

自発的な自己組み立てを実現する群ロボットの開発

Development of Multi-robotic System that enables stable and spontaneous Self-assembly

鈴木 雄也, 月舘 統宙, 中田 武志
清水 正宏, 石黒 章夫

Kazuya Suzuki, Tunamichi Tsukidate, Takeshi Nakada
Masahiro Shimizu, and Akio Ishiguro

東北大学

Tohoku University

キーワード： 自己組み立て (Self-assembly), 群ロボット (Multi-robotic system),
非線形振動子 (Nonlinear Oscillator)

連絡先： 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 電気系1号館 512号室 石黒研究室
鈴木雄也, Tel.:022-795-3207, Fax.:022-795-3781, E-mail: suzuki@cmplx.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

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態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解離されたとしても、再びもとの体の構造を組み上げて再生することが知られている。また、親水基と疎水基からなる両親媒性分子は、ミセル構造やベシクル構造といった構造体を自発的に形成する。さらに、およそ60兆個の細胞の集合体であるわれわれ人間の体もその発生過程において、たった一個の細胞すなわち受精卵が細胞分裂と細胞分化を繰り返すことによって形作られる。対象とするシステムの規模や複雑性

が増大するにつれて、このような概念は今後必要不可欠なものとなるであろう。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とは、元来きわめて密接に関連しあった概念である。したがって、このような自己組み立ての実現方策に関する議論を通じて、耐故障性に優れた人工物の構築に向けての有用な知見を獲得することもあわせて期待でき、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、群ロボットを用いた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では、自己組み立てのプロセスを計画問題に帰着させたアルゴリズム的な手法の開発に焦点が当てられていた。このため、システムの構成要素

(以下ユニットと呼ぶ)数の増加や自己組み立ての目標形態の複雑化に伴い,問題が劇的に難しくなるという拡張性の無さが指摘されていた.一方で,自然界における自己組み立てでは,そのプロセスにおいてすべてを規定するような設計図というものは存在せず,物理化学的な物質間相互作用が積極的に活用されている.したがって,制御系のみならず機構系をも積極的に活用したモデルは,大規模かつ複雑な幾何学的構造を持つシステムの自己組み立てにおいても非常に有用であると考え.

上記の考察に基づいて筆者らは,自己組み立て・自己修復を工学的に実現しうるシステムとして群ロボットに着目し,制御系のみならず機構系の力学的特性をも積極的に活用することで自己組み立て・自己修復の実現を目指す研究を進めている.具体的には,(1)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,ならびに(2)受動変形機構によるユニット間の力学的特性の活用,という二つの工夫を主に導入することで単純な形態,並びに異方性を持つ形態への自発的な自己組み立てをシミュレーションで実現した[1].また,自己組み立てを力学的最安定形態への移行の帰結,自己修復をその最安定形態への移行途中と捉えることで,両者を同一の制御則の下で同時に議論することが可能と考える.本研究では群ロボットを用いた自己組み立て・自己修復可能な実機の製作を目指す.製作する実機には,自己組み立てを実現したシミュレーションにおいて考慮した制御系・機構系の工夫を実装した.製作した実機プロトタイプが位相勾配方向に従い凝集可能となったので報告する.

2. 提案手法

2.1 設計思想

本研究では,自己組み立てによる変形プロセスを,力学的最安定形態への時間発展と捉えることにより,下記の思想に基づいた自己組み立てを目標とする:

- 自己組み立てに用いるユニットはホロノミックな移動を可能とする.
- 自己組み立ては各ユニット間の相対位置の変化による形態形成によって行われる.
- 自己組み立ては最近傍ユニットとの局所的通信のみを用いて自律分散的に行われる.
- 自己組み立ての過程において,各ユニットの振る舞いは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,ユニット間の物理的相互作用をも活用する必要がある.

以下,上記の設計思想の下で,筆者らが自己組み立て能力を有するシステムをどのように設計したのかを説明する.

2.2 非線形振動子間相互作用による位相勾配の生成

各ユニットに周期的な振る舞いを生成させるためにVDP(van del Pol)振動子を導入する. i 番目のユニット(ユニット i)に実装したVDP振動子の振る舞いを規定する微分方程式を以下に示す:

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

α_i は振動数を, β_i は非線形振動子のリミットサイクルに収束する速度を規定するパラメータである.

次に，非線形振動子間の相互作用を設定する．相互作用として求められる要請は，非線形振動子間に引き込み現象を誘起させることである．そこで，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，単純な拡散的相互作用を採用する．説明の便宜上，相互作用前の振動子 i の振動状態を x_i^{tmp} ，相互作用によって更新された状態を x_i と表わすことにする．具体的に用いた式を以下に示す：

$$x_i = x_i^{\text{tmp}} + \epsilon \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_j^{\text{tmp}} - x_i^{\text{tmp}} \right) \quad (2)$$

式中の N_i は，時刻 t においてユニット i の近傍ユニットの数を表している．これら近傍ユニットの状態(x_j^{tmp})は，局所通信により取得されるものとした．

ここで，複数のVDP振動子が式(2)にしたがって相互作用する際に，一部の振動子に対して式(1)における α_i の値を適切に設定することで，群内部に有意な位相分布を構成することができる．例えば目標形状を円盤状形態とした適切な凝集力を誘起するための位相分布を生成するためには， α_i の値を以下のように設定する：

$$\alpha_i = \begin{cases} 1.3 & \text{群全体の外縁に位置するユニット} \\ 1.0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (3)$$

各ユニットが群全体の外縁に位置する場合， α_i の値が増加されることに注意されたい．その結果，外縁部にあるユニットのVDP振動子の振動数は，群内部にあるユニットと比較して相対的に小さくなる．これにより，群全体に凝集力を与える位相勾配を，群内部に生成することができる．図1は，複数のユニットを円盤状形態に配置したときに，相互引き込み

によって生成される位相分布を表わしている．図中の矢印および明暗は，各位置での勾配ベクトルの方向ならびに位相の値をそれぞれ表わしている．各勾配ベクトルの方向は全体の中心に向いていることに注意されたい．

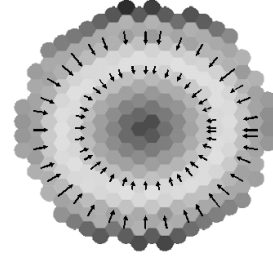


Fig. 1 Phase distribution created through the mutual entrainment among the VDP oscillators in a circular arrangement

2.3 凝集力の自発的誘起

上記の設計に基づき，ここでは制御アルゴリズムの設計方針について説明する．より具体的には，前述したVDP振動子の局所的相互引き込みから生成される位相分布を利用することによって，どのように各ユニットを制御するかを示す．

ここでは以下に示す式に従って，各ユニットが移動する方向を考える：

$$\mathbf{F}_i(t) = -k \sum_{j=1}^{N_i} \{(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \mathbf{r}_{ij}\} \quad (4)$$

式中で N_i は，時刻 t においてユニット i の近傍ユニットの数である． \mathbf{F}_i は，ある時刻 t において，ユニット i が能動的に移動のために生成する力であり， k は比例係数である． $\theta_j(t)$ はユニット i に結合している近傍ユニット j のVDP振動子の位相を表わし， \mathbf{r}_{ij} はユニット i からユニット j への方向ベクトルである．また， $\theta_i(t)$ は時刻

t におけるユニット i のVDP振動子の位相を表し，ここでは以下の式で定められる：

$$\theta_i(t) = \arctan \frac{\dot{x}_i(t)}{x_i(t)} \quad (5)$$

前述のアルゴリズムにより，各ユニットの移動方向は位相勾配の方向である(図1)．この結果，自発的に生成された凝集力によって全ユニットは群の中心部に向かって移動しようとするため最終的に群全体は，円盤状形態に収束すると考えられる．この形態は，力学的に最安定な状態だと考えることができるので，自己組み立てを「力学的最安定形態への移行の帰結」としてとらえることができる．

2.4 受動的変形によるユニット群形態の固化の回避

上述の制御則の実装により，群全体は最安定形態である円盤状形態への時間発展を可能とする．しかし，ユニット群を位相勾配方向へと流動的に移動させる方法のみでは局所的にユニット群形態が固化することによって安定的な最安定構造への移行が妨げられることが懸念される．このようなユニット群の流動的な移動と局所的な固化といった特性は一般的には小麦粉や砂などの粉粒体において観察される現象と同様である．粉粒体とは固体粒子の集まりのことを指し，固体のように静止し続ける固化，流体のように流れる流動化といった性質を持つ．

そこで筆者らはユニット群の固化を防ぎ流動化を促すため，ユニット自身に受動的な形態可変性を持たせることで移動可能な空間を生み出すことを可能とした．具体的には各ユニットは外力に応じて受動的に変形する機構(受動的変形性)を実装する．図2にその概要図を示す．同図おにける円盤一つ一つがそれ

ぞれユニットを示している．各ユニットは円形を基本形状としているが(同図(a))，例えば上下方向から圧縮力が印加されるとその外力に応じて受動的に変形する(同図(b))．この機構を導入することにより各ユニットは構造内部において移動できる空間を自ら作り出すことができ，構造が密となっても固化することなく各ユニット間に可動範囲を生成することができる．この機構を導入することでユニットの相対的位置関係が現在の状況に物理的に妥当なものへと安定的に移行していくことが期待できる．

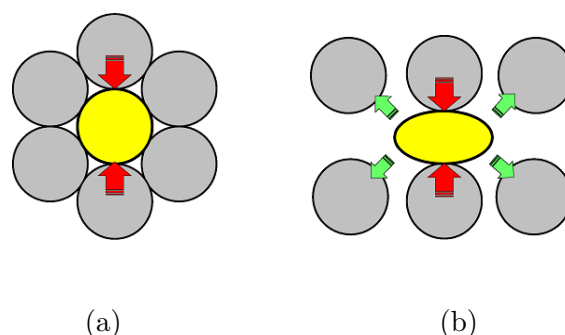


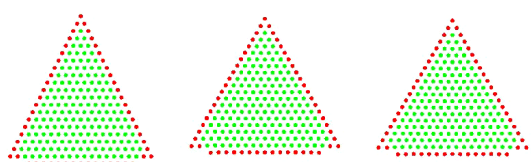
Fig. 2 : A schematic of the passive deformation implemented

3. シミュレーションによる受動変形の検証

本節では，実機開発の前に前節において提案された手法を用いたシミュレーションでの自己組み立ての検証を行い，実機に実装すべき特性を確認する．

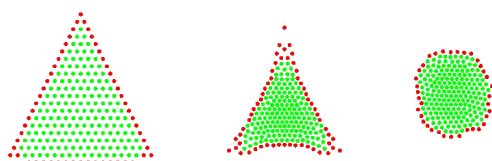
各ユニットの受動的変形の影響について議論するために，各ユニットが受動的変形可能な場合と受動的変形不可能な場合で，最安定形状を円盤状形態となる自己組み立てを行うシミュレーションを行った．シミュレーション条件を以下に示す．ユニットの初期配置は三角形，各ユニットのVDP振動子のパラメータ α_i

の値は(3)式の通りに設定した．その結果として，図1のように等方的な凝集力が生成され，円盤状形態の最安定形態へ遷移することが期待される．図3，図4はユニットが受動的変形不可能な場合と受動的変形可能な場合の自己組み立ての時間発展を示している．図3の各ユニットが受動的変形不可能な場合は，初期形態と最終形態にあまり違いがみられない．これは，ユニット同士が最密充填構造をとってしまい，相対的位置関係を改変できなくなってしまうと考えられる．一方，図4の各ユニットが受動的変形可能な場合は，こちらの場合には最終形態が円盤状形態に近いものとなっている．この結果より，安定かつ迅速な自己組み立てのための各ユニットに持たせる受動的変形機能の重要性が理解できる．



(a) Initial state (b) 10000steps (c)Final state

Fig. 3 : Self-assembly without the passive deformation (see in the alphabetical order)



(a) Initial state (b) 10000steps (c)Final state

Fig. 4 : Self-assembly with the passive deformation (see in the alphabetical order)

4. 実機製作

ここまで議論してきた手法を用いることで，筆者らが開発した自己組み立てを実現するロボットの設計について説明する．

4.1 実機特性

今までに述べてきた自己組み立ての手法は，ユニットを実体のあるロボットと置き換えることでも実現可能であると考えられる．そこで各ロボットに求められる実機特性を以下の機構を用いることで実現する：

- 全方向車輪による全方向移動．
- 赤外線による非接触通信．
- シリンダーとばねによる受動変形機構．

図5は筆者らが製作したロボットの全体図である．図6に本実機における各機構系を示す．本ロボットは，全方向車輪を3つ持ち，それぞれを120度ごとに配置させ独立に駆動させることで全方向に対しての移動を実現する．他に，近傍のロボットとの局所通信を行うための赤外線通信ユニット，受動的変形特性を持たせるためのシリンダーとバネからなる腕を12方向に有している．本ロボットは，振動子の計算や全方向車輪や通信ユニットを制御するために，マイコンH8/3694Fを搭載している．図6は実機における，(a)移動機構，(b)通信機構，(c)受動変形機構の各機構系を紹介した図である．

4.2 受動変形機構

ここでは前述で挙げたシリンダーとばねを用いた受動変形機構について具体的に説明する．機構系全体は図7(a)のように構成されて

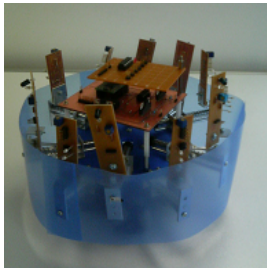
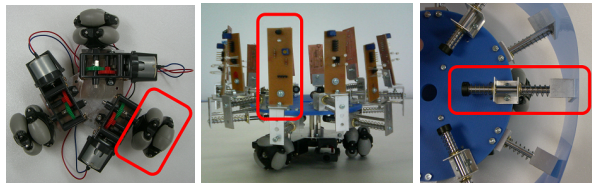


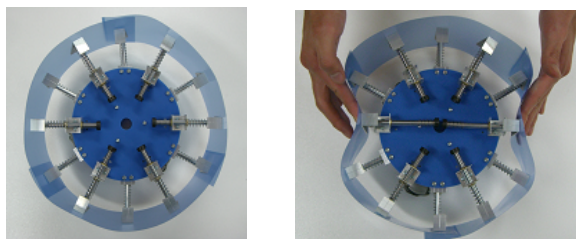
Fig. 5 Overall view of the robot



(a) (b) (c)

Fig. 6 : The hardware of the unit

おり上下方向に互い違いに12方向に受動変形機構が配置されている，外力が存在しない場合には図7(a)のようにばねは自然長のままでロボット全体は円盤状である．左右方向から外力を受けると図7(b)のように外力に応じて受動的に変形し，ロボット全体は円盤状から外力に応じた形状へと変形する．この機構によりユニットの受動的形態可変性を実現する．



(a) (b)

Fig. 7 :The passive deformation mechanism implemented

4.3 位相情報の相互通信

今回は相互通信の簡素化のため文献[2]の手法を参考にして，連続的に位相の相互引き込みを行うのではなく離散的に相互引き込みを

行う方策を採用した．具体的には各ユニットは以下の手順に従って位相情報の通信を行う：

- 各振動子は，自身の位相が0となったときに発光することで近傍のユニットに自身の位相情報を伝える．
- 光を受け取ったユニットは自身の振動子の位相修正を行う．

各ユニットが上記の手順による相互引き込みを繰り返し行うことで群全体に位相勾配が生まれ，筆者らが期待する凝集力が生成されると考える．

5. 実機を用いた凝集の検証

今回，筆者らが開発した実機7台を用いて円盤形状への簡単な凝集を確認した．実機は初期配置として図8(a)のように配置されている．また中心に配置されている実機はほかの6台に比べて振動数が大きい．各ユニットは，局所的な相互作用を行うことで内側へ向かうような位相勾配を生成し，位相勾配に応じた移動トルクを繰り返し生成する図8(b)．その結果7台すべてが凝集した形である図8(c)へと時間発展する．



(a) (b) (c)

Fig. 8 : Locomotion generated by phase gradient

まとめと今後の課題

本稿において，筆者らは自己組み立て可能な群ロボットの製作を目標とし，その基本的

な機構である局所的な相互通信とそれに基づいた位相勾配方向への移動ができる実機を製作した。

今後の課題として、まず単純な形態への自己組み立てを実機により達成する。筆者らは実機製作にあたりシミュレーションのモデルを模した各機構系を実装した。しかし、実装した機構が実機による形態形成においても適切に働いているか、特に受動変形機構を形態形成の速度などを指標にすることでその有用性を検証する必要がある。また、今回は7台というきわめて少ない実機を用いて実験を行った。この実機の台数を増やし多くの台数で実験していくことも今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(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, 課題番号:19360112)および「東北大学脳科学グローバルCOE脳科学を社会に還流する教育研究拠点」からの援助によって行われた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木雄也, 月舘統宙, 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, 2A1-3, 長野, 2008年1月
- 2) D. Kurabayashi, K. Okita, and T. Funato, Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Group Using a Nonlinear Oscillator Network, in Proc.of 2006 IEEE/RSJ IROS, pp.186-191, 2006.