

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21800027

研究課題名（和文）スケーラブルな自己組織型オーバーレイネットワークに関する研究

研究課題名（英文）On a self-organized routing method for scalable overlay networks

研究代表者

小泉 佑揮 (KOIZUMI YUKI)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：50552072

研究成果の概要（和文）：物理学や化学、および、生物学におけるポテンシャルの概念に着想を得た自己組織型の制御方式により、トポロジに変化がある場合でも効率的なデータ転送可能な経路制御方式を提案した。自然界では、様々な勾配場が重畳されてポテンシャル場が形成されるというアナロジーにもとづき、既存研究で提案されているデータ転送のための勾配場に、トポロジの変化を考慮した勾配場を重畳する。シミュレーションにより、トポロジの変化がある場合でも、低遅延かつ少ない制御情報量でデータ転送が可能なポテンシャル経路制御を実現した。

研究成果の概要（英文）：In this research, to achieve the efficient data transmission with low amount of control information, we propose a new potential-based routing, which is inspired by gravitational, electromagnetic, or other potential fields in physics, chemistry, or biology. More specifically, we superimpose a new gradient field to overcome the changes in network topologies onto the gradient field for data transmission, which was proposed in the several existing researches. Through simulations, we show that our proposed method achieve the efficient data transmission under the situation where the network topology changes dynamically.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,070,000	321,000	1,391,000
2010 年度	925,680	294,000	1,219,680
年度			
年度			
年度			
総計	1,995,680	615,000	2,610,680

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：オーバーレイネットワーク、自己組織制御、経路制御

## 1. 研究開始当初の背景

インターネットの発展に伴い、様々なアプリケーション技術が登場している。これに伴い、Web やメールなどのレガシートラフィックだけではなく、Peer-to-Peer ファイル共有システムや VoIP などに起因する様々なトラフ

ックがネットワーク上に流れている。また、インターネットに接続するユーザの増加に伴い、ネットワークの利用形態が多様化しており、ネットワークに流れるトラフィックも多様化している。さらに、今後到来するユビキタス社会では、計算機や携帯電話などの情報端末に加え、家電製品や自動車などの多様な

機器が、有線、無線などの様々なネットワークを介して通信を行う。以上の背景から、将来のインターネットには、多種多様なノードを收容し、かつ多種多様なトラヒックを柔軟に收容するための基盤技術が必要不可欠である。

しかし、インターネットのインフラストラクチャーは、トラヒック收容量の最大化などの性能指標にもとづいた制御が行われている。また、通信事業者には、ネットワークを停止することなく運用することが求められており、機器の通信媒体が持つ特性の差や、アプリケーションの要求する通信品質の差を考慮した制御手法を新たに導入することは困難である。このように、インターネットのインフラストラクチャーは、多様なトラヒックを柔軟に收容できないのが現状である。

このような問題を解決するためのアプローチとして、オーバーレイネットワークが注目されている。オーバーレイネットワークのキーとなる概念は、IP ネットワークなどの既存アンダーレイネットワーク上に論理的なネットワークを構築し、その論理的なネットワーク上でオーバーレイネットワークが経路制御（オーバーレイルーティング）をすることである。オーバーレイネットワーク上の各ノードは、論理ネットワーク上で、遅延やスループットなどのアンダーレイネットワークの状態を計測し、自身が必要とする性能や機能を満たす経路を選択することで、通信の機能や性能をアンダーレイネットワークから引き出すことができる。また、オーバーレイネットワークは既存のインフラを変更する必要がない点や、主にアプリケーションとして開発されている点から、柔軟な機能の実現やインターネットへの展開が容易であるという利点もある。

その一方で、オーバーレイネットワークの、ネットワーク規模およびネットワーク制御情報量に関するスケーラビリティに問題があることを指摘されている。オーバーレイネットワークでは、自身の通信品質を向上させるために、随時アンダーレイネットワークの状態を計測している。オーバーレイネットワークの1つである Resilient Overlay Network (RON)[Andersen01]は、各ノードが、通常時では約 30 秒に 1 回、輻輳やリンク障害などの通信品質劣化時にはより細かい間隔でネットワークを計測する。この計測は、各ノードが独立して実施するため、ノード数  $n$  に対してネットワーク上の計測トラヒック量は  $O(n^2)$  であり、ネットワークの規模が大きくなるにつれて制御が破綻するのは明らかである。また、ネットワーク全体を計測すると、各ノードで計測情報の処理に要する処理が膨大になるだけでなく、情報が劣化するとい

う問題がある。すなわち、ネットワークの規模が大きくなり、ネットワーク計測から実際のトラヒック転送までの時間が長くなると、トラヒック転送時には、ネットワークの状態が計測時から変化している可能性が高くなり、効率的なトラヒック転送ができない。以上のように、オーバーレイネットワークは、既存のインフラストラクチャーを変更することなく、多種多様なトラヒックを柔軟に收容するための手段として有望視されているものの、スケーラビリティに問題があるため、普及に至っていない。そこで、本研究課題では、自然界で観測される自己組織的な振る舞いに着想を得た自己組織型経路制御手法を実現し、オーバーレイネットワークのスケーラビリティを向上することで、多様な端末を柔軟に收容可能なインターネットのインフラストラクチャーの実現を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、既存のインターネットインフラストラクチャーの柔軟な利用を可能にする、スケーラブルかつ柔軟なオーバーレイネットワークの実現を目的とした研究を遂行する。具体的には、各ノードが近傍の情報のみを利用し、その情報にもとづいて自己組織的に経路を制御することで、大規模ネットワークに適用可能で、かつ多種多様な端末を收容可能なオーバーレイネットワークの確立を目指す。

## 3. 研究の方法

大規模ネットワークに適用可能なオーバーレイネットワークを実現するためには、制御情報量の削減を実現する必要がある。本研究課題では、この要件を満たす制御方式として、自己組織型の制御に注目する。自己組織型の制御とは、それぞれのノードが自身の近傍の情報をもとに、自律分散的に制御を実施することで、わずかな情報量で、柔軟な振る舞いを実現する制御方式である。はじめに、自己組織型の制御が有する、わずかな情報量で制御を実現することが可能であるという特性を応用することで、大規模ネットワークにも適用可能なスケーラビリティの実現を図る。次に、自己組織型制御の柔軟な振る舞いを応用することで、多様なノードを收容可能なオーバーレイネットワークの実現を図る。

本研究課題では、上記の自己組織型のアプローチとして、物理学や化学、生物学におけるポテンシャルの概念に着想を得た自己組織的な経路制御方式であるポテンシャル経路制御に注目する。例えば、物理学では、重

力、電界、磁界などの場 (Field) 中を粒子がその場に従って移動する現象が観測されており、ポテンシャル経路制御はこれらの現象を経路制御に応用したものである。それぞれのノードが隣接ノードと互いに情報交換しながらネットワーク内に自律分散的にポテンシャルを形成する。それぞれのノードは隣接ノードのポテンシャル値のみをもとにトラヒックを転送すれば良い。そのため、既存の経路制御方式よりも制御情報量を大幅に削減することができ、ネットワークの規模に対するスケーラビリティを向上させることができる。

ポテンシャル経路制御は、それぞれのノードがネットワーク全体の情報を把握できないような、モバイルアドホックネットワークの分野では、応用が検討されている。しかし、本課題が目指す、有線、無線などの様々なネットワークを介して通信を行う多様な端末を柔軟に収容するオーバーレイネットワークを実現するためには、有線、無線網の差を考慮したポテンシャル経路制御を実現する必要がある。モバイルアドホックネットワークの分野で考えられているポテンシャル経路制御をそのまま応用することはできない。そこで、固定端末によって構成される有線ネットワークと、移動端末によって構成される無線ネットワークの相互接続が可能なポテンシャル経路制御を実現する。

以上の課題を解決することで、大規模ネットワークに適用可能で、かつ多種多様な端末を収容可能なオーバーレイネットワークの確立を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) ポテンシャル経路制御の概要

本課題では、ベースとするポテンシャル経路制御方式として、文献[Lindgren03]で提案されている Utility-based Routing を用いる。本課題の成果を述べる前に、既存方式である Utility-based Routing の概要を述べる。

Utility-based Routing では、それぞれのノード  $a$  が他のノード  $b$  に対するユーティリティと呼ばれる値  $P_{a,b}$  を持ち、この値に基づいてデータを転送する。ノード  $a$  では、ノード  $b$  宛のデータを転送するノードを

$$P_{c,b} = \max_{i \in \text{neighbor}(a)} P_{i,b} \quad (1)$$

となるノード  $c$  に転送する。ただし、 $\text{neighbor}(a)$  は、ノード  $a$  と通信可能なノードの集合とする。すなわち、周囲のノードの中で、最もユーティリティ  $P_{c,b}$  の高いノード  $c$  にデータを転送する。このとき、ノード  $b$  が

ポテンシャルの発生源と見なすと、ネットワーク内では、 $b$  を起点とするグラディエントが形成されており、ポテンシャルのアナロジーにしたがい、データをポテンシャルの高いノードに転送する。

Utility-based Routing では、ユーティリティを隣接ノード間で交換することで、自律分散的に構築する。はじめに、ポテンシャルの起点ノード  $b$  と隣接しているときは、以下の式でユーティリティを更新する。

$$P_{a,b} = P_{a,b}^{\text{old}} + (1 - P_{a,b}^{\text{old}}) \cdot P_{\text{init}} \quad (2)$$

ここで、 $P_{\text{init}}$  は、ユーティリティの初期値を決める定数である。ノード  $a$  が  $b$  と隣接していない場合は、以下の式にしたがって、一定時間ごとにユーティリティを更新する。

$$P_{a,b} = P_{a,b}^{\text{old}} \cdot \gamma \quad (3)$$

$\gamma$  は (0,1) の定数、 $P_{a,b}^{\text{old}}$  は更新前のユーティリティである。これにより、一定時間ごとに、ノード  $b$  と隣接関係にない場合は、一定時間ごとに、ユーティリティを減衰させる。最後に、ノード  $b$  と隣接関係にはないが、他のノード  $c$  と隣接関係にある場合は、以下の式にしたがって、ユーティリティを伝搬させる。

$$P_{a,b} = P_{a,b}^{\text{old}} + (1 - P_{a,b}^{\text{old}}) \cdot P_{a,c} \cdot P_{c,b} \cdot \beta \quad (4)$$

ここで、 $\beta$  は定数である。以上のようにして、ノード  $b$  を起点とするポテンシャルのグラディエントを自己組織的に形成する。

次章では、提案方式であるノードの移動を考慮したポテンシャル経路制御を述べる。

### (2) ノードの移動を考慮したポテンシャル経路制御

既存方式である Utility-based Routing は、自己組織的にグラディエントを形成することができ、スケーラブルな経路制御を実現できる。しかし、モバイルアドホック網を対象として考案された方式であるため、有線網に接続している固定端末と、無線網に接続している移動端末が混在する状況下では、その移動特性の差によって、データ転送が効率的に行われぬ。そこで、本課題では、ノードの移動特性が異なる場合を考慮したグラディエント構築により、固定端末によって構成される有線ネットワークと、移動端末によって構成される無線ネットワークの相互接続が可能なポテンシャル経路制御の実現を目指す。

はじめに、ノードの移動特性を考えた場合のグラディエント形成方法を述べる。Utility-based Routing を移動端末と固定端末が混在する環境下で利用する場合は、グラディエントが適切に形成されるだけでは不十分である。具体的には、移動端末  $a$  が固定端末  $b$  の近くを通りすぎた場合、式 (2) によって、

$P_{a,b}$ が高い値に更新される。しかし、 $a$ は、その後、 $b$ から遠ざかるが、 $P_{a,b}$ が高いため、他のノードは $b$ 宛のデータを $a$ に転送してしまう。その結果、データも $a$ とともに宛先である $b$ から遠ざかり、データの転送遅延が増加してしまう。

そこで、あるノード $a$ が宛先ノード $b$ の近くを通り過ぎた直後のユーティリティを上昇させることで、データのスムーズな転送を試みる。自然界では、様々なポテンシャルが重畳されてグラディエントが形成されているというアナロジーを応用し、式(1)から(4)で定義されるデータ配送のためのグラディエント $P_{a,b}$ と、ノードの移動による影響を補正するグラディエント $Q_{a,b}$ を重畳させ、Utility-based Routingの自己組織的なデータ転送の能力を損なわずに、ノードの移動による影響を補正する。具体的には、ノード $a$ が $b$ と通信した時刻からの経過時間 $t$ に伴い減衰するポテンシャルを以下の式で定義する。

$$Q_{a,b} = -\exp(\alpha \cdot t)$$

その上で、データ転送先のノードを決定する式(1)を以下ように変更する。

$$P_{c,b} + Q_{c,b} = \max_{i \in \text{neighbor}(a)} (P_{i,b} + Q_{i,b})$$

このように、ノードの移動を補正するグラディエントを導入することで、移動端末と固定端末が混在するようなネットワークでも効率的なデータ転送を実現することができる。

シミュレーションによる評価の結果を図1に示す。評価結果から、既存方式を用いた場合よりも最大で68%程度に遅延を抑えることができることが分かった。

### (3) ゆらぎを用いたグラディエント形成

移動端末が含まれるネットワークでは、(2)で提案した方法を用いたとしても、ポテンシャルが周囲のノードよりも局所的に最大となるノードが存在する。ポテンシャルが局所

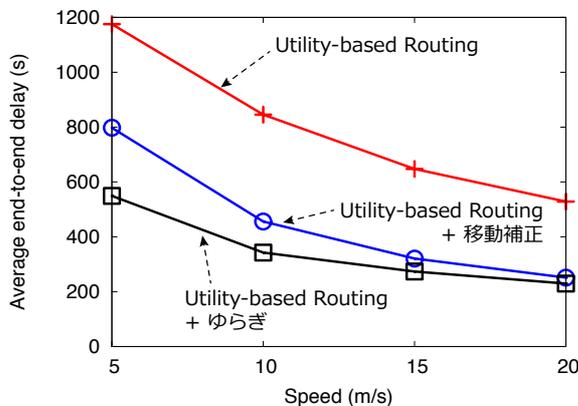


図1 エンド・エンド間の平均メッセージ転送遅延

的に最大となるノードには、周囲のノードからデータが集中するため、効率的なデータ配送が阻害される。この問題は、ノードの移動に起因するものである。ただし、ヒューリスティックな方法で完全に解決することは困難である。そこで、自然界には一定量のゆらぎが存在するというアナロジーを応用し、グラディエント形成にゆらぎを応用することを考える。

具体的には、式(3)で、一定時間ごとにユーティリティを更新する際に、ゆらぎを加える。

$$P_{a,b} = P_{a,b}^{\text{old}} \cdot \gamma + \eta$$

$\eta$ は、平均0のホワイトガウシアンノイズである。これにより、ポテンシャルの局所最大の影響を抑え、データの効率的な転送を試みる。

図1から、シミュレーションによる評価の結果、既存方式と比較して、最大で46%に遅延を抑えることができることが分かった。

### (4) デモンストレーションの作成

研究成果の最後に、本課題成果のアウトリーチ活動の一環として作成した、ポテンシャル経路制御の可視化デモプログラムを図2に示す。

図の丸はノードを表し、ノードの色はユーティリティを表している。ユーティリティが高いほど赤で、低いほど黒になる。また、背景のグリッドの色はグラディエントを可視化している。ユーティリティの勾配を青のグラディエントで示している。

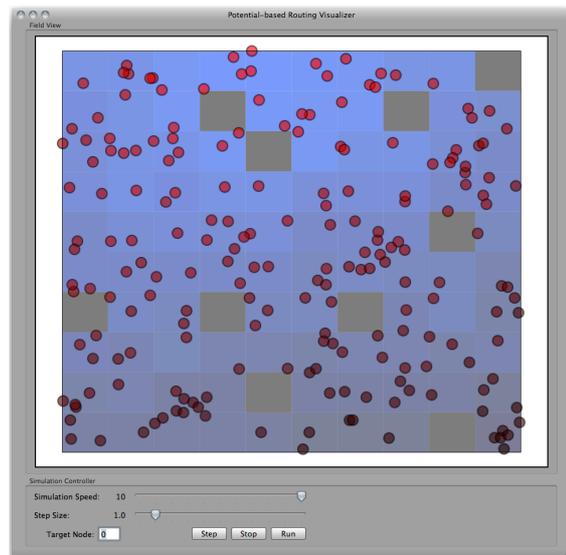


図2 ポテンシャル経路制御の可視化プログラムのデモ画面例

参考文献

[Lindgren03] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, 2003.

[Andersen01] D. G. Andersen et al., "Resilient overlay networks," in *Proceedings of SOSP*, pp. 131–145, Oct. 2001.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

現在投稿準備中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 佑揮 (KOIZUMI YUKI)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：50552072

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし