

力学環境に適応変形する群ロボットシステム

鈴木陽介, 木村 仁, 小関道彦, 伊能教夫
東京工業大学, 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1
{ysuzuki@stu., kimura@, koseki@, inou@}mech.titech.ac.jp

Transformable Robotic System Adapting to Mechanical Environment

Yousuke SUZUKI Hitoshi KIMURA
Michihiko KOSEKI Norio INOU
Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT - Group robots system “Cell Robots” aim to construct various structures with cooperative transformation. Such system can change its formation adapting to mechanical environments. The agent of the Cell Robot, named “CHOBIE”, has 2-way slide motion mechanisms for large stiffness of the structure. In this system, the same algorithm is required for each cell robot in order to compose the system independent of the number of group robots. For the purpose of realizing basic modification of structure, this study proposes an algorithm for “crawl motion” for linear locomotion of whole robots. To avoid concentrated loads on one cell robot, this paper also discusses the position of load sensor with results of FEM and experiments.

Key Words: Group Robots, Cellular Robot, Structural Formation

1. 緒言

生体の骨組織には作用する負荷などの環境に応じて形状や剛性が変化する現象が見られる[1]。これは生体組織が環境に適応した状態へ自律的に変化するために起きるとされる現象で、機能的適応（リモデリング）と呼ばれている。もしこの機能を人工の構造物（機械や建築など）に持たせることができれば、その応用範囲は非常に広いと考えられる。そこで本研究では自己再構成を行う機械システムを提案する。自己再構成ロボットは既に数多く提案されている[2]が、本研究では力学条件に応じて変形可能な群ロボットシステムを開発することを目的とする。

本稿では、まずシステムの構成要素（以下セルロボットと呼ぶ）の機構と機能の概略を述べ、その特徴を考慮した構造変形手法について述べる。また、構造物が自己再構成を実現するための各セルロボットの制御方法に関して新しく提案を行い、実験による検証も含めて議論する。

2. セルロボットの機構と機能

現在開発を進めているセルロボット“CHOBIE”の外観を図1に示す。本機構は2方向にスライド可能な対称性を持った形状であり、多数連結することで2次元的な構造物を構築可能である。CHOBIEは主に中板部分と左右の側板部分から構成される。CHOBIE間の分離、結合は接触面に沿ったスライド移動によって行う。隣接するロボット同士はレール状の構造によって相互にかみ合い、高い結合力で連結される。移動時に

おいてはゴムシートを接着したレール上を車輪の代わりとなる駆動ギアが回転して動力を伝達する。縦移動用と横移動用のモータはCHOBIEの両側板にそれぞれ一つずつ配置する構成とした。ロボットが移動する必要のない場合は、中板に配置した固定棒を相手のロボットの穴に差し込むことによってロボット同士の相対位置が固定される。これらの機構によって本システムは安定した変形機能と高い形状維持性能を有している。また、中板には固定棒の他に固定棒用モータおよび制御用マイコン、バッテリー等を内蔵し、群ロボット全体は完全なワイヤレスシステムとなるよう、前モデル[3]に全面的に改良を加えた。

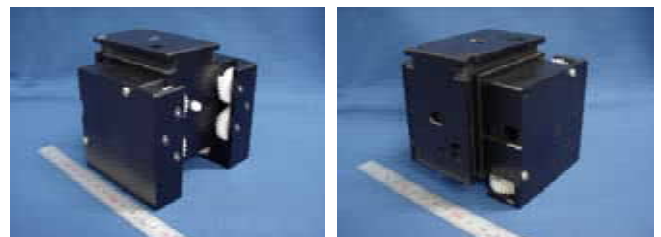


Fig.1 Appearance of CHOBIE

ロボット同士の相互通信には赤外線LEDとフォトインタラプタを1対の通信装置として用いており、セルロボットの4面に配置している。隣接するセルロボット同士の赤外線LEDとフォトインタラプタは互いに向き合い、1つのロボットが周囲4つのセルロボットと光通信を行う。CHOBIEの内部構造を図2に、諸元を表1に示す。

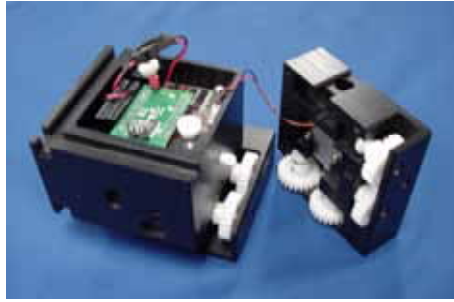


Fig.2 Internal view of CHOBIE

Table1 Specification of CHOBIE

Main Material	ABS
Size	80 × 80 × 100 [mm]
Mass	600 [g]
Battery	Li-ion Battery × 2 7.4[V], 550[mAh]
Maximum Velocity	60[mm/s]
CPU	H8/3664F

3. クロール移動のアルゴリズム

先に述べたように、CHOBIE は結合時の剛性を高めるためにスライド移動を採用している。このため本機構では図3に示すような結合・分離は不可能であり、セルロボットが横に移動する際には横一列に、縦に移動する際には縦一列に並んだセルロボット全てが同時に移動する必要がある。構造を変形するにはこれらの構造上の要求を満たすようなアルゴリズムが要求される。

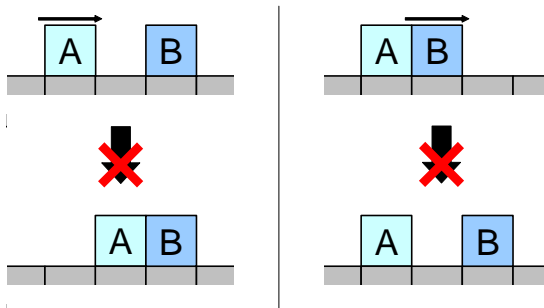


Fig.3 Restriction of connection and disconnection

一方で、セルロボット群が自律分散システムとして機能するためには搭載アルゴリズムは同一で、かつシステムを構成する個体数に依存しないことが望ましい。これらの要求事項を考慮したシステム全体の变形基本動作として、本報告では図4に示すような奇数台のセルロボットによるクロール動作をとりあげた。これは単純な变形動作の繰り返しによって構造物全体が平面上を移動する動作であり、システムを構成する個体数を変更したときの動作を検証しやすい。

ここでは以下の2つについて考察を行う。

- 同一のアルゴリズムに従うセルロボット群の中から矛盾なくモータを駆動するセルロボットを決定する方法
- 同時に移動する台数に依らずに同期をとる方法

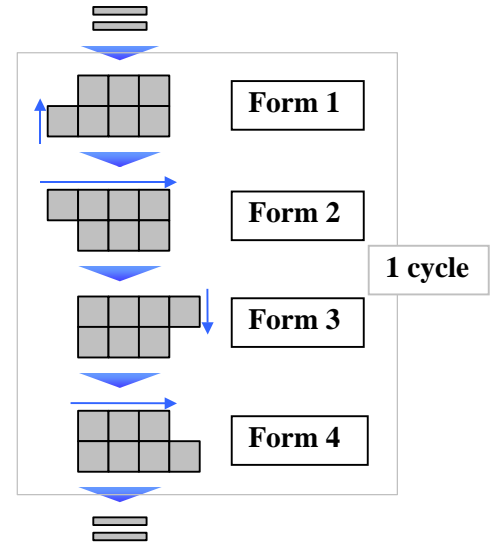


Fig.4 Crawl motion

奇数台のセルロボットがクロールを行う際には、台数に依存せず図4に示した4つの全体形状のパターンが存在する。各形状においてモータを駆動すべきセルロボットは一意に決定されるため、全体形状を知ることができれば理想的である。しかし、システムの構成数が未知である場合は同一のアルゴリズムで構造物全体の形状を認識するのは困難だと考えられる。

そこで、構造内のある特徴的な位置に存在するセルロボットが暫定的なマネージャとなって移動の可能性を判断し、各ロボットにモータ駆動指令を伝達する方式を採用した。これならば、移動の制約に対して矛盾が生じない上、協調動作も行いやすい。

クロールにおけるマネージャの決定までの流れを以下の) ~) および図5に示す。

-) 全セルロボットが全方向に信号を送る
-) 上または下から信号を受けたセルロボットは左右への送信を停止する
-) マネージャとなったセルロボットは周囲からの信号の組み合わせにより形状を判断する

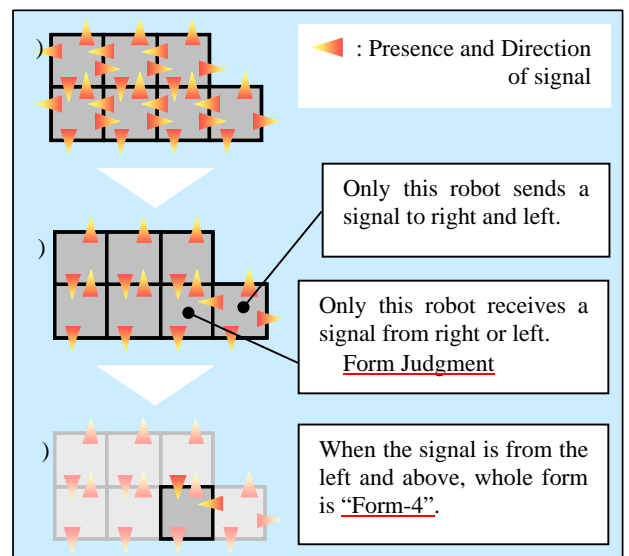


Fig.5 The method of judgment of whole form

各ロボットの同期動作の実現に関しては、駆動するセルロボットが一行に連続して並んでいることを利用した手法を用いた。横移動開始時の手順を以下に示す。

- 左端から右端へ順番に信号を伝達する
 - ・固定を解除しない限り右に信号を渡さない
 - ・信号が右端に到達するのは全てのセルロボットが固定を解除し終わった直後となる
- 右端から左端へ順番に信号を伝達する
 - ・右からの信号を受け取ったセルロボットは左に信号を送ると同時に駆動を開始する

縦移動時は上記において左端が下端、右端が上端に入れ替わる。本手法を用いた場合、隣接するセルロボット同士の駆動開始時間のずれは理論的には信号の伝達に要する時間に等しい。実際の通信速度は測定値で約 $10 \mu\text{s}$ であり、セルロボットの最大移動速度は約 60mm/s であるから、ロボットは $0.6 \mu\text{m}$ 程度のずれしか生じないことになる。この値はセルロボットをかみ合わせた時のガタより遥かに小さいため、相当数のセルロボットが同時に移動しても通信による時間のズレは全体の動作に大きな影響を与えないと考えられる。セルロボット間の光通信の精度に関しても、セルロボット 5 台を並べて行った実験でも通信に問題は生じなかったため、本手法は十分に実用に耐えうると考えられる。

4. 動作実験

3 台のセルロボットに対して提案アルゴリズムを搭載して動作実験を行った。動作の様子を図 6 に示す。慣性により前方へと倒れ込むこともあるが、正確なクローリング動作を行うことが確認され、1 サイクルに要した時間は約 9sec であった。

次いで、先程と同一のアルゴリズムを 5 台のセルロボットに搭載した。このうちの様々な組み合わせで 3 台のクローリング動作を検証し、いずれも正確なクローリング動作を行うことを確認した上で 5 台での動作を実行した。その様子を図 7 に示す。この場合も正常なクローリング動作がなされることおよび 1 サイクルの所要時間が約 9sec であることを確認した。

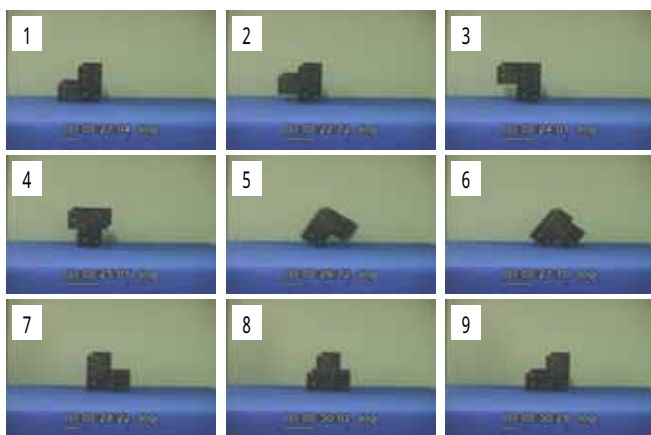


Fig.6 Operation test with 3 cell robots

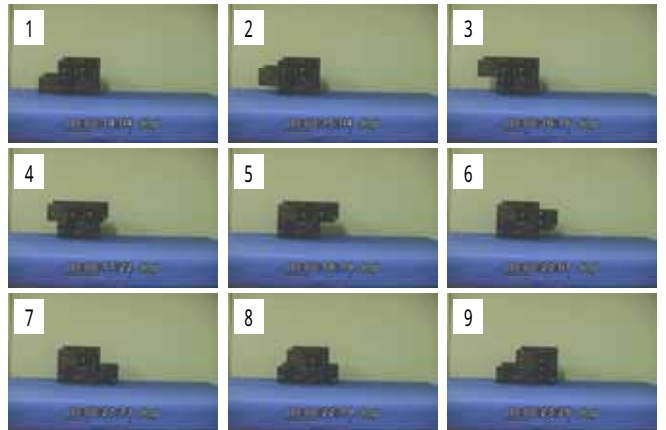


Fig.7 Operation test with 5 cell robots

実験により、前節のアルゴリズムが実際にセルロボットの移動を制御するものとして有効に働くことを確認した。また 3 台および 5 台でのクローリング動作が可能であったことから、このアルゴリズムでより多くのセルロボットを用いたクローリング動作を実現することが可能であると考えられる。

5. 力学環境への適応

本研究室ではセル・オートマトンを用いた自己再構成のシミュレーションを行っており、これによるとセルの連続体からなる構造物に対して適当な負荷条件を与えたときに、大きな応力が作用するセルの周囲には新たにセルを発生させ、反対に負荷がほとんど生じていないセルは消滅させるというルールで繰り返し計算を行うことによって、力学環境に適応した形状が自動的に生成されることが示されている[4]。

これをセルロボットにより行うためには、各セルロボットが自身に作用する負荷(応力)を検知し、全体で平均化するような構造変形を行うようにすればよいと考えられる。

既に本研究において、セルロボットに作用する負荷を検知するセンサとしてひずみゲージが有効であることが確認されているが[2]、最適なセンサ位置についての議論はまだされていない。そこで最適なひずみゲージの貼付位置に関して検討を行った。

6. 最適な負荷センサ位置に関する考察

力学環境に適応するためには負荷センサの配置が重要である。本研究で行った検討の手順を以下に示す。

セルロボットに大負荷が発生しうる力学条件を想定

各力学条件について有限要素解析によりひずみが生じやすい位置および方向を特定

特定した各位置にひずみゲージを実機に貼付し、想定した力学条件を再現して出力を測定

想定した 3 つの力学環境を図 8 に示す。それぞれ左端を固定した状態でのせん断とその逆向きの場合、および上端を固定した状態での下方向への引張りである。

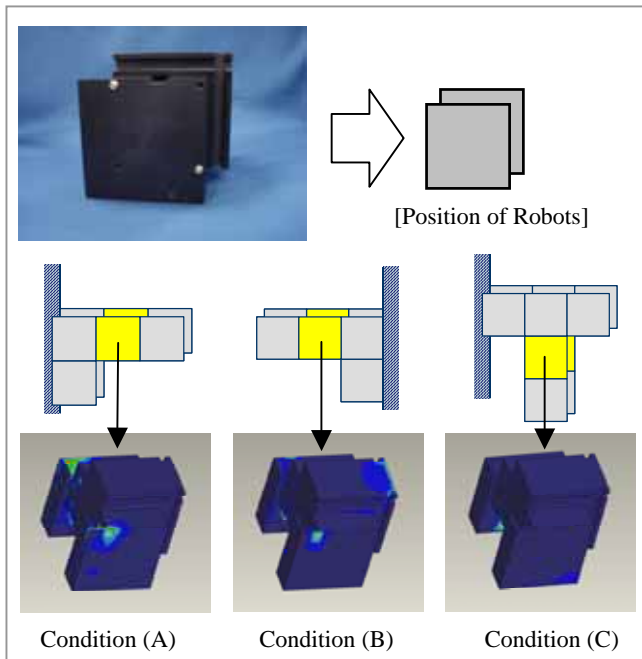


Fig.8 Mechanical conditions and results of FEM

条件(A)と条件(B)では固定する箇所が異なり，条件(A)では側板を固定しているのに対して条件(B)では中板を固定している．中板と側板の構造的な剛性の違いや，セルロボットの重心位置などを考慮すると，この2つを同様の力学環境とは見なせない．そのためこれらは別個のものとして扱う．

実験の結果，各力学条件に対するひずみゲージの出力変化には設置位置によって以下の2通りの特徴が存在した．

- a) 全ての力学条件において比較的输出が大きい
- b) 特定の力学条件においては出力が大きい，その他では小さい

セルロボットの破壊を避けるためには多様な負荷を検知できる a) のような位置が理想的であると考えられる．ただし，b) のような位置が各力学条件について存在すれば，セルロボットは負荷に加え自身の周囲の状態も検知できる．すなわち，そのセルロボットがどのように行動すれば自身の負荷を軽減できるかが分かる．しかし，この方式ではひずみゲージを多数設置する必要があり，構造および制御法には更なる検討が必要であるとえられる．

7. 基本的な適応変形

力学的な適応変形の基本は応力が大きいところにセルロボットを集めることで負荷の集中を避けることである．本システムへの応用としては，各セルロボットは自身に作用する負荷をセンサにより検知し，これが一定値以上になった場合は周囲に信号を送る．信号を受け取ったセルロボットは周辺のセルロボットの配置を確認し，負荷が作用しているセルロボットの近くに移動するような指示をする，といった手順になる．

しかしコンピュータシミュレーションによるセル・オートマトンの場合と同様のルールでセルロボットを制御することはできない．セルロボットは簡単に生成・消滅ができるものではなく，列ごとのスライド移動でしか構造の変形ができないからである．そのため，ある箇所の応力を低減するための変形が別の場所の応力に影響を与える可能性がある．

したがって，セルロボットから形成される構造物が力学環境に適応変形するためのルールは複雑になることが予想される．そこで今後は使用する負荷センサとその設置箇所を決定し，得られるデータを実験により確認した上で動作シミュレーションを行い，実用的なルールを模索するという手順が必要と考えられる．

8. 結論

自己再構成機能を有する機械システムを構成するための構成単位であるセルロボット“CHOBIE”について，その機構と機能を述べた．基本的な変形動作であるクロールを通してセルロボットの移動アルゴリズムに関して検討を行い，スライド移動機構に基づく移動の制約を考慮した構造変形手法と構成数に依存しない同期手法を考案した．また，このアルゴリズムを搭載した3台と5台のセルロボットを用いた動作実験により，提案アルゴリズムが理論通りに動作することも確認した．

また，負荷に適応した変形についてはひずみゲージの最適な貼付位置に関して検討を行った．数値解析と実験によりセルロボット内部のひずみが大きい位置とその特徴を求めた．これにより全般的にひずみが大きい位置及び，ある力学条件でのみひずみが生じやすい位置があることを確認した．これらの結果から，本システムの力学環境に対する適応変形の実現可能性を指摘した．

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] Robert Fitch and Daniela Rus: Self-Reconfiguring Robots in the USA, 日本ロボット学会誌 Vol.21, No.8, pp.832-838, 2003
- [3] 伊能教夫, 小関道彦, 南賢吾, 小林広和: 構造物を構築する群ロボットの運動機構, ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集 [No.02-6], (CD-ROM)1P1-L12, 2002
- [4] 伊能, 下平, 小林: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), 日本機械学会論文集 (A編), Vol.61, No.586, pp.1416-1422, (1995)