

分散資源割当における共生的アプローチ： 通信網の資源管理を目指して

桑原和宏 石田亨

NTTコミュニケーション科学研究所

619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2

e-mail: {kuwabara | ishida}@cslab.kecl.ntt.jp

あ ら ま し マルチエージェントシステムにおける分散資源割当に対してミクロ経済の考え方を応用した共生的 (*symbiotic*) アプローチを提案する。マルチエージェントシステムにおいて、各々のエージェントがそれぞれゴールを持ち、それらのゴール間に競合関係などの相互作用がある時、それらの競合を解決し、システム全体で適当な振舞いを保ちつつ、各エージェントのゴールを達成することを我々は協調均衡化と呼んでいる。分散資源割当はこのような協調均衡化の一つの典型的な例である。共生的アプローチはエージェント間の陽の競争 / 協調を伴わない特徴を持ち、エージェント間の通信量の削減を目的としている。通信網におけるパス設定をモデルに全体の資源の使用率を均等化するというグローバルな目的関数を持つ分散資源割当問題を考え、シミュレーションを通して共生的アプローチの有効性を示す。

和文キーワード 分散資源割当, ミクロ経済的アプローチ, 協調均衡化, 通信網管理

Symbiotic Approach to Distributed Resource Allocation: Toward Communication Network Resource Management

Kazuhiro Kuwabara Toru Ishida

NTT Communication Science Laboratories

2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 JAPAN

e-mail: {kuwabara | ishida}@cslab.kecl.ntt.jp

Abstract This paper presents a microeconomics-based *symbiotic* approach to a distributed resource allocation problem in a multi-agent system. When an agent has its own goal and there is interaction among agents' goals, it is necessary to resolve possible conflicts and achieve agents' goals while an overall desired state is realized. We call this kind of process *Coordinated Balancing*. A distributed resource allocation is a typical example. The proposed symbiotic approach neither involves explicit cooperation nor competition among agents. The main objective of this approach is to reduce communication between agents. This approach is applied to a distributed resource allocation problem modeled on path assignments in a communication network, where the global objective is to equalize the resource usage ratios. Simulation results indicate that the proposed symbiotic approach is effective.

英文 key words Distributed resource allocation, Microeconomic approach, Coordinated balancing, Network Management

1 はじめに

ハードウェア、ソフトウェアの技術の進歩に伴い、分散計算システムが注目されつつある。特にエージェントと呼ばれる自律的に振舞う複数の計算主体が一つのシステムを構成するマルチエージェントシステムは今後の新しい計算システムの一つとして興味深い。この種の多くは Open System [2] として特徴付けられるであろう。そこでは外界の環境が時時刻々と変化の中で、分散システムが、非集中型のコントロールのもとで連続して動作し続ける。

このようなマルチエージェントシステムにおいては、個々のエージェントの振舞い方とシステム全体の挙動の関係を同定するのが難しく、エージェントがどのように行動戦略を決めていけば、システム全体として所望の振舞いが得られるかわかっていないところが多い。

さらに各々のエージェントは全体の情報を持っておらず、不完全な情報のもとに行動を決定していかなければならない。したがって全体を見渡した制御は難しく、エージェントはできるだけ自律的に行動することが要求される。自律的に行動することにより、エージェント間の通信量を削減することが期待できる。さらにエージェントの行動を記述する場合にも基本的には自分のところだけに注目して考えれば良いので、モジュラリティの向上も期待できる。

エージェントの行動ルールを設計する際において、エージェントがそれぞれのゴールを持ち、それらのゴール間に競合関係などの何らかの相互作用がある時、それらの競合を解決し、システム全体で適当な振舞いを保ちつつ、各エージェントのゴールを達成する必要が出てくる。このようなプロセスを我々は協調均衡化とよんでいる。

ここではマルチエージェントシステムにおける資源割当を取り上げ、ミクロ経済の考え方に基づいた共生的 (*symbiotic*) アプローチ [4] を提案する。分散資源割当問題は協調均衡化の典型的な問題の一つとして考えることができる。このアプローチの目標はエージェントの自律性を向上させ、エージェント間の通信を減らすことである。共生的という名前はエージェントの目的達成が直接、間接に他のエージェントの振舞いに依存していることによる。

まず、従来から提案されてきたミクロ経済的アプローチを説明し、本論文で提案する共生的アプローチを述べる。次にここで考えるマルチエージェントシステムの定式化を与える。さらに分散資源割当問題の定式化を与え、それが、マルチエージェントシステムにどのようにマッピングされるかを示す。通信路のパス設定という例題を取り上げ、エージェントの戦略の例を示し、シミュレーション結果を述べる。最後に今後の課題を述べる。

2 ミクロ経済モデルに基づくアプローチ

Open system を実現する上で、市場経済の考え方が有効であるとの議論がある [6]。特にシステムにおける種々の

資源 (例えば CPU パワー、記憶領域) の割当のためのメカニズムを考えると、市場経済のアイデアは直観的に適合する。すなわち、人間の経済活動は大規模な資源割当を中央集権型の制御に委ねることなく実現していると考えることができる。分散システムの中に仮想的な市場を構成し、資源割当を市場経済のメカニズムに委ねることによって分散コントロールのもとで資源割当を実現できるのではないかというわけである。以下、ミクロ経済モデルに基づくアプローチとしてエージェント間で陽に協力する協力的 (*cooperative*) アプローチとエージェント間で陽の競争を導入する競争的 (*competitive*) アプローチを概観する。そしてここで提案する共生的 (*symbiotic*) アプローチを説明する。

2.1 従来のアプローチ

2.1.1 協力的アプローチ

[3] ではミクロ経済学の考え方を分散システムにおけるファイルの配置という一種の資源割当問題に応用している。ネットワーク中のノードにファイルを分散して配置する時にファイルへのアクセスにおける通信コストとディレイの和というグローバルな利得関数を考え、その値を最小にするような問題を扱っている。全体の利得関数は各ノードにおけるファイルの配置量の関数になる。ノードはこの関数を知っていて、現在の自分へのファイルの割当量におけるグローバルな利得の限界利得 (*marginal utility*) を計算し、その値を他のノードと通信しあう。(ここでの利得関数は各ノードにおける利得関数の和になっている。) ノードは通信された限界利得より平均値を計算し、平均より高い限界利得のノードにはファイルの割当を増やし、低いところにはファイルの割当を少なくする。このサイクルを繰り返すことによって全体として最適なファイル配置を実現している。しかし、そのため、すべてのノードが協力的に振舞うことが前提となっており、しかも、各ノードが自分へのファイル割当量の全体の利得関数に与える影響が計算できることが前提となっている。

また、限界利得をエージェントの間で陽に通信する必要があり、エージェント間での通信量の増加を招く。さらにすべてのエージェントは決められたルールで動くことが要求されており、制御は分散されているものの、エージェントが自律して動いているとはいえない。そのため、エージェントの行動ルールを記述する際にも個々のエージェントの行動だけに注目すればよいわけにはいかなくなる。

2.1.2 競争的アプローチ

[1] では経済主体が全体の振る舞いは考慮に入らず、競争的 (*competitive*) に自分の利得のみをあげるように振る舞うことで全体としても資源管理がうまくいくと主張している。ここでは分散システムにおける CPU 時間の分配を例題に取り上げている。分散システムに入ってくる一つのジョブと各プロセッサがエージェントと呼ばれる経済主体となる。ジョブにはあらかじめいくらかのファンドが

与えられ、与えられたファンドを用いてジョブはプロセッサから CPU 時間と通信路を購入し、ジョブが実行されるようにする。この時、ジョブは与えられたファンドの中でできるだけ安く実行しようとしたり、また、サービス時間ができるだけ短くなるようにするなどの各自の行動基準にしたがって行動する。一方、CPU 時間と通信路の価格はオークションによって決められ、プロセッサは自分のもうけをできるだけ最大にするように行動する。各エージェントは利己的に行動するにもかかわらず、いわゆる“見えない手”に導かれて全体としては効果的な資源配分が実現できるということである。

エージェントが利己的に振舞うにも関わらず、ロードバランスをしないものに比べ、全体として良いロードバランスが実現できることをシミュレーションを通して示している。この時の評価尺度はジョブの平均の待ち時間を短くすることで、どのエージェントも平均の待ち時間を下げるように考慮するわけでないにもかかわらず全体としてうまくいっているところに大きな特徴がある。

さらに、[7]では同様な考え方を分散システムにおいてコンカレントに実行されるプログラム群に対して適用し、適切な資源割当が実現できることを報告している。特にジョブに与えるファンドをコントロールすることにより、ジョブの間のプライオリティをコントロールできることを示している。

また、LAN で結合されたワークステーション間でタスクのスケジューリングを行なうシステムにも応用されている [5]。この *Enterprise* というシステムでは DSP (Distributed Scheduling Protocol) が定義されている。クライアントのマシンはタスクのプライオリティと共に入札を募るリクエストを流す。それに対し、サーバマシンは予想される終了時間を書いた入札を出す。ここでプライオリティのつけ方を変更することで、全体としても異なった振舞いを実現できるという特徴がある。

これらの競争的アプローチではエージェントは利己的に振舞い、グローバルな目標に対する考慮はないといっている。したがってエージェント自体の振舞いを記述しようとする時にもエージェントのこともだけを考慮に入れば良いので簡易になるという利点が生まれる。

しかし、オークションを通じて価格を決定していくというプロセスにはオーバーヘッドが伴うことが予想される。単なるオークションの実行に伴う通信量、計算量のオーバーヘッドだけではなく、例えば資源を買うために入札する時、有効な入札を計算するためには結局は他のエージェントの動きを予想する必要がある。そのための隠れたオーバーヘッドが無視できないのではないかと考えられる。

2.2 共生的アプローチ

以上のアプローチではエージェント間で明示的な協調が要求されたり、また、明示的な競争が行なわれている。さ

らにエージェント間で限界利得を通信しあったり、入札など明示的な通信が伴う。

これに対してここで提案する共生的アプローチではこのような明示的な通信は一際ない。価格はオークションを通して決めるのではなく、売り手のエージェントが必要を見ながら決定する。これらの価格は買い手のエージェントに対して何らかの方法で伝えられる。買い手のエージェントは提示された価格をもとに何をどれだけ購入するかを決定する。

したがってこのアプローチではエージェント間の通信は基本的には買い手の価格の提示と売り手の注文だけという極めて簡素化されたものになる。

問題はこのようなエージェント間の通信が少なく制限された状態において、エージェントが自分の行動ルールにしたがって振舞った時、全体としても果たしてうまく振舞うかどうかということである。

以下、戦略について考える前にマルチエージェントシステムの形式的な定義を与え、さらにここでの例題である分散資源割当のモデルとそれがマルチエージェントシステムにどのようにマッピングされるかを述べる。

3 マルチエージェントシステム

ここではマルチエージェントシステムを次のような構成要素からなるものとする。

- エージェントの内部状態 I 。
- エージェントが満たすべき制約 C 。
- マルチエージェントシステム全体のグローバルな目的関数 O 。
- エージェント間でやりとりされる情報、割り当てられる資源などの物 (goods) G 。
- エージェントの戦略 S 。

の組 $\langle I, C, O, G, S \rangle$ で表現されるとする。

ここで戦略とはエージェントの内部状態と持っている物から次の内部状態と他のエージェントに渡す物への関数として考えることができる。

4 分散資源割当問題

4.1 資源割当

m 個の資源 r_i ($1 \leq i \leq m$) を n 個のアクティビティ a_j ($1 \leq j \leq n$) に分配すると考える。ここで資源 r_i に対してその総量を N_i で示す。

アクティビティ a_j に関して資源の割当に関して次のような条件を満たす必要がある。

- 割り当てることのできる資源の組合せがあらかじめ決められている。この組合せをサブアクティビティと呼び、 $s_{j,k}$ ($1 \leq k \leq l_j$) で表す。これはアクティビティの目的を達成するためにいくつかの資源の組を割り当てて必要があるという状況に対処するためである。

- 各サブアクティビティ $s_{j,k}$ の単位量に対して必要な資源の種類、量が与えられている。これを $m \times l_j$ の資源割当行列 C_j で表す。この行列の各要素 $c_{j,i,k}$ はサブアクティビティ $s_{j,k}$ の単位量に対して必要な資源 r_i の量を示す。
- 確保するサブアクティビティの合計量 R_j が与えられている。アクティビティ a_j においてサブアクティビティがそれぞれ確保する量を $d_{j,k}$ とする。サブアクティビティの間の配分を表すベクトル $\mathbf{d}_j = (d_{j,1}, \dots, d_{j,l_j})^T$ を考えると次のようになる。

$$R_j = \sum_{k=1}^{l_j} d_{j,k}$$

各アクティビティが各資源に対して割当を要求する量を表すベクトル $\mathbf{x}_j = (x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{m,j})^T$ は $(x_{i,j})$ はアクティビティ a_j に割り当てられる資源 r_i を示す)

$$\mathbf{x}_j^T = \mathbf{d}_j^T C_j$$

となる。

全体の資源の割当を $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ で表すとすると (w_i) は資源 r_i の割当 (総) 量を示す)

$$\mathbf{w}^T = \sum_{j=1}^n \mathbf{x}_j^T = \sum_{j=1}^n \mathbf{d}_j^T C_j$$

となる。

全体の目的関数 F_0 は資源の割当量 w_i と総量 N_i の関数で与えられる。例えば、各資源の使用率 u_i の分散を最小にするとすれば、

$$u_i = \frac{w_i}{N_i}$$

$$F_0 = \frac{\sum_{i=1}^m (u_i - \bar{u}_i)^2}{m} = \frac{m \sum_{i=1}^m u_i^2 - (\sum_{i=1}^m u_i)^2}{m^2}$$

として F_0 を最小にすることになる。

通信ネットワークにおけるネットワークのパスの設定問題 (図1) はこのような資源割当問題として考えることができる。すなわち、通信ネットワークのノード間のリンクを資源として考え、アクティビティをあるノードから別のノードにいたるパスを確保するとする。確保すべきパスの容量と、パスをどのようににはたらきよいか、その候補はすでに与えられているとする。この候補がサブアクティビティに対応する。問題はいくつかある候補の中からどのように全体の要求を満たすようにパスに割り当てるかであり、その時、全体のリンクの使用率をできるだけ均等化するという問題である。

4.2 マルチエージェントシステムへのマッピング

以上述べた資源割当をマルチエージェントシステム $\langle I, C, O, G, S \rangle$ にマッピングすることを考える。

まず、各資源に一つのエージェントを割り当てる。すなわち、そのエージェントは資源の状態 (総量 N_i 、割当量 w_i) を内部状態として持つ。また、それぞれのアクティビ

ティに対して一つのエージェントを割り当てる。このエージェントはサブアクティビティの割当行列 C_j 、確保すべき資源の量 R_j 、サブアクティビティの配分ベクトル $\mathbf{d}_j$ を内部状態として持つ。

また、制約としてアクティビティのエージェントは与えられた資源を確保しなければならないという制約がある。ただし、ここでは、資源の量は十分あって全体の要求を満たす資源の割当は容易に求まるものとする。

また、グローバルな目的関数としては資源の使用率の分散をできるだけ小さくすることになる。

次にエージェント間で交換される情報を考える。ここでは資源に対して価格を想定する。例えば、この価格は共通なブラックボードに書かれ、アクティビティはそれをいつでも参照できるとする。アクティビティの割当要求は遅れなく正確に資源に伝わることを仮定しよう。ただし、資源同士、アクティビティ同士の間には通信が行なわれないものとする。したがって、アクティビティ間、資源間で明示的な協調を実現するのは難しいことになる。

このような仮定のもとでエージェントはどのような戦略をとったら良いであろうか。

5 エージェントの戦略

ここでは資源 (売り手) が価格が決め、その値をもとにアクティビティ (買い手) が資源の割当、具体的にはサブアクティビティの配分 $\mathbf{d}_j$ を決定することを一つのサイクルとして、それを繰り返すことにする。したがって売り手にとっては需要から価格を決定する戦略、買い手にとっては価格から資源の割当を決定する戦略を決める必要がある。

5.1 売り手の戦略

売り手 (資源) は割当要求という需要を見ながら、需要が多ければ価格を上げ、需要が少なければ価格を下げるという戦略をとるのが一般的であろう。具体的には資源はアクティビティからの要求の総和をとり、使用率を計算し、それに基づいて価格を再設定する。この使用率が需要に相当する。具体的には次のサイクルにおける価格 $p_i(t+1)$ は資源の使用率におけるなんらかの基準 u_s と現在の使用率 $u_i(t)$ との差をもとに現在の価格 $p_i(t)$ から次のように計算する。

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \beta(u_i(t) - u_s)p_i(t)$$

ここで β は価格に関する感度定数である。

5.2 買い手の戦略

アクティビティはここでは買い手に相当する。グローバルな目的関数があることを考えると、次のような両極端な戦略を考えることができよう。

- 利己的 (*selfish*) 戦略: アクティビティは価格という指標をもとに自分の資源の要求量を調整し、できるだけ安い資源を使うようにする。すなわち、利己的戦略ではエー

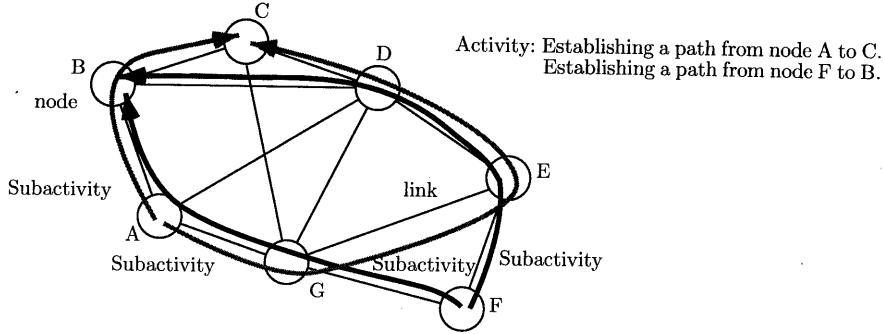


図 1: 通信ネットワークの例

ジェントが利己的に振舞おうというものである。しかし、入れなどの明示的な競争は伴わない。単に安いところ安いところへと割当を変化させるだけである。

- 調和的 (harmonious) 戦略: アクティビティはできるだけ安く資源を使うようにするものの、グローバルな目的関数を考慮に入れるように振舞う。調和的戦略においてはグローバルな目的関数がわかっていて、それが最適になる方向に自分の行動を律していこうとするものである。ただし、アクティビティ同士の間での通信は行なわれないので、完全な協調は実現できず、ヒューリスティクスに基づいた振舞いをすることになる。

以上述べた戦略の具体的な実装の例を以下述べる。

5.2.1 利己的戦略

アクティビティはサブアクティビティごとの単位価格を計算する。その中から価格が一番安いサブアクティビティを選ぶ。それが p 番目のサブアクティビティ $s_{j,p}$ とする。この時、感度定数 α があり、 α が 1 の時はそのアクティビティで確保すべき資源をサブアクティビティ $s_{j,p}$ で確保することにし、 α が 0 の時は現在のサブアクティビティの配分は変化しないものとする。具体的には $s_{j,p}$ の割当量 $d_{j,p}$ を

$$d_{j,p}(t+1) = (1 - \alpha)d_{j,p}(t) + \alpha R_j$$

とする。 $d_{j,k}(k \neq p)$ に関しては合計で $\alpha(R_j - d_{j,p}(t))$ だけを $d_{j,p}$ へ移動させることになる。これは、価格の高いサブアクティビティから順番に $d_{j,p}$ が所定の量になるまで移していく。

5.2.2 調和的戦略

アクティビティは資源の価格に基づいて資源の購入割合を決定する。ここでは、まず、サブアクティビティごとの単価を計算し、その単価の逆数の比でサブアクティビティの配分を計算する。すなわち、資源の価格ベクトルを $p(t)$ 、サブアクティビティごとの単価を表すベクトルを $\eta_j(t)$ とするとサブアクティビティの割当 $d_{j,k}(t+1)$ は次のようになる。

$$\eta_j(t) = C_j p(t)$$

$$\mu_{j,k}(t) = \frac{1}{\eta_{j,k}(t)} \quad (1 \leq k \leq l_j)$$

$$d_{j,k}(t+1) = \frac{R_j}{\sum_{k=1}^{l_j} \mu_{j,k}(t)} \mu_{j,k}(t)$$

5.3 結果

ランダムに作った 10 個の問題について資源の使用率の分散がどのように変化するかを測定した。この時の問題の条件は次のとおり。

- 資源の数は 100。アクティビティの数も 100。
- 各アクティビティは五つのサブアクティビティを持ち、各サブアクティビティは一つの資源を使うと仮定した。この時、一つのアクティビティの中では同じ資源は使わないものとした。
- 資源の量は 1 から 10,000 までの一様分布とした。
- 各アクティビティは 500 の資源の確保するとした。したがって平均的な資源の使用率は 0.1 になる。

ここでは最初の資源 r_i の価格 $p_i(0)$ は資源の量 N_i の逆数に比例して決めた。すなわち、

$$p_i(0) = \frac{1,000,000}{N_i}$$

また、最初のアクティビティの割当要求は両者の戦略ともサブアクティビティの価格の逆数の比で決めた。

また、資源の価格に関しては相対値が意味を持つので、便宜的に平均価格が 1,000,000 になるように各サイクルごとに相対値化した。また、価格、資源の割当要求は整数値に丸めた。

利己的戦略の場合の資源の使用率の分散の結果を図 2 に示す。ここでは感度定数 α をパラメータとして変化させた。この時、価格の感度定数 β は 1.0 としている。また、 $u_s = 0.1$ としている。この値は予想される資源の使用率の値から決めた。また、比較のため調和的戦略の結果をグラフに含めてある。

また、価格の感度定数 β を変化させた時の調和的戦略の資源の使用率の分散の変化の結果を図 3 に示す。

さらに買い手 (アクティビティ) 全体の支出の削減の様子を調べるために流通の割合 (Circulation Ratio, CR) を

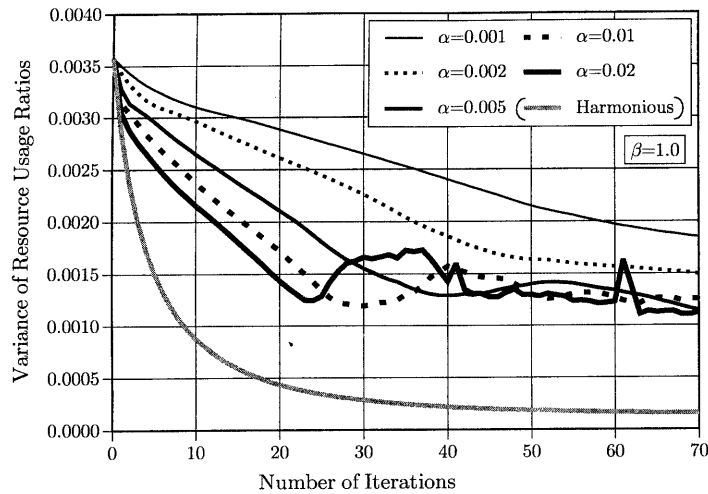


図 2: 資源の使用率の分散の変化 (利己的戦略)

測定した。これは

$$CR = \frac{\text{資源の割当量} \times \text{価格の合計}}{\text{資源の総量} \times \text{価格の合計}} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i w_i}{\sum_{i=1}^m p_i N_i}$$

で表される量である。この流通の割合が高い時、買い手は資源に対してより高い金額を払っていることになる。利己的戦略において感度定数 α を変化した時の結果を図 4 に示す。比較のため調和的戦略の結果もあわせて示してある。

これらの結果から次のようなことが言える。

- 利己的戦略は資源の使用率の分散の変化の振動を起こすが、調和的戦略は起こさない。利己的戦略の場合、感度定数 α が大きいと資源の使用率の分散の変化が振動を起こす。特に分散の値がある程度のところに落ち着いた所で振動を起こす。これは価格の安いところに資源の需要が集まり、すると、その価格が上昇し、また、元の方へ需要が戻るということを繰り返すためと思われる。利己的戦略に比べ、調和的戦略の方は使用率の均等化がよりスムーズに達成できている。これは調和的戦略では資源の要求の突然の変化が起きにくいからと思われる。グラフには示していないが利己的戦略において α の値が 0.001 と小さい時、使用率の分散の値が 0.0005 と小さい値まで到達する。さらに興味深いことに分散の値が 0.0005 に達すると資源の使用率の分散の変化のグラフは周期が 100 繰り返し程度のゆっくりとした振動を示した。これはこの振動現象が利己的戦略に固有のものであることを示していると言えよう。
- 振動の幅を小さくするためには感度定数 α を小さくする必要があるが、その時の流通の割合は大きくなる。感度定数 α が小さい時は振動を小さくすることができる。しかし、その場合、資源の使用率の分散の収束は遅くな

る。さらに α が小さい時、流通の割合は大きくなる。これは α が小さい時、利己的戦略はアクティビティの支出を全体として少なくすることには貢献していないことになる。全体の支出を抑えるためには α は大きくなる必要があり、その時は資源の使用率の分散の変化は振動を起こす。

- 利己的戦略は買い手にとって有効な戦略である。感度定数 α が大きい時、利己的戦略は資源の使用率の分散の変化において振動を示す。しかし、その時の流通の割合は調和的戦略に比べ、わずかながら少なくなっている。これは買い手の立場からみると α の大きい利己的戦略は流通の割合を減らす、すなわち、買い手全体の支出を減らすという意味で買い手にとって有効な戦略である。
- 調和的戦略はグローバルな視点からみると有効な戦略である。調和的戦略は利己的戦略に比べ、資源の使用率の均等化という観点においては有効に働いている。このことはグローバルな目的関数への寄与のヒューリスティクスが有効に効いていることを示している。さらに価格の感度定数 β が大きいほどより使用率の均等化が早く達成されることがわかる。

5.4 課題

ここでのシミュレーションの結果は共生的アプローチの興味深い性質の一端を示していると考えられる。次のステップとして次にあげるような課題が考えられる。

- 通信のオーバーヘッドの定量的評価: 共生的アプローチの目的の一つはエージェント間の通信量の削減ということである。従来の経済的アプローチと通信量の定量的な評価が必要である。特に通信のオーバーヘッドはエージェント間のネットワークのトポロジに依存する部分があるので、評価にあたってはこのようなトポロジを考慮に入れ

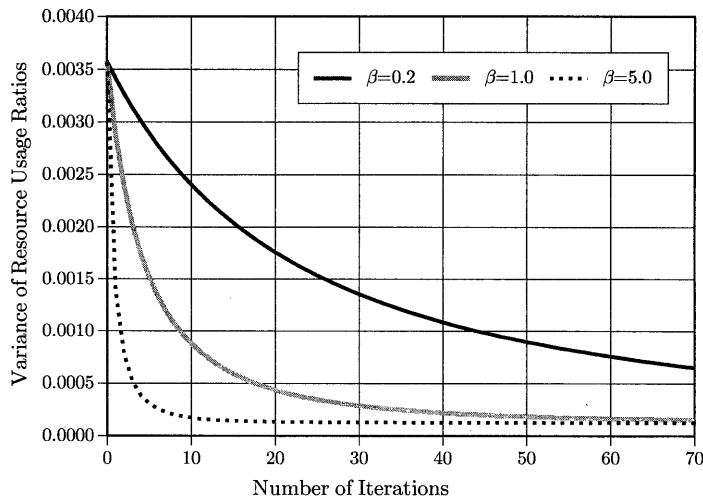


図 3: 資源の使用率の分散の変化 (調和的戦略)

る必要がある。

- 全体の目的関数の各エージェントの目的関数への統合: 最良の戦略とはプログラムのしやすさと全体から見た時、良い性能が達成できることである。今回の例では調和的戦略は単純なヒューリスティクスでグローバルな観点からも初期の目標を達成しているといえる。しかし、そのヒューリスティクスをエージェントの個々の目的関数の観点から説明するのは難しい。すなわち、グローバルの目的関数をどのようにエージェントの目的関数へ対応づけるかが課題となる。
- 資源の枯渇や不確かな情報に対処できるようなエージェントの戦略の拡張: ここでの実験では資源の量は十分あって割当要求が実際の量を超えることはない、また、価格の情報に誤りがなく、遅れなくエージェントに伝わるという仮定をおいた。このような仮定は第一次近似としてなりたっても、実際のシステムへの応用を考えると制約が大き過ぎる。エージェントの戦略を拡張して資源の不足、必ずしも正確でない価格情報にも対応できるようにする必要がある。
- 実際の応用の特徴を反映させるような価格システムの活用: 価格は人間の直観にあったモデルを提供してくれる。例えば通信ネットワークのパス設定の問題ではパス再設定のためのコストを考慮に入れる必要があろう。価格を導入すれば、再設定のコストを価格に反映することにより、再設定のためのコストを特別に扱う必要がなくなり、回線のコストの中に含めて考えることができる。

また、確保すべき通信路についても重要なものとそうでないものとに分けることができよう。例えば重要な通信路はある経路を通る回線を必ず確保したいとか、また、危険分散の意味でできるだけ多くの回線に分けて確

保したいという要求があった時、通信路の設定要求に対して異なるファンドを与えることで解決できることが期待できる。すなわち、通信路要求間のプライオリティをアクティビティに対して与えるファンドの額に対応させることにより、通信路のプライオリティ付けも同じ枠組の中で処理することができる。

価格は特にエージェントの行動を記述するルールを書く時にはわかりやすいヒューリスティクスを与えてくれる。また、価格を導入することで、種々の多様なことが価格という統一的な指標のもとで考えることが可能になる。

6 おわりに

ここでは分散資源割当問題における共生的アプローチを提案した。そこではエージェントは明示的な協調 / 競争をせず、自分が得られる情報をもとに自律的に振舞いを決める。エージェント間での限界利得の通信や、入札などは行なわれない。従来のミクロ経済的アプローチと比較して、共生的アプローチは、エージェント間の通信量を削減することが期待できる。

ここではこのような共生的アプローチの研究の第一歩として、通信ネットワークにおける資源割当をベースにした例題において、利己的戦略と調和的戦略の二つの戦略についてシミュレーションを行ない、共生的アプローチの有効性を示した。

通信網のような Open System の大きな特徴の一つは状況がダイナミックに変化していくことである。この例で、途中で資源の量が増えたり、アクティビティが増える場合にもうまく対応するかということも今後の課題として残されている。さらには複数の異なった戦略を持つ

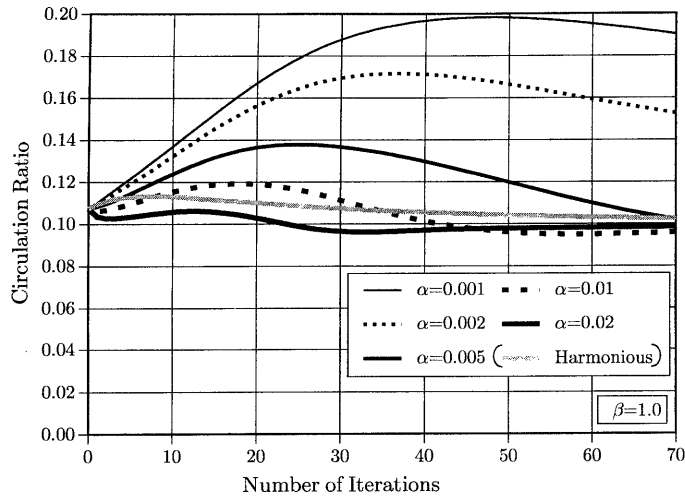


図 4: 流通割合の変化 (利己的戦略)

エージェントがいる場合、また、エージェントの戦略が途中で変化していく場合の全体としての振舞いはどうなるか、ということも興味深い問題である。

謝辞

日頃から御指導いただく NTT コミュニケーション科学研究所西川清史所長、中野良平グループリーダー、また、討論いただいた同所の横尾真氏、西部喜康氏に感謝します。

参考文献

- [1] Ferguson, D., Yemini, Y., and Nikolaou, C.: Microeconomic Algorithms for Load Balancing in Distributed Computer Systems, *8th Int'l Conf. on Distributed Computing System*, pp. 491-499 (1988).
- [2] Hewitt, C.: Offices Are Open Systems, in Huberman, B. A. ed., *The Ecology of Computation*, pp. 5-23, Elsevier Science Publishers (1988).
- [3] Kurose, J. F. and Simha, R.: A Microeconomic Approach to Optimal Resource Allocation in Distributed Computer Systems, *IEEE Transactions on Computer*, Vol. 38, No. 5, pp. 705-717 (1989).
- [4] Kuwabara, K. and Ishida, T.: Symbiotic Approach to Distributed Resource Allocation: Toward Coordinated Balancing, *Pre-Proceedings of MAAMAW '92* (1992).
- [5] Malone, T. W., Fikes, R. E., Grant, K. R., and Howard, M. T.: Enterprise: A Market-like Task Scheduler for Distributed Computing Environments, in Huberman, B. A. ed., *The Ecology of Computation*, pp. 177-205, Elsevier Science Publishers (1988).

- [6] Miller, M. S. and Drexler, K. E.: Markets and Computation: Agoric Open Systems, in Huberman, B. A. ed., *The Ecology of Computation*, pp. 133-176, Elsevier Science Publishers (1988).
- [7] Waldspurger, C. A., Hogg, T., Huberman, B. A., Kephart, J. O., and Stornetta, W. S.: Spawn: A Distributed Computational Economy, *IEEE Transaction on Software Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 103-117 (1992).