下における実時間適応能力(生存脳機能)の発現原理の解明に大きく貢献したと考えられる。

## 7.2 今後の展望

本論文では、無限定環境下において実時間適応的な創発的形態制御を可能とするモジュラーロボット Slimebot を開発し、その生存脳機能の発現の検証を行った。生存脳機能理解のための構成論的研究にはさまざまなアプローチが存在するが、本論文では、意図的に原初的な生物に着目することで、基本的な生存脳機能の抽出を試みるアプローチを採用した。本節では、さらに進んだ生存脳機能理解のためにはどのようなアプローチをとるべきかを考察する。

本論文における、シミュレーション、実機実験によって Slimebot が生存脳機能を発現することが確認されたが、ここでは、現象が観察されたのみであり、その根底にはどのような基本原理が存在するのかに関しては議論が進められていない。また、本論文の作業仮説において、無限定環境下で適応的に振る舞うためには、行動主体における脳(制御系)と身体(機構系)間の相互作用ダイナミクスが調和していることの重要性を指摘したが、その仮説自体の検証がなされていない。

これらのことから、今後は次のような疑問が検証されるべきである：

- 制御系と機構系間の相互作用ダイナミクスの調和している状態とは？
- 身体性や種の違いにかかわらず、生存脳機能発現には普遍的な基本原理が存在するのか？

これらの疑問に対して適切に回答するためには、制御系、機構系、環境間の相互作用様式を明示的に表現し、定量化可能な指標を定めることが重要である。かつ、このような指標を Slimebot で定める際には、議論対象となるスケールの違いによって、得られる情報の持つ意味が全く異なる可能性があることにも注意しなければならない。

Slimebot は、本論文で示したように優れた拡張性を持つシステムである。それ故に、モジュラーロボットを構成するモジュール数は、最小単位である 2 でも動作が可能であるのに対して、数百、数千のモジュールから構成される Slimebot も動作が可能である。このような Slimebot の力学的な挙動は、モジュール数が 2 の場合は解析的に予測が可能であり、モジュール数が非常に多い場合にもまた、連続体近似により祖視化さ

れた力学を用いて解析的な予測が可能となる。しかしながら，少数多体系と呼ばれるようなモジュール数が数十のスケールでは，解析的な予測が不可能となり，実機実験やシミュレーションが必要となる。制御系，機構系，環境間の相互作用ダイナミクスに関する疑問を考察する上で，このようなスケールの違いにどのような本質，原理が内在しているかは非常に興味深い問題であり，今後の議論が期待される。

## 参考文献

- [1] R. ファイファー, C. シャイアー著 (石黒章夫, 小林宏, 細田耕 監訳), 「**知の創成 – 身体性認知科学への招待–**」, 共立出版, 2001.
- [2] 高草木薫, 浅間一, 「移動知:行動からの知能理解–構成論的観点と生物学的観点から」, 計測と制御, Vol.44, No.9, pp.580–589, 2005.
- [3] H. Asama, et al., “System Principle on Emergence of Mobiligence and Its Engineering Realization”, in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1715–1720, 2003.
- [4] 矢野雅文, 三浦治己, 「結合振動子による真性粘菌の情報処理」, 数理科学, No.408, pp.15-22, 1997.
- [5] 高松敦子, 藤井輝夫, 細川和生, 遠藤勲, 「マイクロ構造を用いた粘菌変形体ネットワークの結合制御」, 第11回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.89–92, 1999.
- [6] T. Fukuda and Y. Kawauchi, “Cellular robotic system (CEBOT) as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulators”, in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.662–667, 1990.
- [7] 村田智, 黒河治久, 富田康治, 小鍛治繁, 「分散機械システムの設計 (第三報) – 大規模システムの構築アルゴリズム –」, 第6回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.265–270, 1995.

- [8] K. Støy and R. Nagpal, “Self-Reconfiguration Using Directed Growth”, in Proc. of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS 2004), pp.1–10, 2004.
- [9] 黒河治久, 吉田英一, 神村明哉, 富田康治, 村田智, 小鍛冶繁, 「変形し移動する自立モジュール型ロボット (M-TRAN)」, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.8, pp.855–859, 2003.
- [10] M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang, and D. Duff, “Self-Reconfigurable Robot Systems: PolyBot”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.8, pp.851–854, 2003.
- [11] Morten W. Jorgensen, Esben H. Ostergaard and Henrik H. Lund, “Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot”, in Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2004(IROS2004), pp.2068–2073, 2004.
- [12] R. Wooton, “How Flies Fly”, *Nature*, Vol.400, pp.112–113, 1999.
- [13] R. Wooton, “Design, Function and Evolution in the Wings of Holometabolous Insects”, *Zoologica Scripta*, Vol.31, No.1, pp.31–40, 2002.
- [14] 石黒章夫, 「多型的神経回路による歩行ロボットの適応制御」, 第14回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.303–308, 2002.
- [15] 石黒章夫, 石丸和寿, 早川宏治, 川勝年洋, 「Well-balanced Design とは何か?—制御系ダイナミクスと身体系ダイナミクスの調和設計—」, 第15回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.39–44, 2003.
- [16] D. Floreano and F. Mondada, “Automatic creation of an autonomous agent: Genetic evolution of a neural-network driven robot”, in Proc. of the 3rd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press, pp.421–430, 1994.



- [17] F. Mondada and D. Floreano, “Evolution of neural control structures: Some experiments on mobile robots”, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.16, pp.183–195. 1995.
- [18] A. Ishiguro, K. Ishimaru, “How Should Control and Dynamics be Coupled? – A Robotic Case Study–”, in *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003(IROS2003)*, pp.1727–1732, 2003.
- [19] 上田顕, 「分子シミュレーション–古典系から量子系手法まで–」, 裳華房, 2003.
- [20] 名古屋大学 土井プロジェクト 高機能材料設計プラットフォーム研究体 : OCTA ソフトマテリアルのための統合化シミュレータ 汎用粗視化分子動力学シミュレータ *COGNAC* ユーザーズマニュアル <http://octa.jp>
- [21] G. Beni and J. Wang, “Theoretical Problems for the Realization of Distributed Robotic Systems”, in *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 1991(IROS1991)*, pp.1914–1920, 1991.
- [22] ジェラルド ベニ: 「自律分散ロボットシステムと群知能」 *日本ロボット学会誌*, Vol.10, No.4, pp.457–463, 1992.
- [23] K. Sugawara, M. Sano, “Cooperative Acceleration of Task Performance: Foraging Behavior of Interacting Multi-Robots System”, *Distributed Autonomous Robotic System 2*, Springer, pp.233–242, 1996.
- [24] 菅原研, 「群れロボットの協調と群知能」, *数理科学*, No.431, pp.69-75, 1999.
- [25] 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫, 「制御系–機構系間の有機的連関を通じた自己組み立て・自己修復」, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.61–66, 2006.
- [26] 松場 弘明, 清水正宏, 石黒 章夫, 「自己組み立て能力を有するモジュラーロボットの開発」, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 2E17, 2005.

- [27] R. Pfeifer and Fumiya Iida, “Morphological computation: connecting body, brain, and environment”, *Japanese Scientific Monthly*, Vol.58, No.2, pp.48–54, 2005.
- [28] C. Paul, “Morphology and Computation”, in *Proc. of the International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour*, pp.33–38, 2004.
- [29] 伊藤一之, 福森嘉孝, 五福明夫, 「受動知能と能動知能に基づく知能の解釈と蛇型ロボットへの適用」, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2B17, 2004.

# 研究業績

## 1 査読付学術雑誌論文

1. Akio Ishiguro, Masahiro Shimizu, and Toshihiro Kawakatsu, “A Modular Robot That Exhibits Amoebic Locomotion”, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 2006, in print.
2. 石黒 章夫, 清水 正宏, 「移動知発現のための制御系と機構系の設計原理—モジュラーロボットを用いた事例研究—」, *計測と制御*, Vol. 44, No. 9, pp. 634–639, 2005.
3. 清水 正宏, 高橋 正康, 川勝 年洋, 石黒 章夫, 「制御系と機構系の有機的カップリングを活用したモジュラーロボットの創発的形態制御」, *日本ロボット学会誌*, Vol. 23, No. 6, pp. 718–724, 2005.
4. 清水 正宏, 川勝 年洋, 石黒 章夫, 「多粒子系の動力学解析手法を応用した群ロボットの自律分散的形態制御」, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 41, No. 2, pp. 126–134, 2005.
5. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Masayasu Takahashi, Toshihiro Kawakatsu, Yuichi Masubuchi, and Masao Doi, “Adaptive Shape Reconfiguration of a Decentralized Motile System Exploiting Molecular Dynamics and Stokesian Dynamics Methods”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 2–3, pp. 271–277, 2004.

## 2 査読付国際会議論文

1. Masahiro Shimizu, Toshihiro Kawakatsu, and Akio Ishiguro, “A Modular Robot That Exploits a Spontaneous Connectivity Control Mechanism”, in Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2005(IROS2005), pp.2658–2663, 2005.
2. Akio Ishiguro, Masahiro Shimizu, and Toshihiro Kawakatsu, “Slimebot: A Modular Robot That Exhibits Amoebic Locomotion”, in CD-ROM Proc. of 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2005.
3. Masahiro Shimizu, Toshihiro Kawakatsu, and Akio Ishiguro, “Slimebot: A Modular Robot That Exploits Emergent Phenomena”, in Proc. of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp.2993–2998, 2005.
4. Akio Ishiguro, Masahiro Shimizu, and Toshihiro Kawakatsu, “Don’t Try to Control Everything!: An Emergent Morphology Control of a Modular Robot”, in Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2004(IROS2004), pp.981–985, 2004.
5. Masayasu Takahashi, Masahiro Shimizu, Toshihiro Kawakatsu, and Akio Ishiguro, “Real-time Morphology Control of a Modular Robot by Exploiting the Interaction between Control and Mechanical Dynamics”, in Proc. of SICE Annual Conference 2004 (SICE2004), pp.906-911, 2004.
6. Masahiro Shimizu, Masayasu Takahashi, Akio Ishiguro, Toshihiro Kawakatsu, Yuichi Masubuchi, and Masao Doi, “Coherent Swarm Creation of Autonomous Mobile Robots by Exploiting Molecular Dynamics and Stokesian Dynamics Methods”, in Proc. of Joint Meeting : “International Conference on Molecular Simulation (ICMS)” and “Computational Science Workshop 2004 (CSW2004)”, PB39, pp.262–263, 2004.

7. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Toshihiro Kawakatsu, Yuichi Masubuchi, and Masao Doi, “Coherent Swarming from Local Interaction by Exploiting Molecular Dynamics and Stokesian Dynamics Methods”, in Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003(IROS2003), pp.1614–1619, 2003.
8. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Toshihiro Kawakatsu, Yuichi Masubuchi, and Masao Doi, “Adaptive Swarming by Exploiting Hydrodynamic Interaction Based on Stokesian Dynamics Method”, in Proc. of SICE Annual Conference 2003 (SICE2003), pp.709–714, 2003.

### 3 査読無国際会議論文

1. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Yuichi Masubuchi, Takashi Taniguchi, and Masao Doi, “Autonomous Decentralized Control of a Modular Robot Using a Molecular Dynamics Method”, in Proc. of International workshop on coarse-grained dynamics in soft-materials, pp.136, 2002.

### 4 口頭発表

1. 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「力学系の時空間構造に基づく移動知理解に向けての一考察 -モジュラーロボットを用いた事例研究-」, 第18回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.217-222, 2006.
2. 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫, 「制御系－機構系間の有機的連関を通じた自己組み立て・自己修復」, 第18回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.61-66, 2006.
3. 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫, 「制御系と機構系間の相互作用を活用した自己組み立て」, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2005, pp.101-106, 2005.

4. 河野紀明, 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「対流による原形質流動を有するモジュラーロボット」, 第11回創発システム・シンポジウム講演資料集, pp.111-114, 2005.
5. 松場 弘明, 清水正宏, 石黒 章夫, 「自己組み立て能力を有するモジュラーロボットの開発」, 第23回日本ロボット学会学術講演会, 2E17, 2005.
6. 松場弘明, 清水正宏, 石黒章夫, 「自己集積・自己修復能力を有するモジュラーロボットの構築」, 形の科学シンポジウム予稿集, pp.64-65, 2005.
7. 河野紀明, 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「原形質流動によって駆動するモジュラーロボット」, 形の科学シンポジウム予稿集, pp.95-96, 2005.
8. 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「Slimebot: 創発現象を活用したモジュラーロボット-実機による予備的検証-」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 論文集, 1A1-S-006, 2005.
9. 松場弘明, 清水正宏, 石黒章夫, 「自己集積能力を有するモジュラーロボットの構築」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 論文集, 1A1-S-008, 2005.
10. 河野紀明, 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「高い流動性を有するモジュラーロボットの開発-ゾルーゲル転移に着想を得た原形質流動の誘起-」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 論文集, 1A1-S-009, 2005.
11. 清水正宏, 高橋正康, 川勝年洋, 石黒章夫, 「創発現象を活用したモジュラーロボット -形態安定性および耐故障性検証に基づく実機デザイン-」, 第17回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.31-36, 2005.
12. 清水正宏, 高橋正康, 川勝年洋, 石黒章夫, 「制御系と機構系の有機的連関を活用したモジュラーロボットの創発的形態制御 -原形質流動ならびに表面張力効果の検証-」, 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1B34, 2004.

13. 高橋正康, 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 「制御系と身体系の相互作用を活用したモジュラーロボットの創発的形態制御」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 論文集, 1P1-L1-13, 2004.
14. 清水正宏, 「分子シミュレーション技法を用いたモジュールロボットの自律分散的形態制御」, 関西レオロジー研究会主催 第22回関西地区修士発表会要旨集, pp.10, 2004.
15. 清水正宏, 石黒章夫, 高橋正康, 川勝年洋, 増渕雄一, 土井正男, 「結合部位の力学的特性を活用したモジュラーロボットの形態制御」, 第16回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.193-196, 2004.
16. 清水正宏, 石黒章夫, 川勝年洋, 増渕雄一, 土井正男, 「流体力学的相互作用を用いたモジュールロボットの自律分散制御」, 第21回日本ロボット学会学術講演会, 2B23, 2003.
17. 清水正宏, 石黒章夫, 川勝年洋, 増渕雄一, 土井正男, 「ストークシアンダイナミクスを用いたモジュールロボットの自律分散的形態制御」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 論文集, 2A1-1F-F6, 2003.
18. 清水正宏, 石黒章夫, 川勝年洋, 増渕雄一, 土井正男, 「分子動力学法とストークシアンダイナミクスを参考にしたモジュールロボットのリアルタイム形態制御」, 第15回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.165-170, 2003.
19. 清水正宏, 石黒章夫, 増渕雄一, 土井正男, 「非対称LJポテンシャルを用いた移動群ロボットの形態制御」, 第16回分子シミュレーション討論会, pp.121, 2002.
20. 清水正宏, 石黒章夫, 増渕雄一, 谷口貴志, 土井正男, 「分子動力学法を参考にしたモジュールロボットの自律分散制御」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 論文集, 2A1-A02, 2002.

## 5 著書

1. Masahiro Shimizu, Masayasu Takahashi, Toshihiro Kawakatsu, Akio Ishiguro, “Emergent Morphology Control of a Modular Robot by Exploiting the Interaction between Control and Mechanical Dynamics”, Distributed Autonomous Robotic Systems 6, Springer, 2006, in print.
2. Akio Ishiguro, Hiroaki Matsuba, Tomoki Maegawa, and Masahiro Shimizu, “A Modular Robot That Self-Assembles”, Intelligent Autonomous Systems 9, IOS Press, 2006.

## 6 その他学会誌等における執筆

1. 清水正宏, 「創発アイデア道場 (2002年度)」, 計測と制御, Vol.43, No. 8, pp. 617, 2004.
2. 清水正宏, 「第8回分子シミュレーション夏の学校報告」, 分子シミュレーション研究会会誌 アンサンブル, 2004.

## 7 受賞歴

1. 日本ロボット学会第20回研究奨励賞, 2005.
2. 2005 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award.
3. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2004) Best Paper Award.



## 謝辞

本研究を行うにあたり、数々のご助力をいただきました名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻 教授 古橋武先生に深く感謝申し上げます。また、筆者を研究の道に導き、研究の場を与えていただくとともに、さまざまな御教示、御鞭撻を賜りました東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 教授 石黒章夫先生には心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を賜りました名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻 教授 笹井理生先生，電子情報システム専攻 教授 大熊繁先生，情報科学研究科 助教授 北栄輔先生に心より感謝致します。

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 教授 川勝年洋先生には、具体的な面において終止並々ならぬご指導を頂き、厚く御礼申し上げます。また、折りにふれ筆者の研究に対して貴重なご助言を賜りました東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授 土井正男先生，東京農工大学工学部有機材料化学科 助教授 増渕雄一先生に深く感謝します。

また、日頃より研究をともにした、名古屋大学大学院博士課程後期課程 大脇大氏，名古屋大学大学院博士前期課程 2年 河野紀明氏，佐藤智紀氏，前川知毅氏，同 1年 松野善幸氏，森貴章氏，渡邊航氏，東北大学工学部 4年 坂井善行氏，鈴木雄也氏，有益な御助言，ご協力をいただきました富士通(株) 高橋正康氏，(株) 豊田中央研究所 藤井亮暢氏に心から感謝します。

さらに、東北大学大学院工学研究科電気・通信専攻石黒研究室に関係する全ての方，名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻古橋研究室に関係する全ての方，名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻 旧土井研究室に関係する全ての方，本研究に関わってくださった皆様に対しここに改めて感謝します。

最後に、名古屋大学大学院工学研究科博士課程への進学のお機会を与えてくださり、最後まで温かく見守ってくれた家族に感謝いたします。