感情誘起行動型ロボット群の役割分担の創発

学生員 草野 拓也* 正員 野澤 昭雄*
正員 井出 英人*

Emergent of Burden Sharing of Robots with Emotion Model

Takuya Kusano*, Student Member, Akio Nozawa*, Member, Hideto Ide*, Member

Cooperated multi robots system has much dominance in comparison with single robot system. Multi robots system is able to adapt to various circumstances and has a flexibility for variation of tasks. Robots are necessary that build a cooperative relations and acts as an organization to attain a purpose in multi robots system. Then, group behavior of insects which doesn't have advanced ability is observed. For example, ants called a sociality insect emerge systematic activities by the interaction with using a very simple way. Though ants make a communication with chemical matter, a human plans a communication by words and gestures. In this paper, we paid attention to the interaction based on psychological viewpoint. And a human's emotion model was used for the parameter which became a base of the motion planning of robots. These robots were made to do both-way action in test field with obstacle. As a result, a burden sharing like guide or carrier was seen even though those had a simple setup.

キーワード：感情モデル，感情フィールド，創発システム，自律分散，役割分担

Keywords: Emotion Model, Emotion Field, Emergent System, Decentralized Autonomous Systems, Burden Sharing

1. はじめに

近年，環境の変化に対する適応性と，様々な作業要求に対する柔軟性と，一部の故障が全体の故障に至らないという耐故障性，そして並列的に動くことによる作業効率の向上等のメリットにおいて，複数のロボットが相互作用を及ぼしあって新たな機能を生み出す創発機能に関する研究に注目が集まっている。これは，作業とロボットが一对一だったこれまでの関係から，ロボットシステムの多機能冗長性を目指し，ロボット群による形態形成に関する研究である。つまり，ロボット群がそれぞれの空間的配置を変え，その形態を変形させることで，作業や環境条件に対し，最適なハードウェアを構築することで対応することが目指されている。しかし，従来の設計者が天下りのコントローラを構築していた手法や，大域的な通信手段を使って集中的に管理する手法は，確実ではあるが制御するロボットの数が増えると通信頻度が高くなり，システムが複雑になるほど通信の停滞や信頼性の低下が生じ，効率の低下に繋がる。

これに対して，形態形成をロボット群自身が行ってしまうば，動的環境下に置いてもロボット設計者はハードウェアの再構成を行う必要がなく，ロボット内部のセンサなどの物理的構成を考慮せずに制御手法を設計することができる。このような，各ロボットの自律性を高めその局所的な相互作用によりシステム全体の挙動を創発する，いわゆるボトムアップ的に構築する手法では，ロボットの身体的特徴（センサ・アクチュエータの特性・位置・数など）や，ロボットと環境との相互作用を意識しなくてもコントローラの構築に反映され，システムの複雑化による通信の停滞の恐れも少なく，効率の上昇が期待されている^{(1)～(5)}。

マルチロボットシステムによる分散協調的問題解決は，複雑かつ大規模な問題に対し有効であると言われている。しかしマルチロボットシステムにおいて，複数のロボット群が有益的に群としての目的を達成するためには，適応的に協調関係を築きながら組織だって振る舞うことが必要である。そこで注目されるのが，高度な能力を持っていない昆虫レベルの集団行動である。例えば社会性昆虫と呼ばれる蟻や蜂などは，フェロモンやダンスといった非常に単純なコミュニケーション手段を用いることによる相互作用で，組織的活動を創発している。その結果，群としての目的を達成している⁽⁶⁾。このように蟻は化学物質によるコミュニケーションを発達させたが，人は主に言葉や身振りで意志

* 青山学院大学理工学部
〒 229-8558 神奈川相模原市淵野辺 5-10-1
AoyamaGakuin University Science and Engineering
SagamiHara Campus 5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara,
Kanagawa 229-8558

疎通する。

一方、コンピュータ技術などの発達にともなう、ロボットの機能が発達し、複雑な作業を実現できるようになってきた。それにともない、ロボットの活躍する場が広がってきた。これまで産業一辺倒であったロボットの活躍の場が、医療や福祉のような人間と共存する環境での応用へと広がりを見せている。これまでのロボットは、産業を支えるシステムとして生産性や精度といった機能を追求されていた。しかし近年、心の癒しや娯楽などを重視し、愛玩用ペットロボットや、医療や福祉の現場で活躍する介護ロボットの実現が期待されている。これらのロボットは人間と積極的に関与することが前提となるため、ロボットの感情や感情に関する研究が盛んとなっている⁽⁷⁾。

また、脳に対する理解の進展と、これまでのシステム原理の限界を背景として、最近、超システム、複雑適応系などの様々な新しいシステムの考え方が提唱されている。これらに共通する視点は、環境との動的な関係に基づいたシステムの自己組織的な変化である。すなわち、システムは固定した最適構造をつくり出すのではなく、外界に向かって開かれ、外部からの情報をキャッチしながらそれに反応して自分を変えていくというものである⁽⁸⁾。

我々は、情動に応じてタスクを選定するこれまでの情動型ロボットシステムとは異なった、感情の相互作用そのものにアナロジーを得た、まったく新しい複数移動ロボットの自律的な行動アルゴリズムを提案している。これまでに、人間の感情の相互作用に由来する誘引および忌避行動に基づく行動生成ルールを持つ感情誘起型自律移動ロボットを定義し、ロボット群の行動生成を試みてきた⁽⁹⁾。

本稿では、実機実験によって、このアルゴリズムによるロボット群の行動を評価する。具体的には、ロボット群に実験を行うフィールドを往復させ、そのときの行動の評価、また、障害物を有するフィールドでの行動の評価を行う。その結果、単純な設定下ではあるが、集中管理型のシステムでは見られないような役割分担の創発が見られたので報告する。

2. 感情モデルとロボットの特性

2.1 感情モデル 人間の感情に関する研究は、心理学の領域において盛んであり、感情の分類方法についても様々な説がある。例えばRussellは、人の感情は「快 - 不快」、「活性 - 不活性」の二次元構造からなるとしている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。同様に、Larsen&Dienerも感情のCircumplex Modelを提唱しており、これを図1に示す。このCircumplex Modelは、誘意性(快-不快)と覚醒(活性-不活性)と名付けられる次元で構成されている。第一象限の領域に「快の活性」、第二象限の領域に「不快の活性」、第三象限に「不快の不活性」、第四象限に「快の不活性」とラベリングすることができる⁽¹²⁾。快の活性は喜び、不快の活性は怒り、不快の不活性は憂鬱、そして快の不活性にはくつろぎ、というように感情語の布置ができ、人間の持つ全ての感情がこの

図1 Larsen&Dienerによる人の感情構造

Fig. 1. A circumplex model.

circumplex modelによって表すことができるとされている⁽¹³⁾。

2.2 ロボットの感情と行動モデル 一般に人間関係の醸成には相互的な愛好と嫌悪が大きく関与している⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。自分に対して好意を持つ人間には自分も好意を持つことで円滑な関係を維持することができ、嫌悪された場合には積極的に関わらない方が一定の関係を維持するには都合がよい。これは複数の人間同士の関係においても同様である。自律的に主義・主張の異なる集団が形成され全体としては一定の関係が保たれることは、現実社会からも示唆されるところである。逆に言えば、局所的な社会心理学的行動様式に基づくことにより、大域的に一定の安定性や方向性を与えることが可能であることを示していると考えられる。

以上のことをふまえ、本稿では各ロボットにCircumplex Modelに基づく二次元構造の感情モデルから「快 - 不快」の感情をパラメータとして与え、以下の感情の内部変数 Pv を用いた行動ルールを各ロボットに与えた。

- ロボットは周囲全方向に一定の視野を持ち視野範囲内の環境から情報を得る
- 視野範囲内の他のロボットが「快」であれば自らに好意を持っていると解釈し、そのロボットに接近する
- 視野範囲内の他のロボットが「不快」であれば自らを嫌悪していると解釈し、そのロボットから離反する
- 進行方向に他のロボットや障害物が存在する場合は「不快」へ推移する
- 進行方向に他のロボットや障害物が存在しない場合は「快」へ推移する

以上のルールに基づきロボットの位置ベクトル R と速度ベクトル V 、および感情の内部変数 Pv を式(1)~(4)に定める。

$$R_i(t+1) = R_i(t) + V_i(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$Pv_{ji} = \frac{Pv_j \cdot r_{ji}}{|r_{ji}|} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_i(t+1) = V_i(t) + l \sum_j Pv_{ji} \dots\dots\dots (3)$$

$$Pv(t+1) = Pv(t) \cdot (1 - R_{Pv}) + \frac{(d_R - D)}{|(d_R - D)|} \cdot R_{Pv} \cdot Pv(t) \dots\dots (4)$$

図 2 速度ベクトルの生成と感情フィールド

Fig. 2. The formation of emotion field the speed vector & emotion field.

図 3 ロボットの行動パターン

Fig. 3. Movement patterns of robots.

$R_i(t)$: ロボット i の t step 時の位置ベクトル

$V_i(t)$: ロボット i の t step 時の速度ベクトル

$Pv(t)$: t step 時の感情の内部変数

Pv_{ji} : ロボット i における視野範囲内の
ロボットの感情フィールド

R_{Pv} : 感情値変動率 ($0 \leq R_{Pv} \leq 1$)

d_R : ロボット i から最も近傍のロボットまでの
距離

l : 他のロボットによる感情フィールドの
影響度合を決める係数

r_{ij}, r_{ji} : ロボット i, j 間の距離ベクトル

D : ロボットの視野

i : 自己の ID-Number

j : 他ロボットの ID-Number

t : ステップ数

ここで、感情フィールド Pv_{ji} とは、ロボット i の視野範囲内に存在する他のロボット j の感情値による誘引性、忌避性に関わるマップである。感情の内部変数 Pv は、 $Pv > 0$ ならば快状態であり、感情フィールドはロボットから離れる向きと定義し、これを快フィールドと呼ぶ。逆に、 $Pv < 0$ ならば不快状態であり、感情フィールドはロボットに向かう方向と定義し、これを不快フィールドと呼ぶ。各ロボットが生成する感情フィールドは、その強さに比例し距離に反比例する感情フィールドの総和として各ロボットの速度ベクトルに相互作用する。その例を図 2 に示す。ロボット A の視野内にロボット B とロボット C が存在し、ロボット A は、快状態のロボット B に近付こうとする b と不快状態のロボット C から遠ざかろうとする c があり、それらの合成ベクトルである a の方向に行動する。感情フィールドにおいては、ロボット A の速度ベクトル a が快フィールドに

図 4 実験システム

Fig. 4. Experiment system.

図 5 初期フィールド

Fig. 5. Initial test field.

向いている。

2.3 行動特性 ロボット全体の行動パターンを図 3 に示す⁽⁹⁾。ロボットは A, B の 2 体表示しており、左右の矢印がロボットの進行方向を示している。

(a) 接近行動 A, B とともに快状態

($Pv_A > 0$ かつ $Pv_B > 0$)

(b) 離反行動 A, B とともに不快状態

($Pv_A < 0$ かつ $Pv_B < 0$)

(c) 追走行動 ロボット A が不快状態、ロボット B が快状態 ($Pv_A < 0$ かつ $Pv_B > 0$)

追走行動の場合、ロボット A は快状態のロボット B に接近しようとし、ロボット B は不快状態のロボット A から離反しようとするため、このような行動をする。

3. 実験

本稿は、我々が行った先行実験⁽⁹⁾の理論的内容を、実機実験により評価することを目指している。先行実験では、「快 - 不快」、「活性 - 不活性」の二つのパラメータを用いているが、本稿では、一検討として「快 - 不快」をパラメータとして実験する。

3.1 実機及び実験環境について 本稿では、ロボス (株) の分散協調自律移動ロボット (Robo-E2) を実験に用いる。本体は、直径 180 [mm] に納まるサイズである。また、無線 LAN 通信でロボット間、ホストとロボット間の通信も可能である。

グローバルカメラにはジャスタム (株) の CCD カメラ、

図 6 離反時間

Fig. 6. Estrangement time.

図 7 ロボット 2 体, $l = 0.5$ のときのロボット群の行動軌跡

Fig. 7. The behavior path of two robots at $l = 0.5$.

BASLER A300 を用いる。解像度は 640×480 pixels であり、これを高さ 2700 [mm] に設置した。実験を行うフィールドは 2200 [mm] $W \times 1600$ [mm] L である。

3.2 実験システムについて 実験を行うシステムを図 4 に示す。また実行方法を以下に示す。

- ・ロボット 1 体に対し、1 つのプログラムを用いる
- ・グローバルカメラにて撮影し、撮影枚数は 4 枚/s とする
- ・grabing program にて位置情報を取得し、感情値の変動を行う
- ・各ロボットのプログラムが位置情報と感情値を受け取り、次に移動すべき場所の計算を行う
- ・以上の計算結果を無線にて各ロボットへ送る
- ・ロボットは受信したメッセージに従い行動する

3.3 往復行動実験

3.3.1 実験方法 ロボット 1 から 2 の 2 体、ロボット 1 から 3 の 3 体を用い、往復行動実験を行う。ロボットは図 5 のようにフィールド左上に配置し、初期状態は快状態 ($P_v = 100$) とする。図 5 の START 地点と GOAL 地点にはそれぞれ快の要素が置いてあると仮定し、実験開始直後、各ロボットは GOAL 地点の快の要素を目指し、GOAL 地点到達後は START 地点の快の要素を目指し行動する。これらを目的地と呼び、各ロボットはこの目的地間の往復を繰り返す。このとき式 3 の l を 0 から 3.0 まで変化させて実験を行い、各ロボットの行動軌跡を観察する。このとき、 $R_{P_v} = 0.5$ 、実験時間は 120 [s] とする。また、今後用いる予定である測距センサの精度を踏まえた予備実験より、 $D = 170$ とする。

3.3.2 実験結果及び考察 はじめに、ロボット 2 体

図 8 ロボット 3 体のときのロボット群の行動軌跡

Fig. 8. The behavior path of three robots.

のときの互いに接触してから離反するまでに要した時間を図 6 に示す。 $l \leq 1.3$ では回避時間が 120 [s] となっているので、離反できなかったことを表している。しかし $l \geq 1.6$ では離反可能である。離反時間はほぼ同じ値となり、その平均は 1.94 [s] となっていた。

次に、ロボット 2 体のときの行動軌跡を図 7 に示す。縦軸に時間を取り、図中の $X, Y, START, GOAL$ は図 5 と対応している。このとき $l = 0.5$ である。 28 [s] でロボット 1 は GOAL 地点に向かいロボット 2 は START 地点に向かっていて、正面から衝突してしまい、それ以上行動できなくなっている。 $l = 0.5$ は図 6 より、2 体では離反できなかった値である。

続いてロボット 3 体のときの代表的な例である、 $l = 0$ 、 $l = 0.5$ 、 $l = 2.5$ における行動軌跡を図 8 に示す。 $l = 0.5$ のときは図 6 及び、図 7 よりロボット 2 体のときは衝突後離反不可能であったのに対し、図 8 の $l = 0.5$ よりロボット 3 体にする事で衝突後離反可能になった。これはロボット数を 3 台に増やすことでロボットに作用する力が増え、2 台のときには保たれていた感情フィールドの均衡が崩れたからだと考えられる。また、 $l = 0.5$ のときは $l = 2.5$ のときに比べ、各目的地に対し直線的な行動をしている。さ

図9 障害物を有するフィールドでの $l = 1.3$ のときのロボット群の行動

Fig. 9. The behavior of robots at $l = 1.3$ in test field with obstacle.

らに, $l = 2.5$ のときの方がフィールドを広く使う行動をとっていた。これは, ロボット同士の相互作用の影響が強くなったためである。その結果, 往復運動に対する効率が悪くなってしまうことが考えられる。そして $l = 0$, すなわち感情フィールドの影響がないときは, 79[s] でロボット2はSTART地点に向かいロボット1とロボット3はGOAL地点に向かおうとしているため, 正面から衝突してしまいそれ以上行動できなくなっている。これは感情フィールドの影響がないため, 相互作用が起きないからである。

3・4 障害物を有するフィールドでの往復行動実験

3・4・1 実験方法 540 [mm]W × 100 [mm]L × 30 [mm]H のブロックを十字にフィールド中央に置く。ロボット1から3の3体を用い, 3・1・1 と同様の条件の下, 実験を行う。

3・4・2 実験結果及び考察 はじめに, $l = 1.3$ のときのロボット群の行動を図9に示す。GOAL 地点へ向かい

図10 障害物を有するフィールドでのロボット群の行動軌跡

Fig. 10. The behavior path of robots in test field with obstacle.

行動を開始したロボット群の進行方向に障害物がある。そのため, ロボット2は障害物に衝突し, 不快状態に推移する(図9中0[s] ~ 8[s])。そして, ロボット1とロボット3は障害物を回避するように行動している(図9中8[s] ~ 40[s])。これはロボット2によって発生した不快フィールドから離反しようとするためである。この結果, ロボット1とロボット3はSTART地点に戻って来ることができた。このとき, ロボット2のように障害物に衝突し, 止まってしまったロボットを「ガイド (Guide)」, ロボット1やロボット3のように周囲を往復行動しているロボットを「キャリア (Carrier)」と名付ける。この様に役割分担が見られた。

次に, 代表的な例である $l = 0$, $l = 1.3$, $l = 1.7$ のときのロボット群の行動軌跡を図10に示す。 $l = 1.3$ のときは図9の通り8[s]以降, ロボット2の座標が変化していないことから, ロボット2がガイドとなり, その周囲をロボット1とロボット3がキャリアとして行動している。 $l = 1.7$ のときは, 一度ガイドとなったロボットが再びキャリアになったり, はっきりとした役割分担を見ることはできなかった。11[s]でガイドとなったロボット2が, 33[s]で再びキャリアとなっているのが一例である。これは, 相互作用

が強いいため、ガイドとなっているロボットの視野内に快状態のキャリアが存在すると、そのロボットに接近しようと行動し、障害物から脱するためである。さらに、感情フィードの影響がない $l=0$ のときは、ロボットが3体ともガイドとなってしまう、それ以上行動できなかった。

4. ま と め

本稿では、実機実験により人の感情モデルを用いたロボット群を、障害物のないフィールド、あるフィールドを往復させ、その行動を観察、分析した。その結果、単純な設定下ではあるが、集中管理型のシステムでは見られないようなガイド、キャリアといった役割分担の創発が見られ、これが環境に対し柔軟な対応が可能であるということが分かった。今後は、今回用いていない「活性 - 不活性」の導入、ロボット間通信、各種センサの取り付けによる環境情報の取得や、ロボット間の情報の共有を検討する。
(平成16年10月26日受付、平成17年1月26日再受付)

文 献

- (1) H. Asama: "Communication and Cooperation in Distributed Autonomous Robotic Systems", JSPE, Vol.57, No.12, pp.2117-2122 (1991-12) (in Japanese)
浅間 一:「マルチエージェントから構成された自律分散型ロボットシステムとその協調的活動」, 精密工学誌, 57, 12, pp.2117-2122 (1991-12)
- (2) S. Taneichi and A. Utani: "Efficiency of an Agent Group with Heterogeneous Motion Algorithms", Trans. JSCES, Vol.6, pp.137-138 (2001) (in Japanese)
種市真也・宇谷明秀:「不均質な行動パターンが混在したエージェント群の自律的協調」, 計算工学講演会論文集, 6, pp.137-138 (2001)
- (3) Y. Ikemoto, Y. Hasegawa, T. Fukuda, and K. Matsuda: "Graduated Spatial Pattern Formation of Robot Group", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.22, No.7, pp.97-105 (2004-7) (in Japanese)
池本有助・長谷川泰久・福田敏男・松田一彦:「ロボット群による段階的空間パターン形成に関する研究」, 日本ロボット学会誌, 22, 7, pp.97-105 (2004-7)
- (4) H. Asama: "Special Issue on Flexible and Adaptive Machines. Distributed Autonomous Robotic System Configured with Multiple Agents and Its Cooperative Behaviors", pp.150-151 (1995) (in Japanese)
浅間 一:「自律分散型ロボットシステムにおける通信と協調」, 日本機械学会第73期全国大会講演資料集, pp.150-151 (1995)
- (5) A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Uchikawa, and P. Eggenberger: "Autonomously Mobile Robot Control by a Neural Network with Dynamically-Rearranging Function", pp.213-218 (1999) (in Japanese)
石黒章夫・近藤敏之・内川嘉樹・Peter Eggenberger:「動的再編成機能を有する神経回路モデルの提案」, 自律分散システム・シンポジウム, pp.213-218 (1999)
- (6) H. Kawamura, M. Yamamoto, K. Suzuki, and A. Ohuchi: "The Distributed Search Algorithm Based on Cooperative Behaviors Between Multi-Agents", Proc. of MACC'97 (1998) (in Japanese)
川村秀憲・山本雅人・鈴木恵二・大内 東:「エージェント間の協調動作に基づく分散的探索手法」, Proc. of MACC'97 (1998) (in Japanese)
- (7) H. Ishihara: "A Study on Emotional Robotic System", JSME ROBOMECH 1999, 2P2-79-101 (1999) (in Japanese)
石原秀則:「心をもつロボットシステムに関する研究」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 2P2-79-101 (1999)
- (8) 伊藤宏司: 知の創発, NTT 出版 (2000)
- (9) S. Sato, A. Nozawa, and H. Ide: "Characteristics of Behavior of Robots with Emotion Model", IEEJ Trans. EIS, Vol.124,

No.7, pp.1390-1395 (2004-7) (in Japanese)

佐藤重彦・野澤昭雄・井出英人:「感情モデルを適用した自律行動型ロボット群の行動特性」, 電学論 C, 124, 7, pp.1390-1395 (2004-7)

- (10) J. A. Russell: "A circumplex model of affect", Journal of Personality and Social Psychology, Vol.39, pp.1167-1178 (1980)
- (11) J. A. Russell: "A single-Item Scale of Pleasure and Arousal", Journal of Personality and Social Psychology, Vol.57, No.3, pp.493-502 (1989)
- (12) R. J. Larsen and E. Diener: "Promises and problems with the circumplex model of emotion. In M. Clark(Ed.)", Review of Personality and Social Psychology, Vol.13, pp.25-59, Newbury Park, CA:Sage (1992)
- (13) A. Kikutani, T. Ogawa, and N. Suzuki: "A two-dimensional configuration of emotion words", Doshisha Psychological Review, No.45, pp.31-37 (1998) (in Japanese)
菊谷麻美・小川時洋・鈴木直人:「感情語の2次元空間内の配置について」, 同志社心理第45号, pp.31-37 (1998)
- (14) 遠藤利彦: 喜怒哀楽の起源, 岩波書店 (1996)
- (15) 詫摩武俊: 好きと嫌いの心理学, 講談社現代新書 (1981)

草 野 拓 也 (学生員) 2004 年青山学院大学理工学部電気電子工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在籍。

野 澤 昭 雄 (正員) 1997 年青山学院大学大学院理工学部研究科博士前期課程修了 (電気電子工学専攻)。現在、青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。

井 出 英 人 (正員) 1970 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻)。1985 年 UCLA 応用科学科客員研究員。1986 年 UCLA 脳研究所客員教授。感覚の計測, 感覚代行の研究に従事。青山学院大学理工学部講師, 助教授を経て現在, 同教授。1996 年より 2002 年まで同学部長。工博。日本生理学会論文賞, 電気学会論文賞各受賞。日本ロボット学会, 計測自動制御学会会員。