

熱力学アナロジーを用いた群行動形成に関する基礎研究

北海道工業大学 ○寺町 和優, 北海道工業大学 大堀 隆文,
北海道工業大学 北守 一隆, 北海道工業大学 川上 敬, 北海道工業大学 木下 正博

要旨

多数の構成要素によって成り立つシステムにおいて、システムの振舞いを制御することの困難性が指摘されている。本研究では、閉領域内に配置された複数のロボットの群行動を実現することにより、多数の構成要素を持つシステムの振舞いを制御するための方法論の妥当性を検証する。始めに群行動の定量化を行い、この量を基に進化的、学習手法によりシステム全体としての目標状態へ到達するような制御の方法論を示す。

1. 緒言

近年、ネットワークシステムのように多数の構成要素によって成り立つシステムにおいて、システムの振舞いを制御することの困難性が指摘されてきている。さらに、それぞれの要素が自律的な振舞いをするような自律エージェントの場合、システムの振舞いの制御のため各々の相互作用も含めた複雑適応系と全体の制御の両者を同時に解決する必要がある。本研究では、この自律エージェントとして自律移動ロボットを制御対象として閉領域内に配置された複数のロボットの群行動を実現することにより、多数の構成要素を持つシステムの振舞いを制御するための方法論の妥当性を検証する。このための具体的な方法論として、エントロピーなどの熱力学的パラメータを利用する方法を提案する。しかしながら、ロボット群の振舞いと熱力学的パラメータとのマッピングに関しては未だ研究例が少なく、これを制御に利用しているようなアプローチは少ない。本研究では、まず群行動の定量化を行い、この量（状態量）を基に進化的、学習手法によりシステム全体としての目標状態へ到達するような制御の方法論を示す。

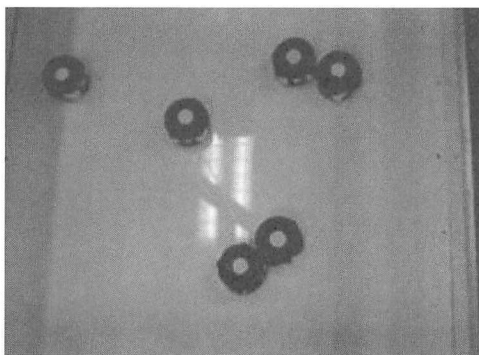


Fig.1 Measurement system of the real robots

2. 群システムと熱力学

ここで、制御の対象とする複数の自律移動ロボットの群システムの構成要素を図1に示す。また、群ロボットシステムを図2に示すように、多数の移動ロボットが壁で囲まれた有限のフィールド内で自律的に行動すると設定する。以下では、このような群ロボットシステムを制御する定量的観測を、熱力学とのアナロジーから以下のように行う。

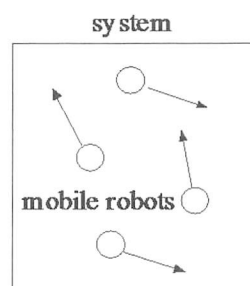


Fig.2 The grouping robot system

各ロボットを気体分子と見なし、群ロボットシステムを熱力学における場と仮定する。これにより、孤立系としてシステム全体を見るのが可能となる。この場合、孤立系全体の状態量や、系内部の部分系を開放系として状態量を定義できるが、厳密にはエネルギー保存の法則が成り立たない。ロボットを行動させる際、その動力源はロボットに搭載されたバッテリーあるいは有線による外部からの電力供給である。また、ロボットが行動する際に使用されるエネルギーは、摩擦により熱に変化し、空気中へ放出される。これらを考慮すると、システム全体は孤立系ではなく、エネルギーを外部と交換している散逸系であると捉えることが可能である。

3. 群システムにおける巨視的状态量

群ロボットシステムの挙動の巨視的状态量を定量化するため、構成要素である各々のロボットを気体分子と仮定し、熱力学における状態量を導入する。巨視的状态量として、熱力学で使用される圧力・内部エネルギー・エントロピーを群ロボットシステムにおいて定義し、熱力学における各状態量の意味と、群ロボットシステムにおけるそれらの意味について考察する。

3. 1 圧力

ロボットと壁との衝突の様子を図3に示す。このとき、ロボットの衝突前と衝突後の速度 v_1 及び v_2 の壁に垂直な速度成分を v_{1n}, v_{2n} と置き、ロボット群の系の圧力を次のように定義する。

壁面の面積を A_I とする。ある時刻 t_1 において、時間間隔 τ_1 をとると、系の圧力 P は、

$$P = \left\{ \sum_{t=t_1}^{t_1+\tau_1} m(v_2 - v_1) \right\} / A_1 \tau_1$$

と表す。ロボット群が内部で衝突せずに周期行動をとっている場合、あるいは内部でデッドロックに陥っている場合には、壁との衝突が少なくなるため、圧力は低くなる。

3. 2 温度・内部エネルギー

系の温度は、壁にロボットが衝突した際のエネルギーの変化で定義する。また、この系の内部エネルギーは、すべてのロボットの並進運動の運動エネルギーとして記述する。今、壁面あるいは温度計の面積を A_2 とする。ある時刻 t_1 において、時間間隔 τ_1 をとり、系の温度 T と内部エネルギー U の関係を熱力学のアナロジーから次のように定義する。

$$\Delta T = \Delta U / C_v A_2 \tau_1$$

ここで、 C_v は定積比熱である。また、内部エネルギーの変化 ΔU は、

$$\Delta U = \left\{ \sum_{t=t_1}^{t_1+\tau_1} \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2) \right\}$$

である。系の温度が高ければ系の内部でロボットの運動が活発であり、温度が低ければロボットの動きは鈍くなる。

3. 3 エントロピー

系を N 個のセルに区切り、ある時間間隔 τ の間に、ロボットがあるセルを通過する確率を Q_i とする。このとき、エントロピー S は次のようにして定義される。

$$S = - \sum_i Q_i \log Q_i$$

ロボットがランダムな運動をする場合、その軌道が多くセルを通過すると、エントロピーは増大する。ロボットが周期的な軌道をとる場合、エントロピーは減少し、静止している場合、エントロピーは 0 に近づく。定性的には、群ロボットの行動に何らかの秩序があればエントロピーが小さくなり、無秩序な行動をとればエントロピーは増大する。

4. 状態量の測定と挙動特性の解析

ここでは、実ロボットを用いた実験を行い提案した状態量の測定法を示す。また、測定された状態量から群ロボットの挙動を解析し、制御の可能性を検討する。提案した状態量を実ロボットの挙動によって測定し、測定された状態量の解析を行う。図 3 に示すように、自律移動ロボット *khepera* (直径 55mm) を用い、上方からトラッキングビジョンシステムでその挙動を観測し、状態量を観測した。

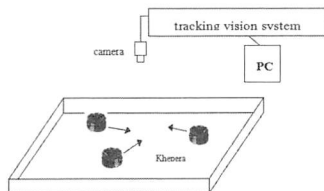


Fig.3 The experimental system

図 4 は各状態量を軸とした状態空間を設定し、その空間における状態量の推移を示したものである。周期的行動とデッドロックの顕著な特徴が現れている。いずれも、ロボット群の初期行動パターンはランダムウォークとしている。

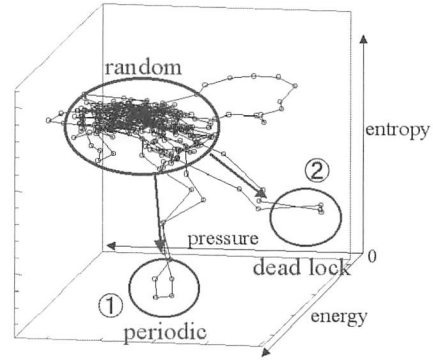


Fig.4 Transition of the state quantities

以上のような観測から特徴を分析された熱力学的パラメータのうちエントロピーを用いてこれを進化計算における適応度の計算に利用し、ロボット群の制御を行った。各々の要素は近傍 8 方向への移動行動が可能で、ある指定された領域内における他のロボット、あるいは壁などの境界との干渉に対するセンシング機能を持ち、状態-行動のマッピングが可能な自律移動ロボットとする。エントロピーを高い値から徐々に低い値へと変化させ、このエントロピー値を用いた関数により適応度を逐次計算する進化的手法により、群全体を制御する。すなわち、これにより群全体の行動の活性度を制御することが可能なことを示す。図 5 に示すようにロボット群はエントロピーの変化により活性度が制御され、小さなエントロピー値では完全に停止してしまう様子がわかる。

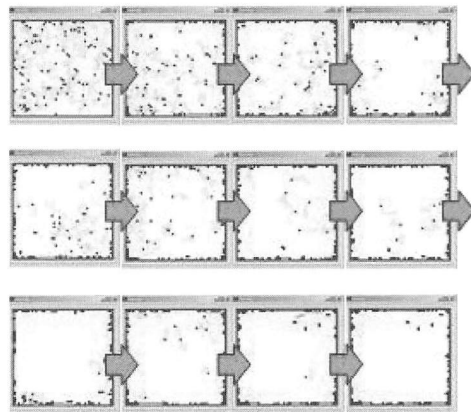


Fig.5 The experimental results

5. 結言

群システムの制御のため、挙動を定量的に観測する方法として、熱力学とのアナロジーから導いた巨視的状态量を導入し、実験によって導入した巨視的状态量の観測を実施した。実験結果より、提案した状態量によって群ロボットの挙動の判別が可能になることが示された。またこれにより、マクロな状態観測が群システムの観測において有効であることが確認された。すなわち周期的行動およびデッドロックと密接に関連していることを示した。

参考文献

Yosuke Nishida, Masahiro Kinoshita, Hiroshi Yokoi and Yukinori Kakazu, "MACROSCOPIC OBSERVATION OF MULTI-ROBOT BEHAVIOR", 10th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, 2000