

F-043

マルチエージェントシステムにおける知識の均質性と取得できる情報の関係[¶]Relationship between Knowledge Diversity and Available Information
in Multi-agent Systems井上 寛康^{†‡}
Hiroyasu Inoue高玉 圭樹^{‡§}
Keiki Takadama下原 勝憲^{†‡}
Katsunori Shimohara片井 修[‡]
Osamu Katai

1. 序論

さまざまな問題の条件（環境の条件やエージェントの知覚・行動の能力の条件など）に応じてマルチエージェントシステムをどう設計するかという指針は、重要な研究課題である。このような設計指針に向けてアプローチしている先行研究があり、どのような条件のときに非均質なエージェントが有効になるかの仮説が提案されている [Balch 98, Potter 01].

これらの研究においては、マルチエージェントシステムで重要な役割分担をいかに効果的に行えたかという観点で評価をしている。しかしながら、その役割分担に必要と思われる他のエージェントの情報の有無を区別していない。マルチエージェントシステムの挙動はインタラクションの内容によって大きく変容するものであるが、インタラクションにおける入力としての他のエージェントの情報についてこれまでに十分整理されていないため、本論文で着手する。その原初的な情報として他のエージェントの位置情報を取り上げる。

以上を踏まえ、「他のエージェントの位置情報を知ることができるか」という条件によって、均質あるいは非均質なエージェントはどのような役割分担の性能を持つかを検証する。これまでに上記の検証を2体のエージェントで行ってきたが、本論文では3体から5体までについて検証する。マルチエージェントシステムにおいて2体で確認された現象が3体以上でも確認できるかという検証は、一般的に認識されるように重要である。例えばゲーム理論の原典 [Neumann 80] においても、2体のエージェントの議論の後、それより多い n 体のエージェントについて議論を直接続けず、3体のエージェントに章を設けて議論していることから見てとれる。また、本論文が扱うのはエージェントの均質と非均質であり、特に非均質の複雑さに影響を与えるエージェントの数について詳しく検証することは意味がある。

本論文は以下のように構成される。2章では本論文の背景、3章では本論文で焦点をあてる条件について詳述する。4章では実験の枠組み、5章では実験の設定と結果を示す。6章で結果を吟味したのち、7章で結論を述べる。

[†]ATR NIS[‡]京都大学大学院情報学研究科[§]東京工業大学大学院総合理工学研究科[¶]本研究は通信・放送機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」により実施したものである。また本研究の一部は、財団法人大川情報通信基金研究助成の支援によって行われた。

2. 背景

2.1 均質性

本節ではマルチエージェントシステムの均質性の定義を述べる。マルチエージェントシステムの均質性は、均質であるか非均質であるかのことであり、これを決める要因は、エージェント個々が持つ特定かつ共通の性質である。そして、システムに含まれるエージェント全てについてその性質が同じであるとき、その性質において均質であるとする。そして、上記以外の場合はその性質において非均質であるとする。

エージェントの均質・非均質を決める要因となる性質は (1) 機械的構造の差異および (2) 知識の差異に分けられる。本論文では機械的構造は均質であり、知識に差異がある場合を扱う。本来であれば、機械的構造の均質性の議論を含めるのが望ましいが、機械的構造の均質性について一般性のある議論は難しいため (2) から着手する。

どのような均質性にするか、すなわち均質と非均質どちらで設計すべきかはエージェント設計の際の選択の1つである。そのような設計の指針は、ある条件における均質・非均質それぞれの性能の見通しに基づくといえる。

2.2 役割分担と均質性

本論文の役割分担は、エージェント間の適切な行動選択と定義する [Takadama 98]。つまり、タスクの解決に複数エージェントの適切な行動が必要であるとき、これを成し遂げるのがエージェントの役割分担である。例えば、エージェント 1・2 が行動 A・B を過不足なく担わなければならないときに、エージェントの 1・2 が行動 A を選択することがないようにしなければならない。このような行動選択を役割分担と呼ぶ。したがって役割分担にあたって、複数のエージェントはそれぞれ異なる行動を同時にとらねばならないことがある。

役割分担を行うには2つ方法があると考えられる。1つはエージェントが役割分担に必要な情報を稼動中に得て行動選択する方法であり、ここでは「状況に基づく役割分担」と呼ぶ。もう1つはそのような情報を得られない中で行動選択する方法であり、「暗黙的な役割分担」と呼ぶ。状況に基づく役割分担のためには、他のエージェントの情報を把握しなければならない。次節で挙げる従来研究においては、本節のような考え方を欠いており本論文と区別できる。

2.3 従来研究

問題の条件とエージェントの均質性の関係として、非均質なエージェントが有効な条件が取り上げられ、これに対してさまざまな仮説が提案がされている。以下でそれらについて述べる。

非均質なエージェントが有効な役割分担を果たすため

の条件として、タスク解決に複数のエージェントを必要とする場合 [Balch 98] が提案されている。しかしこれは適切とはいえない。例えば2体のエージェント間でサッカーのパスを行う場合、一方がパスをし、もう一方が受けるという役割分担が必要である。これは複数のエージェントを必要とするタスクであり、上の主張によれば均質なエージェントでは有効に役割分担できない。しかしながら、自分の方がボールに近いと判断したエージェントがボールに近づき、遠いと判断したエージェントはパスを受けることで、有効な役割分担は可能である。このように、エージェントがボールに近いか遠いかを判断して行動を変えるような知識をもっていれば、エージェント同士が同じ知識であっても状況に応じて役割分担できる。これは上の主張に反することがわかる。

非均質なエージェントが有効な役割分担を果たすための条件は他にも提案されており、タスク解決に複数のスキルを必要とする場合 [Potter 01] がある。この研究では羊追いタスクが用いられている。これはエージェントとして犬・狐・羊がいるときに、犬は狐から羊を守りつつ柵に追い込むというタスクである。このとき、犬の知識は均質と非均質どちらがよいのかを議論している。犬が2匹、羊が1匹いるとき、狐がいなければ犬は均質と非均質で同等に有効であり、一方、これに加えて狐が1匹いるとき、犬は非均質の方が有効としている。すなわち、羊を追う行動だけが必要ならば均質でよく、狐を追い払うという行動が増えると犬は非均質でなければならないという主張である。ところが、この研究では犬に学習させており、毎回同じ状況で開始している。これは初期値に依存して犬の行動に傾向が現れているというだけである。そうではなく、学習の有無に関わらず、前述のサッカーのパスの例と同じように、犬が狐に近いか遠いかを判断して行動を変えるような知識をもっていれば、犬同士が同じ知識であっても状況に応じて役割分担できる。このようなエージェントは非均質にならない。

以上の研究には他にもう一点指摘すべき点がある。それはいずれの研究においてもエージェントは学習を行っており、獲得された知識が均質か非均質かを議論している点である。ここで指摘すべきなのは、学習を利用してエージェントの知識が均質になったからといって、その条件において均質あるいは非均質なエージェントでよいか定かでないということである。なぜなら、学習アルゴリズム自体が均質や非均質を引き起こしていないとはいえないためである。本論文では学習後に実際に現れた均質・非均質を扱うのではなく、学習なしで条件と均質性の関係を検証する。したがって、ありうるすべてのエージェントの知識を検討することになる¹¹。これにより、エージェントの数の増加により検証しなければならないエージェントの知識の空間は爆発する。これへの対策については後述する。

3. 検証する条件

本論文では「他のエージェントの位置情報が役割分担に必要なとき、それを知ることができるか」という条件によって、均質と非均質のエージェントはどのような役割

¹¹この手法では当然のことながら離散値で表現された知識のみが対象となる。

分担の性能を持つか検証する。上の条件は、詳しくは2つに分けられ、(1) 状況に基づく役割分担のためには、他のエージェントの位置情報を知らねばならない、という問題の条件の下で、(2) 他のエージェントの位置情報を知ることができるか・できないかという2つの問題の条件を別々に検証する、ということである。(1) のような条件の下で、他のエージェントの位置情報を知ることができるならば、状況に基づく役割分担ができるが、他のエージェントの位置情報を知ることができないならば、暗黙的な役割分担をせざるを得ないと考えられる。

4. 実験の枠組み

4.1 サッカーシミュレータ

本論文では、実験にロボカップシミュレーションリーグで用いられているロボカップサッカーシミュレータ [野田 02] を用いる。サッカーにおける役割分担とは、パスを出す・受けるに始まり、より組織的なプレスディフェンスなど数多く挙げられるが、ここでは本論文の条件に沿って、エージェントがフィールドにおけるポジションを適切に保つということを取り上げる。すなわちエージェントにとっての役割分担とは、他のエージェントの位置との兼ね合いで適切な位置を選ぶことである。

4.2 エージェントの持つルールセット

各エージェントの行動規則は条件部・行動部からなるルールの集合（以下、ルールセット）で表すものとする。以下でルールの説明を行う。ただし、フィールドの長い方（ゴール間の距離）を x 方向、短い方を y 方向とすると、以下の説明に含まれる前や後という表現は x 方向のみを考慮している。また、中間点は x 方向・ y 方向両方の中間点である。さらに、他のエージェントというのはここではチームメートのことを指し、相手のチームのエージェントは含まない。以降ではここまで述べてきた他のエージェントと同じ意味でチームメートを用いる。

< 条件部 >

チームメートが前にいるか: チームメートがエージェントより前にいるかの条件である。したがって2値である。

チームメートが後にいるか: チームメートがエージェントより後にいるかの条件である。したがって2値である。

< 行動部 >

ボールに向かう: エージェントはボールのある位置へ最大の速さで接近する。ただし蹴れる範囲 ($3m^{**}$) にボールがあるときはゴール方向へ最大の力で蹴る。

ボールとゴールの中間に向かう: エージェントはチームが守るべきゴールとボールの中間点に接近する。またはすでにその位置にいるときは維持する。ただし $25m^{**}$ 以内にボールがあるときは「ボールに向かう」と同じ行動をとる。

このようなルールセットの設計にすることで、ボールに向かうエージェントとボールとゴールの中間に向かうエージェントが常にいる状態が望ましいことになる。す

^{**}3m は予備実験によって任意に決めた値である。

^{**}25m は予備実験によって任意に決めた値である。なお、フィールドの大きさは長さが 105m、幅が 68m である。

なわち、対戦するチームが両方ボールに向かってくれば、それらエージェントよりも前方へちょうどパスのように後方のエージェントから前方のエージェントへボールが蹴られるので有利となる。また、対戦チームが両方ボールとゴールの中間にいれば、前方のエージェントが常にゴールへ蹴りこもうとするので有利となる。つまり、このようなルールセットの設計にすることで、お互いの位置を前後にずらすことが望ましくなり、お互いの位置を知ることで状況に応じた役割分担が可能である。このような設計にした理由は、本論文が扱う条件「他のエージェントの位置情報が役割分担に必要」を実現するためである。

4.3 相手チーム

実験の対象となるチーム（以下実験チーム）は設計しうる全てのルールセットについて検証されるが、一方でその相手チームは常に固定とする。そうしなければの実験チームのさまざまな条件間での役割分担の性能の比較ができないためである。固定するのはルールセットの組み合わせとチームメートの位置情報を知ることができるかである。

相手エージェントを B.1 と B.2 とすると、B.1 のルールセットにおいてはすべての行動がボールに向かうであり、B.2 はすべての行動がボールとゴールの中間に向かうとなっている。B.1 は常に攻撃、いわゆるフォワードの行動をとり、B.2 は常に守備、いわゆるディフェンダーの行動をとる。前述したように、実験チームが両方ボールに向かってきた場合は、それらエージェントよりも前方へちょうどパスのようにディフェンダーからフォワードへボールが蹴られるので有利となる。また、実験チームが両方ボールとゴールの中間にいる場合は、フォワードが常にゴールへ蹴りこもうとするので有利となる。したがって実験チームもこの相手チームと同じように役割分担したときに互角のゲームになる。なお、このルールセットの組み合わせは非均質に該当する。

また相手チームはチームメートの位置情報を知ることができない。ただし相手チームのルールセットは上述のように非均質であり、暗黙的な役割分担を行うことができる。

5. 実験設定と結果

5.1 実験設定

前章におけるルールセットの内容より、1体のエージェントが持ちうるルールセットの種類は $2^4 = 16$ となる。この理由は、エージェントは全ての条件部に対して行動を決めなければならないためである。

本論文においては、他のエージェントの位置情報を知っている・知らないという各条件で、これらのすべてのルールセットの組み合わせについて実験せねばならない。2.1 で定義した均質性より、非均質であれば異なるルールセットを持つが、均質であれば同じルールセットを持つ。各エージェントの持ちうるルールセットは 4.2 で述べたとおり 16 種類であるので、2体の場合、均質であれば 16 通り、非均質であれば 120 通りとなる。これまでの研究では、2体におけるこれらのすべての組み合わせを検証した。しかしながら、これは 3 体以上では非

常に多くの組み合わせとなる。例えば、3 体の非均質でも 800 通りである。したがってこのままでは 3 体以上の実験は困難であるため、本論文の検証内容を阻害しない形でルールセットの組み合わせの数を減らした。以下でこれについて述べる。まず問題の条件によって 2 つの場合に分ける。

他のエージェントの位置情報を知らない場合

- 前にも後ろにもチームメートがいないという情報のみを得られるので、エージェントの行動は 2 つのみである。すなわち 1 体のエージェントが持ちうるルールセットは 2 種類である。

他のエージェントの位置情報を知っている場合

- 前にも後ろにもチームメートがいないという情報は得られない。
- チームメートが前にも後ろにもいる際には、数の多い方のみを情報として得る。また、同数のチームメートが前後にいるときは後ろにチームメートがいるとする。これにより、前にも後ろにもチームメートがいるという情報は得られない。
- さらに「チームメートが前にいる場合にボールに行く、後ろにいる場合にボールとゴールの間に行く」というルールは無駄であるので省く。なぜならすでにより多くチームメートがいる方に近づくためである。
- 以上から 1 体のエージェントが持ちうるルールセットは 3 種類とできる。

これにより検証しなければならないルールセットの組み合わせが大きく減少できる。例えば 3 体で他のエージェントの位置情報を知らない場合、均質で 3 通り、非均質で 12 通りである。この妥当性は検証する必要があるため、2 体での実験において、ルールセットの減少前と減少後の結果を比較する。これは次節で示す。

本論文で評価の対象とする役割分担の性能として、得失点を用いる。一般的には得失点はサッカーの結果でしかないが、4.2 のエージェントの設計からわかる通り、位置を巧くとることができるエージェント、すなわち役割分担の性能が高いエージェントの方がより高い得失点になることがわかる。したがって、本論文では得失点を役割分担の性能の指標とする。

実験では、上述のルールセット減少の妥当性確認のための 2 体を含んで 5 体までのエージェントで実験した。その際、各ルールセットの組み合わせについて相手チームとゲームを行い、その得失点を取得した。各ゲームは 5 分間ずつであり、各ルールセットの組み合わせについて 30 回のゲームの得失点差の平均を求めた。

5.2 実験結果

実験の結果を示したものが図 1 および 2 である。両図においては横軸がエージェントの数、縦軸はルールセットの組み合わせのうち最大の得失点差である。特に横軸の左端においては、2 体の実験のうちルールセットの数を減らす前の結果である。それ以外の結果は減らした後の結果であり、2 体の結果においては減らす前とほぼ同じ結果がでている。これらグラフからわかるように、他のエージェントの位置情報を知らないときは、最大の得失点差において非均質なルールセットが均質を上回る

ている。また他のエージェントの位置情報を知っているときは、最大の得失点差において非均質と均質なルールセットで差がない。そしてこれらはエージェントの数に影響を受けないことがわかる。

最大の得失点差

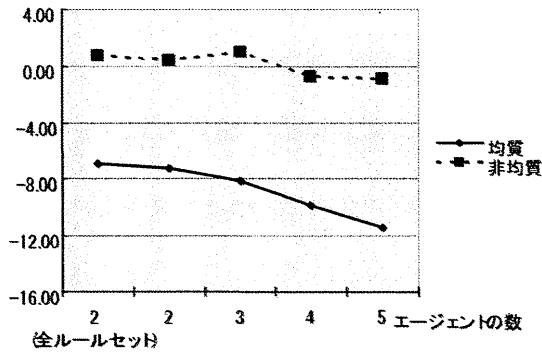


図 1: 位置情報を知らないときの最大の得失点差

最大の得失点差

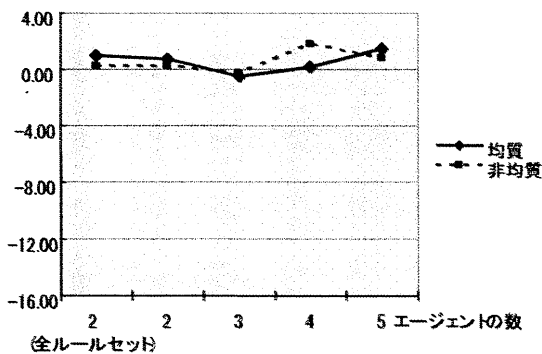


図 2: 位置情報を知っているときの最大の得失点差

6. 議論

前章でルールセットの減少を行ったが、2体のエージェントの結果の比較より、減らした方法は妥当と考えられる。

実験の結果からわかるように、均質と非均質においては2体より多いエージェントにおいても2体と同様の傾向となることがわかった。その原因は以下であると考えられる。2体の結果からわかるように、均質なエージェントが役割分担するためにはお互いの情報を知った上で必要な行動をとらねばならない。ところが、一般的に3体以上では一部のエージェントの間で役割分担がなされて他のエージェントがそれを知らず、均質なエージェントでは全体での役割分担に至れないということが起こる。本論文の実験で、3体以上の場合においても2体と同様の傾向が現われたのは、(他のエージェントの位置情報を知っているときに) そういった一部のエージェント間の役割分担は起きず、常に全体で情報を共有していたためと考えられる。上記のような理由で、役割分担における均質と非均質の最高の性能に着目した場合、他のエー

ジェントの位置情報を知ることができない場合は非均質がよく、知ることができる場合は均質と非均質で差がないという命題は、ローカルな役割分担が行われないうちエージェントの数によらず成り立つということがわかったといえる。

7. 結論

本論文では「他のエージェントの位置情報が役割分担に必要なとき、それを知ることができるか」によって、均質と非均質のエージェントはどのような役割分担の性能を持つか検証した。ここでの均質・非均質は機械的構造ではなく知識の差異であった。役割分担における均質と非均質の最高の性能に着目した場合、他のエージェントの位置情報を知ることができない場合は非均質がよく、知ることができる場合は均質と非均質で差がないということは、エージェントの数に依存しないで成り立つとわかった。これが成り立つのは、エージェント間でローカルな役割分担が行われないうちである。

参考文献

- [Balch 98] Balch, T.: *Behavioral diversity in learning robot teams*, PhD thesis, Georgia Institute of Technology (1998)
- [Inoue 03] Inoue, H., Takadama, K., Shimohara, K., and Katai, O.: 知識の非均質性を持つマルチエージェントが有効となる条件, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2003, pp. 208-215 (2003)
- [Neumann 80] Neumann, J. and Morgenstern, O.: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press (1980)
- [Potter 01] Potter, M. A., Meeden, L. A., and Schultz, A. C.: Heterogeneity in the coevolved behaviors of mobile robots: the emergence of specialists, in *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence 2001*, pp. 1337-1343 (2001)
- [Takadama 98] Takadama, K., Hajiri, K., Nomura, T., Shimohara, K., and S.Nakasuka, : Organizational Learning Model for Adaptive Collective Behaviors in Multiple Robots, *Advanced Robotics (The international journal of the Robotics Society of Japan)*, Vol. 12, No. 3, pp. 243-269 (1998)
- [野田 02] 野田 五十樹: ロボカップシミュレーションリーグ, ゲーム・プログラミングワークショップ 2002, pp. 22-27 (2002)