

力学環境に適応変形する群ロボットの開発 - 自律分散同期型制御による構造物生成 -

鈴木陽介(東工大), 木村仁, 小関道彦, 伊能教夫(東工大)

Reconfigurable modular robot adaptively transforming a mechanical structure - Structure construction with distributed autonomous synchronous control -

*Yousuke SUZUKI, Hitoshi KIMURA, Michihiko KOSEKI, Norio INOU, Tokyo Tech

Abstract - This paper describes group robots called CHOBIE that adaptively construct a mechanical structure. The robots have slide motion mechanisms and transform the structure by synchronous movements. First of all, mechanical features and constraints of the robots are described. Second, as an effective control method for the synchronous robotic system, a scheme using a “temporary leader” is introduced. Some experimental results show the validity of the scheme. Third, a simulator which predicts transforming processes of CHOBIE is developed.

Key Words: Modular robotic system, Group robots, Self-reconfiguration, Mechanical structure

1. はじめに

骨に代表される生体組織には力学環境に応じてその形状や剛性を自律的に変化させる自己再構成機能がある[1]. 本研究では生物がもつ適応機能をモジュラーロボットに応用することで, 力学環境の変化に対して最適な形状を構築可能なロボットシステムを開発することを目的としている. 構成要素となるモジュール(以下セルロボットと呼ぶ)はブロックのように多数連結して構造を形成する. 各セルロボットは隣接するセルロボットとの通信を行うことで自らの行動を決定し, これらの協調動作により構造変形が成される. 本研究では現在, 二次元スライド移動型セルロボット“CHOBIE”の機構と制御アルゴリズムの開発を進めている[2][3].

本稿ではまずセルロボット“CHOBIE”の機構および構成されるモジュラーロボットの特徴を述べる. 次に自律分散同期型群ロボットの効率的な制御方式としてテンポラリー・リーダを用いる手法を提案し, 具体的な動作実験によってその有効性を確認する. 最後にCHOBIEの変形シミュレータの概要とそれを用いた制御アルゴリズムの開発に関して報告する.

2. セルロボット“CHOBIE”の機構

図 1(a)に CHOBIE のスライド移動機構を示す. 本ロボットは箱状の中板に対し 2 つの側板をずらして挟み込んだ構造をしている. 2 つの側板には, 図 1(b)のようなモータとギアからなる駆動機構が対称に設置されている. 一方, 中板の表面にはレール状の溝があり, 隣接するセルロボットのギアとかみ合うことで接触面に垂直な方向への拘束を維持する. さらに溝の底に接着されている低弾性ゴムとギアがかみ合っており, ギアを回転させることでスライド移動を行う(図 2(a)). この結合・駆動機構により CHOBIE は格子状の二次元構造物を構成し, 剛性を維持しながら構造変形を実行できる. ただし図 2(b)のようにスライド動作を伴わない結合や分離は行えない.

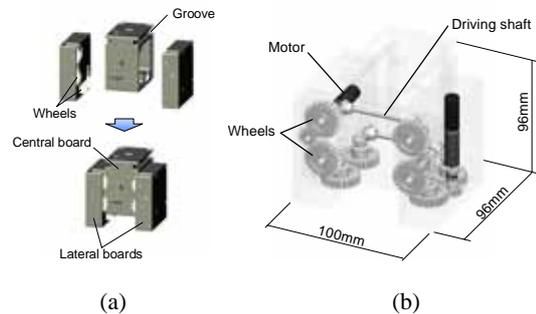


Fig. 1 Slide motion mechanism of CHOBIE

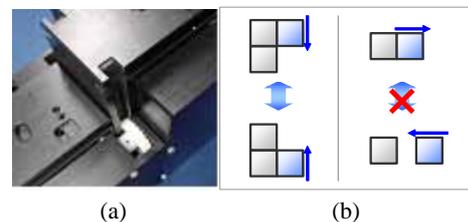


Fig. 2 Mechanical constraints between adjacent robots

また, 中板の内部には固定・位置決め機構, 通信デバイス, 制御基板およびバッテリーが組み込まれている. 固定・位置決め機構は, 図 3(a)に示すような固定棒とそれが収まる穴からなるかんぬきのような構造であり, 移動の際には正確な位置で停止し, 非移動時は強固に固定することが可能となる. また, 通信機能としては赤外線 LED およびフォトトランジスタからなる光通信を採用した. 各デバイスは 4 面に一対ずつ設置されており, 各セルロボットはその上下左右の 4 台のロボットとの通信を行う.

制御基板には MPU として H8/3664F を搭載している. 全てのセルロボットの MPU には同一の制御プログラムを搭載する. 制御回路やモータへの電力供給には 2 個のリチウムイオンバッテリー(550mAh)を用いている. また, 作用する負荷を検知する必要があるため, 有限要素解析を行い[3], 最も応力が生じやすい場所にひずみゲージを貼付した(図 3(b)).

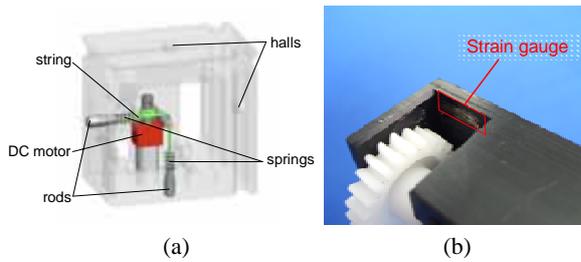


Fig. 3 Locking mechanism and position of strain gauge

3. アルゴリズム

3.1 テンポラリー・リーダー(Temporary leader)手法

本モジュラーロボットの動作は、セルロボットの移動による構造変形の繰り返しによって成される。構造変形を実行するためには、構造内の全てのセルロボットの中からモータを駆動するセルロボットを選定する必要がある。このとき、特定の基準に従って選定が行われるようなアルゴリズムを各セルロボットに与えることで、全体として所望の動作を実現させる。このアルゴリズムは、当然ながら目的とする動作によって異なるものとなるが、次のような共通した制約がある。第一に、セルロボット間の通信によって伝達される情報は簡単なものでなくてはならない。これは複雑な情報の伝達を考慮すると、セルロボットの台数が多い場合や構造が複雑な場合への応用が困難となり、アルゴリズムの汎用性が低下するためである。第二に、構造変形時には縦または横に連結した全てのセルロボットが同期してモータを駆動する必要がある。これは前述した機構的拘束により、かみ合っているセルロボット同士の単純な分離は不可能なためである。よってこの選定は確実に「列」ごとに行われなくてはならない。

こうした制約を考慮し、本研究では一回の構造変形ごとの一時的なリーダー(テンポラリー・リーダー)を用いる手法を考案した。これはセルロボット間の簡単な情報処理で特定できる位置で、かつ命令の起点として相応しい位置に存在するセルロボットがテンポラリー・リーダーとなり、所定の「列」に対して駆動命令を送るといったものである。モータを駆動するセルロボットを決定するまでの流れは図4のようになる。

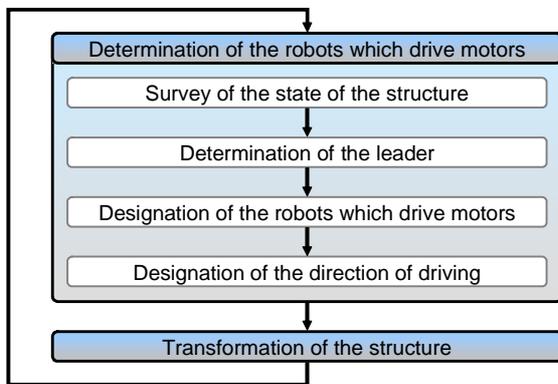


Fig. 4 Flow of transformation

3.2 動作例 1 “クロール(奇数台)”

上述の変形手順を繰り返すことで、モジュラーロボットの動作が実現される。その具体例として図5に示すようなクロール移動を行った。これは奇数台のセルロボットが4通りの形状を順番に形成することで、全体が図の右方向へ移動する動作である。各形状パターンにおいて、青色のセルロボットがモータを駆動する必要がある。これらに対して駆動命令を送るために、を印したセルロボットがテンポラリー・リーダーとなるようにした。その手順を以下に示す。

1. 全セルロボットが上下左右に送信
2. 上または下から受信したら左右への送信を停止
3. このとき縦および横の二方向から受信しているセルロボットがテンポラリー・リーダーとなる(図6)

テンポラリー・リーダーが決定する際の二つの信号の組み合わせは4通りあり、それぞれ図5の4通りの形状に対応する。よって信号の組み合わせに応じてリーダーを4種類に区別し、それぞれのリーダーがどの列に駆動命令を送信するかを設定することで、モータを駆動するセルロボットを適切に決定することができる。

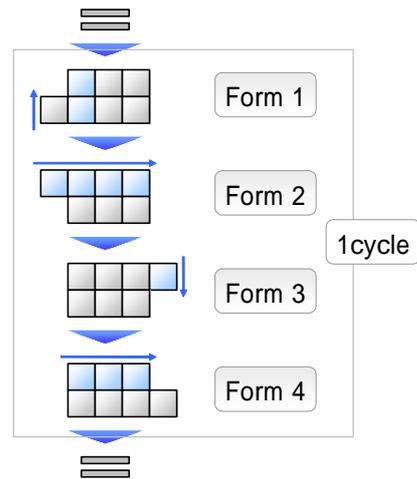


Fig. 5 Crawl motion

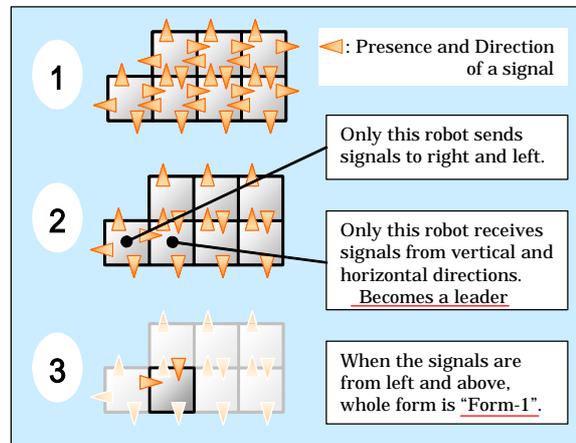


Fig. 6 Procedure of determining a leader

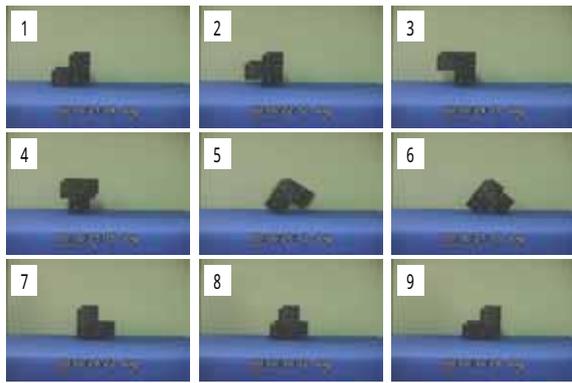


Fig. 7 Crawl motion with three robots

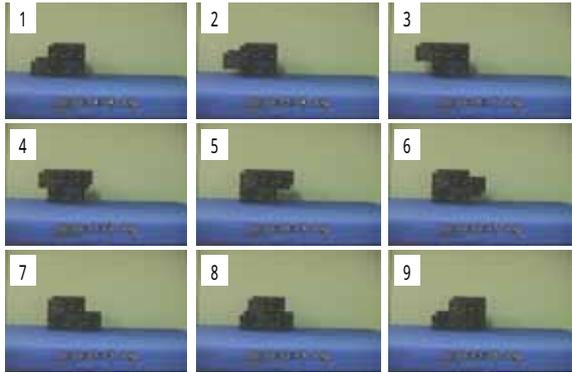


Fig. 8 Crawl motion with five robots

以上のアルゴリズムを与え、3、5、7、9台のセルロボットを用いた動作実験を行った。いずれの場合でも安定した動作が確認された。3台および5台による動作実験の様子を上図7、8に示す。なお、構成台数が偶数の場合も部分的なアルゴリズムの追加のみでクローリング動作が可能であることを確認している。

3.3 動作例2 “橋梁構築と負荷適応”

次に、負荷に適応しながら橋梁を構築する動作に関して議論する。負荷適応変形の基本は各セルロボットに作用する応力が平均化されるように構造を変化させることであると考えられるが、それだけでは実際に何らかの仕事を行うことはできない。したがってある程度の応力は許容して動作を行い、応力が閾値を超えた場合にのみそれを軽減するための変形動作を行うようにする。両者をそれぞれ基本変形動作、負荷適応動作と呼ぶことにする。本稿では基本変形動作として橋梁構築について述べる。変形過程は図9のようになる。

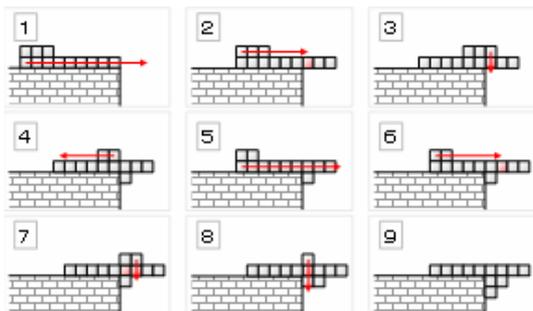


Fig. 9 Bridge construction

クローリング動作の場合はクローリングのアルゴリズムのみが与えられ、常にこのアルゴリズムで動作を行っていたが、今度は橋梁構築と負荷適応の二つのアルゴリズムを用意しておき、状況に応じて両者を使い分けることになる。すなわち、設定した閾値以上の応力が作用しているセルロボットが存在しない限りは基本変形動作のアルゴリズムで橋梁の構築を進め、その過程で閾値を超えるセルロボットが発生したときには適応変形動作のアルゴリズムに切り替える。その後過負荷が解除されたら、橋梁構築を再開するようになる。したがって、過負荷のセルロボットが存在するかどうかは変形を行った直後に確認する必要がある。フローチャートを下図10に示す。

負荷情報に応じたアルゴリズムの切り替えが可能であることを確認するため、負荷適応動作の実験を行った。図11のように片持ち梁構造の先端に負荷を作用させ、最も応力が大きくなるセルロボットAの部分強化されるようにセルロボットBを移動させる動作である。図12に示す動作実験の結果、負荷情報を用いて動作の流れを制御することは十分に可能であることが確認された。この動作に橋梁構築のアルゴリズムを組み合わせることで負荷に適応しながら橋梁を構築することが可能となる。

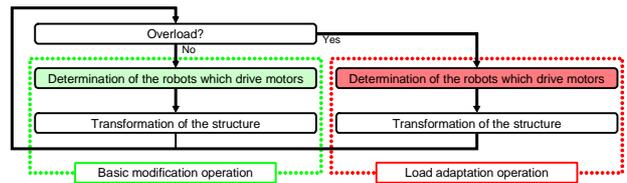


Fig. 10 Flow chart of switching the algorithms

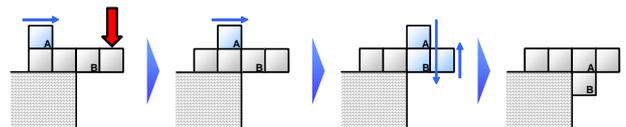


Fig. 11 Load adaptation in bridge construction

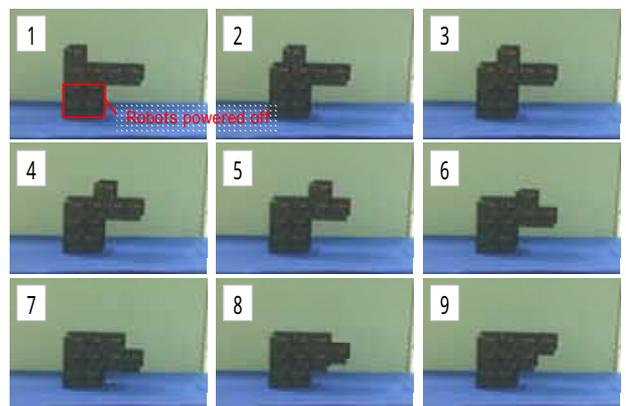


Fig. 12 Load adaptation with five robots

4. シミュレータを用いたアルゴリズム開発

4.1 シミュレータの作成

これまでに述べた動作は比較的単純なアルゴリズムで実現可能なものであり、変形過程の予測が容易であったが、より高度な変形動作のアルゴリズムを開発するためには、任意の初期形状からどのような変形が行われるかをシミュレートできるプログラムが有用である。また、CHOBIEの台数には限りがあるため、大規模な構造変形のアルゴリズムを探る上でも役立つ。そこで制御アルゴリズムの開発を支援するツールとして、また実機では試すことのできない多数台による動作を予測するシステムとして、CHOBIE専用シミュレーションプログラムを作成した。図13はその概観である。境界条件、初期形状およびフローチャートを入力した上で計算させることで、各変形を行うごとの形状を表示可能である。

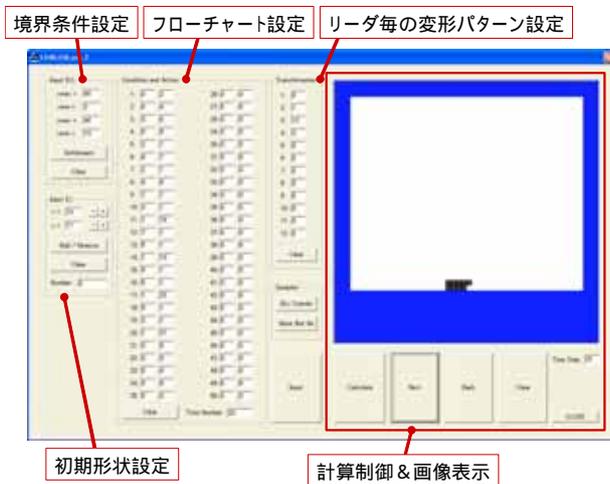


Fig. 13 Simulator for CHOBIE

以上の機能に加え、各セルロボットが検知する応力状態に対する適応変形のシミュレーションを行うため、様々な形状におけるひずみゲージの出力データを収集することで、任意の形状パターンにおける応力値を予測できるようにする計画である。

4.2 制御アルゴリズムの開発

作成したシミュレータを利用して実践的で複雑なアルゴリズムの開発を進めている。その内実際に動作実験を行ったもののひとつに、“汎用クローラ”と呼んでいる動作がある。これは前述の奇数台によるクローラ動作を発展させ、偶数台の場合や様々な初期形状に対応できるようにしたアルゴリズムである。シミュレーション結果と実際の動作の様子を図14、15に示す。両者を比較すると、シミュレータの予測と実際の動作の整合性が確認できる。なお、この汎用クローラ動作以外にも構造物を可能な限り上方に伸張する動作“縦伸び”などのアルゴリズムを開発し実機での動作確認を行っている。

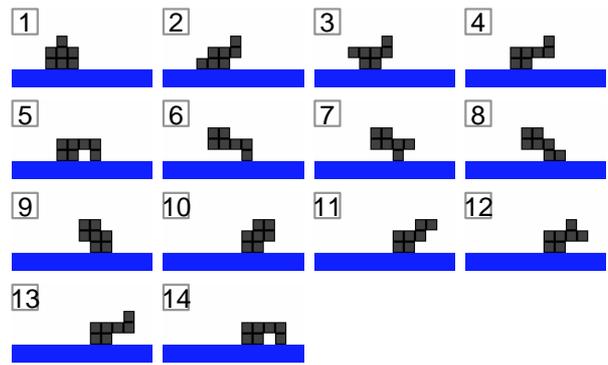


Fig. 14 Simulation results of generalized crawl motion

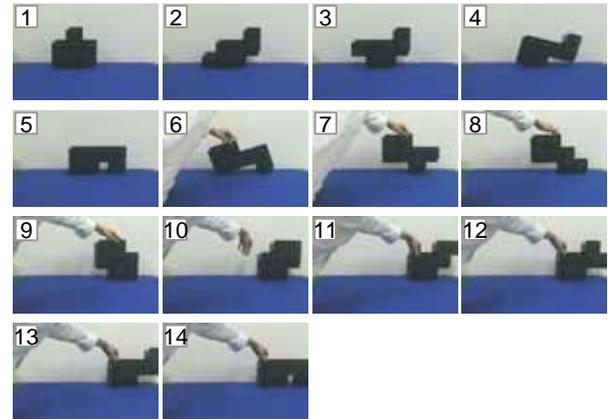


Fig. 15 Experimental results of generalized crawl motion

5. 結論

本稿では適応変形可能な構造物を構築する群ロボット“CHOBIE”の機構および制御アルゴリズムに関して報告した。構造物の剛性を維持するための機構による変形時の制約を考慮し、構造内の適当な位置に存在するセルロボットが一時的なリーダーとなって全体の变形を指揮する手法を提案した。クローラおよび負荷適応の二つの動作実験を行い、本手法が同期動作を行う群ロボットの制御に適した手法であることを示した。また、制御アルゴリズムの開発を支援するツールとして、CHOBIEの変形動作をシミュレートするプログラムを作成した。これを利用して開発したアルゴリズムを実機で動作確認した結果、シミュレータは正確にCHOBIEの動作を予測できることを確認した。

参考文献

- [1] B.Kummer: BIOMECHANICS OF BONE, chapter 10 in BIOMECHANICS, Y.C.Fung, N.Perrone and M.Anliker (eds.), Englewood Cliffs, New Jersey (1972)
- [2] Koseki M, Minami K and Inou N (2004) Cellular Robots Forming a Mechanical Structure (Evaluation of structural formation and hardware design of “CHOBIE II”): Proc Int Symp Distributed Autonomous Robotic Systems, 131-140
- [3] 鈴木陽介, 木村仁, 小関道彦, 伊能教夫, “力学環境に適応変形する群ロボットシステム”; 日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷集(第 11 回), pp.105-108, 2005