

協調計算と協調アルゴリズム

小堀紀子 生天目 章  
防衛大学校 情報工学科

3C-8

1 はじめに

本発表では、マルチエージェントの協調計算と協調アルゴリズムについて論じる。個々のエージェントは、自己の効用を最適にする個人的合理性を追求した自律的行動をとる。そのようなエージェントの利己的な行動が競争社会の源泉である。利己的なエージェントの社会において、他のエージェントとの相互作用を通して私的な効用関数の追求を自己規制することにより、社会的に最適解が実現されるための枠組みを協調計算モデルとして定式化する。各エージェントは、自己の効用関数を最適にする行動を選択する一方で、他のエージェントとの相互作用を認識しながら、その挙動を予測し、それに基づいて自己の行動を自律的に調整する。各エージェントの自律的な行動調整プロセスを協調アルゴリズムとして定式化する。また、マルチエージェントによる協調計算の適用例を示す。

2 競争問題と協調問題の定式化

個々のエージェントの効用関数を自己の行動戦略と他のエージェントの行動戦略の連続関数として次式で定式化する。

$$U_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = U_i(x_i, x(i)) \quad (1)$$

競争原理に基づく行動、即ち自己の効用関数を最適にする行動を、特に個人的合理性に基づく自律的行動と定義する。また、社会を構成するすべてのエージェントの個人的合理性を満足する各エージェントの自律的行動の組を競争的均衡解として定義する。競争的均衡解は、各エージェントの限界効用関数を同時に均衡させる解、すなわち、

$$\partial U_i(x_i, x(i)) / \partial x_i = M_i(x_i, x(i)) = 0 \quad (2)$$

を満足する解である。

社会全体に定義される共通の効用関数を最適にする各エージェントの行動を社会的合理性に基づく行動と定義する。また、そのような行動の組を協調的均衡解（パレート効率）として定義する。協調的均衡解を実現する社会的合理性に基づく各エージェントの行動を協調的行動と定義する。社会を構成する各エージェン

トの効用関数の総和、

$$\sum_{i=1}^n U_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (3)$$

を社会の共通の目的関数とすると、それを最適にする協調的均衡解の条件は、

$$\partial S / \partial x_i = \partial U_i / \partial x_i + \sum_{j \neq i} \partial U_j / \partial x_i = 0 \quad (4)$$

を同時に満足する解として与えられる。(2)と(4)式より個人的合理性を満足する条件と社会的合理性を満足する条件とは、一般には一致しない。また、各エージェントは、競争的均衡解と比較し協調的均衡解の方がより高い効用を獲得することができる。しかしながら、そのような協調的均衡解は自動的に決まらない。したがって、そのような協調解が、各エージェントの学習プロセスに基づき、いつか実現されるかについて分析する必要がある。

3 協調計算と協調アルゴリズム

各エージェントの自律的な行動の下で、社会的に最適である協調的均衡解が求めることができる計算モデルを、特に協調計算と定義する。また各エージェントが自己の行動を調整することにより協調的均衡解に収束する計算プロセスを協調アルゴリズムと定義する。個人的合理性の条件と社会的合理性の条件とが一致しない問題において、各エージェントは自己の効用関数を修正する方法を考える。各エージェントは、修正された自己の効用関数を最適にするような行動戦略をそれぞれ独自に追求することにより、協調的均衡解が実現できる[1]。

以下では、社会の一員として新しく修正された効用関数の下で自律的な行動をとるための枠組みを協調計算と協調アルゴリズムとして定式化する。エージェント社会においては、各エージェントは自己の行動戦略が他のエージェントに及ぼす影響度を考慮する必要がある。そのような影響度は、各エージェントのシャドー係数  $\lambda_i(x(i))$  として次式で表す。

$$\lambda_i(x(i)) = - \sum_{j \neq i} (\partial^2 U_j / \partial x_j \partial x_i) x_j \quad (5)$$

シャドー係数に基づく協調アルゴリズムの概要を Fig.1に示す。協調アルゴリズムは、シャドー係数に自己の行動戦略を乗じて修正した効用関数を、それぞれのエージェントが最適にするための自律的行動を決定するためのプロセスとして定式化する[2]。

Cooperative Computation and Cooperative Algorithm  
Noriko KOBORI & Akira NAMATAME  
Dept. of Computer Science, National Defense Academy,  
Yokosuka, 239, Japan

即ち,

$$\text{If } M_i\{x_i, x(i)\} < \lambda_i\{x(i)\} \text{ then } x_i := x_i - \delta_i$$

$$\text{If } M_i\{x_i, x(i)\} > \lambda_i\{x(i)\} \text{ then } x_i := x_i + \delta_i$$

以上の協調アルゴリズムは協調的均衡解に収束する。また、各エージェントが自己の行動戦略が他のエージェントに及ぼす影響度を考慮しない、即ちシャドー係数をゼロとして上記のアルゴリズムで協調した場合には、個人的合理性の下での競争的均衡解に収束する。

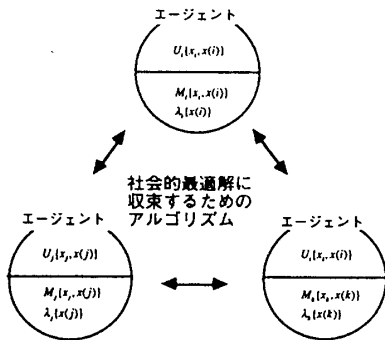


Fig.1 協調計算アルゴリズムの概念図

#### 4 応用例

応用例として、マルチエージェントによる知識の供給問題を取り上げる。ある問い合わせQに対してエージェント  $K_i$  が供給する知識の量を

$$u_i = s(K_i, Q)x_i \quad (6)$$

で表す。特に、各エージェントが知識供給の依頼に際して、他のエージェントの行動戦略を全く考慮しない場合にエージェント集団が供給する知識量は次式で与えられる。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n s(K_i, Q) \quad (7)$$

次に、エージェントの効用関数を知識の供給量の比率  $x_i$  を行動戦略として次式で定式化する。

$$U_i\{x_i, x(i)\} = x_i(a - \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j) - cx_i \quad (8)$$

競争的均衡解は、次式の行列方程式の解として与えられる。

$$(B + B_1)x = a - c \quad (9)$$

ここで、 $B$ は(8)式の効用関数の相互作用係数  $b_{ij}$ ,  $i, j=1, 2, \dots, n$ , を要素とする行列である。また、 $B_1$ は  $b_{ii}, i=1, 2, \dots, n$ , を対角要素とする対角行列である。同様に協調的均衡解は、次式の行列方程式の解として与えられる。

$$(B + B^T)x = a - c \quad (10)$$

次に効用関数の相互作用係数  $b_{ij}, i, j=1, 2, \dots, n$ , がすべて同じ係数  $b_{ij}=1, i, j=1, 2, \dots, n$  の場合及び対角要素が  $b_{ii}=1, i=1, 2, \dots, n$ , 非対角要素が  $b_{ij}=b(0 < b < 1), i, j=1, 2, \dots, n$  の場合について競争的均衡解と協調的均衡解を求め、マルチエージェントの協調計算モデルに基づく知識の供給量の比較を行う。前者の相互作用係数がすべて同じ場合は、各エージェントの供給する知識は同質で、知識の需要側からはどのエージェントから知識が供給されているか識別することができない場合である。後者の場合は、各エージェントの供給する知識は混質で、需要側からはどのエージェントから供給されているか識別することができる場合である。各エージェントの供給する知識が混質の場合、競争的均衡解においてエージェント全体が供給する知識の量は次式で表される。

$$S_2 = \sum_{i=1}^n s(K_i, Q)/(1 + b(n-1)/2) \quad (11)$$

同様に混質な知識の場合、協調的均衡解においてエージェント全体が供給する知識量は、次式で表される。

$$S_3 = \sum_{i=1}^n s(K_i, Q)/(1 + b(n-1)) \quad (12)$$

競争的均衡解より協調的均衡解の方がエージェント全体が供給する知識量は少ない。すなわち

$$S_3 < S_2 < S_1 \quad (13)$$

競争的均衡解は、他のエージェントとの相互作用を考慮しながら、自己の効用を最適にするための個人的合理性を追求することにより実現される均衡解である。一方、協調的均衡解は各エージェントが他のエージェントとの相互作用を考慮し、自己の効用関数を修正して、それを最適にするための個人的合理性を追求することにより実現される均衡解である。いずれも各エージェントは他のエージェントとの相互作用を考慮することにより、自己の供給量を自発的に規制するため、エージェント全体が供給する知識量は他のエージェントの行動を全く考慮しない場合に比べ少ない。つまり、情報の洪水を防ぐことができるのである。

#### 参考文献

[1]生天目, 小堀: 分権型エージェント社会における協調行動の創発, マルチエージェントと協調計算論文集(1995)  
 [2][Kurose 89] Kurose, J., Simha, R.: A Microeconomic Approach to Optimal Resource Allocation in Distributed Computer Systems, IEEE Tran. on Computers, Vol.38, 1989.