

# サービス品質を考慮した協力的なオーバレイネットワークの構築

代表研究者 笹部昌弘 大阪大学 大学院工学研究科 助教

## 1 概要

オーバレイネットワークは、ユーザ同士が協力的に自身の資源を提供し合うことでユーザ数に対してスケール可能なサービスを展開可能な技術である。一方で、個々のユーザは自身にとっての利益を最大化しようと振る舞う傾向があることから、そのような相互依存関係の下で協力的なオーバレイネットワークを構築するため技術が必要となる。また、オーバレイリンクが IP ネットワーク上で遠く離れた端末間で構築されると、ユーザにとってのサービス品質が低下するだけでなく、IP ネットワークにかかる負荷も増大する。既存研究では、これらの検討課題に対して個別に検討されてきた。本研究では、進化ゲーム理論に着想を得た協力的な行動の発現と IP ネットワークとの相関性向上を可能とするオーバレイネットワーク構築手法を提案する。シミュレーション評価により、サービス品質を考慮した協力的なオーバレイネットワークを構築できることを示した。

## 2 はじめに

オーバレイネットワークは、ユーザ同士が協力的に自身の資源(計算能力、記憶領域、帯域など)を提供し合うことで、従来のクライアント-サーバ型システムに比べてユーザ数に対してスケール可能なサービスを展開可能な技術である。一方で、各ユーザにとってはシステム全体としての利益よりも自身の利益を最大化しようと振る舞うことが合理的であり、その結果、自らの資源提供をできる限り抑えた上で、サービスを利用しようとする傾向が高い[1]。こうしたユーザ間の競合関係に関しては、人間を含む生物社会で広く見られる現象であり、その中である種の協力関係を築くことで社会全体がうまく機能していることもまた事実である。近年、進化ゲーム理論の枠組みを利用して、こうしたユーザ間の競合関係の下で協力的な関係が自律分散的に生まれるメカニズムの解明やその応用が広く検討されている[2-9]。

一方、オーバレイネットワークは IP ネットワーク上に構築されることから、IP ネットワークの構造がオーバレイネットワークの性能に影響を与えるだけでなく、オーバレイネットワーク上を流れるトラフィックが IP ネットワークにかかる負荷に影響を与える。例えば、オーバレイリンクが IP ネットワーク上で遠く離れたノード間で確立された場合、ユーザの知覚する応答性や通信速度といったサービス品質の低下につながるだけでなく、IP ネットワーク上でトラフィック負荷の増大するリンク数も増加する。この問題に対しては、IP ネットワークの構造を考慮した上でオーバレイネットワークを構築することが重要である。[10, 11]では伝搬遅延時間を IP ネットワークにおける距離とみなし、距離の近いノード間でオーバレイリンクを確立する手法を提案している。

ノード間の協力関係、オーバレイネットワークと IP ネットワークとの相関性の問題については、これまで個別に検討が行われてきているが、実際には両者を同時に考慮する必要がある。本稿では、IP 網特性を考慮した協力的なオーバレイネットワークの構築手法を提案する。

オーバレイネットワークはノード間の隣接関係の繰り返しにより成り立っている。隣接ノード間では、一般にメッセージやデータの交換が行われており、これらのやりとりの結果から、各ノードでは自身の接続関係のよさを評価することができる。ここで、接続関係は、当該リンクの両端のノードの協力の度合いが高く、またそれらが IP ネットワーク上で近い場合によく考えられる。高い評価を持つユーザの行動や接続関係を模倣することで、各ノードは自身の接続関係を向上できる可能性が高い。これは、進化ゲーム理論における模倣による優れた戦略の生き残りというコンセプトに着想を得ている。

協力的なオーバレイネットワークの構築手法としては、SLACER [8]やWang-Nakao method [9]がすでに提案されており、それらも進化ゲーム理論に基づいた制御方式となっている。提案方式では、協力的なオーバレイネットワークの構築に加え、下位の IP ネットワークの特性の考慮についても取り組んでいる点が既存方式と大きく異なる。

## 2 関連研究

互いの利益が相互依存関係にある状況下で、ユーザ間の協力関係がどのようにして発生するかに関する研究は進化ゲーム理論の分野で近年活発に行われている[3-8]. その中で、特に複数ユーザからなるグループやネットワークにおける協力的行動の出現に着目した研究成果については、協力的なオーバーレイネットワーク構築への応用が試みられている[8, 9].

SLACER [8]は、進化ダイナミクスに基づく協力的なオーバーレイネットワークの構築手法を初めて提案した研究である. その後、Nowak らの成果[6, 7]に基づき、文献[9]では理論的に裏付けされた形で協力的なオーバーレイネットワークの構築手法が提案された. ただし、いずれの構築手法においても、IP ネットワークとの相関性といった、実用的な側面から見た場合の問題点に関しては言及されていない. また、現在広く利用されている P2P ファイル共有システムである BitTorrent [12]では、ゲーム理論における tit-for-tat 戦略に倣い、端末間でのアップロード帯域の積極的な交換を促すための仕組みが導入されている. 文献[13, 14]では、この tit-for-tat に基づく帯域交換を network formation game としてモデル化し、分析することで、ナッシュ均衡の存在や効率のよい帯域交換の仕組みについて明らかにしている. これらの研究では、端末間の個々のやりとりのみに着目しているが、本研究では、端末とその隣接端末を一つのグループと見なし、グループレベルでの協力的行動の発現に着目している.

一方で、IP ネットワークを考慮したオーバーレイネットワークの構築手法に関しては文献[10, 11]などが挙げられる. これらの研究では、各オーバーレイリンクを IP ネットワーク上で近傍のノード間に確立することを主な目的としている. このことにより、ユーザにとっての応答性向上、IP ネットワークにかかる負荷の軽減が期待できる. また、文献[11]では、オーバーレイネットワークがスケールフリー性を持つようにすることで、オーバーレイネットワーク上での到達率向上も実現している. ただし、いずれの手法もユーザの協力的な振る舞いが暗黙のうちに前提とされている.

IP ネットワークの特性を考慮した上でオーバーレイネットワークを構築するためには、IP ネットワークの特性を計測する必要がある. Ping や traceroute といった有名なツールにより、伝搬遅延時間や IP ネットワーク上での 2 端末間のホップ数を計測できるほか、Pathload [15]などのツールにより 2 端末間の利用可能帯域も計測可能である. さらに、こうした 2 端末間の IP ネットワーク上での近傍性に基づき、多次元のユークリッド空間に端末を仮想的に配置する Vivaldi [16]などの Internet coordinate system に関する研究も活発に行われている. 本研究では、これら既存技術を利用することで、IP ネットワーク上での近傍性を考慮した制御手法の確立を目指す.

## 3 提案手法

### 3-1 概要

前述のように、オーバーレイネットワークはノード同士の隣接関係の繰り返しにより構築されている. 一般に、サービス実現のためには隣接ノード間でメッセージやデータのやりとりを協調的に行う必要がある. このとき、各ノードにとっては IP ネットワーク上で近傍に位置し、かつ協力的なノードと隣接関係を結ぶことで応答性や通信速度の高いサービスを楽しむことができる可能性が高い. このことは同時に、オーバーレイトラフィックが IP ネットワークに与える負荷を軽減することにもつながる. 一方、隣接ノードに対して協力的な行動をとる場合には、相手に利益をもたらす反面、自身はある種の資源、計算能力、記憶涼気などを提供する必要がある.

オーバーレイネットワークの構築は、各ノードにおける隣接ノードの選択により実現されるが、一般に、この手続きはオーバーレイネットワーク確立のための機能としてソフトウェアに組み込まれている. ここで、ソフトウェア作成者は、そのソフトウェアが広く利用されるように、ユーザと IP ネットワーク双方にとって望ましい隣接ノードが自律分散的に選択されるようにソフトウェアを設計するものとする. 以下に、各ノードにおける隣接ノード選択アルゴリズムを述べる.

各ノード  $i$  はサービスの実現のために隣接ノードとの間で必要となる処理、例えばクエリの転送、クエリに対する応答など、を積極的に行う、あるいは行わないことが想定できる. ここで、前者を協力的な行動 ( $s_i=1$ )、後者を非協力的な行動 ( $s_i=0$ ) と呼ぶ. なお、実際の各ノードの行動は隣接ノードによって観測されるため、各ノードは行動そのものを偽ることはできない. ここで、ノード  $i$  にとっての現在の接続関係の良さを次式で定義する.

$$u_i = \sum_{j \in N_i} (s_j - s_i) \delta \quad (1)$$

式(1)は、隣接ノードの協力的な行動の結果もたらされる利益を1と見なした場合、自身の協力的な行動にもなうコストを相対的に $\delta$  ( $0 < \delta < 1$ )と見積もった場合に、すべての隣接ノードとのやりとりでもたらされる利得を表している。実システムにおいて正確な $\delta$ の値を見積もることは困難であるため、4章のシミュレーション評価では、 $\delta$ の増加に対する提案方式の有効性の変化を評価する。式(1)より、個々のノードにとっては協力的な隣接ノードを増やし、かつ自身は協力的な行動をとらないことで利得を最大化できるが、同時にそれぞれの隣接ノードにとっては利得が低くなる。

隣接関係を持つノード双方の利得を高めるためには、互いに協力的な行動をとる必要がある。このことを実現するために、進化ゲーム理論における模倣と突然変異の考えに倣った方式を提案する(アルゴリズム1)。提案方式は大きく分けてインタラクション、利得比較、戦略更新と隣接関係改善の三つのフェーズの繰り返しからなる。この繰り返しの単位を世代と呼ぶ。インタラクションフェーズでは、隣接ノード間でオーバーレイネットワークを利用するサービスにおけるやりとりを一定期間行い、その結果、式(1)に基づき利得が算出される。次の利得比較フェーズでは、自身の接続関係のよさを客観的に評価するために、比較相手となるノードをオーバーレイネットワークから選出する。具体的な選出方法については3.2節で述べる。

更新フェーズでは、比較相手との利得の大小関係を下に、自身の接続関係の良さを評価し、必要に応じて戦略の更新と隣接関係の改善を行う。具体的なアルゴリズムは3.3節で述べる。

---

**Algorithm 1** Proposed algorithm for one generation.

---

```

1: // Phase 1: Utility calculation based on the original interactions for the service
2: for all  $i \in \mathcal{N}^{(g)}$  do
3:   Peer  $i$  obtains utility  $u_i^{(g)}$  through interactions with neighbors ( $\forall k \in \mathcal{N}_i^{(g)}$ )
4: end for
5: // Phase 2: Peer selection for utility comparison
6: for all  $i \in \mathcal{N}^{(g)}$  do
7:   if  $\{l | l \in \mathcal{N}_i^{(g)}, s_l^{(g)} = 1\} \neq \phi$  then
8:     Peer  $i$  randomly chooses peer  $j$  within distance  $\max_{k \in \{l | l \in \mathcal{N}_i^{(g)}, s_l^{(g)} = 1\}} \{d_{i,k}\}$ 
9:   else
10:    Peer  $i$  randomly chooses peer  $j$  from  $\mathcal{N}^{(g)} \setminus \{i\}$ 
11:   end if
12: end for
13: // Phase 3: Strategy update and refinement of neighboring structure phase
14: for all  $i \in \mathcal{N}^{(g)}$  do
15:   if  $u_i^{(g)} < u_j^{(g)}$  then // Imitation and refinement
16:      $s_i^{(g+1)} = s_j^{(g)}$ 
17:      $m = \max(m_{\text{ini}}, |\{k | k \in \mathcal{N}_i^{(g)}, s_k^{(g)} = 1\}|)$ 
18:     Peer  $i$  selects  $(m-1)$  closest peers from  $\{k | k \in \mathcal{N}_i^{(g)} \setminus \{j\}, s_k^{(g)} = 1\} \cup \mathcal{N}_j^{(g)}$  as  $\mathcal{N}_i^{(g+1)}$ 
19:      $\mathcal{N}_i^{(g+1)} = \mathcal{N}_i^{(g+1)} \cup \{j\}$ 
20:   else
21:     if  $u_i^{(g)} = 0$  then // Mutation
22:        $s_i^{(g+1)} = 1$ 
23:       Peer  $i$  randomly chooses peer  $k$  from  $\mathcal{N}^{(g)} \setminus \{i\}$ 
24:        $\mathcal{N}_i^{(g+1)} = \{k\}$ 
25:     else
26:        $s_i^{(g+1)} = s_i^{(g)}$ 
27:        $\mathcal{N}_i^{(g+1)} = \mathcal{N}_i^{(g)}$ 
28:     end if
29:   end if
30: end for

```

---

### 3-2 IP 近傍性を考慮した利得の比較相手の選出

接続関係の良さは隣接ノード間のインタラクションの結果から算出される。一方で、それがシステム全体として見た場合にどの程度よいかを各ノードは判断する必要がある。この点に関して、元々の進化ゲーム理論や SLACER, Wang-Nakao scheme では、利得の比較相手をシステム全体からランダムに選出する仕組みを採用している。

前述のように、ユーザおよび IP ネットワーク双方にとって、各オーバーレイリンクは IP ネットワーク上でより近い端末間で確立されることが望ましいことから、提案方式では、利得の比較相手として IP ネットワーク上でより近い端末を優先的に選ぶ仕組みを取り入れる。ここで、各ノードは合理的に現在よりも接続関係がよりよくなるように隣接ノードを変更するとし、現在の協力戦略をとる隣接ノードの中でもっとも IP ネットワーク上で遠くに位置するノードよりも近くに位置するノードを比較相手として選出する。例えば、図 1(a)では、ノード 4 がノード 5 を比較相手として選択した場合を表す。ただし、協力的なノードが隣接ノードの中に一つも存在しない場合には、他のノードの中からランダムに比較相手を選ぶ。以上は、アルゴリズム 1 の 6 行目から 12 行目に対応する。

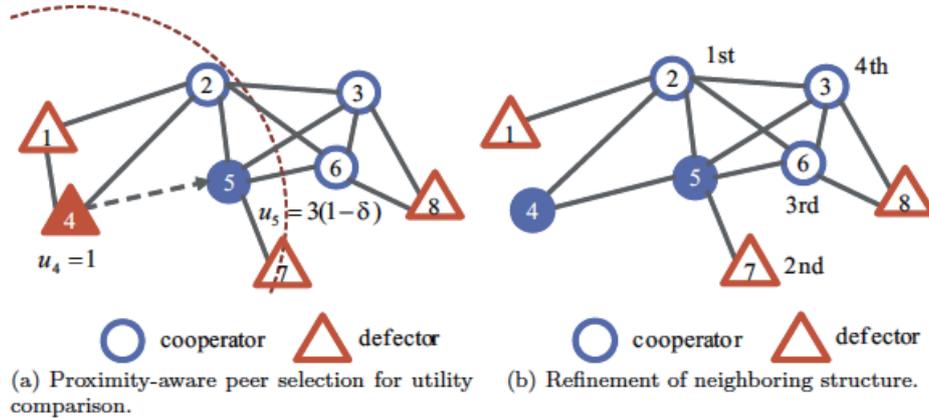


図 1 アルゴリズム概要

ここで、ノード間の距離の定義方法については複数の可能性が考えられる。

1) 伝搬遅延時間. Ping などのツールにより計測可能である。計測にかかる負荷が小さいため、もっとも実現が容易であると考えられる。また、通信路の状態も考慮に入れることができる。最近では、Vivaldi などの Internet coordinate system を用いることで、比較的少ない負荷で多数のノード間の距離を計測することが可能となっている。

2) IP ネットワーク上でのホップ数. traceroute などのツールで算出可能である。伝搬遅延時間と異なり、IP ネットワーク上での経路が変化しない限り値は変化しない。一時的な通信路の輻輳状態よりも長期的に見た場合の IP ネットワークへかかる負荷を抑えたい場合に適していると考えられる。さらに、ISP の立場からは AS 間トラフィック量、特にトランジットリンクに流れるトラフィック量を低く抑えたいことから、AS トランジット数を考慮に入れることも考えられる [17, 18]。

既存方式と同様に、NEWSCAST [19] のようなノード発見メカニズムを利用することで提案手法は実現可能である。

### 3-3 戦略更新と隣接関係の更新

利得の比較後、各ノードは必要に応じて自身の戦略と隣接ノードを更新する。更新方法は状況に応じて異なるが、いずれもよりよい接続関係を獲得することが目的である。

#### (1) 模倣に基づく更新

まず、比較相手の利得の方が高かった場合、そのノードの行動およびその接続関係の一部を模倣することで利得の向上を図る。ここで、新たな隣接ノードを決めるに当たっては、既存の隣接ノードと比較相手の隣接ノードの中から自分にとってより高い利得をもたらすと期待されるノードを優先的に選択する。まず、既存の隣接ノードの中で協力戦略をとるノードを候補として選出する。それにさらに比較相手の隣接ノードを加えたものの中から、IP ネットワーク上で近傍に位置するノードを優先的に新たな隣接ノードとして選ぶ。

このとき、新たな隣接ノードの数  $m$  を

$$m = \max \left( m_{\text{mi}}, \left| \left\{ k \mid k \in N_i^{(g)}, s_k^{(g)} = 1 \right\} \right| \right) \quad (2)$$

で与える。ただし、 $m_{\text{mi}}$  は  $m$  の初期値を表す。この式は、変更の前後で協力戦略をとる隣接ノードの数をできる限り維持することを目的としている。各ノードが獲得できる隣接ノード数は、自分から張る論理リンク数だけでなく、他のノードから張られる論理リンク数にも依存する。一般に、ノード毎に IP ネットワーク

上で近接するノードの数は異なるが、上の式を用いることで、 $m$  の値は世代を経る毎に、ノード毎に適切な値に調整される。その結果、世代の経過とともに、論理リンクの切り替え回数は減少し、安定したオーバレイネットワークの構築が可能となる。既存方式では  $m$  をすべてのノードで同一としており、このことがリンク切り替え回数の観点での収束性を妨げる要因となっている。

新規の隣接ノード数  $m$  のうち 1 つは比較相手とし、残り  $(m-1)$  個の隣接ノードを、現在の隣接ノードの中で協力戦略を選んだノードと比較相手の隣接ノードの中から IP ネットワーク上で近接に位置するものから順に選ぶ。これらは、アルゴリズム 1 の 16 行目から 19 行目に相当する。例えば、図 1(b) では、図 1(a) における利得の比較の結果、 $u_4 < u_5$  だった場合のノード 4 における隣接ノードの更新の様子を示している ( $m_{\text{ini}}=2$ )。ノード 4 にとって、変更前の協力戦略をとる隣接ノード数は 1 なので  $m=2$  となる。ノード 4 はまず非協力戦略をとるノード 1 との接続を切断し、ノード 5 の隣接ノードの中で自分からの距離が最も近いノード 2 と、さらにノード 5 と新たに接続を確立する。このようにして、協力戦略をとるノードの集合が徐々に拡大するとともに、IP ネットワーク上で近傍に位置するノード間で優先的に隣接関係が構築される。

## (2) 突然変異に基づく更新

一方、自分と比較相手の利得がともに 0 であった場合、式(1)より、両者を含め、その周囲には協力戦略をとるノードが一つも存在しないことを意味している。ユーザにとってはサービスを利用できないことは最大限回避されるべきであると考えられるため、この場合には現在の隣接ノードとの接続をすべて切断し、自身の戦略を協力戦略に変更した上で、ランダムに選んだ一つのノードを新たな隣接ノードとする。これは生物が環境に適応するために突然変異を起こすメカニズムと似ている。ただし、生物では変化の時間スケールが非常に長い、すなわち突然変異の発生する確率が非常に低いのに対し、提案方式では制御の収束時間短縮の観点で決定論的に突然変異を起こすようにしている(アルゴリズム 22 行目から 24 行目)。

## 4 シミュレーション評価

ノード間での協力関係の実現性、構築されたオーバレイネットワークの構造的特性の観点から評価を行う。

### 4-1 シミュレーション設定

シミュレータには NetLogo [20] を用いた。ノード数  $|N|$  を 1000 とし、初期のオーバレイネットワークとして次数 2 の正則グラフを構築した。ただし、以降の結果は初期のオーバレイネットワークの構造に依存しないことを確認している(完全グラフ、Waxman ランダムネットワーク [21]、BA モデルに基づくスケールフリーネットワーク [22] での評価を行った)。IP ネットワーク上での端末間の近傍性をモデル化するために、各端末を  $1 \times 1$  の 2 次元ユークリッド領域内にランダムに配置した。

比較方式については、文献[9]の方式を用いた。パラメータ設定に関しては文献[9]を参考に以下のように設定した。既存方式と提案方式において共通するパラメータである、協力行動に対するコスト  $\delta$  は 0.1 とした。さらに、両方式で構築されるオーバレイネットワークの平均次数  $k$  がほぼ等しくなるように、提案方式における新規リンク確立数  $m$  を 6、比較方式における新規リンク確立数の最大値を 10 とそれぞれ設定した。

以降、各性能指標について述べる。ノード間での協力関係の実現性に関しては、協力戦略をとるノードの割合  $f_c$  が初期状態からどのように推移するかに着目する。構築されたオーバレイネットワークの構造的特性に関しては、ネットワーク効率性とクラスタ係数を用いて評価する。ネットワーク効率性は次式で与えられる。

$$E(G) = \frac{1}{|N|(|N|-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d(G, i, j)}$$

ここで、 $d(G, i, j)$  はグラフ  $G$  上でのノード  $i, j$  間の最短経路長を表している。本稿では、オーバレイネットワーク上での 1 ホップを距離 1 とみなす hop-based network efficiency  $E_h(G)$  と IP ネットワーク上での  $i, j$  間の距離とみなす distance-based network efficiency  $E_d(G)$  の 2 通りで評価する。hop-based network efficiency は文献[9]で用いられている指標であり、オーバレイネットワークそのもののスモールワールド性を評価するのに適している。0 から 1 までの値をとり、任意の 2 ノード間の最短経路長が短いほど値は 1 に近づく。一方、distance-based network efficiency はオーバレイネットワーク上の任意の 2 ノード間で通信を行う際の応答性や下位の IP ネットワークにかかる負荷の観点での評価に用いることができる。以降では、領域サイズで正規化した値を用いている。

クラスタ係数は次式で定義される。

$$C(G) = \frac{1}{|N|} \sum_{i \in G} \frac{\sum_{j \neq k \in N_i} e_{jk}}{|N_i|(|N_i|-1)/2}$$

ここで、 $e_{jk}$  はノード  $j, k$  間にリンクが存在する場合に 1、そうでなければ 0 をとる変数である。各ノードに対して、それぞれの隣接ノード間にリンクがより多く存在するほどクラスタ係数は高くなる。クラスタ係数が高いほど、ネットワーク内には互いにリンクを有するノードからなる集団が多く存在する。本研究では、協力戦略をとるノードからなる集団がうまく形成できているかどうかを表す一つの指標として用いる。

#### 4-2 協力行動の進化

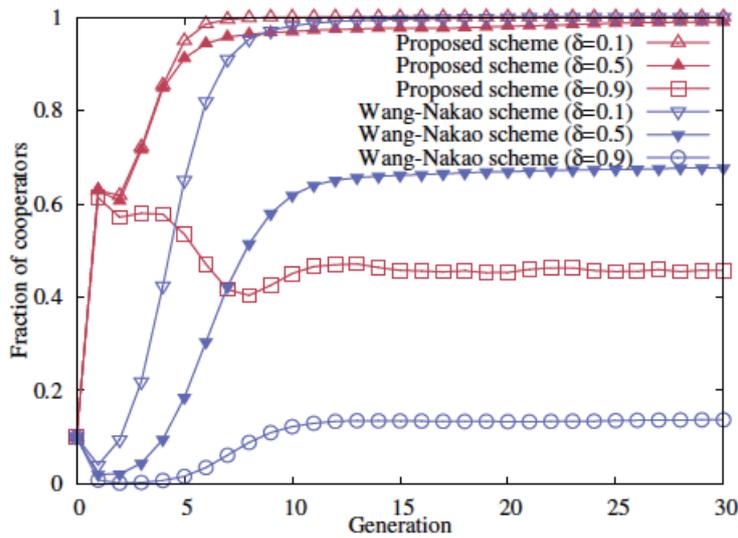


図 2 協力戦略を選ぶノードの推移

図2に提案方式とWang-Nakao方式における、協力戦略を選ぶノードの割合の推移をそれぞれ示す。図より、 $\delta=0.1$  の場合は方式によらず、一定数の世代を経過すると協力的なオーバーレイネットワークを構築できている。さらに、既存方式に比べて提案方式の方が収束速度が速い。これは、以下のように説明できる。まず、シミュレーション開始時には協力戦略を選ぶノードの割合が 0.1 と非常に低く、多くのノードの利得が 0 となっている。それらのノードはその状況を打開するために、突然変異の仕組みにより隣接ノードのリセットと協力戦略への切り替えを行う。このことにより、協力戦略を選ぶノードの割合は急激に上昇し、協力戦略を選ぶノードからなる小規模な集団が複数発生する。これらの集団に属するノードの得る利得がシステム全体の平均に比べて高くなるため、その戦略と論理リンクが他のノードに模倣され、最終的にすべてのノードが協力戦略を選ぶこととなる。

一方、 $\delta$  が大きくなるといずれの方式においても定常状態で協力的な戦略をとるノードの割合が減少していることがわかる。ただし、 $\delta=0.5$ 、 $\delta=0.9$  いずれの場合においても、提案方式は既存方式に比べて高い値を示しており、協力行動にともなうコスト増に対してよりロバストなオーバーレイネットワークを構築可能である。なお、文献[9]では適切なパラメータ設定により  $\delta=0.5$ 、 $\delta=0.9$  の場合においても定常状態における  $f_c=1$  を実現可能であると述べられているが、シミュレーションの結果、乱数の与え方によってそれが実現される場合とされない場合に分かれ、平均的な振る舞いとしては図1で示される結果となった。この点に関しては提案方式においても同様の傾向が見られた。

以降では、公平な評価のため、両方式において定常状態における  $f_c$  が 1 となる  $\delta=0.1$  の場合の結果を用いて評価を行うものとする。

#### 4-3 オーバレイネットワーク構造の分析

以降では、提案方式と既存方式でそれぞれ構築されるオーバーレイネットワークの構造について分析する。提案方式と既存方式で構築されるオーバーレイネットワークの平均次数はそれぞれ 12.07、13.06 であった。

図3は提案方式と既存方式における  $E_d(G)$  と  $E_h(G)$  の推移を示している。まず、 $E_h(G)$  は提案方式よりも既存方式の方が高い値を示していることから、オーバーレイネットワーク単体として見た場合、任意の2ノード間のオーバーレイホップ数は既存方式の方が少なくなることがわかる。これは、既存方式ではスモールワールド構造が出現するのに対し、提案方式では隣接ノードの候補を IP ネットワーク上での近傍に位置するノードに限定しているため、スモールワールド構造が出現しにくいことを意味している。また、既存方式に比べて提案方式の方が平均次数が小さいことも影響している。一方、 $E_d(G)$  については提案方式の方が既存方式よりも最大で2倍程度の値を示しており、提案方式を用いることで、オーバーレイネットワーク上の任意の2ノード間で通信が行われる際の応答性や IP ネットワークにかかる負荷を改善できることがわかる。

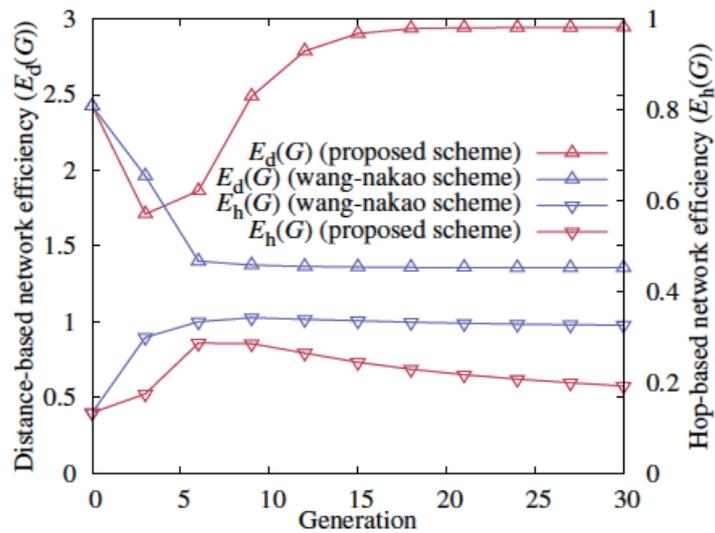


図 4 ネットワーク効率性の推移

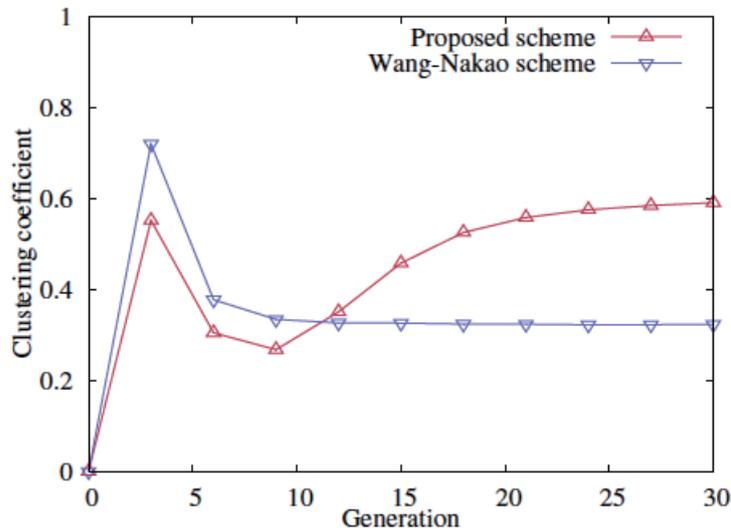


図 3 クラスタ係数の推移

次に、提案方式と既存方式におけるクラスタ係数の推移を図 4 に示す。図より、提案方式は既存方式に比べて高いクラスタ係数を持つオーバーレイネットワークを構築していることがわかる。これは、提案方式では IP ネットワーク上で近傍のノード間で優先的に隣接関係を築くことから、triangle motif が多数出現するためである。triangle motif の構造により、頑強な協力関係の構築だけでなく、特定ノードの故障・消失に対する頑健性の向上も期待できる。

## 5 おわりに

本研究では、協力的な関係の創出と IP ネットワークとの相関性の向上を可能とするオーバーレイネットワーク構築のための包括的な手法を提案した。提案手法は進化ダイナミクスに着想を得ており、各ノードはよりより接続関係を築いているノードの戦略と接続関係を模倣することで、自身の接続関係の更新を試みる。その際、接続関係を比較する相手、接続相手となるノードを IP ネットワーク上で近傍のノードから優先的に選択することで、IP ネットワークとの相関性を高め、ユーザのサービス品質向上を同時に実現することが可能となる。シミュレーション評価により、提案手法を用いることでサービス品質を考慮した協力的なオーバーレイネットワークを構築できることを示した。

## 【参考文献】

1. E. Adar, B.A. Huberman, Technical Report Xerox PARC (2000)
2. J.W. Weibull, Evolutionary Game Theory (The MIT Press, 1997)
3. F. Fu, L. Liu, L.Wang, The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems 56(4), 367 (2007)
4. H. Ohtsuki, M. Nowak, Journal of Theoretical Biology 251(4), 698 (2008)
5. F. Santos, J. Pacheco, T. Lenaerts, Proceedings of the National Academy of Sciences 103(9), 3490 (2006)
6. M.A. Nowak, Science 314(5805), 1560 (2006)
7. C.E. Tarnita, T. Antal, H. Ohtsuki, M.A. Nowak, Proceedings of the National Academy of Sciences 106(21), 8601 (2009)
8. D. Hales, S. Arteconi, IEEE Intelligent Systems 21(2), 29 (2006). DOI <http://dx.doi.org/10.1109/MIS.2006.35>
9. Y. Wang, A. Nakao, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B 40(2), 493 (2010). DOI <http://dx.doi.org/10.1109/TSMCB.2010.2042123>
10. Y. Liu, L. Xiao, X. Liu, L.M. Ni, X. Zhang, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 16(2), 163 (2005)
11. J. Zhang, L. Liu, C. Pu, in Proceedings of GLOBECOM 2005 (St. Louis, 2005), pp. 636–640
12. D. Qiu, R. Srikant, SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 34, 367 (2004)
13. H. Zhang, G. Neglia, D. Towsley, G.L. Presti, in Proceedings of 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '07) (2007), pp. 2189–2197
14. G. Neglia, G.L. Presti, H. Zhang, D. Towsley, in Proceedings of the 1st EuroFGI International Conference on Network Control and Optimization (2007), pp. 13–22
15. M. Jain, C. Dovrolis, IEEE/ACM Trans. Netw. 11, 537 (2003)
16. F. Dabek, R. Cox, F. Kaashoek, R. Morris, in Proceedings of ACM SIGCOMM 2004 (ACM Press, New York, 2004), pp. 15–26
17. K. Matsuda, G. Hasegawa, M. Murata, in Proceedings of the 25th of the International Conference on Information Networking (ICOIN) (2010)
18. S. Ren, E. Tan, T. Luo, S. Chen, L. Guo, X. Zhang, in Proceedings of the 29th Conference on Information Communications (2010), pp. 1523–1531
19. M. Jelasity, A. Montresor, O. Babaoglu, ACM Transactions on Computer Systems 23, 219 (2005)
20. U. Wilensky. NetLogo (1999). Available at <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
21. B.M. Waxman, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 6(9), 1617 (1988)
22. A.L. Barabási, R. Albert, Science 286 (1999)

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Evolutionary Game Theory-Based Evaluation of P2P File-Sharing Systems in Heterogeneous Environments	International Journal of Digital Multimedia Broadcasting	2010年3月