

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360112

研究課題名 (和文) 個体発生過程をモチーフとした自己組み立てへのダイナミカルアプローチ

研究課題名 (英文) A Dynamical Approach to Self-assembly Inspired by Ontogenetic Process

研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90232280

研究成果の概要 (和文)：本研究の目的は、生物の個体発生過程をモチーフとして、幾何学的に複雑な形態への安定かつ自発的な自己組み立てを実現する群ロボットの構築をダイナミカルアプローチの立場から議論することである。この目的のために、非線形振動子の相互引き込みを活用した凝集力の誘起、ならびにロボット間の物理的な相互作用を活用することで、自己組み立てを完全自律分散的に実現する制御方策を提案し、20台程度の実機ロボットを用いて実験的に検証した。

研究成果の概要 (英文)：This study discussed the realization of self-assembly with the use of a multi-robotic system each of which has simple motile function. A significant feature of this study is that form generation by self-assembly is considered as the result of time evolution toward the most dynamically stable state. Owing to this, the proposed method also satisfies significant ability of self-repair without making any modification to the proposed algorithm. We also validated our proposed method by building about 20 real physical robotic agents. Experimental results show that stable and spontaneous self-assembly is achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：自己組み立て、自己修復、群ロボット、ダイナミカルアプローチ、自律分散制御、創発、非線形振動子、相互引き込み

1. 研究開始当初の背景

自己組み立てとは、基礎ユニットが互いに集まり安定かつ自発的に何らかの特定形状を

形成する現象である。自然界には、生物・非生物を問わずこのような現象が数多く観察される。例えば、原始的な腔腸動物であるヒド

ラは、人為的に細胞単位に乖離されたとしても、再び元の身体の構造を組み上げという驚異的な自己組み立て（再生）能力を示す。また、親水基と疎水基からなる両親媒性分子は、ミセルやベシクルといった構造体を自発的に形成する。さらに、さまざまな形態を示す（多細胞）生物も、発生過程を通して自発的に形作られている。人工物の構築においても、対象とするシステムの規模や複雑性が增大するにつれて、自己組み立て能力の具備が今後必要不可欠なものとなることは論を俟たない。また、ヒドラの例からも明らかなように、自己組み立てと自己修復は元来強く関係し合った概念である。このため、自己組み立ての実現方策に関する議論を通して、優れた耐故障性を示す人工物の構築に向けての有用な知見を獲得することも併せて期待でき、その波及効果はきわめて大きい。

このような背景から、ロボティクスの分野では、複数台のロボットを用いて自己組み立ての実現を目指す研究がいくつか行われてきた。しかしながらこれまでの研究の多くは、基本的に、外部操作者からの指令、もしくは変形手順を中央集権的な計画問題に帰着させて明示的に規定するアルゴリズム的な手法に基づいて、自己組み立て過程における個々のロボットの振る舞いを逐一決定している。このため、システムの大規模化・最終形態の複雑化に伴って問題が劇的に難しくなる可能性が否めず、これら手法のスケラビリティには疑問がある。

2. 研究の目的

自然界の自己組み立て現象に改めて目を向けてみると、自己組み立て過程におけるすべての事象を明示的に規定するような設計図（アルゴリズム）といったものは存在せず、物理化学的な物質間相互作用をも積極的に活用することによって、自発的かつ創発的に形態形成がなされている。例えば、多細胞生物の個体発生過程においては、最終的な形態へと時間発展していく過程で、細胞間の接着性の違い（差次接着性と呼ばれる）が大きな役割を果たしていることが知られている。自己組み立ては対象とするシステムの構成要素数がきわめて大きいことが前提となっているため、この現象すべてをアルゴリズム単体に帰着させて議論するのは、スケラビリティの観点からも得策ではない。したがって、初動段階からモジュール間の物理的相互作用の活用を考慮したダイナミカルなアプローチを採用することは決定的に重要な意味を持つ。

このような観点からわれわれは、制御系と

機構系間の相互作用を通して発現する創発現象を積極的に活用することにより、任意の初期形態から最終形態への安定かつ自発的な自己組み立てを可能とする群ロボットの開発を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

自己組み立てを最安定形態へ自発的な時間発展として実現するため、本研究では具体的には、(1)機能性素材の有する力学的特性の活用、ならびに(2)非線形振動子の相互引き込みを活用した表面張力的な凝集力の誘起、という二つの工夫を導入した。そして、前者をロボット間の自発的着脱制御機構として、後者をロボット間凝集力の中核的な生成機構として活用することにより、完全自律分散的な制御方策で安定かつ自発的な自己組み立てを実現した。

本手法における自己組み立てによる形態形成は、従来の多くの研究で見られるような制御アルゴリズムのみによって規定されるものではなく、ロボット間の物理的相互作用をも活用した力学的な最安定状態への移行の帰結として発現している。このため、必然的に自己修復機能も併せ持つという優れた特色を有している。

4. 研究成果

本研究を通して得られた成果を以下、具体的に示す：

- (1) 非線形振動子の相互引き込みを活用した凝集力の誘起、ならびに群ロボットを構成するロボット間の物理的相互作用を活用することで、自己組み立てを完全自律分散的に実現する、ダイナミカルアプローチに基づく制御方策を提唱した。
- (2) 実験的に妥当性を検証するための群ロボットシステムを設計・製作した。提案する自己組み立てと自己修復を実現するために、各ロボットには全方向移動を可能とするオムニホイールを、そして近傍のロボット通信するための赤外線通信ユニットを実装した。図1に設計・製作したロボット実機の写真を示す。
- (3) 実機ロボットを20台程度製作した（図2参照）。
- (4) 各ロボットに受動的な変形機能を持たせることで、安定かつ迅速な再安定形態への収束が実現できることを実験的に示した。この結果を図3に示す。このことは、アルゴリズムとして明示的に書かれる制御則以外にも、物理的な受動性や可変形性に内在する費明示的な制御則をも併せて実装することの必要性を示す重要な結果である。

- (5) 提案する手法は、自己組み立てを最安定形態への自発的な時間発展と捉えている。したがって、アルゴリズムに何ら改変を加えることなく、自己修復機能をも発現できることが期待される。このことを示すために実験を行ったところ、優れた自己修復機能をも有していることを確認した。図4にその結果を示す。

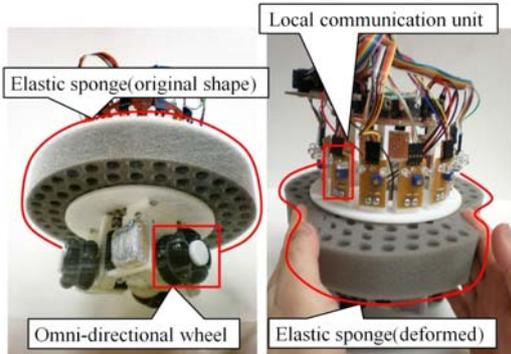


図1 製作したロボット実機



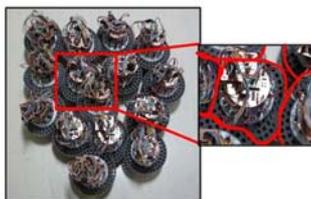
図2 自己組み立てロボットシステム



(a) Initial State



(b) Transient State



(c) Final State

図3 自己組み立ての実験結果



(a) Initial State



(b) Transient State



(c) Final State

図4 自己修復の実験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 11 件)

1. 月舘統宙, 清水正宏, 菅原 研, 石黒章夫, 要素間結合の生成と崩壊のバランスに基づくダイナミックセルフアセンブリ, 第22回自律分散システム・シンポジウム, 2010年1月31日, 名古屋
2. Kazuya Suzuki, Tsunamichi Tsukidate, Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Stable and Spontaneous Self-assembly of a Multi-robotic System by Exploiting Physical Interaction between Agents, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.10.14, USA, St. Louis
3. Kazuya Suzuki, Tsunamichi Tsukidate, Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Self-assembly with Simple Robotic Agents, ICCAS-SICE International Joint Conference 2009, 2009.8.19, Japan, Fukuoka
4. 月舘統宙, 鈴木雄也, 清水正宏, 菅原 研,

- 石黒章夫, ダイナミックセルフアセンブリを活用した構造物の構築と移動, ロボティクス・メカトロニクス講演2009, 2009年5月26日, 福岡
5. 鈴木雄也, 月館統宙, 清水正宏, 石黒章夫, 自己組み立て・自己修復を行う群ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会2009, 2009年5月26日, 福岡
 6. 鈴木雄也, 月館統宙, 中田武志, 清水正宏, 石黒章夫, 結合振動子系を活用した自発的自己組み立ての実験的検証, 計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2008年12月5日, 岐阜
 7. Kazuya Suzuki, Tsunamichi Tsukidate, Takeshi Nakada, Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Self-assembly through the Local Interaction between “Embodied” Nonlinear Oscillators with Simple Motile Function, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.9.24, France, Nice
 8. 月館統宙, 鈴木雄也, 中田武志, 清水正宏, 石黒章夫, 結合振動子系を活用した自発的自己組み立てを行う群ロボットシステムの実験的検証, 第14回創発システム・シンポジウム, 2008年8月18日, 富山
 9. 鈴木雄也, 月館統宙, 清水正宏, 石黒章夫, 自発的な自己組み立てを実現する群ロボットの開発, 第243回計測自動制御学会東北支部研究会, 2008年6月20日, 弘前
 10. Kazuya Suzuki, Tsunamichi Tsukidate, Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, Self-assembly and Self-repair by Exploiting Coupled Nonlinear Oscillators with Simple Motile Function, 4th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2008.6.4, U.S.A, Cleveland
 11. 鈴木雄也, 月館統宙, 清水正宏, 石黒章夫, 単純な運動機能を有する結合振動子系を活用した自己組み立て, 第20回自律分散システム・シンポジウム, 2008年1月25日, 諏訪

[図書] (計1件)

1. R. Pfeifer, J. Bongard (細田 耕, 石黒章夫 訳), 共立出版, 知能の原理 身体性に基づく構成論的アプローチ, 2010, 432

[その他]

ホームページ等

<http://www.cmplx.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90232280

(2) 研究分担者

清水 正宏 (SHIMIZU MASAHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50447140

(3) 連携研究者

なし