チームワークへの鍵:合意形成の理論

本村 陽一 (電子技術総合研究所)

アブストラクト: 複数のエージェント間で効率の良い協調動作 (チームワーク) を実現するためにはエージェント間で合意を形成することが重要である。この合意形成のメカニズムを理論的に解析するために確率的な枠組が有効である。ここでは合意を注目する点の一致 (焦点:Focal Point) としてとらえ, これを確率的な選択の一致という観点で定式化し評価する方法を紹介する。また, 詳細な理論的解析のためにもシミュレーターを用いた実験的評価が重要であることを述べ, そのための汎用シミュレーターを用いた研究例を紹介する。

1 はじめに

マルチエージェントによる協調動作を実現するためには目的とするゴール, サブゴール, 動作対象の選択などについて合意形成の仕組みが必要である。特に実環境と同様, 動的で絶えず変化する環境においては (1) 不確実, 不完全な入力のもとで, (2) 限られた時間的制約の中でも的確に動作することが望ましい。

このような悪環境のもとでもロバストに機能する協調動作のために, 通信を用いないで情報共有を行う枠組として焦点 (Focal point)[1] が最近重要視されてきている [2][3]。これは自律的に注視点を選択するための基準として, 問題の設定 ・その場の状況 ・文脈などにより顕著に他と区別されうる解と定義されている。特に人間にとっての焦点は社会的な場の状況, 構図から規定されてくるものとして様々な社会的局面についての調査研究を行った例がある [1] [4]。 例えば任意の整数を一つ選ぶ時, どの数字がもっとも良く選ばれるか」, 「打ち合せなしで仲間と落ち合うためにどの場所に行くべきか」, などである。また最近では焦点をマルチエージェントの枠組で応用するための試みとして, 複数の属性を持つ対象から一つだけ選び出すというタスクを属性値の Rareness(珍しさ) と Extreamness(とる値の極端さ) という直観的指標を用いて行った例 [5] もある。

AI 標準問題として提案されているサッカーゲームなどのタスクにおいてもこうした焦点を通じた合意の形成は本質的に重要な課題であり, ここでは焦点を解析するための理論的, 実験的アプローチをいくつか紹介する。

2 合意の定式化

エージェントがとりうる選択の集合を $\{S_1, S_2, \cdots, S_i\}$ とする。今, エージェント a とエージェント b がそれぞれ S_a,S_b を選択し, 選択を一致させる ($S_a = S_b$) ことを合意の形成とする。完全な情報が得られる場合, 各エージェントが同じ入力に対し全く同じ決定的 (非確率的) アルゴリズムを用いて選択を行えば合意が成立することは明らかである。しかしより一般的に視野が限定されるなどして完全な観測が期待できない場合, エージェントごとに得られる入力が異なるために決定的なアルゴリズムでは選択が一致しない時は確率 1 で合意は成立しなくなる。このため情報の欠損などに対してロバストでない。また繰り返し的な試行により学習を行う場合にも各状態でどれだけ修正が必要であるかといった評価を行うことが難しい。一方, 確率的なアルゴリズムの場合には一定時間内の試行による頻度情報から選択が一致する確率を得ることができ, 学習のための状態評価が可能である。以上の理由から確率的な定式化を採用する。

さて確率的に選択が行われる場合にエージェント a が各選択を行う確率集合を

$$P^a = \{p_1^a, p_2^a, \cdots, p_n^a\}, (\text{ただし} \sum_{i=1}^{n} p_i^a = 1)$$

とすると, これは a に関する確率分布である。エージェント a, b の選択が一致する確率は次式で表される。

$$P^a \cdot P^b = \sum_{i=1}^{n} p_i^a \cdot p_i^b \qquad (1)$$

したがって合意形成のためには式 (1) を大きくすることが目的となる。

この値の上限については評価することができる [6]。式 (1) が最大となるのは明らかに確率分布 $P^a = P^b$ の時であり, $\{p_i\}$ の標本分散,

$$\sigma^2(P) = \sum_{i=1}^{n} p_i^2/n - (\sum_{i=1}^{n} p_i/n)^2$$

を用いて,

$$\sum_{i=1}^{n} p_i^a p_i^b \leq \sum_{i=1}^{n} p_i^2 = n(\sum_{i=1}^{n} p_i/n)^2 + n\sigma^2(P) = \frac{1}{n} + n\sigma^2(P)$$

が容易に示せる。したがって$\sigma^2(P)$ が最大となる分布[1] P を a,b が共に選べばよい (例えば $P = \{1, 0, 0, \cdots\}$)。ただしこれは Pに何の制約も課さない場合の上限値であるから, 一般には問題に依存する様々な制約のもとでの一致確率を評価する必要がある。

3 シミュレーションによる解析

式 (1) において, P_a と P_b は二次元空間内での対象の配置, ロボットの初期配置, 行動アルゴリズムなどに依存

[1] 分散最大の確率分布 P という意味ではない。

して定まるものであるから分布形を事前に得ることは必ずしも容易ではない。だが問題に依存した特定の構造が明らかになればうまく式 (1) を近似的に評価が可能になると期待できる。そこで問題構造を忠実に再現して精度の高いサンプリングを行うためのシミュレーションが重要になる。

3.1 汎用シミュレーター MARS

協調行動は様々な問題のサブタスクになっていることが多く, 例えばサッカーゲームで学習のための報酬がゴールの得点によってしか与えられないと、ゴールに至るまでの間になされたパスワーク、守備陣の協調的なディフェンス、などの評価を与えることは難しい。そこで協調動作の学習のために我々は, 任意に報酬やペナルティを与えたり、ロボットに任意のセンサを搭載できるなどの拡張的機能を持つ汎用マルチロボットシミュレーター MARS も開発しており、ftp でも公開している [7]。

3.2 仮想的協調問題を通じての実験的評価

さて合意の形成のみを切り出し検証するために次のようなタスクを考える [8]。

エージェントとして二次元平面内のロボットを考える。このロボットは有限の視野を持ち回転, 移動を行う。平面内にはロボット以外にも処理対象 (物体) が存在していて複数のロボットが同じ対象を発見, 接近し, 同時に触れた時, 協調動作によって対象が処理されたとみなす。

またこの問題において, 対象を 「パスワーク」, 「相手ボールの奪取」などとするとサッカーゲームのサブ問題とみなすこともできる。(この場合には対象の発見はその処理が可能な状況認識, 接近は処理可能な状況への接近ということになる。協調動作が成功した場合に報酬を与えることにするとロボットは行動を通じてチームワークを学習することができる。)

ロボットが動き回り対象 kに触れた回数を m_kとする。全対象に関する観測頻度で正規化したもの

$$p_k = \frac{m_k}{\sum_{k=1}^{n} m_k}$$

を観測確率として, $P = \{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$ を考えることができる。もしロボットが観測頻度に比例して対象を処理する場合には式 (1) はその集団の協調動作の平均的なパフォーマンスを表すことになる。

次に MARS を用いて経験共有の有効性を検証する例を示す。視野に他のロボットが存在していた時に物体を観測した場合に他のロボットとの経験を共有したものと考えて、それ以外は観測回数に数えないことにする。ロボット 3 台を適当に動作させ単純に各物体 (全 20 個) を単純に観測した場合の頻度確率を図 (1), 経験共有した観測についての頻度確率を図 (2) に示す。

この時の 3 台のロボットの選択の一致確率は
単独での観測:$P^a \cdot P^b \cdot P^c = 0.264 \times 10^2$,
経験共有の場合:$P^a \cdot P^b \cdot P^c = 0.283 \times 10^2$

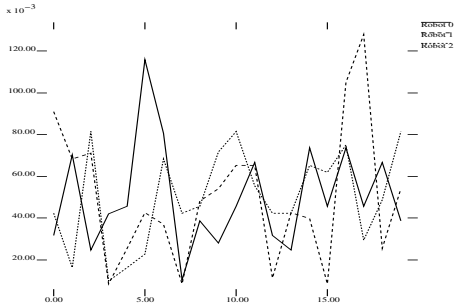

図 1: 単純な物体観測の頻度確率 (横軸:物体番号)

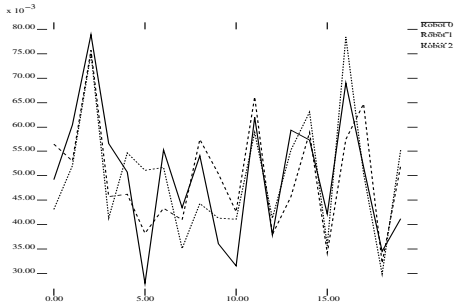

図 2: 経験共有の場合の頻度確率

となり, わずかではあるが経験を共有した観測を用いた方が選択一致確率が向上している。

4 まとめ

合意形成を目的として選択の一致性を評価する確率的な定式化を行い, これを解析するための理論的, 実験的アプローチを紹介した。このような手段により協調動作を実現するための手法, 学習方法を提案し, 検証していくことが今後の課題である。

参考文献

[1] Schelling, T.C.:"The Strategy of Conflict", NewYork, Oxford University Press,(1963).

[2] 大沢:" 焦点に基づくエージェント間の整合, 第 4 回インテリジェントシステムシンポジウム, pp.33-36(1994).

[3] 國吉:" 実世界エージェントにおける注意と視点", 人工知能学会誌, vol.10No.4, pp.507-514,(1995).

[4] 松原望:" 新版 意志決定の基礎", 朝倉書店 (1985).

[5] Fenster, M. Kraus, S., J.S.Rosenschein:"Coordination without Communication: Experimental Validation of Focal Point Techniques", ICMAS-95, (1995).

[6] Sugden, R.:"A Theory of Focal Point", The Economic Journal, 105(May), pp.533-550(1995).

[7] 電総研 MARS 開発グループ: mail-to: mars@etl.go.jp

[8] 本村 他:" 複数自律ロボット環境における Focal Point の形成" , 日本ソフトウェア科学会 MACC'95 (1995). http://www.csl.sony.co.jp/person/nagao/macc95/