社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

ノードの多様性を考慮した P2P オーバレイネットワークのためのトポロジ構成法

田内　淳也† 　大崎　博之† 　今瀬　真†

† 大阪大学 大学院情報科学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
E-mail: †{j-tauti,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　近年、ネットワークの大規模化とともに、ネットワークに接続されるノードの多様化が進んでいる。特性の異なる、多数のノードによって効率的なオーバレイネットワークを構成するためには、自律分散的な制御をどのように実現するかが鍵となる。一方、社会学において、人種間の分居現象を説明する社会モデルとして、シェリングモデルが存在する。これまで Singh らは、シェリングモデルを応用した、P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法を提案している。Singh らは、ノードが二種類であることを前提とし、同種のノードを隣接させることにより、効率的なオーバレイネットワークのトポロジを構成する手法を提案している。本稿では、Singh らの手法を拡張することにより、特性の異なるノードに対する、オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (拡張シェリングアルゴリズム) を提案する。N 種類のノードが扱えるようにシェリングアルゴリズムを拡張することにより、多様なノードに対応できる、オーバレイネットワークのトポロジ構成法を提案する。シミュレーション実験により、提案する拡張シェリングアルゴリズムの特性 (効率性・自己組織性・収束特性) を調査する。その結果、提案する拡張シェリングアルゴリズムにより、効率的なオーバレイネットワークのトポロジ構成が可能であること、提案する拡張シェリングアルゴリズムが自己組織性と良好な収束特性を有することなどを示す。
キーワード　オーバレイネットワーク、トポロジ構成、ノードの多様性、社会学、シェリングモデル

Adaptive Topology Configuration Method for P2P Overlay Networks with Heterogeneous Nodes

Junya TAUCHI†, Hiroyuki OHSAKI†, and Makoto IMASE†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan
E-mail: †{j-tauti,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　Recently, the number of nodes in networks is rapidly increasing. On the other hand, nodes connected to the networks have various characteristics such as processing speed or transmission rate. If the overlay network topology is configured in such a manner that nodes with similar characeristics are connected together, the capacity of the network can be increased. It is necessary to configure the overlay network topology by a decentralized control for many heterogeneous nodes. When configuring the overlay network which is consisted of heterogeneous nodes, the topology of the network must be configured in a decentralized manner. In sociology, Schelling's model, one of the famous social models, explains the mechanism of segregation. Singh et al. propose a topology adaptation method based on Schelling's model for P2P overlay networks. Their method configures the overlay network topology such that similar nodes are connected assuming that there exist two types of nodes. In this paper, we propose a method for configuring the overlay network topology with heterogeneous nodes. by extending the method proposed by Singh et al. We extend Singh's method so that it can support N types of nodes to enable configuration of the overlay network toiplogy with heterogeneous nodes. We also investigate the characteristics of the proposed method by simulation. Our simulation result show that the proposed method is efficient as well as highly self-organizing and has good convergence property.

Key words　Overlay Networks, Topology Configuration, Node Heterogeneity, Sociology, Schelling's Model

1 はじめに

近年、ネットワークの大規模化とともに、ネットワークに接続されるノードの多様化が進んでいる。例えば、インターネットに接続される計算機の台数は、2006 年 7 月の時点で約 4 億 4 千万台であったのに対して、2 年後の 2008 年 7 月の時点で約 5 億 7 千万台と、2 年間で約 30% 増加している [1]。これと同時に、ネットワークに接続されるノードの種類 (サーバ・デスクトップ計算機・携帯端末・センサデバイスなど) やアクセス回線の種類 (光ファイバ・ ADSL ・無線など) が多様化している。

一方、インターネットのルーティングを上位層で柔軟に制御することができる、オーバレイネットワークへの注目が高まっている [2–4]。

特性の異なる、多数のノードによってオーバレイネットワークを構成するためには、効率的なオーバレイネットワークのトポロジを、自律分散的な手法で構築することが求められる。大規模なオーバレイネットワークを構成するためには、自律分散的な手法が不可欠となる。また、ノードの特性を考慮してオーバレイネットワークのトポロジを決定しなければ、オーバレイネットワーク全体の効率が低下してしまう。

オーバレイネットワークにおいて、特性の異なるノード同士がオーバレイリンクによって接続された場合、性能の低いノードがボトルネックになり、ネットワーク全体の通信容量が低下してしまう。この時、類似した特性のノードが隣接するように、オーバレイネットワークトポロジを構成すれば、ネットワーク全体の通信容量を増大させることが可能となる。

一方、社会学において、人種間の分居現象を説明する社会モデルとして、シェリングモデル [5] が存在する。シェリングモデルは、セルオートマトンモデルの一種であり、二種類のエージェントがそれぞれ自律的にセルの移動を繰り返すことにより、同種のエージェントの集団が自己組織化されるという特徴を有している。

これまで Singh らは、シェリングモデルを応用した、P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (シェリングアルゴリズム) [6, 7] を提案している。Singh らは、シェリングモデルが自律分散性と自己組織性を有していることに着目し、シェリングモデルを応用した、P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法を提案している。Singh らは、ノードが二種類であることを前提とし、同種のノードを隣接させることにより、効率的なオーバレイネットワークのトポロジ構成を実現している。

しかし、Singh らの手法では、ノードが二種類であることを前提としているため、これを特性の異なる多様なノードによって構成されるオーバレイネットワークにそのまま適用することができない。

そこで本稿では、Singh らの手法を拡張することにより、特性の異なる多様なノードに対する、オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (拡張シェリングアルゴリズム) を提案する。具体的には、$N(\geq 2)$ 種類のノードが扱えるようにシェリングアルゴリズムを拡張することにより、多様なノードに対応した、オーバレイネットワークのトポロジ構成法を提案する。提案手法は、類似した特性のノードが隣接するように、オーバレイネットワークのトポロジを段階的に変化させる。これにより、ノードの特性が多様な、より現実的なネットワークへの適用を可能とする。

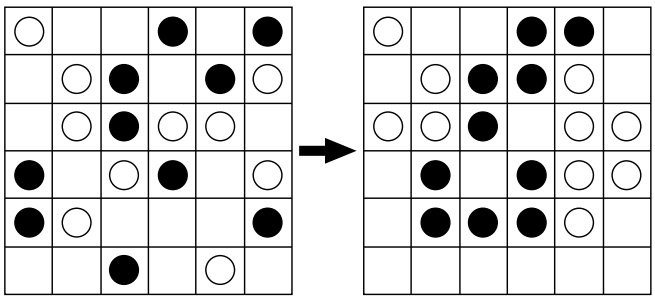

図 1: 人種間の分居現象を再現するシェリングモデル : 各個人が、同じ属性を持つ人々と積極的に集まろうとしないにもかかわらず、結果として同じ属性の集団が形成される

さらに、シミュレーション実験により、提案手法の有効性を評価する。その結果、提案するトポロジ構成法により、効率的なオーバレイネットワークのトポロジ構成が可能であること、提案する制御手法が自己組織性と良好な収束特性を有することなどを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章では、シェリングモデルおよびシェリングモデルをオーバレイネットワークの制御に応用した研究を紹介する。3 章では、特性の異なる多様なノードに対するオーバレイネットワークのトポロジ構成法を述べる。4 章では、シミュレーションによって提案する拡張シェリングアルゴリズムの特性を調査する。最後に 5 章において、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

以下では、人種間の分居現象を説明する社会モデルであるシェリングモデルと、シェリングモデルを工学的な用途 (オーバレイネットワークのトポロジ構成法) に応用した研究を紹介する。

2.1 シェリングモデル

シェリングモデルとは、人種間の分居現象を説明する社会モデルの一つである (図 1) [5]。分居現象とは、異なる属性 (人種や文化など) を持つ人々によって構成される社会において、社会全体として同じ属性を持つ人々が集まることにより、居住地の分離が起こるという現象である。

シェリングモデルは、上記のような人種間の分居現象を再現できる簡単なモデルである。シェリングモデルは、各個人が、同じ属性を持つ人々と積極的に集まろうとしないにもかかわらず、結果として同じ属性の集団が形成されることを示している。つまり、シェリングモデルにより、人種間の分居が発生する原因が、「各個人が、自分とは異なる属性を持つ人々を排除しようと差別的に行動する」ためではなく、「各個人が、自分とは異なる属性を持つ人々に囲まれる (マイノリティになる) ことを

避ける」ためであることが示されている。

シェリングモデルは単純化された社会のモデルであり、セルオートマトンモデルの一種である。シェリングモデルには、属性の異なる二種類のエージェントが存在する。これらのエージェントが、それぞれ自律的にセルの移動を繰り返すことにより、結果として、同じ属性を持つエージェントの集団が自己組織化される。

シェリングモデルの概要は以下の通りである。

シェリングモデルでは、社会は $m \times n$ のセルに区切られた二次元平面でモデル化される。属性の異なる二種類のエージェントが存在し、それぞれのエージェントは、他のエージェントの属性が認識可能である。各エージェントは、「許容水準」と呼ばれるパラメータ $\theta(0 \leqq \theta \leqq 1)$ を持つ。各エージェントは、近隣 (8 個の隣接セル) に存在するエージェントのうち、自身と同じ属性を持つエージェントの比率が θ 未満であれば、「自身がマイノリティである」と判断する。

シェリングモデルは、以下のような手順で実行される。まず、二次元平面上のセルに、ランダムに複数のエージェントが配置される。エージェントの属性には、二種類のどちらかの属性が割り当てられる。各エージェントは、近隣に存在するエージェントのうち、自身と同じ属性を持つエージェントの比率を計算する。この値が許容水準 θ 以上であれば、エージェントはそのセルに留まる。一方、この値が、許容水準 θ 未満であれば、マイノリティになることを避けようとして、近隣の空きセルに移動する。

以上のような手順を繰り返すことにより、結果として、同じ属性を有するエージェントの集団が形成される。シェリングモデルで特筆すべきは、各エージェントの許容水準が比較的小さい値であっても、許容水準からは予期できないほど密集したエージェントの集団が形成されるという点である。

シェリングモデルは、社会学における古典的なモデルの一つであり、その特性の分析 [8,9] や、シェリングモデルを拡張したモデルの研究 [10] も行われている。

2.2 シェリングモデルの工学的用途への応用

シェリングモデル自体は、社会の分居現象を説明するモデルであるが、これを逆に工学的な用途に応用することも可能であると考えられる。つまり、シェリングモデルにおける、「各エージェントが、同じ属性を持つエージェントと積極的に集まろうとしないにもかかわらず、結果として同じ属性のエージェントの集団が形成される」という性質は、「各エージェントを (マイノリティにならないように) 緩やかに制御するだけで、結果として同じ属性のエージェントの集団を形成できる」とも見ることができる。つまり、シェリングモデルは、クラスタリングのように、属性の類似したエージェントのグループを形成するという用途にも利用できると考えられる。

シェリングモデルを工学的な用途に応用した先駆的な研究として、Singh らの研究 [6,7] が存在する。Singh らは、シェリングモデルを応用することにより、P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (シェリングアルゴリズム) を提案している。

本稿では、人種間の分居現象を説明するセルオートマトンモデルを「シェリングモデル」、Singh らの提案した P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法を「シェリングアルゴリズム」と区別して表記する。

オーバレイネットワークにおいて、特性の異なるノード同士が接続された場合、性能の低いノードがボトルネックになり、ネットワーク全体の通信容量が低下してしまう。シェリングアルゴリズムでは、シェリングモデルに基づく手法により、類似した特性のノードが隣接するように、オーバレイネットワークのトポロジを段階的に変化させる。これにより、同種のノードが隣接するトポロジとなり、ネットワーク全体の通信容量が増大する。

ただし、Singh らのシェリングアルゴリズムは、シェリングモデルを単純な形で利用しているため、ノードの種類が二種類である (ノードの通信速度が二種類である) ことを前提としている。しかし、現実のネットワークではノードの特性はさまざまに異なる。このため、そのままでは Singh らの手法を現実のネットワークに適用することはできない。

3 シェリングモデルに基づくオーバレイネットワークのトポロジ構成法

特性の異なる、多数のノードによってオーバレイネットワークを構成するためには、効率的なオーバレイネットワークのトポロジを、自律分散的な手法で構築することが求められる。

本章では、Singh らのシェリングアルゴリズムを拡張することにより、特性の異なる多様なノードに対する、P2P オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (拡張シェリングアルゴリズム) を提案する。

3.1 シェリングアルゴリズム

まず、Singh らの提案するシェリングアルゴリズムを説明する。

シェリングアルゴリズムとは、P2P オーバレイネットワークにおいて、各ノードが自律分散的にオーバレイリンクを貼り替えることにより、効率的なオーバレイネットワークのトポロジを構成する手法である。シェリングアルゴリズムでは、ノードの種類が二種類である (ノードの通信速度が二種類である) ことを前提としている。

シェリングアルゴリズムでは、シェリングモデルに基づく手法により、同種のノードがオーバレイネットワーク上で隣接するように、オーバレイネットワークのトポロジを段階的に変化させる。各ノードは、許容度と呼ばれるパラメータ $\theta\,(0 \leqq \theta \leqq 1)$ を有している。各ノードは、(オーバレイリンクによって接続されている) すべての隣接ノードのうち、自身と同種の (同じ属性を持つ) ノードの比率を計算する。この値が、許容水準 θ 以上であれば、ノードは何も行わない。一方、この値が許容水準 θ 未満であれば、深さ優先探索によって自身と同種のノードを探索し、オーバレイリンクの貼り替えを行う。具体的には、隣接する異種のノードとのオーバレイリンクのうち、ランダムに選択した一つのオーバレイリンクを切断する。さらに、探索によって発見した同種のノードへオーバレイリンクを作成する。

なお、特定のノードへのリンク集中を避けるため、各ノード

に接続できるオーバレイリンク数には上限 L_{max} が設けられている。また、ノード探索の範囲を限定するために、ノード探索の範囲は S_{max} ホップまでに限定されている。つまり、許容水準 θ 未満の場合には、S_{max} ホップ以内に存在するノードのうち、自身と同種であり、なおかつ接続されているオーバレイリンク数が L_{max} 未満のノードを探索する。なお、上記の条件を満たすノードが発見できない場合は、オーバレイリンクの貼り替えを行わない。

シェリングアルゴリズム自体は、オーバレイネットワークのトポロジを段階的に改変する手法である。文献 [6,7] では、シミュレーションにより、シェリングモデルと同様に、同種のノードの集団が形成されることが示されている。

3.2 ノードの多様性を考慮した拡張シェリングアルゴリズム

本稿では、Singh らの手法を拡張することにより、特性の異なる多様なノードに対するオーバレイネットワークのトポロジ構成法 (拡張シェリングアルゴリズム) を提案する。具体的には、$N(\geqq 2)$ 種類のノードが扱えるようにシェリングアルゴリズムを拡張することにより、多様なノードに対応したオーバレイネットワークのトポロジ構成法を提案する。

拡張シェリングアルゴリズムは、シェリングアルゴリズムを自然な形で拡張したものである。基本的にはシェリングアルゴリズムと同一であるが、近隣のノードの属性によって、オーバレイリンクの貼り替えを行うかどうかの判定基準が異なる。

以下、ノードの種類数を N ($N \geqq 2$) とし、ノードの種類の集合を $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_N\}$、ノード i の種類を $t(i)$ と表記する。多様なノードの扱いを可能とするため、種類 t_n および t_m の類似性を $d_{n,m}$ と定義する。Singh らのシェリングモデルは、$N = 2$ かつ

$$d_{n,m} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_n = t_m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

の場合に相当する。

拡張シェリングアルゴリズムでは、シェリングアルゴリズムと同様に、各ノードは許容度と呼ばれるパラメータ θ ($0 \leqq \theta \leqq 1$) を有している。本稿では、文献 [6] と同様に、すべてのノードの許容度が等しい場合を考えるが、現実にはそれぞれのノードの許容度は異なる場合も考えられる。

拡張シェリングアルゴリズムでは、各ノードは以下のようにオーバレイリンクの貼り替えを行う。

(1) 隣接ノードとの距離 D_i を計算する

ノード i は、隣接ノードと自身との距離 D_i を計算する。D_i は、ノード i と各隣接ノード j との類似性 $d_{t(i),t(j)}$ により次式で定義される。

$$D_i = \sum_{j \in A_i} d_{t(i),t(j)} / |A_i| \quad (2)$$

ここで、A_i はノード i の隣接ノードの集合である。

(2) 隣接ノードとの距離 D_i と許容水準 θ を比較する

隣接ノードとの距離 D_i が許容水準 θ 未満であれば、ステップ (3) に進み、文献 [6] と同じアルゴリズムにより、オーバレイリンクの貼り替えを行う。そうでなければ、ステップ (1) に戻る。

(3) オーバレイリンク接続の候補となるノード j を探索する

深さ優先探索によって、S_{max} ホップ以内に存在する、接続されているオーバレイリンク数が L_{max} 未満の、自身と同種のノードを探索する。上記の条件を満たすノード j が発見できれば、ステップ (4) に進む。そうでなければ、ステップ (1) に戻る。

(4) 異種の隣接ノード k とのオーバレイリンクを削除する

隣接する異種のノードから、異種の隣接ノード k をランダムに一つ選択する。異種の隣接ノード k の次数が 2 以上であれば、異種の隣接ノード k とのオーバレイリンクを削除し、ステップ (5) に進む。そうでなければ、ステップ (1) に戻る。

(5) 同種のオーバレイノード j へのオーバレイリンクを作成する

探索によって発見した同種のノード j へのオーバレイリンクを作成し、ステップ (1) に戻る。

4 シミュレーション

4.1 実験の目的

2 章で述べたように、Singh らのシェリングアルゴリズムは、ノードの種類が二種類であることを前提としている。文献 [6] では、二種類のノードに対してシェリングアルゴリズムを用いることにより、オーバレイネットワーク全体の通信容量が増大することが示されている。

一方、シェリングアルゴリズムが基礎としているシェリングモデルも、エージェントの種類が二種類であることを前提としている。二種類のエージェントに対して、シェリングモデルが高い自己組織性を有することが知られている [5]。しかし、複数のエージェントを許すようにシェリングモデルを拡張した場合の研究も一部行われている [10] が、それがどのような自己組織性を示すかは十分明らかにされていない。

また、シェリングモデルを工学的な用途に応用する場合、定常特性 (定常状態における特性) だけでなく、過渡状態 (過渡状態における特性) も重要である。オーバレイネットワークのトポロジ構成への応用を考えると、定常状態の特性 (効率性・自己組織性) だけでなく、過渡状態の特性 (収束特性) も重要である。特に、シェリングモデルは、許容水準 θ が大きい時には、エージェントの移動が収束しない場合がある [11] ことも知られている。

そこで以下では、我々が提案する拡張シェリングアルゴリズムの効率性・自己組織性・収束特性を、シミュレーション実験により明らかにする。

4.2 シミュレーション条件

以下では、ノードの種類数 N により、拡張シェリングアルゴリズムの効率性・自己組織性・収束特性がどのように変化するかを調査する。

本稿では、基本的に文献 [6] と同じシミュレーションモデルおよびシミュレーション条件を用いる。ただし文献 [6] では、ノードの種類が二種類である (ノードの処理速度が 1 [Mbit/s] もしくは 10 [Mbit/s] である) が、本稿ではノードの種類数を N (ノードの処理速度は 1 [Mbit/s] から 10 [Mbit/s] まで N 段階の

表 1　シミュレーションで用いたノードの処理速度

種類数 N	処理速度 [Mbit/s]
2	1, 10
3	1, 5.5, 10
4	1, 4, 7, 10
5	1, 3.25, 5.5, 7.25, 10

表 2　シミュレーションで用いたパラメータ設定

ノード数	1,000
平均次数	3
ノード探索の範囲 S_{max}	5
オーバレイリンク数の上限 L_{max}	10

離散的な値を取る (表 1)) としている。

シェリングアルゴリズム自体の特性に注目するため、文献 [6] と同様に、物理ネットワークはボトルネックにならないものとする。つまり、オーバレイネットワークを構成する、ノードの処理速度がオーバレイネットワークのボトルネックになるものとする。このような仮定を置くことにより、オーバレイネットワークのみに着目したシミュレーションが可能となる。

オーバレイネットワークのノード数を 1,000 とし、初期状態では平均次数 3 のランダムネットワークによってオーバレイネットワークのトポロジを与えた。オーバレイリンク数の上限 L_{max} を 10、ノード探索の範囲 S_{max} を 5 とした。

ノードの種類間の類似性は次式によって与えた。

$$d_{n,m} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_n = t_m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

また、各種類のノード数はできるだけ同数となるようにした。

シミュレーションで用いたパラメータ設定を表 2 に示す。以降のシミュレーションでは、特に断りのない限り表 2 の値を用いている。

シミュレーションでは、ランダムに選択したノードに対して、順次、拡張シェリングアルゴリズムを実行した。つまり、シミュレーション中の 1 スロットでは、高々一回のオーバレイリンク貼り替えが行われる。

それぞれのパラメータ設定に対して、乱数の種を変化させて 10 回のシミュレーションを繰り返し、各メトリクスの平均値を計算した。

4.3　効　率　性

まず、拡張シェリングアルゴリズムによって、オーバレイネットワークの効率性がどの程度向上するかを調査する。

図 2 に、ノードの許容水準 θ を 0 – 1 と変化させた時の、オーバレイネットワークの「平均ボトルネック帯域」を示す。ここで、平均ボトルネック帯域とは、オーバレイネットワークの通信容量を測る指標の一つであり、すべてのノード対間の経路の帯域 (ボトルネックとなっているノードの通信速度) の平均である。ここでは、十分に時間が経過した後 (平均ボトルネック帯域が、定常状態における値の 1% 未満に収まった状態) での、平均ボトルネック帯域を計算している。図中には、ノードの種類数 N を 2 – 5 と変化させた時の結果を示している。

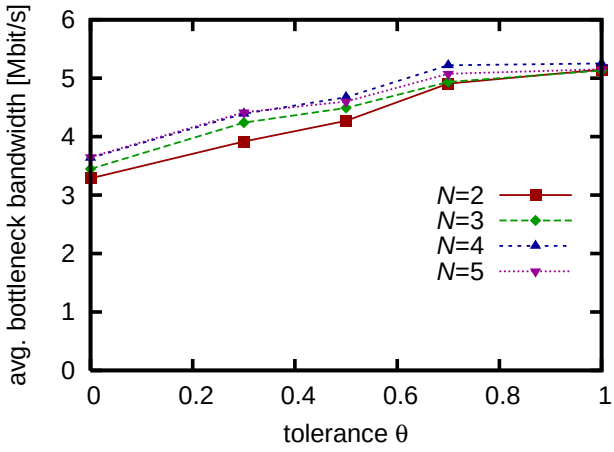

図 2: ノードの許容水準 θ を変化させた時の、オーバレイネットワークの平均ボトルネック帯域: ノードの種類数 N によらず、拡張シェリングアルゴリズムによって、オーバレイネットワークの効率性が向上している

ノードの種類数 $N = 2$ の時、Singh らのシェリングアルゴリズムと同一となる。また、許容水準 $\theta = 0$ の時が、拡張シェリングアルゴリズムを実行しない場合 (オーバレイネットワークのトポロジを初期状態から変化させない場合) に相当する。

この図より、ノードの種類数 N によらず、拡張シェリングアルゴリズムによってオーバレイネットワークの効率性が向上している (平均ボトルネック帯域が増加している) ことがわかる。これはつまり、拡張シェリングアルゴリズムを用いることにより、多様なネットワークにおいても効率的なトポロジ構成が可能であることを意味している。

4.4　自己組織性

次に、拡張シェリングアルゴリズムが、どのような自己組織性を示すかを調査する。

図 3 に、ノードの種類数 N を 2 – 10 と変化させた時の、オーバレイネットワークの「平均集合度」を示す。ここで、平均集合度とは、アルゴリズムの自己組織性の高さを測る指標の一つであり、すべてのノードに対する、隣接ノードとの距離 D_i の平均である。ここでは、十分に時間が経過した後 (平均集合度が、定常状態における値の 1% 未満に収まった状態) での、平均集合度を計算している。図中には、ノードの許容水準 θ を、0, 0.3, 0.5, 0.7 と変化させた時の結果を示している。

許容水準 $\theta = 0$ の時が拡張シェリングアルゴリズムを実行しない場合に相当する。

この図より、まず、ノードの種類数 N によらず、拡張シェリングアルゴリズムによって、オーバレイネットワークの平均集合度が増加している (つまり、自己組織化されている) ことがわかる。ノードの種類数 N が増加しても、平均集合度はわずかにしか減少していない。これはつまり、拡張シェリングアルゴリズムが、ノードの種類数 N によらず高い自己組織性を有することを意味している。

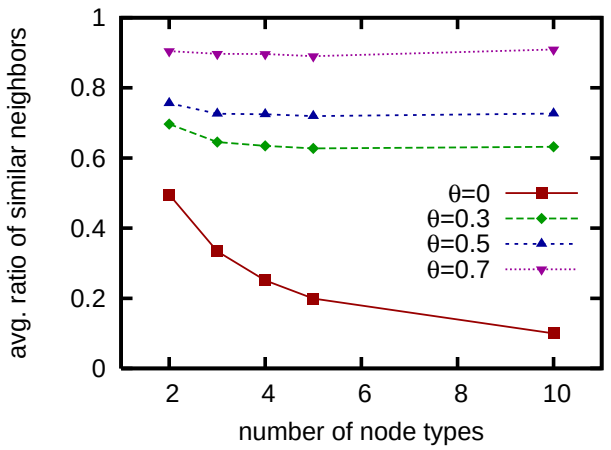

図 3: ノードの種類数 N を変化させた時の、オーバレイネットワークの平均集合度: ノードの種類数 N によらず、拡張シェリングアルゴリズムによって、オーバレイネットワークの平均集合度が増加している

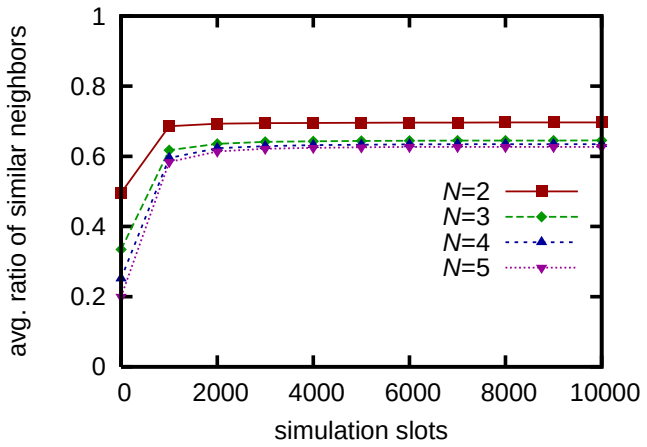

図 4: 平均集合度の時間的変化 (許容水準 $\theta = 0.3$): ノードの種類数 N によらず、約 3000 – 4000 スロットで平均集合度が収束している

4.5 収束特性

最後に、拡張シェリングアルゴリズムの収束特性を調査する。

図 4 に、シミュレーション開始から、各スロットにおける平均集合度の時間的変化を示す。この図は、許容水準 $\theta = 0.3$ の場合の結果である。図中には、ノードの種類数 N を、2 – 5 と変化させた時の結果を示している。

この図より、ノードの種類数 N によらず、約 3000 – 4000 スロットで平均集合度が収束していることがわかる。オーバレイネットワークのノード数が 1000 であるため、平均集合度が収束するまでに、各ノードがオーバレイリンクの貼り替えの要 / 不要を判定する回数は、高々 3 – 4 程度である。これはつまり、拡張シェリングアルゴリズムの収束特性は、ノードの種類数 N をに大きく影響されていない (良好な収束特性を有している) ことを意味している。

5 まとめと今後の課題

本稿では、Singh らの手法を拡張することにより、特性の異なるノードに対する、オーバレイネットワークのトポロジ構成法 (拡張シェリングアルゴリズム) を提案した。また、シミュレーション実験により、提案手法の有効性を評価した。その結果、提案するトポロジ構成法により、効率的なオーバレイネットワークのトポロジ構成が可能であること、提案する制御手法が自己組織性と良好な収束特性を有することなどを示した。

今後の課題として、動的なノードの参加・離脱時における、拡張シェリングアルゴリズムの性能評価が挙げられる。また、より現実的なネットワーク環境における、拡張シェリングアルゴリズムの有効性評価や、拡張シェリングアルゴリズムの実アプリケーションへの適用等が考えれる。

謝　　辞

本研究を実施するにあたり、 有意義な議論をしていただいた、大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸氏に感謝いたします。

文　　献

[1] “Internet Systems Consortium, Inc..” `https://www.isc.org/solutions/survey`.

[2] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, “Resilient overlay networks,” *Computer Communication Review*, vol. 32, p. 66, Oct. 2001.

[3] Z. Li and P. Mohapatra, “QRON: QoS-aware routing in overlay networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, pp. 29–40, Jan. 2004.

[4] M. Kwon and S. Fahmy, “Topology-aware overlay networks for group communication,” in *Proceedings of the 12th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*, pp. 127–136, May 2002.

[5] T. C. Schelling, “Dynamic models of segregation,” *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, no. 2, pp. 143–186, 1971.

[6] A. Singh and M. Haahr, “Topology adaptation in P2P networks using Schelling’s model,” in *Proceedings of the Workshop on Games and Emergent Behaviors in Distributed Computing Environments*, Sept. 2004.

[7] A. Singh and M. Haahr, “Creating an adaptive network of hubs using Schelling’s model,” *Communications of the ACM*, vol. 49, pp. 69–73, Mar. 2006.

[8] J. Zhang, “A dynamic model of residential segregation,” *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 28, pp. 147–170, July 2004.

[9] J. Zhang, “Residential segregation in an all-integrationist world,” *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 54, pp. 533–550, May 2004.

[10] W. A. V. Clark and M. Fossett, “Understanding the social context of the Schelling segregation model,” in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 105, pp. 4109–4114, Mar. 2008.

[11] 山影 進, 服部 正太, ed., コンピュータのなかの人工社会 マルチエージェントシミュ レーションモデルと複雑系. 共立出版株式会社, Sept. 2003.