

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23700081
 研究課題名（和文） 遅延耐性ネットワークにおける異種端末の共生を可能にする経路制御方式に関する研究
 研究課題名（英文） On the gradient-based routing for supporting heterogeneous nodes in Delay Tolerant 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）：本研究では、特性の異なる多種多様な端末を柔軟に収容する遅延耐性ネットワーク実現を目的とし、生物の環境変化に対する適応性を応用したノードの特性に依存しない遅延耐性ネットワークにおける経路制御の実現を目指す。脳や細胞の成長過程で形成される化学物質による濃度勾配に着想を得た方式により、ノードの移動特性を考慮した経路制御を提案した。本方式は、自己組織的に形成した勾配にもとづいてメッセージを転送する。シミュレーション評価を通して、移動特性の異なるノードが混在する環境におけるメッセージ転送遅延を最大で 50%削減することを明らかにした。さらに、提案手法である移動特性補正用勾配は、複数の既存方式に応用することが可能であり、既存のいくつかの経路制御手法の性能を改善できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Gradient-based routing, where each node calculates a metric that indicates how useful the node might be in relaying messages to a destination node and transmits messages according to the metric, is a promising approaches for Delay Tolerant Networks. Conventional gradient-based routing methods do not consider node movement when they form a gradient, which may result in inefficient message relays and degraded performance. We devise a gradient-based routing method that incorporates node movements into its gradient, thereby overcoming the inefficient message relay problem. Use of the proposed method reduces the average message delivery delay by up to 50% when the nodes travel straight. Its use also substantially reduces the maximum message delivery delay.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

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：モバイルネットワーク技術

1. 研究開始当初の背景

無線通信機器の小型化や省電力化に伴い、様々な物に通信機能が搭載されており、自動車による車車間通信ネットワーク、環境モニタリング端末によって構成されるセンサーネットワークなど多種多様なネットワーク

が提案されている。このようなネットワークの大きな特徴の1つとして、通信機器（以降ノードとする）が移動する点が挙げられる。ノードの移動により、通信の切断およびネットワークの分断などが発生するため、既存のネットワーク制御手法は適切に動作しないことが知られている。このようなネットワー

クは、遅延耐性ネットワーク (DTN) と呼ばれており、DTN を対象とした制御手法に関する研究が盛んになされている [Matsuda08]。

上述の通り、DTN では、ノードの移動によりネットワークの状態が時々刻々と変化するため、データ (DTN ではメッセージと呼ぶ) の始点ノードから目的地ノードまでの経路を決定することは困難である。そのため、1 ホップごとに次の中継ノードを決定していく方式がとられることが多い。それでもやはり、時々刻々と変化するネットワークの性質上、数ある隣接ノードから、メッセージを中継するノードを決定することは難しい。したがって、DTN におけるメッセージ転送に関する既存研究の多くは、ノードがある確率モデルで決定される速度や移動パターンなどの移動特性にしたがって移動すると仮定し、そのモデルの移動特性を考慮したときに、メッセージの目的地ノードに対して効率的にメッセージを配送できる可能性のあるノードにメッセージを転送していく方式を提案している。しかし、当然のことながら、ノードが経路制御方式の想定しない移動をする場合には、性能が大きく劣化することが示されている [Spyropulos08]。このように、既存研究の多くは、ある特定のネットワークに閉じた制御しか実現できないのが現状である。

一方で、DTN 技術の応用が期待されるネットワークは数多く提案されており、ノードの特性も多岐に渡っている。上述のノードの移動に焦点を当てた場合でも、図 1 に示すように、自動車は直線的な移動をするのに対し、歩行者はランダムな移動をすることが知られている。我々の生活空間を想定した場合、自動車と歩行者のように異なった移動特性を持つノードが混在している。将来のネットワークでは、このような異なる特性を持つノードを柔軟に運用することが求められている。例えば、総務省が掲げる ICT 戦略では、センサーネットワークによってモニタリングされた情報が、アドホックに接続された周囲のモバイル端末に柔軟に配送されるようなネットワークが目標として掲げられている。このような環境を実現するためには、多種多様なノードを柔軟に収容可能なネットワークを実現することが必要不可欠であるが、既存研究あるいはそれらを組合せるのみでは、ある特定のネットワークに閉じた制御しかできないのが現状である。以上より、移動特性の異なる様々なノードが混在する環境でも、その特性に依存せずにメッセージを転送可能な DTN を実現することは重要な課

題である。

[Spyropulos08] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. Raghavendra, "Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, pp. 63-76, Feb. 2008.

[Matsuda08] T. Matsuda and T. Takine, "(p, q)-epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc network," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 26, no. 5, pp. 783-793, 2008.

[Kaneko06] K. Kaneko, Life: An introduction to complex systems biology. Understanding Complex Systems, Springer, 2006.

2. 研究の目的

前述の背景をふまえ、本研究では、移動特性の異なるノードが混在する DTN 環境下でも柔軟にメッセージ転送を実現することを可能にする経路制御方式の実現に取り組む。

3. 研究の方法

目的を実現するためには、次の 2 点を達成することが必要不可欠である。

- (1) ノードの移動特性の差や変化に対して柔軟かつ適応可能な制御メカニズムを実現する
 - (2) 少ない制御情報量、すなわち局所的な情報のみを利用し、適切な経路を決定する
- (1) は、本研究の目的である移動特性の異なる異種端末を柔軟に収容するための幹となるテーマである。(2) は、DTN では必須要件である。DTN では、ノードが常に移動しているため、それぞれのノードがネットワーク全体の情報を把握することは困難であり、近傍のノードとの局所的な情報交換によってネットワークの状態を推測し、データの転送先を決定する方法が必要である。

本課題では、これら 2 つの特性を有する制御メカニズムとして、脳や細胞の成長過程で形成される化学物質による濃度勾配に着想を得た方式によりノードの移動特性の差や変化に対して柔軟な制御メカニズムの実現を目指す。また、生物の振る舞いに着想を得たメカニズムが局所的な情報交換で制御されているという性質を応用し、DTN における局所的な情報交換にもとづく経路制御の実現を目指す。本課題では、これらの特性を有した DTN における経路制御方式を実現することで、移動特性の異なるノードが混在する

DTN 環境でも、その移動特性に依存しない柔軟なメッセージ転送を実現する。

4. 研究成果

本研究では、特性の異なる多種多様な端末を柔軟に收容する遅延耐性ネットワーク実現を目的とし、生物の環境変化に対する適応性を応用したノードの特性に依存しない遅延耐性ネットワークにおける経路制御の実現を目指す。脳や細胞の成長過程で形成される化学物質による濃度勾配に着想を得た経路制御方式であるポテンシャル経路制御を応用し、ノードの移動特性を考慮した経路制御を実現した。本章では、提案手法の概要およびポテンシャル経路制御を説明し、その後提案手法を説明する。

(1) 提案手法の概要

脳や細胞の成長過程で形成される化学物質による濃度勾配に着想を得た経路制御方式であるポテンシャル経路制御をベースとし、ノードの移動特性を考慮することで、移動特性の異なる多様なノードを收容可能な経路制御方式を実現する。ポテンシャル経路制御は、周囲のノードと局所的な情報交換にもとづいて経路制御に必要な勾配を形成し、形成した勾配にもとづいてメッセージを転送する方式である。提案手法は、経路制御に必要な勾配（経路制御用勾配）に加えてノードの移動特性を加味した勾配（移動特性補正用勾配）を形成し、経路制御用勾配と移動特性補正用勾配を重畳することで、効率的なメッセージ転送する。経路制御用勾配は、隣接ノードから受信した情報をもとに自身の勾配値を計算し、その情報を他の隣接ノードに伝搬させることで形成する。移動特性補正用の勾配は、それぞれのノード内で計算する。

(2) 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[Wang07]で提案されている RED を用いる。本課題の成果を述べる前に、既存方式である RED の概要を述べる。

RED では、それぞれのノード a が他のノード b に対する値（ポテンシャル値とする）と呼ばれる値 $W_{a,b}$ 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

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

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、最もポテンシャル値 $W_{c,b}$ 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。ポテンシャル経路制御の概念を図 1 に示す。

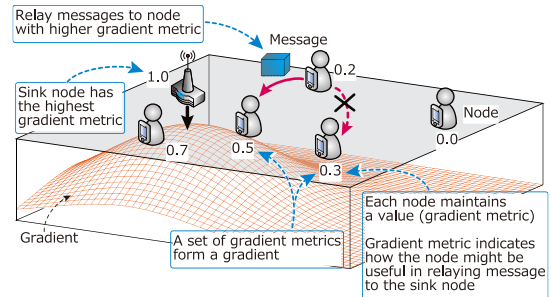


図 1. ポテンシャル経路制御の概念図

RED では、ポテンシャル値を隣接ノード間で交換することで、自律分散的に図 1 の勾配を構築する。以降、宛先をノード d の場合に焦点をあて、ノード d を起点とする勾配の形成方法を説明する。はじめに、ノード d は自身のポテンシャル値、すなわち $W_{d,d}$ をネットワーク内のポテンシャルの最大値である 1 に設定する。ノード i は、ノード k ($i \neq k$ かつ $i, k \neq d$) は、以下の式にしたがって、メッセージの転送に成功した際にポテンシャル値を更新する。

$$W_{i,d} = \begin{cases} (1 - \alpha)W_{i,d}^{\text{old}} + \alpha W_{k,d}, & \text{Transmission} \\ (1 - \alpha)W_{i,d}^{\text{old}}, & \text{Timeout} \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $W_{i,d}^{\text{old}}$ は、ノード i の持つノード d に対する更新前のポテンシャル値である。 α は、 $0 < \alpha < 1$ となる定数である。メッセージ転送に成功した場合は、メッセージ転送先のノード k のポテンシャル値の方が高い。さらに、ノード i のノード k を経由してノード d にメッセージを転送できる可能性があるため、ノード k のポテンシャル値に応じて自身のポテンシャル値 $W_{i,d}$ を更新する。一定の期間内にメッセージ転送がなかった場合は、ノード i のノード d へのメッセージ転送の寄与度は小さいものとし、ポテンシャル値を減衰させる。以上のようにして、ノード d 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。

(3) 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 RED は、自己組織的にグラディエントを形成することができ、スケラブルな経路制御を実現できる。しかし、移動特性の差によって、データ転送が効率的に行われない場合がある。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、異種端末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。RED 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 d の近くを通りすぎた場合、式 (1) によって、 $W_{a,d}$ が高い値に更新される。しかし、 a は、その後、 d から遠ざかるが、 $W_{a,d}$ が高いため、他のノード b は d 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 d から遠ざかり、データの転送遅延が増加してしまう。このような状況の例を図 2 に示す。

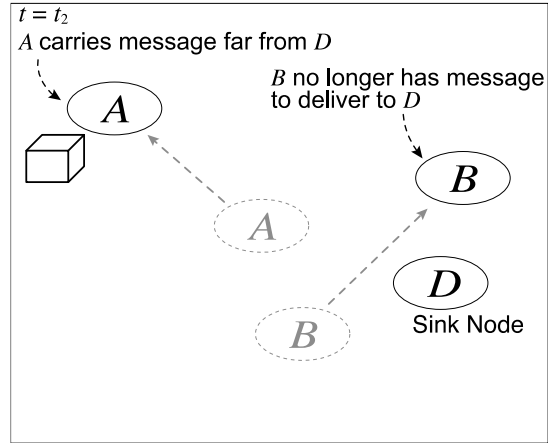
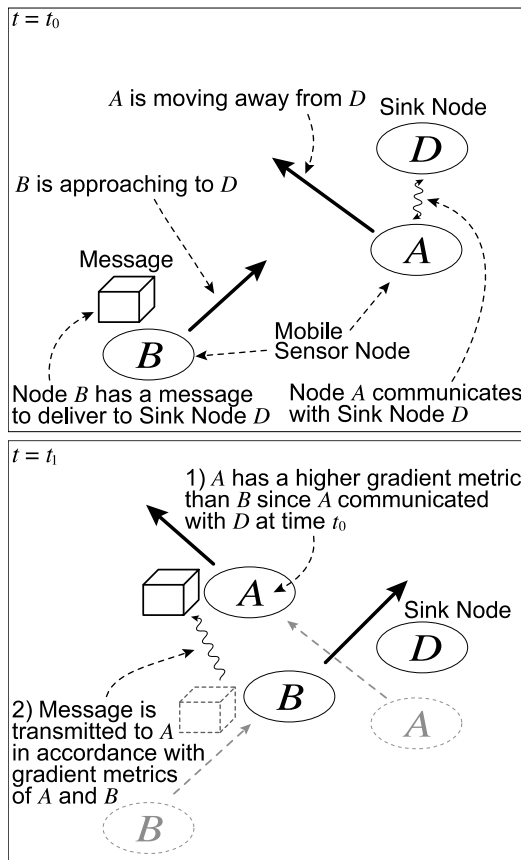


図 2. 既存方式で非効率なメッセージ転送が発生する例

そこで、あるノード a が宛先ノード d の近くを通り過ぎた直後のポテンシャル値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、既存方式で利用されるデータ配送のためのグラディエント $W_{i,d}$ と、ノードの移動による影響を補正するグラディエント $G_{i,d}$ を重畳させ、RED 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 i が d と通信した時刻からの経過時間に伴い減衰するポテンシャル値を以下の式で定義する。

$$G_{i,d} = -\alpha \cdot G_{i,d}^{\text{old}} \quad (3)$$

$G_{i,d}^{\text{old}}$ は、更新前のポテンシャル値である。 α は、 $0 < \alpha < 1$ である定数である。この式で一定時間ごとにポテンシャル値 $G_{i,d}$ を更新する。経路制御に以下で示すポテンシャル値 $V_{i,d}$ を用いる。

$$V_{i,d} = W_{i,d} + G_{i,d} \quad (4)$$

このようにして構成したグラディエントの概念図を図 3 に示す。その上で、データ転送先のノードを決定するルールを以下の通りに変更する

$$V_{c,b} = \max_{i \in \text{neighbor}(a)} V_{i,b} \quad (5)$$

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。

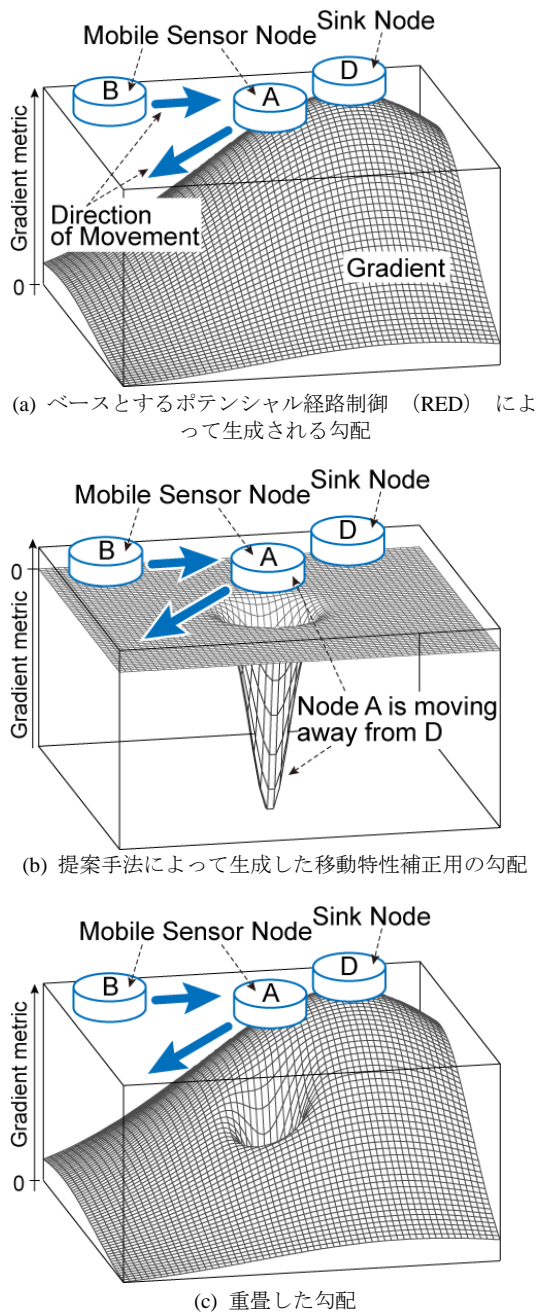


図 3. 提案手法によって生成する勾配の概念図

シミュレーションによる評価の結果を図 4 に示す。図はエンド間のメッセージ転送遅延の度数分布である。図 4 (a)は既存方式である RED を単体で用いた場合であり、図 4 (b)は RED に加えて提案手法である移動特性を考慮したグラディエントを併用した場合の結果である。評価結果から、RED を単体で用いた場合は 100 秒以上の遅延を要する場合も多いが、提案手法を併用することで、非常に長い遅延を被っているメッセージを大幅に削減できたことがわかる。さらに平均値を比較した場合、最大で 50%程度メッセージ転送遅延を削減できることがわかった。

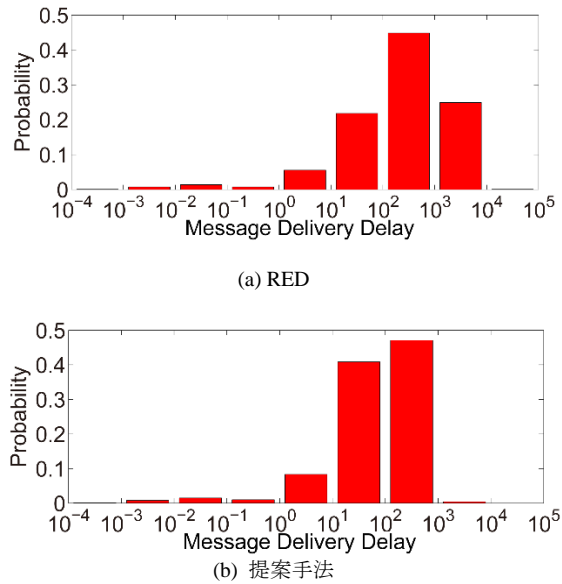


図 4. エンド間のメッセージ転送遅延の分布

[Wang07] Y. Wang and H. Wu, “Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): A new paradigm for pervasive information gathering,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 1021–1034, Sept. 2007.

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)

[学会発表] (計 3 件)

- [1] Yuki Koizumi, Hideyuki Kanai, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, “On the Gradient Formation Incorporating Node Movement for Gradient-based Routing in Delay Tolerant Mobile Sensor Networks,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, Nov. 2012.
- [2] 小泉 佑揮, 金井 秀行, 大崎 博之, 今瀬 真, “遅延耐性ネットワークにおける勾配を用いた経路制御のためのノード移動を考慮した勾配形成方法,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2012-22), Mar. 2012.
- [3] Hideyuki Kanai, Yuki Koizumi, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, “Gradient-based Routing in Delay Tolerant Mobile Sensor Networks Incorporating Node

Mobility,” in *Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Jan. 2012.

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