

力学環境に適応変形する群ロボットの開発 —制御アルゴリズムの数値的表現と動作計画手法の提案—

○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 - Numerical expression of control algorithm and motion planning method -

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

Abstract — This study describes a group robot system “CHOBIE II”. The feature of the CHOBIE II is a function to form a reconfigurable structure. In the previous paper, we introduced a control method of the robots and realized transformation of the structure. In this paper, we focus on a motion planning method to obtain control algorithms. For this purpose, we introduce a numerical criterion for generating transformations. The criterion is expressed with matrix form of 32 parameters. This paper demonstrates the criteria generate various motions of the CHOBIE II, and proposes a new method to obtain the appropriate parameters for objective motions.

Key Words: group robots, modular robots, structural transformation, distributed autonomous systems, adaptive transformation

1. はじめに

多数の独立したモジュールからなるモジュラーロボットシステムは、その組織的な群挙動を上手くデザインすることで多機能性、環境適応性、耐故障性などの性能が実現されるという利点がある[1]。このシステムを用いて構築された構造物は、まるで生物のような環境適応性を実現できる可能性がある。こうした構造物が実現されれば、様々な目的や環境に柔軟に適応して常に最適な形状と機能を維持することができ、多様な要求が存在する人間の生活環境や、深海や宇宙空間などの極限環境において有用であると考えられる。

このような観点から、筆者らは力学環境に対する適応性を有する構造物を構築するモジュラーロボット“CHOBIE”を提案している。現在開発を進めている“CHOBIE II”は次のような特徴を有する。

- 同一の機構を有するブロック状のモジュールにより構成される(Fig. 1)
- モジュール同士が多数かみあい結合することで構造物を形成する
- モジュール群の協調的な移動動作によって構造物の全体的な変形が実行される
- 各モジュールの行動決定はそれぞれに内蔵されたMPUによって行われる
- MPUに実装されている制御プログラムもまた全て同一である

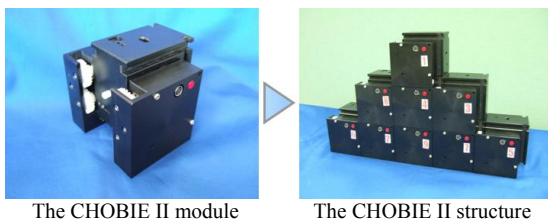


Fig. 1 The module and the structure of the CHOBIE II

CHOBIE IIの構造物は、ブロック状のモジュールが縦横に連結した二次元格子構造を有しており、その変形動作は特定の行(横方向に並んだモジュール)や列(縦方向に並んだモジュール)ごとの同期したスライド移動によって実行される。前回の報告では、CHOBIE IIモジュールの機構について述べ、構造変形を実行するための制御アルゴリズムとしてテンポラリー・リーダー手法を提案した[2]。これは構造内の特定の条件を満たしたモジュールが一回の変形動作を指揮する一時的なリーダーとなり、行あるいは列ごとの変形を実行するものである。本手法を適用することで、Fig. 2に示すクロール動作、階段構築動作、負荷適応動作などが実現された。

本論文では、CHOBIE IIによる構造物が所望の変形動作を行うための制御アルゴリズムを自動で導出する手法について議論を行う。具体的には、各モジュールに与える制御アルゴリズムをいくつかのパラメータで表現する手法を提案し、その上で目標形状への変形を実現するための適切なパラメータ設定を自動で導出する方法について議論する。

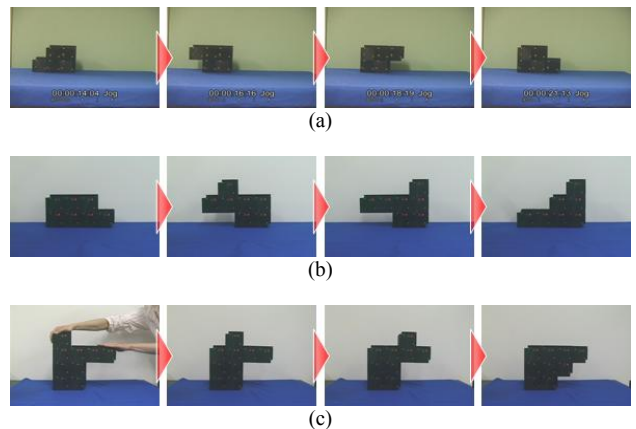


Fig. 2 Motions of the CHOBIE II ((a) crawl motion, (b) stairs construction, (c) load adaptation)

2. 動作生成規準の数値的表現

上述の変形動作を生成する際に、筆者らはあらかじめ全体形状の変形過程を想定した上で、この変形過程をトレースできるように動作生成の規準を設定した。しかし CHOBIE II の多様な動作を行うためには、任意の目的が与えられたときにそれを実現するための制御アルゴリズムを自動で導出できることが理想的である。また、従来の方法では全体形状やその変形過程が複雑な場合には適用が困難であった。

ここでは CHOBIE II への動作生成規準の与え方を統一し、これを数値的に表現することを行う。これにより構造変形の傾向をいくつかのパラメータで設定することができるため、数値解を求める形での制御アルゴリズムの自動導出が可能となる。

2.1 32 個のパラメータによる数値的表現手法

基本的に CHOBIE II の変形動作は、特定の望ましくないローカルな特徴が存在するときにこの特徴を除去するような変形を行うという捉え方ができる。そのため CHOBIE II の動作生成においては、どのような特徴が望ましくないのかを定義することが重要である。このとき、構造内の各モジュールにとって影響を受けるあるいは逆に影響を与えることができる範囲は、自身が存在する行と列に限定されている。そこで、ここでは各モジュールが自身の存在する行や列に存在する特徴形状に注目して動作生成を行うものとして、以下のような手法を提案する。

最初に、構造内の各モジュールは自身が存在する行や列の両端の状態に関する情報を得る。このとき注目するのは、行の両端が上端や下端であるかどうかという状態に関する 4 つの情報と、列の上端が左端や右端であるかどうかという 4 つの情報である。これらを 2 つの 4 次元ベクトル (c_h : 横方向特徴ベクトル, c_v : 縦方向特徴ベクトル) としてまとめる。一例を Fig. 3 に示す。

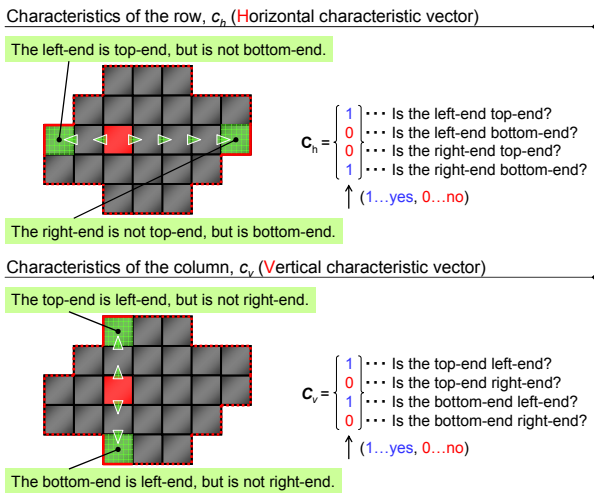


Fig. 3 Definition of c_h and c_v

次に、これらの組み合わせ 16 通りにおける各特徴を対象として、これらがどれだけ望ましくないかについて数値で評価する。各モジュールは自身の行と列の状態の“望ましくなさ”を(1)式で計算する。

$$L = c_v^t (A_v + A_h) c_h = c_v^t A_v c_h + c_v^t A_h c_h \quad (1)$$

$$= \begin{Bmatrix} c_{v1} & c_{v2} & c_{v3} & c_{v4} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_{v11} & \alpha_{v12} & \alpha_{v13} & \alpha_{v14} \\ \alpha_{v21} & \alpha_{v22} & \alpha_{v23} & \alpha_{v24} \\ \alpha_{v31} & \alpha_{v32} & \alpha_{v33} & \alpha_{v34} \\ \alpha_{v41} & \alpha_{v42} & \alpha_{v43} & \alpha_{v44} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{h1} \\ c_{h2} \\ c_{h3} \\ c_{h4} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_{v1} & c_{v2} & c_{v3} & c_{v4} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_{h11} & \alpha_{h12} & \alpha_{h13} & \alpha_{h14} \\ \alpha_{h21} & \alpha_{h22} & \alpha_{h23} & \alpha_{h24} \\ \alpha_{h31} & \alpha_{h32} & \alpha_{h33} & \alpha_{h34} \\ \alpha_{h41} & \alpha_{h42} & \alpha_{h43} & \alpha_{h44} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{h1} \\ c_{h2} \\ c_{h3} \\ c_{h4} \end{Bmatrix}$$

ここで、 c_h , c_v は各モジュールが自身の存在する行と列から収集した 4 つずつ特徴の有無をベクトル表記したもの、 A_h , A_v はこれらの 16 通りの組み合わせにおける各特徴の望ましくなさを与える 4×4 行列である。特徴の組み合わせ 16 通りと行列 A_h , A_v の各成分との対応は Fig. 4 のようになっている。例えば両行列の(1,1)成分は、あるモジュールにとって自身が存在する行の左端が上端であり、かつ列の上端が左端であるという状態がどの程度望ましくないかを与える数値である。これらによって求められる数値 L が構造内のモジュールが存在する各位置における形状的な望ましくなさを与えることとなる。

そして、 L の値が最も大きいモジュールがリーダーとなる。リーダーとなったモジュールは、自身周辺の最も望ましくない特徴、すなわち自身がリーダーになる際に最も寄与したパラメータに対応する特徴を除去するような駆動命令を送るようにする。以上の方法によって、特徴の望ましくなさを意味する計 32 個のパラメータによって、CHOBIE II の動作生成の規準を与えることができる。

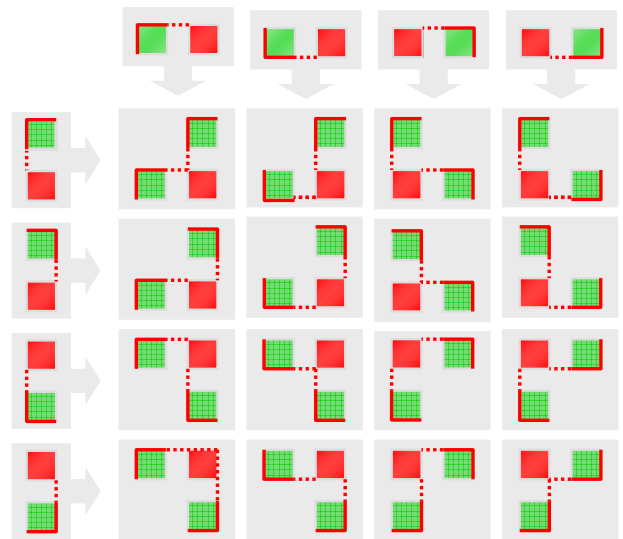


Fig. 4 Combinations of characteristics indicated by the parameters

2.2 数値的表現に基づく動作生成

上述のように処理される 32 個のパラメータを適切に設定することで、実際に CHOBIE II のいろいろな動作を実行できることを示す。例えば次のように設定することでクロール動作が行われる。Fig. 5 はシミュレーションにより得られた変形過程である。各段階における各モジュールの赤色の濃さは L の値の大きさに対応するようになっている。

$$A_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

これらの 32 個のパラメータにおいて、“1”に設定されている 4 つのパラメータによって 4 通りの変形動作パターンが生成される。これにより構造物が 4 種類の形状を繰り返し構成する動作がもたらされ、構造全体が右方向に移動することとなる。また、次のようにすれば構造を縦方向に伸ばすような動作が実行できる。シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。最後に全モジュールの L の値がゼロになった段階で変形が収束する。

$$A_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (3)$$

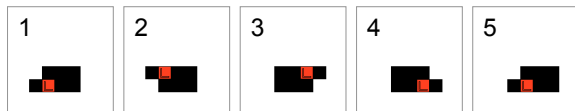


Fig. 5 Simulation result of generated crawl motion

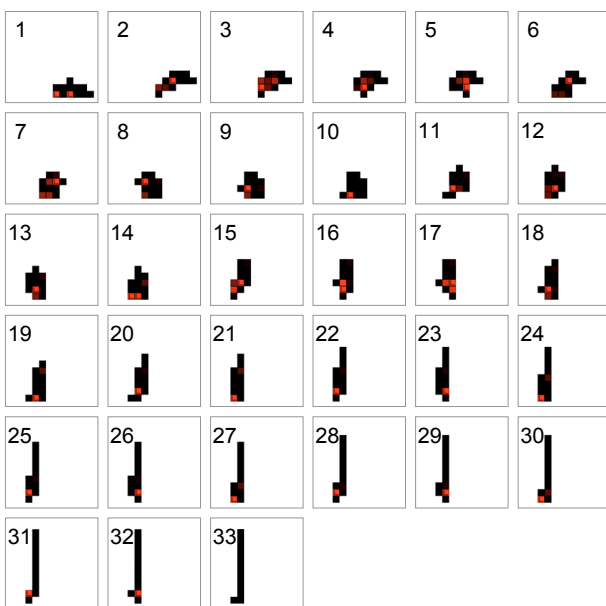


Fig. 6 Simulation result of generated upper growth motion

3. 32 個のパラメータの自動導出手法

前章の方法を用いることで、行や列に存在する特徴の望ましく無さを与える 32 個のパラメータによって CHOBIE II の動作を生成可能となった。クロール動作や縦方向に伸びる動作のような簡単な規準で生成可能な動作であれば開発者が考えて設定することも可能であるが、基本的にはパラメータ設定の問題を解くことは非常に困難である。そこで本章では、任意の目的形状が設定されたときにそれを実現するためのパラメータを自動で導出する方法について議論する。

3.1 特定の初期形状から特定の目標形状

まず、特定の初期形状から特定の目標形状への変形を実行するパラメータの導出方法を対象とする。こうしたパラメータがひとつでも見つければ、これを設定することで常にその形状間の変形が可能となる。このようなパラメータを様々な初期形状と目標形状の組み合わせについて求めてデータベース化しておけば、これらを状況に応じて適用することで多様な変形過程が生成できる。

例として Fig. 7 のような初期形状と目標形状を設定した場合を考える。基本的な考え方として、あるパラメータに大きな値を設定することは、その対応する特徴が望ましくないことを意味し、逆に小さな値を設定することはその特徴が望ましいことを表現することになる。したがって、この場合は目標形状において存在する特徴に対応するパラメータには小さな値を与え、初期形状に存在する特徴に対応するパラメータには大きな値を与えることで、目標形状に近い形状ほど望ましく、一方で初期形状に近い形状は望ましくないという規準を与えることができる。これによって、初期形状から離れて目標形状に収束しようとする変形動作が生成されやすくなることになる。

しかし、以上の考えに基づくパラメータを設定してシミュレーションを数パターン試行したところ、目標形状と同じような特徴を有する形状には収束するが目標形状と一致するとは限らない、あるいは収束しないという結果が得られた。この原因は、上記の考えでは具体的な変形過程を考慮していない点にある。確実に目標形状に収束するパラメータを得るためには、実際に変形過程をシミュレートしながら、目標形状を形成可能なパラメータを探索する必要があると考えられる。

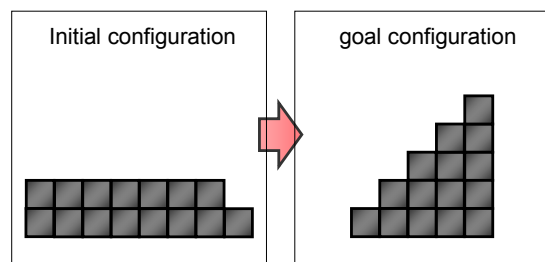


Fig. 7 Considered initial configuration and goal configuration

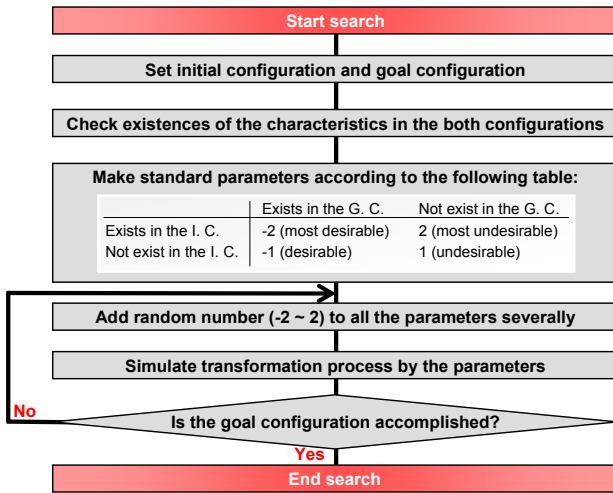


Fig. 8 Flow chart of the searching method

そこで、様々なパラメータをランダムに自動生成して初期形状からのシミュレーションを行い、目標形状を達成できるものを探索するプログラムを作成した。そのフローチャートを Fig. 8 に示す。

Fig. 7 の設定でプログラムを PC (CPU: Intel Pentium 4, 3.4GHz) 上で実行した結果、20 分程度の計算時間の後、以下のようなパラメータが出力された。このパラメータを用いたシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。

$$A_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, A_h = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 3 & -1 \\ -3 & -2 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 4 & 1 \\ -2 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

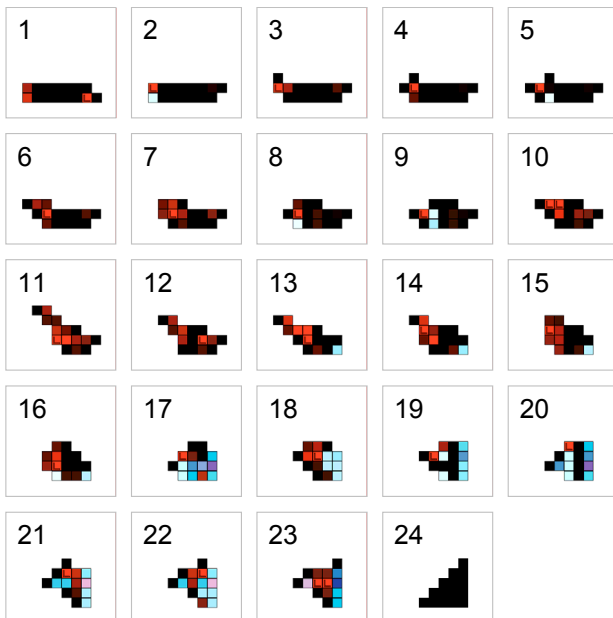


Fig. 9 Simulation result of stairs construction motion from the initial configuration in Fig. 8 using the parameters of formula (4) obtained by the searching method

3.2 任意の初期形状から特定の目標形状

次に任意の初期形状から特定の目標形状に至るようなパラメータの導出に関して考察する。前節での議論から、32 個の数値配分は初期形状から目標形状への変形過程に深く関わっている。そのため、ひとつの数値配分で初期形状に依存せずに特定の目標形状を達成することは困難であると予想される。一方で、2.2 節で延べた縦方向に伸びる動作のように目標形状が特殊なものであれば、様々な初期形状からでもその目標形状に至ることができる例もある。

そこで、不特定の初期形状から直接目標形状を形成するのではなく、多様な初期形状から変形可能な特殊な中間形状を設定して第一段階の構造変形を実行してから、第二段階で目標形状への変形動作を行うという方法が有効だと考えられる (Fig. 10)。中間形状からの構造変形は 3.1 節で提案した特定の初期形状からの場合の導出プログラムが適用可能であるため、この方法で任意の初期形状から特定の目標形状を形成するパラメータを得ることができることになる。

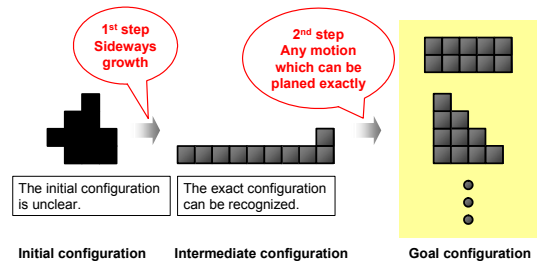


Fig. 10 Motion planning in case of initial configuration is unclear

4. 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 II の制御アルゴリズムの自動導出手法に関して報告した。CHOBIE II の制御アルゴリズムは、各モジュールが存在する行や列に存在する特徴がどの程度望ましくないかを与えるパラメータを設定することで数値的に表現可能となる。特定の初期形状から特定の目標形状への変形動作を生成できるパラメータは、シミュレータを用いたランダムな探索を行うプログラムによって実用的な時間内で導出することができることを確認した。また初期形状が特定されない場合には、特殊な中間形状を用いることで目的を達成するパラメータを取得可能であることを示した。

参考文献

- [1] Fukuda T, et al., "Structure Decision Method for Self Organizing Robots Based on Cell Structure-CEBOT," ICRA 1989, pp. 698-700.
- [2] 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ー自律分散同期型制御による構造物生成ー"; 第 24 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, (CD-ROM)3D26, 2006