

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00368

研究課題名(和文)「生き生きとした構造物」を構築する群ロボットシステム

研究課題名(英文) Collective construction of lively structures by swarm robotic system

研究代表者

菅原 研 (Sugawara, Ken)

東北学院大学・教養学部・教授

研究者番号：50313424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、部材とロボットが協調することで「生き生きとした構造物」、すなわち、動的安定性を有し、合理的な形状を形成し、動的に変化する環境に適応できる性質を有する構造物、を構築する群知能ロボットシステムの開発を目的としたものである。主たる研究項目は、自己組み立てアルゴリズムの基礎の確立、簡単な適応機構の導入、外的環境との密なつながりによる合理的な形状の自己組み立てと高度な適応能力の付与、の3点である。基本的には当初の計画に基づく形で成果を得るにいった。それに加えて、化学シグナルの導入や、物体の協調搬送への拡張など、当初の計画に含まれなかった新たな広がりにもつなげることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

群ロボットによる構造物構築では、一般に静的構造物を作ることに焦点が当てられており、「モジュールが常に入れ替わる」特性を陽に扱う事例は極めて少ない。動的安定性を有する構造物について、耐損壊性や適応性などの具体的な特性を示したことで、構造物構築に関する新しい知見を提起できたところに意義があると考えられる。また、知能・機能をロボットと部材に分散し、それらの協調によって目的を達するアプローチは、分子ロボティクスなど、限られた機能しか組み込めない領域において、有用な知見になることが期待できる。移動する構造物をロボットと見立て、2つの階層を有するシステムとして提案したことにも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop an intelligent robot system to construct "lively structures" by collaboration between the simple robots and easy-functional materials. Lively structure here means, the structures that are dynamic stability, which has a reasonable shape, and can adapt to the dynamic environment. The points of this research are as follows: establishment of a basic self-assembly algorithm, introduction of a simple adaptive mechanism, and development of the function which enables the system to construct reasonable and adaptive structures based on close connection with the external environment. We have basically completed this project as planned. In addition, we got some extended ideas such as an introduction of chemical signals and an application for object transportation.

研究分野：群知能ロボット

キーワード：群知能ロボット 動的安定性 構造物 適応性 生き生きとした

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

群知能ロボティクスは、ロボット同士あるいはロボットと環境が相互作用することで、高度な機能の発現を目指す工学である。群知能ロボットの活躍が特に期待されるのは、宇宙や深海、あるいは分子スケールのミクロな空間など、人間による直接的な操作が困難な状況下での働きである。群ロボットが有効に機能する具体的な作業のひとつとして、集団の協調による構造物構築があげられる。構造物の構築方法は集中管理型と分散管理型に大別できる。集中管理型は、緻密な設計と工程に基づいて高度な構造物を形成する型であり、今日の社会においては一般化されている。一方、分散管理型構造物構築については、設計原理がまだ確立されておらず、研究も発展途上にある。

群知能ロボットによる構造物構築に関する従来研究を俯瞰すると、そのアプローチは2つの型に大別できる。モジュラー型と材料構築型である。モジュラー型とは、モジュールがロボットと部材を兼ねており、適切な位置に移動して結合することで構造物を形成するものである。材料構築型とは、単体あるいは少数のロボットが部材同士を適切に配置し結合することで構造物を形成するものである。モジュラー型のロボットシステムは、1990年代後半から今日に至るまで積極的に研究が進められており、モジュラーロボティクスという分野も形成されている。一方、材料構築型はモジュラー型ほど活発ではないが、近年になって研究報告が増えている。自然界に目を向けると、社会性昆虫の巣作りなどに代表されるように、分散管理型かつ材料構築型の構造物構築の例を様々なところで見出すことができる。その仕組みを解明すべく、社会生理学を中心とした分野で長らく研究が行われている。

従来研究を改めて見直すと、モジュラー型、材料構築型のほぼすべてに共通しているのは「目的の形状の構造物が形成されたところでタスク完了」としていることである。これは静的に安定な構造物を作ることを意味する。一方で、我々は自己組み立てに関する研究を通して、非平衡系現象の枠組みで捉えることにより、動的安定性を有するシステムとしての構造物構築というアプローチがありうることに注目してきた。構造物を「モジュール同士が静的かつ強固に結合したもの」とせず、「モジュールが常に入れ替わる中で“動的安定に成り立つ”もの」と捉えるアプローチである。構造物の強度や密閉性などに課題が生じるものの、モジュールの相対位置が常に入れ替わることで、目標形状の完成に達するまでの時間、構造物のロバスト性や適応性などにおいて、静的安定構造物には見られない特徴を有する構造物を実現できる。

動的安定性を求める上で、すべてのモジュールが自走機能を有するのは得策ではない。機能による切り分けを行い、その組み合わせにより構造物の自己組み立てを狙うほうが見通しがよい。例えば、部材は情報処理が可能な機能を有しつつもできるだけシンプルなものとし、移動で必要となる機構は少数のロボット側に持たせ、それらの協調により構造物形成を目指すことなどがその具体案となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は「生き生きとした構造物」を構築する群知能ロボットシステムを開発することである。「生き生き」とは、動的安定性を有すること、合理的な形状を形成できること、環境に適応する性質を有することを意味する。動的安定性とは、構造物構成要素が生成と崩壊を絶えず繰り返す中で平衡を保つ特性のことであり、特に生命活動において随所で見られる。合理的とは、置かれている環境において、形成された構造物の形状に合目的な意味があることを指す。環境への適応とは、おかれている環境に対して合理的な変化を自発的に起こすことを意味する。

本研究では上記の目的を達成する上で、ロボット側を一方的に高機能化するのではなく、知的処理要素をロボット側と部材側に分散するアプローチをとる。すなわち「限られた知能と単純な機構に基づいて動くロボット群」と「極小規模な情報処理系を有する材料」が積極的に協調することで「生き生きとした構造物」を形成できるシステムを開発する。

### 3. 研究の方法

本研究では、単純な仕組みに基づいて行動するロボット群が、極小規模な情報処理系を有するブロックと協調することで、「生き生きとした構造物」を形成する問題を取り扱う。本研究では主に2次元空間における構造物構築問題は取り扱うものとした。本研究における基本設定を以下に示す。

・ロボット：簡単な移動機構とブロック把持機構を有し、移動方向については確率的に動作する。構造物の構造に関する情報は持たない。

・ブロック：簡単な情報処理系、近接通信系および着脱機構を有する。また、構造物の構造に関する情報を持つ。自身の着脱面についてON-OFFを制御できるものとするが、通信系における信号強度をコントロールすることでブロック同士が接触していない場合でも通信は可能であるものとする。

・タスク：ロボットは空間内に散在するブロックを収集し、ブロック同士を結合することで構造物を形成する。結合可能なサイトをブロックが制御し、それによってロボットがブロックを付着させることで設計に従った構造物を形成する。つまり、ブロック側が自ら形状を制御する仕組みを有し、ロボット側が物理的な移動を行う役割を担う。

なお、ブロックは構造物の一部として設置済みであっても(1)故障、(2)外圧などの外的要因、(3)確率的に動作するロボットによる引き抜き、などによって常に取り外される可能性を有してい

るものとする。

以上の前提に基づき、本研究では、(1)自己組み立てアルゴリズムの基礎の確立、(2)簡単な適応機構の導入、(3)外的環境との密なつながりによる合理的な形状の自己組み立てと高度な適応能力の付与、の順に開発を進めていくものとした。

#### (1) 自己組み立てアルゴリズムの基礎の確立

分散システムによる構造物構築については複数の先行事例がある。しかし、その多くは、実質的には集中管理型システムになっている。目的とする構造物を構築するために各ロボットに与える情報は中央部が生成し、トップダウンで指示が出される。また、それによって形成される構造物は静的であり、柔軟性に欠いたものとなっている。本研究では「構造物の形状からルールを抽出するアルゴリズム」を探求し、自律分散的に構造物が構成できる方法を確立する。

#### (2) 適応機構の導入

外的刺激が加わる状況下で防護壁を自己組織化するタスクを題材として、適応機構を付与する方法を確立する。具体的に定めた目標は次の3点である。

外圧に対し構造物の向きを最適な方向に制御する仕組み

時間的変動を伴う外圧を導入し、それに対する適応性について論じた。強度だけでなく、方向も時間的に変化する場合、構造物の役割によってはその向きも変わるほうがよいという状況が生じうる。その制御を自発的に行うしくみを探求する。

外的な刺激に対抗する構造物の自己組み立て

外的刺激  $P$  に対して耐性強度  $P_g > P$  を満たすような防護壁の自己組み立てを実現する仕組みを探求する。動的安定の特性を活かし、合理的な  $P_g$ 、すなわち、 $P_g \gg P$  や  $P_g < P$  にならないような自己調整機構を発現するための仕組みを開発する。また、外圧によって損壊が生じた部分が修復される際、損壊前よりも強化される仕組みをシンプルに実現することを試みる。筋肉が筋繊維の断裂と修復の過程で強化されることに類する仕組みである。方法論として、各ブロックの内部状態の表記法に改良を加えることを計画した。

外的な刺激を分散する構造物の自己組み立て

外的な刺激を分散できる分岐構造が自己組み立てされる仕組みを開発する。外的環境の影響を常に評価し、損壊が生じる前に能動的に負荷分散する構造を自己組み立てする仕組みを開発する。各ブロックが負荷に関する情報を周囲のブロックと共有することで実現できると考えている。圧力だけでなく、流れなども伴う場合、圧力の分散により流れの変化が起き、その変化が再び構造物の形状変化を促すような興味深いループが生じることが予想される。「環境と構造物の間の相互作用」を積極的に引き起こし、そこに見られる特性についても解析を行う。

#### (3) 構造物のロボット化

動的安定を有する構造物は、平衡状態を意図的に少し崩すことで、あたかも移動しているかのような挙動を示すことが期待できる。つまり、構造物自体を移動ロボットと見立てることができる。これは静的な安定性を有する構造物には見られない特性である。また、移動する構造物がさらに協調するダイナミクスを有すると、群としての構造物によって外的環境に対する適応的な振る舞いを示すようになることも期待できる。これは生命システムとの類似性という視点で極めて興味深い現象になることが予想される。

#### (4) ロボット実験

実環境においても狙い通りに機能することを検証するための実験を行う。小規模ながら、直線状構造物や三角形構造物の構築実験を行うことで提案手法の有効性をより分かりやすく示すことを狙う。実機実験によるデモンストレーションは、研究成果の広報としても重要な役割を果たすと考えている。

## 4. 研究成果

まず年度毎の成果を示す。

### 2017 年度

当該年度に設定した研究項目は(1)基本構造設計手法の改良、(2)適応機構の導入、(3)予備的なロボット実験としていた。

(1)基本構造設計手法の改良については、終端を有する形状の構造物においては2分木の考え方を応用することで、より見通しの良い設計手法を見出すことができた。研究開始当初は構造物の端点を起点とした組立に終始していたが、トポロジカルな視点を持ち込むことでより効率的な構造形成ルールが生成できることが明らかになった。また、構造に再帰的な視点を持ち込むことで、構造物の形状に依るものの、再帰的記述によりルールをコンパクトにできる可能性についても言及できた。一方で、ループ構造の表現やルールの最適化については問題を完全に解決するには至らなかった。

(2)適応機構の導入については、比較的単純な外圧に対して適応的なふるまいを示す基本アルゴリズムを提案することができた。ブロック同士に簡単かつ局所的な通信を導入することで、構造物が厚みを増すことができることを具体的に示した(図1)。自己改変する仕組みについても基礎となるアルゴリズムを構築し、より高度なものに発展させるための基礎を築くことができた。

(3)予備的なロボット実験については、数個のブロックを並べる実験を行う程度にとどまった。ただし、構造設計手法と密に関係するものでもあり、実験だけを先行させた場合、のちに仕様変

更が生じるとそこで不必要なロスが発生する可能性もあることから、当初の予定よりもペースを落として研究を進めた。ただし、ロボットの構築に必要な基礎技術の向上は常に図っていた。

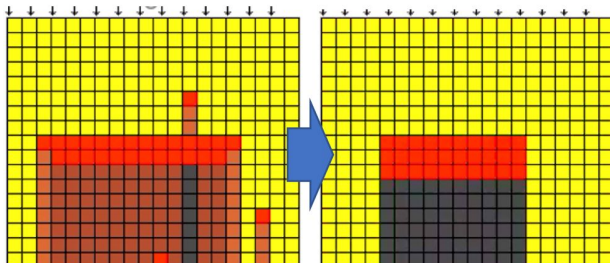


図1 外圧に対して外壁の厚さが増す仕組みの検証

2018 年度

当該年度に計画した主要テーマは「外的環境を導入し、その影響下における合理的形状の自己組み立てを実現することで構造と機能を有機的に結び付ける」というものであった。具体的な研究項目として、(1)外圧に対する自己構造強化ダイナミクスの探求、(2)能動的な負荷分散を実現する基本的なアルゴリズムの探求、(3)基本構造設計手法の改良、としていた。

(1)外圧に対する自己構造強化ダイナミクスについては、外圧として光刺激を題材とし、光を遮蔽する空間をできるだけ広くとるというタスクを通して構造強化ダイナミクスを探求した。まず、ブロック単体の遮蔽率が1.0のものを用いて基本となるダイナミクスを確立した。その上で単体の遮蔽率が1.0以下のものを導入し、複数のブロックの層が自己組織化されることで遮蔽率1.0の領域が形成されるようにダイナミクスを拡張することに成功した。

(2)能動的な負荷分散を実現する基本的なアルゴリズムについては、前項と同様の環境において、簡単な確率動作を組み入れることで初歩的な能動性をもたせることを検討し、基礎的な計算機実験により検証を行った。

(3)基本構造設計手法の改良については、前年度より持ち越していた、ループ構造の表現方法とヒューリスティクスによる冗長性に対するルールの最適化に関して一定の解決を得るに至った。前者についてはループ構造による構造物構成要素同士の衝突を積極的に活用することで解決できることを明らかにした。後者についてはテキストデータ圧縮の概念を活用することで一定の成果を得ることができた。以上のことに加えて stigmergy の概念を取り入れることで、これまで取り扱ってきた高度なブロックだけの構造物形成の枠を超えたものに拡張できた。ルールとしくみを少しだけ追加することで、少数の高度なブロックで骨組みを形成し、そのまわりに高度な機能を持たない passive な材料を寄せ集めることで構造物が形成されることを示した(図2)。

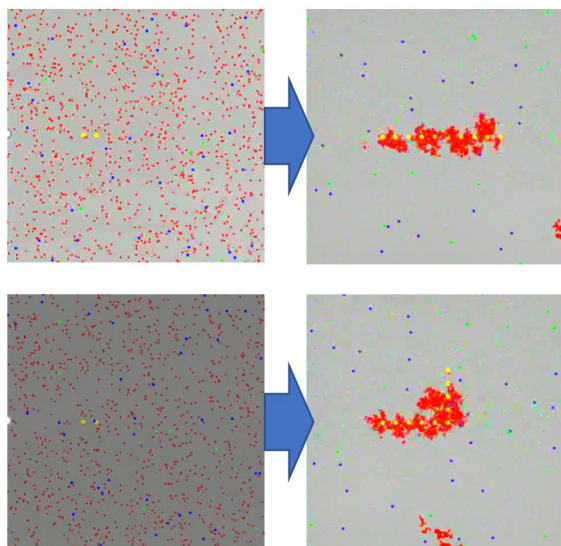


図2 2種類のブロックによる構造物形成の例

2019 年度

当該年度に設定した主たる研究項目は(1)損壊による自己強化を図るしくみの導入、(2)能動的な負荷分散、(3)階層性を有するシステムへの拡張であった。

(1)損壊による自己強化を図るしくみの導入については、部分的な損壊に対し、損壊前の状態に修復するだけでなく、損壊という状態に基づいて周囲に発する情報の発信方向に異方性を持たせ、特定の方向に集積する部材の量を増やすことで強度の強化を可能とするしくみを実装した。構造物を形成するブロック同士には結合する機構を付与することで、現実的な強度強化に向けた手法の提案とその有効性を示すことができた。

(2) 能動的な負荷分散については、損壊が生じる前に能動的に負荷を分散する構造を自己組み立てするしくみを提案した。当初は各ブロックが負荷に関する情報を周囲のブロックと共有することで能動的負荷分散を可能にする構造変化を検討していたが、その中で新たに化学シグナルを導入するしくみの着想に至り、その新規性ならびに有用性が高いことから、その方向での能動的負荷分散を可能とするしくみを探求した。異なるシグナルによる化学反応を活用することで、ロボットのしくみを単純にしたまま、より高度な構造物形成ならびにその強化が可能になることを明らかにした(図3)。

(3) 階層性を有するシステムへの拡張については、局所的な不安定性にバイアスをかけると、構造物が大域的な構造を保ちながら、空間的に移動する現象を利用し、さらにその集団が協調的なふるまいを示すことを目指した。基本となるアルゴリズムの開発ならびにその動作検証を行うことができたが、十分な検証には至っていない。ただし、その過程において物体の協調搬送への応用という新しい方向性の提案と実装を行うことができた。

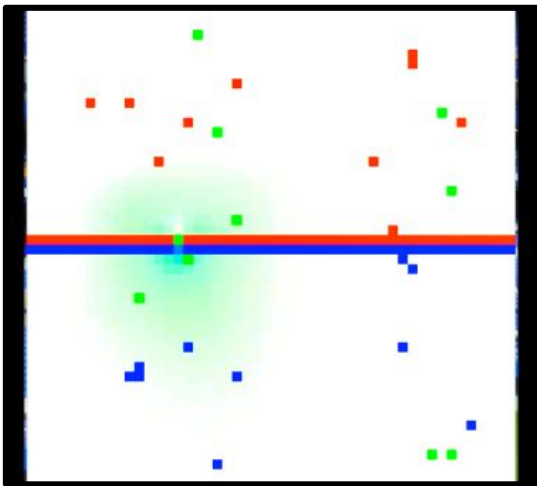


図3 化学反応を活用した構造物の強度強化

#### 成果のまとめ

本研究の目的は「生き生きとした構造物」を構築する群知能ロボットシステムを開発することである。「生き生き」とは、動的安定性を有すること、合理的な形状を形成できること、環境に適応する性質を有することを意味する。基本的な枠組みについては当初の計画に基づく形で成果を得るに至った。一方で、さらに期待できることとして計画で述べた点について得られた成果は部分的なものになっている。しかしながら、通信用シグナルとして化学物質を用いること、複数の化学物質に化学反応を取り入れることによって、システム自体の簡便さを維持しつつ、より高度かつ適応的な構造物が形成しうることを見出した点は、当初の計画には含まれなかった有望な発見であったと考えている。また、構造物自体がロボットになりうる、という点についても、単なる移動にとどまらず、物体の協調搬送に広げることができた、という点で当初の計画には含まれなかった大きな成果であったと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugawara Ken	4. 巻 1
2. 論文標題 Object Transportation by Swarm Robots Based on Constraint Granular Convection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Distributed Autonomous Robotic Systems	6. 最初と最後の頁 329 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-05816-6_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugawara Ken, Doi Yohei, Shishido Miki	4. 巻 23
2. 論文標題 Casualty-based cooperation in swarm robots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 645 ~ 650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-018-0501-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 粉体の動特性を模した群ロボットによる搬送作業
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken Sugawara
2. 発表標題 Object Transportation by Swarm Robots Based on Constraint Granular Convection
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原 研
2. 発表標題 協調メカニズムを陽に有さない群ロボットによる物体搬送
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野 晃任, 菅原 研
2. 発表標題 簡単な協調行動を有する群ロボットによる分散物収集
3. 学会等名 2018年度 情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 葉月, 菅原 研
2. 発表標題 ブラジルナッツ効果を応用した群ロボットによる物体搬送
3. 学会等名 2018年度 情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原 研
2. 発表標題 犠牲に基づく群ロボットの協調行動：弱い相互作用の導入
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 拘束された粉体を模した群ロボットによる搬送作業
3. 学会等名 第18回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 拘束のある単純な群ロボットの搬送作業
3. 学会等名 第30回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原研、赤井澤英司
2. 発表標題 協調する仕組みをもたないロボット集団が示す協調行動
3. 学会等名 第1回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 社会性昆虫に学ぶ群ロボットの構造物構築
3. 学会等名 日本ロボット学会誌
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Ken Sugawara, Akito Ono
2. 発表標題 Adaptive Foraging Behavior of Swarm robots based on Simple Cooperation Mechanism
3. 学会等名 SWARM 2019: The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原研、鈴木沙代
2. 発表標題 自己駆動力をもたない単純なロボットの集団による物体搬送
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原研、木村葉月
2. 発表標題 ブラジルナッツ効果を応用した群ロボットによる物体搬送
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 ロボットと材料の協調による動的安定構造物の構築
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 沙代, 菅原 研
2. 発表標題 自己駆動力をもたない単純なロボットの集団による物体搬送
3. 学会等名 2019年度 情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原研
2. 発表標題 社会性昆虫に学ぶ群ロボットシステム
3. 学会等名 日本動物学会第90回大阪大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----