

# マルチロボットシステムにおける 自発的な協調方法を用いた動的役割割当

A Distributed Coordination Method for Dynamic Role Assignment in Multi-Robot System

柏村 洋平      上野 敦志      辰巳 昭治  
Yohei Kashimura      Atsushi Ueno      Shoji Tatsumi

大阪市立大学大学院 工学研究科 電子情報系専攻  
Department of Physical Electronics and Informatics, Osaka City University

Multi-Robot coordination enables more efficient task execution. In soccer game, dynamic role assignment has great influence on the team performance. Using wireless communication, each robot can determine its own role which is suitable for the team condition. In this paper, we suggest a distributed coordination method for dynamic role assignment, in which we use motivation gauges with dynamic thresholds. It means availability for a role that motivation gauge exceeds the threshold. The gauge changes by the robot condition, and the threshold changes by time and communication. Each player has its own gauges each of which is allocated to each role, and chooses the most suitable one from available roles. Experimental results in simulation have shown the method succeeds in distributed coordination for dynamic role assignment.

## 1. 序論

マルチロボットシステムでは通信を使用した協調行動をさせることで、個々のロボットがそれぞれに定まったタスクを独立して実行するよりも、ロボットチーム全体としてのタスクの実行を効率化できたり、単体では実行が困難なタスクが実行可能になる場合がある。

本研究では単体のロボットにおける制限が多く、協調が大きな意味を持つような問題として、RoboCup サッカー四足リーグにおけるロボットチームのサッカーゲームでの協調を研究の対象とする。

動的な役割割当の既存手法にはオークションなどがあるが、これは集中処理による方法であるため、同期や全体の把握が必要である。そこで、本論文ではそれらを必要としない分散処理による手法として、動機と抑制を用いた自発的な動的役割決定手法を提案する。

## 2. 問題設定

本研究で題材にする四足ロボットリーグでは、同種の四足ロボット4台を1チームとしてのサッカーゲームを行う。

サッカーゲームにおいて優れた結果を出すためには、フィールド上のプレイヤーが各々に適した行動をとる必要がある。例えば、全プレイヤーがボールを追いかけるとお互いが衝突しあって効率が下がったり、ゴール前にプレイヤーがいなくなり失点の可能性が高くなる。これを回避して効率よくプレイするには、ボールをとりに行くプレイヤー、こぼれ球を狙うプレイヤー、そしてディフェンスにまわるプレイヤーなどの役割分担が重要になる。そのため、各プレイヤーが自身に最適な役割を決定することが重要である。

サッカーの試合は、ボールの移動やプレイヤーの移動によって短時間で状況が一転する変化の激しい環境であり、四足リーグで使用するロボットは単眼カメラの限られた視野から情報を

得るため、単体ではこの環境の全体を把握することが難しい。そこで、無線通信を用いた情報共有が非常に重要になるが、この無線通信も通信量が500Kbpsと制限されている。また、ロボットの信頼性は高くなく、ハードウェアやソフトウェアのエラーによって予期しない停止が発生することがある。これらの理由により、役割決定には以下のような制限が必要になる。

1. 短い時間の間隔で即時の役割決定を行えること。
2. 協調のために用いる通信の量を控えめにすること。
3. ロボットの停止と復帰を考慮すること。

以降では、この3つの制限を持つ動的役割決定問題に対して、既存手法の評価や、手法の提案と考察を行う。

## 3. 関連研究

ロボットの協調に関する研究分野は大きく2つに分類される。1つは非常に多数の同種ロボットからなる群ロボットにおける協調であり、もう1つは全体の目的達成の効率を重視した同種、または異種のロボットで構成される小・中規模のロボットチームの協調である。本研究は後者に位置し、異種ロボットチームでも適用可能なアルゴリズムを提案する。ここで異種とはハードウェアの違いだけでなく、ソフトウェアの違いも含み、異種ロボットを組み合わせたチームには、それぞれの特性を活かすことによって効率よくタスクを実行できる可能性がある。

### 3.1 オークション

既存の主要な動的役割決定手法にオークションがある。オークションは、各メンバーの役割に対する適合性を見積値を1ヶ所に集め、優先順位の高い役割から評価値が最も高いメンバーに割当てる集中処理による手法である。

この手法はメンバー全体の把握を必要とする集中処理であり、全てのメンバーの評価値を取得するために同期が必要となる。そのため、通信の遅延やメンバーの予期せぬ停止の影響が大きくなる。このように、メンバーの評価値取得を待つことが制限1の即時の決定を妨げ、制限3の停止と復帰に対する堅牢さが満たされない。

連絡先: 柏村 洋平, 大阪市立大学大学院 工学研究科  
電子情報系専攻知識情報処理工学研究室, 〒 558-8585 大阪市住吉区杉本, TEL/FAX:06-6605-2778,  
yohei@kdel.info.eng.osaka-cu.ac.jp

### 3.2 動機を用いた協調

動機を用いてロボットの行動を変化させる手法がある。ここでの動機とはロボットの行動の集合から実行する行動を獲得するための機構である。

このような機構を用いて複数の異種ロボットから成るチームで堅牢な協調制御を行うソフトウェアアーキテクチャとして、ALLIANCE [1] が提案されている。ALLIANCE では、各行動の活性化度 (activation level) に基づいた行動選択を行う。活性化度は Motivational Behavior という機構により、センサー入力、ロボット間通信からの情報や内部状態から出力され、この値が閾値以上となる行動が選択される。Motivational Behavior は、その内部状態として impatience と acquiescence の2つの動機をもち、impatience は他のメンバーが実行していないタスクに対する動機を強め、acquiescence は実行中のタスクが進行しない場合に、そのタスクに対する動機を弱めて別のタスクへの切り替えを促す。このようにして、impatience は他のロボットがタスクに失敗した場合に有効になり、acquiescence は自身が失敗する場合に有効になるため、本質的に堅牢なアーキテクチャであるといえる。

このような動機を用いた協調手法は分散処理で協調を行い、様々な問題で優れた結果が示されている。しかし、本研究で題材とする動的役割決定問題においては、制限1によりタスクの進行に関わらず役割の切換を行う必要があり、これをそのまま適用することはできない。

### 3.3 感情を用いた雇用問題の解法

動機を用いたロボット制御と同様に感情を用いた協調手法がある。ここでの感情とは、ロボットの内部的な変数や関数により実装される人工的なもので、感情と行動とを結びつけることで生物が行うような行動選択を目指している。

文献 [2] では、あるロボットが別のロボットに助けを求める雇用問題において、“SHAME” という感情を用いている。ロボットチームにおける各ロボットは各々のタスクに対する数値型の SHAME 変数を持ち、この値が一定の閾値を超えるとときに雇用要求を受諾する。SHAME 変数は時間経過に伴い減少し、HELP メッセージ受信により増加する。ここで、HELP メッセージは雇用者がブロードキャストするものであり、受信したロボットは各々がそのタスクに対するその瞬間の適合性から決めた量を SHAME 変数に加える。雇用者は、受諾メッセージを受け取るまでこの HELP メッセージを繰り返すことで、最も適合性の高いメンバーが初めに名乗りを上げる。

この手法は分散処理で雇用相手を決定しており堅牢であるが、動的役割決定問題においては雇用だけではなく自発的な行動決定も必要であるため、これもそのまま適用することはできない。

## 4. 提案手法

### 4.1 概要

本論文の提案手法は、ALLIANCE のように動機を用いて自発的に役割決定を行うアルゴリズムである。基本的な仕組みは、役割に対する適合性が最も高いメンバーが最も早く役割を獲得し、他のメンバーを抑制することである。この仕組みを短い時間間隔で繰り返し用いることで、変化の激しい環境に対応でき、単体のロボットにおけるタスクの進行にかかわらず、適合性の高いメンバーが優先して役割を獲得できる。

この手法では、各ロボットに役割ごとの動機と閾値を持たせ、動機が閾値を超えた場合にのみ、その役割を獲得可能とする。複数の役割について動機が閾値を超えてもよく、その場

合、獲得可能な役割の中から実行する役割を選択できるものとする。この動機と閾値の関係から“主張”、“抑制”、“委任”の3つの作用を実現する。

### 4.2 動機の算出

動機は環境における役割の必要性和、ロボットとその役割の適合性から算出する。必要性和適合性は個々のロボットが自身の持つ情報のみから算出する。例えば、移動するボールを捕まえる役割の場合、ボール付近にチームのメンバーがいれば必要性和が低くなり、いなければ必要性和が高くなる。適合性は、ボールが自身の近くにあると高くなり遠くにあると低くなる。ただし、異種ロボットチームの場合、ボールに追いつく能力と捕獲する能力によって適合性が異なる。

### 4.3 閾値の更新

閾値は、時間経過と抑制によって動的に変化する。また、閾値はロボットの起動時に十分高い値に設定する。これによって、ある程度環境の把握を行って役割の適合性を算出できるようになってから役割を決定できる。

閾値  $T$  は時間  $\Delta t$  の経過で、次のように時間経過で減少させ、動機の値が大きいほど早く閾値が動機を下回るようにする。

$$T \leftarrow T - k(\Delta t)$$

ここで、 $k(\Delta t)$  は、閾値の減少量を決定する関数であり、最も単純な例では次のような関数が考えられる。

$$k(\Delta t) = v_0 \times \Delta t \quad (1)$$

ここで  $v_0$  は減少速度を意味する定数である。また、一定間隔の役割決定を促すために次のような減少速度  $v$  を時間変化させた二次関数が考えられる。

$$\begin{cases} k(\Delta t) = v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \\ v \leftarrow v + a\Delta t \end{cases} \quad (2)$$

$v$  は抑制された時に 0 にリセットされ、加速度を表す定数  $a$  によって時間経過で加速する。この関数を用いると閾値が放物線を描いて減少する。

役割の主張によって閾値を増加させることを抑制とよぶ。役割の主張とは、その役割の実行を他のメンバーに宣言することである。

ある役割について、他の役割からその役割に切り替えたときや、その役割を継続している間に動機が再び閾値を超えたとき、その役割の実行に移ると同時に抑制メッセージのブロードキャストを行う（以下、“主張を行う”とする）。この抑制メッセージは、その役割と他のメンバーの役割とが重複しないようにするためのものであり、メッセージにはその時点での動機の値（以下、“主張値”とする）が含まれる。抑制メッセージを受信した役割の重複しないメンバーは、抑制によってしばらくの間その役割から遠ざかる、また、役割の重複するメンバーは、自身の動機と主張値とを比較して、主張値が大きければ役割を中断して抑制され、主張値が小さければ逆に主張し返す。また、主張をしたメンバー自身も同様に抑制によって閾値を増加させ、連続して主張を繰り返さないようにする。このようにして動機の大きいメンバーが役割を獲得できる。

抑制による閾値の更新は、次のように主張値 *Assertion* と抑制値 *Suppression* の和とする。

$$T \leftarrow Assertion + Suppression$$

ただし *Suppression* は、一定時間役割を維持するための定数である。

ある役割から別の役割に切り替えるとき、それが抑制による切り替わりでなければ、切り替え前の役割について委任メッセージをブロードキャストし、他のメンバーによるその役割の獲得を早めることができる。委任メッセージを受信したメンバーは、時間更新に用いる関数を次のようにする。

$$k(\Delta t) = v_{max} \times \Delta t$$

ここで、定数  $v_{max}$  を十分大きく設定することで、時間減少量を大きくして閾値の減少を加速させる。

#### 4.4 特徴

動機と動的な閾値を用いた協調方法では、全体の把握を必要としない分散処理として動的役割決定問題に適用される点の特徴的である。また、ALLIANCE など既存の分散処理による強調方法では適用できない短い時間間隔での自発的な役割決定が可能である。

動的役割決定問題における3つの制限のうち、1に関しては、同期処理を必要としないため他のメンバーを待たずに各々のタイミングで最適な役割に切り替えることができる。2に関して通信量は、オークションの入札メッセージには全ての役割への評価値が含まれ、メンバー数に比例してメッセージサイズが大きくなるが、提案手法の抑制メッセージは、主張する役割の種類と主張値だけである。また3に関しては、このアルゴリズムはメンバー数の把握が不要であり、あるメンバーが停止した場合にも時間経過でその役割が引き継がれるし、メンバーへの参加の際にも、起動時の閾値に高い初期値を設定するだけで、他のメンバーに特別な処理が必要にならない。

## 5. 実験

提案手法の性能評価を行うためにサッカーシミュレーションプログラムを作成した。このシミュレーションプログラムでは、RoboCup サッカー四足リーグにおける環境を想定し、2700mm × 1800mm のフィールド上で、4台のロボットで構成されるチーム同士を対戦させる。以下では、このフィールド上の座標系をフィールドの中心を原点とし、X 軸を相手側ゴール向きを正としてサイドラインと平行におき、Y 軸をハーフライン上において定義する。また、ロボットの歩行速度や回転速度などは実際のロボットを動かす、計測した値を用いた。ボールの動きは、実際の環境に近い摩擦係数を用いた上で雑音を加えた。

シミュレーション環境におけるロボットの思考サイクルは20ミリ秒の間隔とし、それとは別に、環境の情報取得の間隔を50ミリ秒とした。また、協調行動のための通信データは、思考サイクル1回分の遅延で到達するものとした。

本実験における役割とは、実際のサッカーにおける役割と同じように配置を決定するものとした。ここで配置とは、ストライカー (FW) ならゴール前に、ディフェンダー (DF) ならボールとゴールの間に入るように、そして、ボール担当者 (Ball Chaser) はボールを追いかけようとしてロボットを移動させることである。本実験では、3台のロボットがこれらの3つの役割の中から自身の役割を決定する問題を扱う。残りの1台については、固定してゴールキーパー (Goalie) とした。

役割ごとの戦略は、次節で述べる人工ポテンシャル場法を用いて配置する。また、ボールがロボットの正面に近づいた場合に、ロボットがボールを掴み、相手ゴールの方向へ回転し、ボールを前方に蹴り出すという反射的な行動を実装した。

### 5.1 人工ポテンシャル場法による配置と役割

人工ポテンシャル場法 [3] は、障害物のある空間内でロボットの移動経路を決定する方法である。現実の地図上に仮想的なポテンシャル場を形成し、ポテンシャルの傾斜によって自然な経路を見つけだそうというのが基本的な考え方である。目標点のポテンシャルが最も低くなるように、また途中の障害物の場所ではポテンシャルが十分に高くなるようにしておくことで、ロボットは傾斜を下るだけで障害物を回避しながら目標点に到達できる。

実験では、文献 [4] で用いられたように、各役割ごとに別々のポテンシャル場を割り当て、役割切り替えで人工ポテンシャル場を切り替える方法を用いる。

単一の要素を基に形成するポテンシャル場を複数組み合わせることで、複数の要素を考慮したポテンシャル場が形成できる。つまり、フィールド上のある点  $(x, y)$  におけるポテンシャル  $P(x, y)$  は、単一の要素からなるポテンシャル場におけるポテンシャル  $P_i(x, y)$  の和で表される。

$$P(x, y) = \sum_i P_i(x, y)$$

具体的には、全ての役割について共通して使用するポテンシャル場に  $P_{Wall}$  と  $P_{Obstacle}$  がある。 $P_{Wall}$  はプレイヤーがフィールドから出ないようにするため、フィールドの外に出るほど高くなる急な坂を形成する。また、 $P_{Obstacle}$  は味方チームのロボットを含めて他のロボットとの衝突回避を促すために、自分以外のロボットを中心に局所的に高くなる。ゴールキーパーを除くプレイヤーは、ポテンシャル場  $P_{GoalArea}$  によってルール上禁止されている味方ゴールエリアへの進入を防ぐことができる。次に、役割ごとのポテンシャル場として、ゴールキーパーが使用するポテンシャル場  $P_{Goalie}$  は、ゴールキーパーをゴールエリア内でボールとゴールの間に体を入れるように導き、ストライカーはボールが味方側のフィールド上にある場合は、ポテンシャル場  $P_{Wing}$  によってサイドライン際で待機させ、ボールが相手側フィールドに上ある場合は、ポテンシャル場  $P_{ScoringPosition}$  によって相手ゴール前で待機させる。ディフェンダーはポテンシャル場  $P_{Defence}$  によって、ボールとゴールを結ぶ線分の中心に導かれる。そして、ボール担当者は、ボールに近づくほど低くなるポテンシャル場  $P_{Ball}$  によってボールを追いかける。

このように、ディフェンスとゴールキーパーは常にボールとゴールの間に入ろうとするため、単純にゴール方向へボールを送るだけでは得点が困難で、得点するためにはこぼれ球の素早い獲得が重要になり、協調を行い最適な配置を行うことで失点を抑えながら得点を増やす事ができる環境になったといえる。

### 5.2 提案手法の実装

提案手法の基本的な動作を確かめるために、動機の算出には役割の必要性を含めずに、その役割への適合性のみを用いた。適合性の評価値は以下のように定義される。

$$E_{BallChaser} = \frac{d_{Ball}}{v_{walk}} + \frac{\theta_{Ball}}{v_{rotate}} + b_{Ball}$$

$$E_{Striker} = d_{Opponent'sGoalLine} + b_{Striker}$$

$$E_{Defender} = \frac{d_{Team'sGoalLine}}{v_{walk}} + b_{Defender}$$

ここで、 $v_{walk}$  と  $v_{rotate}$  は、実際のロボットの歩行速度と回転速度を計測して決定した定数である。また、各役割にかかるバイアス値  $b_{Role}$  は、役割  $Role$  の評価値を正の値に調整するための定数である。 $d_x$  は、位置  $X$  までの距離を表し、 $\theta_x$  は、 $X$  を正面にするために必要な回転角度とした。ボール担当者の適合性評価値はボール位置までの到達予測時間とし、ストライカーとディフェンダーの適合性評価値は、フィールド上の座標を時間距離にしたものを用いて、それぞれ、相手ゴールに近いかわりゴールに近いかを評価した値とした。そして、この評価値に定数  $r$  をかけたものを動機とした。

$$Motivation = r \times E$$

獲得可能となった役割の選択方法については、全ロボットで固定した優先順位を設定した。この順位はボール担当者、ディフェンダーそしてフォワードの順とし、プレイヤーは常に順位の高い役割を獲得しようとする。

おおよその通信間隔を  $\tau$  として、閾値の抑制値と時間減少量の関数  $k(\Delta t)$  は、式 (1) を用いて次のようにした。

$$\begin{aligned} Suppression &= \tau \\ k(\Delta t) &= \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

以上の設定でシミュレーションを行った結果、動的な役割切り替えが確認できた。しかし、あるプレイヤーがより優先度の高い役割に切り替えたとき、切り替え前の役割を次に実行するプレイヤーの決定が遅れていることがわかった。そこで、この遅延を解決するために時間減少量の関数を式 (2) を用いて、次のようにした。

$$\begin{cases} Suppression = n \times \tau \\ k(\Delta t) = v\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \\ v \leftarrow v + a\Delta t \\ a = 2 \times \frac{n}{\tau} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $n$  はおおよその通信間隔  $\tau$  を維持して加速度  $a$  を決定するための定数である。

### 5.3 性能比較

提案手法の性能検証のため、役割を固定したチームと対戦戦を行った。また比較のために同じ環境、対戦相手でオークションを用いた場合の結果を示す。

実験で用いたオークションは、提案手法で用いたものと同じ評価関数を使用して適合性の評価値を算出し、ブロードキャストによりチーム全体に伝達させ、個々のプレイヤーが、優先度の高い役割からその評価値を比較して役割を決定する形をとった。この優先順位についても提案手法と同じものを用いた。

通信間隔を 200 ミリ秒から 1000 ミリ秒まで変化させて、それぞれについて 1 試合 20 分を 300 回試行したところ、図 1 に示す結果が得られた。横軸は平均通信量であり、縦軸は 1 試合あたりの得失点差を示す。motivation1 は、閾値の時間減少に式 (3) の一次関数を用いたものである。また、motivation2 と motivation3 は式 (4) の二次関数を用いたもので、それぞれ  $n = 1$  と  $n = 2$  とした。

通信間隔を最も短くしたときに通信量が最大になるが、提案手法ではオークション (auction) に比べ、短い間隔で通信を行った場合の性能が優れている。これは、評価値の算出から役割決定までの間にオークションでは遅延が生じるのに対して、提案手法では同期を取る必要がないので、即時の決定を行っていることに起因すると思われる。

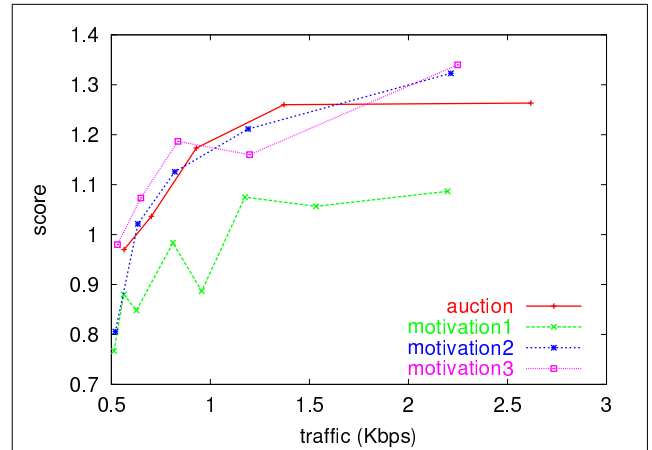


図 1: 性能比較

動的役割決定問題における 3 つの制限について、この実験では制限 1 の短い時間間隔での自発的役割決定が行えることを確認できた。また、制限 2 についても十分に小さい通信量といえる。ただし、制限 3 の停止と復帰については、この実験では考慮しなかったため、確認できなかった。

## 6. 結論

本研究では、変化の激しい環境におけるロボットチームの動的役割決定問題を対象とし、全体の把握を必要としない分散処理による解法を実現した。動機と動的な閾値を用い、強い動機を持っているほど早く役割を獲得して他のメンバーを抑制するという考えをもとにした自発的な動的役割決定手法を提案した。この手法は、既存の分散処理による協調手法では解決できない環境の変化の激しさに対応し、集中処理による手法に劣らない性能が示された。ただし、問題点としてはパラメータが増えたことによるチューニングの難しさが挙げられる。

今後の課題としては、役割の必要性に基づく同期の算出、適切なパラメータチューニング法の開発、雇用アプローチの適用、また、より大きなチームサイズや、異種ロボットチームに適用すること、そして実際のロボットチームを用いての実験などが挙げられる。

## 参考文献

- [1] L. Parker, "Alliance: An architecture for fault-tolerant multi-robot cooperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, pp. 220–240, April 1998.
- [2] A. Gage, R. Murphy, K. Valavanis, and M. Long, "Affective task allocation for distributed multi-robot teams."
- [3] 中野 栄二, 小森谷 清, 米田 完, 高橋 隆行, 高知能移動ロボティクス, pp. 206–223. 大学院情報理工学 (4), 講談社サイエンティフィク, 2004.
- [4] D. Vail and M. M. Veloso, "Multi-robot dynamic role assignment and coordination through shared potential fields," in *Multi-Robot Systems* (A. Schultz, L. Parkera, and F. Schneider, eds.), pp. 87–98, Kluwer, 2003.