

研究課題名	モジュール型ロボットの分散的移動制御手法
所属研究機関名	独立行政法人 産業技術総合研究所
研究者氏名	神村 明哉

研究計画の概要

研究の趣旨・目的

近年、人工物はますます大規模複雑になり、システム全体としての安定性、柔軟性、拡張性が強く求められている。システムを構成する要素を別個に設計・製作し、後から組み立てる現在の設計手法は、システムが大規模複雑化した場合、要素間の適合や、拡張性、安定性に関して難しい問題を含んでいる。これは、機械システムとしてのロボットにおいても例外ではなく、特定の用途に対して設計されたロボットは、予測できない環境に対しては無力であり、また部品単体の故障が致命傷となる場合もある。

そこで本研究では、環境に応じて形態や機能を自律的に変更可能な機械システムの実現方法として、分散型機械システム(モジュール型ロボット)を提案する。モジュール型ロボットは、その構造自体が複数の均一なロボットモジュールから構成されており、冗長な自由度を活かして、環境の変化に適応するように最適な構造へ変化したり(自己組立)、その構造により運動を行ったり(自律運動)、故障した箇所を他のモジュールで置き換えることで機能を維持する(自己修復)といったことが行え、生物のような柔軟で頑健な機械システムを実現できる可能性がある。このようなロボットシステムは、将来的には危険プラント内での保守点検、自律的に行動し地雷を除去するロボット、地震で倒壊した家屋からの人命捜索、深海作業用ロボット、惑星探査用ロボットなど、環境に応じた行動が求められる現場での応用が期待される。

研究計画の概要

本研究の目標としては、モジュール型ロボットシステムを構成するロボットモジュールの研究開発、モジュール型ロボットのような多自由度システムを分散的に制御し、全体の協調により移動動作を行わせるための制御手法の提案があげられる。さらに、実際に提案手法を組み込んだハードウェアによる移動実験を行い、その有効性を確認するとことを目的とする。

上記目標について以下に具体的に示す。

1. ロボットモジュールの開発

ロボットモジュールを実現するためには、モジュール間結合離脱機構、モジュール間通信、制御機構、センサ、アクチュエータなどの要素技術の検討・研究開発を行い、さらにこれらの要素を一つのモジュールとしてまとめあげる必要がある。ロボットモジュールの研究開発に関しては、上述の要素毎に試作、評価を繰り返して、最終的にそれらをまとめたロボットモジュールを複数台試作し、全体としての機能評価を行う。

2. モジュール型ロボットの分散的移動制御手法の提案

モジュール型ロボットの分散的移動制御手法に関しては、与えられたモジュール構造における自由度をどのように利用すれば、全体としての統一的な移動動作が実現できるかについて研究を行う。一般的に、多数の自由度を持つ系において、それら全体の挙動により決まる動作を解析的に最適化することは困難である。そこで、本研究では、生物における運動生成モデルを参考に、各モジュールの自由度の制御に神経振動子と呼ばれる非線形振動子を用いて、さらにそれら振動子間の相互作用により位相差が決定されることで、全体として協調的に歩く、転がるなどの動作を実現する手法を提案する。また、進化型計算手法を用いて振動子間の結合関係を最適化していくことで、任意のモジュール構造による移動パターンを自動的に生成するためのソフトウェアの開発を行う。

3. 検証実験

試作を行ったロボットモジュールハードウェアに提案の制御手法を搭載し、様々なモジュール構造による移動動作実験を行い、本手法および提案モジュールの有効性を検証する。

研究計画の詳細報告

(単位:百万円)

研究項目	所用経費				
	13年度	14年度	15年度	16年度	合計
1. ロボットモジュールの開発	9.0	17.9	12.4		39.3
(1) モジュール間結合手段の検討・評価	← 2.0 →				2.0
(2) モジュール間通信手段の検討・実験	← 1.5 →				1.5
(3) ロボットモジュールの試作・評価	← 5.5 →	17.3	5.5	→	28.3
(4) モジュール制御プログラムの拡張		← 0.6 →			0.6
(5) センサモジュールの試作・評価			← 5.9 →		5.9
(6) 検証実験			← 1.0 →	→	1.0
2. モジュール型ロボットの分散的移動制御手法の開発	0.0	1.2	0.3		1.5
(1) モジュール群全体による動作パターンの自動生成手法の提案・検討	← 0.0 →	0.0	→		0.0
(2) シミュレータの開発		← 1.2 →	0.0	→	1.2
(3) センサモジュールを組み込んだシミュレーションプログラムの開発			← 0.3 →	→	0.3
(4) 検証実験			← 0.0 →	→	
所要経費(合計) (間接経費を含む)	9	19.1	12.7		40.8

.研究成果の概要

研究成果の概要

平成 13 年度, 14 年度を通して, 様々なモジュール構造を構成でき, さらに形態変形, 構造による運動が可能なロボットモジュールの試作, 評価, 改良を進め, 20 台のロボットモジュールの試作を行った. 試作したロボットモジュールは, 6つの結合面を持ち, 2つの超精密ギアモータを内蔵した 2 自由度リンク構造になっている. 他のモジュールと結合することで, LAN が形成され, 相互通信が可能である. 上記モジュールにより構成されたモジュール構造は, モジュール間の離脱, リンクの回転, 再結合を繰り返すことで, 自由に形を変えることができ, さらにモジュール構造の内包自由度を協調的に制御することで, 歩く, 転がるといった移動動作を行わせることができる. 各モジュールにはバッテリーを搭載しており, 試作した 20 台のうち 2 台には無線モジュールを搭載することで, モジュール構造による移動や変形動作の開始をワイヤレスで指示できる.

ロボットモジュールの試作と並行して, 任意のモジュール構造による移動動作パターンをオフラインで自動的に生成するための手法を提案し, 環境やロボットモジュールのダイナミクスを考慮したロボットシミュレータを開発した. 具体的には, 各モジュールの自由度に神経振動子を配置し, その周期波形出力でモータを制御する. そして, 神経振動子をモジュール間で適切に接続することで, お互いの振動を引き込み, さらに位相差が形成されることで, モジュール構造全体で統一的な動作が行える. 本手法は, 神経振動子間の相互作用により自己組織的に移動動作が生成される特徴を持ち, モジュール型ロボットのような分散型機械システムの制御手法として最適である.

ロボットシミュレータでは, 移動パターンを生成したいモジュール構造を初期値として与え, 進化型計算手法により自動的に神経振動子間の結合関係を最適化していき, 最終的にその構造におけるエネルギー効率の良い移動パターンを自動生成する. 複数のテスト構造 (4 足, 6 足, クローラ, 芋虫, スパイダー構造など) を本シミュレータに適用し, 実際に効率の良い移動パターンが生成されることを確認した. また, ロボットシミュレータで生成された移動パターンを実機に搭載することで, 現実世界においても同様にエネルギー効率の良い移動が行えることを確認した. さらに, ロボットシミュレータで得られた運動と, モジュール構造間の形態変形動作を組み合わせることで, 通常は 4 足構造で移動しながら, 高さ制限のある場所では平面的な構造に変形しハードルをくぐり, さらに狭い隙間では一本の芋虫状の構造に変形し移動するという連の移動変形実験にも成功した.

波及効果、発展方向、改善点等

近年, 国内外 (特に日本) においてロボット技術は飛躍的に向上してきており, 日本では, ヒューマノイドタイプの 2 足歩行ロボットが盛んに研究開発され注目されている. しかし, 構造, 制御系が初めから決定されているロボットは, 未知な環境での応用は困難であり, 単一モータの故障でさえもタスクの遂行に支障が出てくる. 本研究は, 多数の細胞が寄り合わさって, お互いに相互作用することで全体としての機能を維持する生物のような機械システムの実現を目指しており, 機械システムを複数のロボットモジュールで構成することで, 環境に応じてモジュールの構成や運動パターンを変化させたり, さらにモジュールが故障した場合, 故障した箇所を切り離して冗長なモジュールで置き換えることで機能を維持するといったこれまでのロボットでは実現できなかったような機能が実現できる可能性がある. 本研究の成果は, そのような分散型機械システムの実現における先駆けであり, 同時に, どのようにロボットモジュールを構成したら良いか, どのような機能が必要となるか, 複数モジュールによる多自由度のシステムをどのように制御したら良いかなどの指針を与えるものである.

今後の発展方向としては, 各モジュールに搭載されたセンサ情報を統合して環境を認識し, それをモジュール構造にフィードバックして形態変形を行ったり, 状況に応じて運動のパターンを変化させたりする自律的なシステムの研究開発を予定している. そのためには, 各ロボットモジュールに距離センサなどのセンサを組み込む必要があり, さらにセンサ情報を統合して環境認識を行うためのアルゴリズムの開発, それに伴う内蔵プロセッサの高機能化が必要となる.

.研究成果発表等の状況

(1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	1件	0件	4件	5件
国際	4件	0件	3件	7件
合計	5件	0件	7件	12件

(2) 特許等出願件数

合計 2件 (うち国内2件、国外0件)

(3) 受賞等

1件 (うち国内0件、国外1件)

1 .The Best Paper Award DARS2002

(4) 主な原著論文による発表の内訳

国内誌 (国内英文誌を含む)

- 1 神村明哉, 村田智, 吉田英一, 黒河治久, 富田康治, 小鍛治繁: 「自己組立可能なモジュール型ロボットシステムに関する研究 (複数ユニットによる変形・移動実験)」, 日本機械学会論文集 C 編, 68 巻 667 号, 886-892, (2001)

国外誌

- 2 Akiya Kamimura, Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, Kohji Tomita, Shigeru Kokaji : 「Self-Reconfigurable Modular Robot - Experiments on Reconfiguration and Locomotion - 」, Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2001), 606-612, (2001)
- 3 Akiya Kamimura, Eiichi Yoshida, Satoshi Murata, Haruhisa Kurokawa, Kohji Tomita, Shigeru Kokaji : 「A Self-Reconfigurable Modular Robot (MTRAN) - Hardware and Motion Planning Software - 」, Proceedings of 2002 Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS2002), Vol. 5, 17-26, (2002)
- 4 Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Akiya Kamimura, Haruhisa Kurokawa, Kohji Tomita, Shigeru Kokaji : 「M-TRAN: Self-Reconfigurable Modular Robotic System」, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7 No.4, 431-441, (2003) (共著論文)
- 5 Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura, Eiichi Yoshida, Kohji Tomita, Satoshi Murata, Shigeru Kokaji: 「Self-Reconfigurable Modular Robot (M-TRAN) and its Motion Design」, Proceedings of Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics And Vision (ICARV'02), 51-56, (2002) (共著論文)

⑥) 主要雑誌への研究成果発表

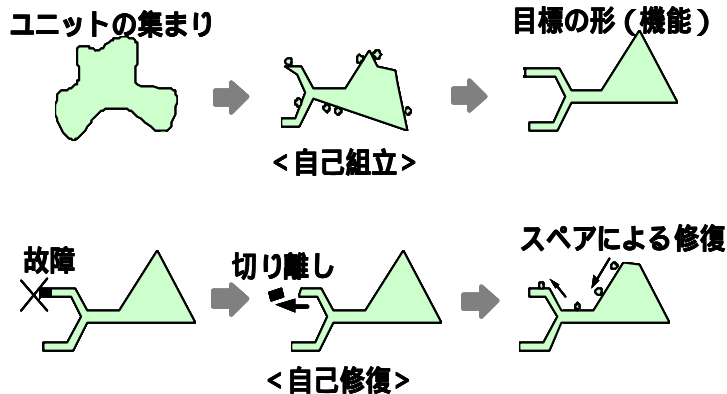
Journal	Impact Factor
日本機械学会論文集 C 編	0
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	0

モジュール型ロボットの分散的移動制御手法

モジュール型ロボットとは

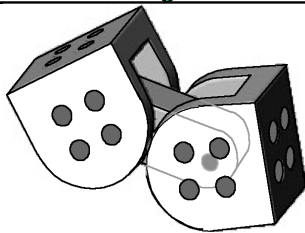
ロボットを複数の均一なモジュール群で構成し、各モジュールが自律分散的に行動することで、全体としてある形態 機能を実現する。

➡ 様々な形態に変形可能 (自己組立), 耐故障性に優れる (自己修復)

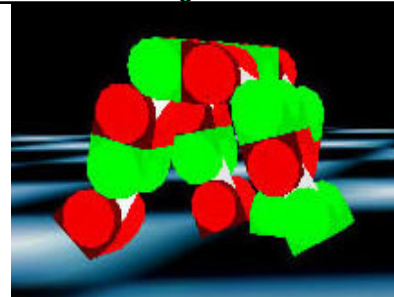


モジュールの開発

分散的制御手法の提案



結合機構, 通信機能, アクチュエータ, センサなどのハードウェア要素技術, 各種制御ソフトウェアを1つのモジュールとして統合する。



モジュールの物理特性を組み込んだ動力学シミュレータ上で、モジュール毎に配置された神経振動子及びそのネットワークの作るリズムにより生成される移動動作を進化型計算手法を用いて最適化することで、自動的に全体移動動作を獲得する。



自動生成された移動動作をモジュール毎の動作シーケンスに変換し、モジュールハードウェアに組み込む。

今後の展望

各モジュールは、内界センサ、他のモジュール、外界センサの情報を統合することで自律的に次の動作を決定し、協調的に全体動作を実現する。