

## 論文の内容の要旨

論文題目 環境適合能力を有する変形変態ロボットの行動生成法に関する研究

氏名 中井博之

一般環境下で活動するロボットの場合、環境や状況に柔軟に適応する能力が重要となる。本研究では、ロボットがこのような環境適合性を実現するためには身体の形状を行動目的に応じて物理的に変化させる方法が有用であると考え、ロボットにおける変形変態機能の実現とその機能を用いた環境適合行動の生成法を構築することを目的とした。なお、本研究ではこのロボットにおける変形変態機能を形状及び剛性などの構造材特性を変化させる機能とした。この変形変態機能を実現する方法としては、身体の一部として変形構造を持つロボットを用いる他に、ロボットが環境内に配置された道具を用いて身体の拡張を行う方法も考えられる。これらの方法は異なる性質を持つ部分もあるが、両者を変形変態ロボットとみなすと形状操作において共通する機能が多くある。

そこで、この変形変態能力を実現するための要素機能として

- (1) 目的形状に応じて変形操作方法を計画する機能
- (2) 変形された形状を確認・認識する機能
- (3) 変形形状を利用した全身行動を計画する機能

が必要であると考え、これらを構築し組み合わせることでモデルベースに形状操作行動を計画するシステムを開発した。さらにそれをロボットに組み込むことでリンクの形状変形を利用した全身行動を実現し、その有用性を検証した。これにより形状の概形モデルを用いることで、ロボットにおける身体の形状操作及び変形構造を利用した環境適合行動のプランニングが可能であることを示した。

また、身体の剛性や形状を変化させることが可能なロボットを実現するために、低融点合金の相変化を利用した軟化変形構造材及びその構造材を用いた変形変態ロボットの開発を行った。

以下に論文の各章の内容に沿ってその概要を述べる。

### 第1章「序論」

本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べる。

### 第2章「変形変態機能を有するロボットの環境適合能力の構成法」

本節では、まずロボットの環境適合性について考察し、変形変態ロボットにおいて形状操作機能を利用した環境適合能力を実現するためにはどのような構成法を用いればよいのかを検討する。次に形状操作機能を実現するためのシステム構成とその構成に必要な要素技術について述べる。

さらに、ここでの形状操作機能とは柔軟な対象を行動目的に応じた形状に変形させる能力のことを指すが、ロボットにおいて形状操作機能が有用である状況には自己の身体が変形する場合以外に、ヒューマノイドのような汎用性の高いロボットが変形可能な道具を扱う場合を考慮することができる。ここでは道具を用いることを「形状変形するリンクによるボディの延長」と考え変形変態ロボットにおける自己形状の変形との共通点及び相違点について検討する。

このとき、変形対象が変形変態ロボットの軟化変形リンクや弾塑性材料のように形状を固定することができる場合、形状操作機能を実現するためには次の機能が必要となる。

- (1) 行動目的に応じて適切な変形目的形状を決定する機能
- (2) 目的形状に応じて変形操作方法を計画する機能
- (3) 変形された形状を確認・認識する機能
- (4) 変形対象を利用した全身行動を計画する機能
- (5) 形状誤差を補正して行動実行する機能

これらのうち(1)の機能は経験や教示によって形状の特性をデータベース化することで構築可能であり、(5)の機能は実機においてセンサからのフィードバックを利用して実現されることが考えられる。本論文では(2)、(3)、(4)の機能に注目し、以後の章でその詳細について述べる。

### 第3章「自己形状の変形を伴う全身行動のプランニング」

形変態ロボットが身体形状を変化させる場合を含めた全身行動のプランニングについて述べる。ロボットが一部のリンクのみを軟化させ残りのリンクが剛体である場合及び変形部を硬化させた場合には、変形変態ロボットにおいても剛体リンクからなるボディに対するプランニングシステムが必要となる。

そこで本章ではまずロボットの全身が剛体リンクとみなせる場合の全身行動の生成法について述べる。全身行動型のロボットは一般に使用できる自由度が多く、また基底リンクが空間に固定されていない。さらに環境との接触による拘束条件も存在する。このためその探索空間は非常に次元が高く、同時に多種の拘束条件も考慮しなければならない。

ここでは、全身行動型ロボットが主としてリム単位で分割可能であることに注目し、そのリム毎に拘束条件を付加し動作を生成するリム分割方式で全身行動を生成する。リム毎に分割して行動生成を行うことにより、それぞれの探索次元を低下させることが可能であり、また複数のリ

ムが同時に運動する場合においても効果的な解が得られる。

次に変形変態ロボットにおいてボディが形状変化する場合のプランニングについて述べる。変形変態ロボットの場合、通常の剛体リンクからなるロボットと次の点で異なる。

- (1) リンクを変形させながら行動することができ、軟化状態にあるリンクは柔軟であるため障害物との接触が許容される。
- (2) ロボットはリンクを変形させて環境に馴染ませることができるが、この場合ロボットのバランスを考えるためには接触点における摩擦力を評価する必要がある。

そこでまず行動計画時にリンクの変形を考慮するためにリンクの端点同士を結ぶ最短経路探索の手法を用いてその変形可能性を判定する方法について述べる。変形可能性を評価する方法は変形形状を計算する方法よりも計算時間が少なく、多くの姿勢に対して変形状態を求める必要があるモーションプランニングの用途に適している。

次に変形リンクを利用した場合のロボットの摩擦によるバランスの評価方法について述べる。この方法では、各接触点における摩擦力を計算し、それらによって接触点が離脱せずに現在の姿勢を維持することが可能であるかどうかを判定する。

#### 第4章「柔軟物の変形モデルを用いた形状操作行動」

ロボットが柔軟物を変形させる際の変形モデルの構築法と、そのモデルを利用した形状予測に基づく形状操作行動について述べる。柔軟物を変形させる場合、ロボットはまずある変形操作に対して対象がどのように変形するかを予測するための順方向の変形モデルを構築する必要がある。本論文ではこの変形モデルを構築するために変形時のポテンシャルエネルギーを考え、それを最小化することで変形形状を算出する方法を用いる。

このポテンシャルエネルギーを用いる方法では、変形時の操作力を同時に求めることが可能である。変形変態ロボットにおいてその変形方法の一つにリンクを環境に押し当てて変形させる方法が考えられるが、このとき操作点の離脱に対する判定は操作力を評価することによってなされる。

次にロボットが柔軟物の形状を操作する場合、ある目的形状が与えられたときにその変形させるために対象をどのように操作すればよいかを求めるための逆方向の変形モデルが必要となる。しかし、柔軟物の変形においてはある形状に対して変形方法が複数存在するケースが多くあるため、変形の逆モデルを解析的に求めることは困難である。そこで、ここでは前述の順計算によって得られた結果を用いてニューラルネットワークを学習させることで逆モデルを構築する方法について述べる。

## 第5章「視覚情報に基づく変形形状のモデル化」

ロボットが変形を認識するための方法には,変形対象に組み込まれたセンサを用いてその変形を直接的に検出する方法と,変形対象を外部からセンシングすることによって変形を検出する間接的な変形検出法の二通りが考えられる.

変形対象にセンサを組み込む方法では取り扱う全ての変形対象にセンサを組み込みが必要であることとセンサの配置によって変形自由度が妨げられる可能性があることが問題となる.そこで本節では外部センサとして視覚センサを用いた変形形状の獲得法について述べる.

本章では,まず視覚画像からの三次元モデルの構築のために観測対象の多視線方向からの輪郭線画像を用いてモデルの形状を削り出しを行うシルエット法の実装について述べる.この構築された三次元モデルは変形形状の概形であり,そのままロボットの行動計画に用いるモデルとしては適切でない.そこで次に形状を定式化し,三次元モデルからそのパラメータを導出しロボットのモデルに反映する方法について述べる.

## 第6章「形状操作能力を利用した全身行動の実現」

各章で述べた要素を組み合わせることによって形状操作機能を構築し,ロボットにおける環境適合行動を実現する.また低融点合金を用いた変形変態ロボットを開発し,リンクの変形を利用した行動を行うことによってその有用性を検証する.

本章ではまず変形変態ロボットを実現する方法として低融点合金を利用し,温度変化によってリンクの形状及び剛性を変化させることが可能である軟化変形リンクの設計と開発について述べる.さらにこの軟化変形リンクを用いた脚型ロボットを開発し,実際にリンクの変形を利用した行動を行う.

次にロボットの環境適合行動について述べるが,そこでまずヒューマノイドを用い,柔軟物を変形させて道具として用いる行動を行う.この行動は変形対象の形状を操作,形状を認識とモデルへの反映,変形後のモデルに基づく行動生成からなり,これまで述べてきた機能を組み合わせることによって実現することができる.

また,低融点合金を用いた軟化変形リンクはリンクの剛性を変化させる際に相変化を用いているため,リンクが欠損した場合にも主構造材である合金を融解させ再度凝固させることで自己修復機能を実現することができる.そのため変形変態ロボットはその構成法として従来のロボットのように頑強な構造を持つのではなく軽量化した骨格を用いて構成することが可能である.本節では最後にこのような軽量骨格脚型ロボットを提案し,その形状操作を伴う環境適合

行動について述べると共に,その応用として自己修復機能を利用した衝撃吸収法についても議論する.

## 第7章「結論」

これまで各章で述べた内容をまとめて本研究を総括し,変形変態ロボットにおける環境適合法の発展及び今後行なわれるべき目的について考察する.