

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500105

研究課題名(和文) 劣通信環境におけるノード移動特性を利用した蓄積搬送型中継転送アルゴリズムの設計

研究課題名(英文) Study on Algorithm Design for Efficient Data Transfer Controls by using Properties of Human Mobility Patterns in Delay Tolerant Networks

研究代表者

巳波 弘佳 (Hiroyoshi, Miwa)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40351738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、劣通信環境における蓄積搬送型中継転送による情報伝搬を効率化するために、特にノード移動特性を利用するアルゴリズムの設計を行った。まず、ノードの移動特性を実際に収集して解析することにより、新たな性質である遭遇特性のスケールフリー性を発見した。さらに、それを説明する数理モデルとしてHomesick Levy Walkモデルを設計し、遭遇特性をはじめ様々な現実的な特性と整合性があることを示した。さらに、これらの結果も用いて、最適停止理論を利用した蓄積搬送型中継転送アルゴリズムを設計し、理論的解析および数値実験によってその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we designed some novel store-carry-forward routing methods based on properties of human mobility patterns for efficient data transfer controls in delay tolerant networks. First, we gathered data of human mobility and analyzed; as a result, we found the scale-free property in the frequency of serendipitous human encounters. In addition, we proposed a human mobility model, Homesick Levy Walk model, to explain the origin of this property. Furthermore, we designed a store-carry-forward routing algorithm based on this property and the optimal stopping theory and finally confirmed the validity of the algorithm by theoretical analyses and numerical experiments.

研究分野：数理工学

キーワード：劣通信環境 蓄積搬送型通信 最適化 確率論 アルゴリズム コピキタスコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

広帯域・低遅延の通信ネットワークの構築が困難もしくは不可能であるような劣通信環境において、一定の性能を確保できる情報通信技術 DTN の必要性が高まっている。実際、通信インフラが大規模な損傷を受けるような災害時における現実的な情報流通手段の確立は、国際的に防災の観点からも重要な検討項目とみなされている。また、気象観測・地震観測・農作物生育状況調査・動植物生態系調査・水質調査などにおいて、大量のセンサを用いた自然環境情報を収集する方法が実用化されつつあるが、これまで困難であった精度の高いデータの取得が可能となり、気象・地震・災害などの予測や生産性向上などへの多大な効果が期待されている。さらに、通信衛星によるネットワークを利用した深宇宙空間の探査も重要視されており、NASA の惑星間通信ネットワークプロジェクトなども進行している。我が国でも、巳波(研究代表者)と内田(分担者)が参画した、情報通信研究機構(NICT)のDTN技術開発プロジェクトにおいて、広域過疎地域におけるユビキタス通信環境実現を目指した研究開発を行った。

DTN 技術は、移動体で構成されるアドホックネットワーク、資源の少ないセンサとセンシングしたデータを集積するシンクで構成されるワイヤレスセンサネットワークなどの研究と関連して、想定されているより劣悪な通信環境においても、対象に応じて許容可能な性能を確保することを目指す基盤技術である。

DTN 実現のために解決すべき技術課題は多々あるが、本研究では、DTN の性能を決定する主要な要素である情報転送技術を対象とする。DTN では、各ノードが情報を一時的に蓄積し、リンクが使える状態になった時に隣接ノードに情報を転送する、いわゆる蓄積搬送型の中継転送により通信を行う。特に災害時の劣通信環境を想定した場合、送信ノードから目的ノードへのデータ転送だけではなく、各ノードの持つデータの集積や共有も重要である。これらに対して、これまでに様々な蓄積搬送型中継転送方式が検討されているが、性能改善の余地がまだ多く残されていた。そのため、実用レベルの性能のDTN を実現するためには、効率化の追求が必要不可欠であった。

## 2. 研究目的

大規模災害時における情報流通手段の確保や、その発生予知・状況監視のための大量のセンサによる自然環境情報収集など、広帯域・低遅延の通信ネットワークの存在を前提とできない劣通信環境下における情報通信技術 DTN (Delay- and Disruption-Tolerant Networking) の必要性が高まっている。本研究では、DTN における有効な情報転送技術

の確立を目指して、

- ・ノードの移動特性に関する情報を利用した蓄積搬送型中継転送方式の設計
  - ・蓄積搬送型中継転送方式に基づく情報収集・共有方式の設計
- を行うことを目的とした。

## 3. 研究方法

まず、移動特性を表現する適切な量を定義し、その推定アルゴリズムを設計し、確率論の観点からその収束条件および収束性能を明らかにし、さらに数値実験によって実際にも良好な性能を示すことを確認することを目指した。また同時に、予備実験として収集蓄積を進めていた、人間など実際の移動体の移動経路履歴データを利用し、移動特性を適切に捉えられることを検証することを目指した。

次に、推定された移動特性に関する情報に基づき、目的ノードへの到達可能性が高く、かつリソース消費を抑制できるデータ転送戦略アルゴリズムを設計した。その際、数値実験によって実際にも良好な性能が得られることを示すだけでなく、最適化理論や確率論に基づき、理論的性能限界の明確化とそれに近い性能を達成できるアルゴリズムの設計を目指した。データ転送戦略は、確率的な要素を含むスケジューリング問題に類似した、ある種の離散最適化問題として扱うことができるため、性能が保証できるアルゴリズムが得られる可能性が高いため、その方向からアプローチした。

さらに、性能評価尺度として、到達確率や到達時間、またノードの情報蓄積容量・処理能力・消費可能電力などのリソース消費量を中心に調べ、これらの間の関係性を明らかにすることを目指した。

## 4. 研究成果

本研究では、劣通信環境における蓄積搬送型中継転送による情報伝搬を、特にノード移動特性を利用して効率化するアルゴリズムの設計を行った。

まず、ノードの移動特性を実際に収集して解析することにより、新たな性質である遭遇特性のスケールフリー性を発見した。人間同士の出会いはランダムではなく、相手ごとに出会う回数や時間間隔には大きな偏りがある。また、移動もランダムウォークではないと考えられるが、どのような移動特性があるのか、これまではよく分かっていなかった。移動特性を調べるため、測定機能を追加した携帯端末を多くの被験者に保持してもらい、長期間にわたってデータを収集し分析した。その結果、すれ違い頻度分布(出会った回数の度数分布)がべき乗則にしたがうこと(スケールフリー性)を新たに発見した。補累積分布を図1に示す。

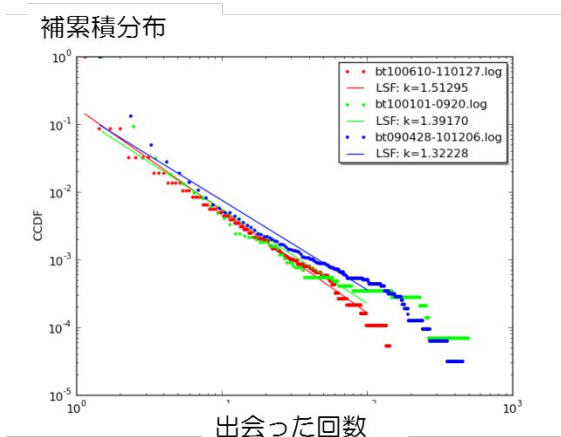


図1 すれ違い頻度分布

さらに、この観測結果と整合性を保つためには「拠点」の存在が必要であることを明らかにした。これまで、生物の移動はレヴィウォークにしたがうという知見が広く知られていたが、単なるレヴィウォークでは、すれ違い頻度分布のスケールフリー性は現れない。また、ランダムウォークでも現れない。そこで拠点を考慮したホームシックレヴィウォークモデルを新たに提案した。図2にレヴィウォークとホームシックレヴィウォークの例を挙げる。

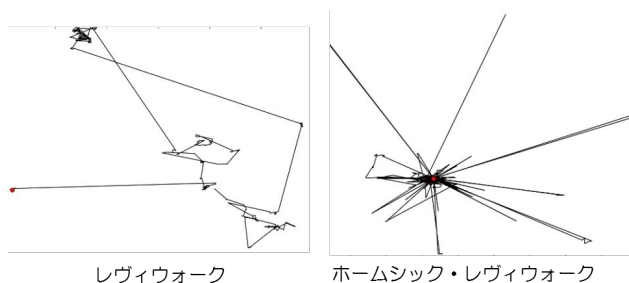


図2 ホームシック・レヴィウォーク

ホームシックレヴィウォークモデルとは、レヴィウォークで移動しつつ、確率的に拠点に戻るというモデルである。ホームシックレヴィウォークモデルでは、すれ違い頻度分布にスケールフリー性が現れ、観測結果と整合性が保たれる。このホームシックレヴィウォークモデルにおいて、すれ違い頻度分布がべき乗則にしたがうことを、平均場近似に基づいて理論的に示し、また数値実験でも示した。なお、ランダムウォークにおいて確率的に戻る拠点を考慮したホームシックランダムウォークモデルではすれ違い頻度分布のスケールフリー性は現れない。したがって、すれ違い頻度分布のスケールフリー性のためには、レヴィウォークであることと拠点の2つの要因がなければならないことがわかった。さらに、ホームシックレヴィウォークを拡張した、複数拠点間を確率的に移動するモデルにおいて、移動履歴が得られたとき、モデ

ルパラメータを推定することによって、将来の移動経路の予測が可能となるため、出会ったノードへデータ転送をするか否かの決定がより高い精度で行えるようになる。

次に、ノードの移動経路やノード同士の遭遇に関する特性を利用することで、蓄積搬送型通信の効率的な制御法を設計した。一つはノード同士の遭遇時間間隔に関する情報から、ノード同士の会いやすさを推定しておき、データを持つノードが他のノードに出会ったとき、そのノードが目的ノードと会いやすいか否かによってデータを実際に転送するか否かを決定するものである。目的ノードに出会いやすいノードのみにデータを転送するため、データのコピー数が抑えられ、ストレージや電力消費量が少なく済むと同時に、高い到達確率と短い到達時間が期待できる。このアイデアに基づき、最適停止理論を利用して、理論的な性能保証ができるデータ転送ノード決定アルゴリズムを設計した。ノードがホームシックレヴィウォークにより移動する状況において、提案アルゴリズムが他の様々なアルゴリズムよりも高い到達確率と短い到達時間が実現できることをシミュレーションにより示した。

また、災害時に残存した通信ネットワークと車車間通信を組み合わせた通信方式である Virtual Segment 方式の高度化も行った。基本的には車車間通信でコンテンツの拡散を行うが、ベースノード A のそばを通過した車両は残存ネットワークにコンテンツをわたし、目的地に近いベースノード B まで残存ネットワーク上で送信され、ベースノード B のそばを通過した車両にコンテンツが渡された後は再び車車間通信でコンテンツの拡散が行われ、目的地に到達させるという方式である。車車間通信のみでコンテンツを拡散させて目的地まで到達させるよりも、残存ネットワークでショートカットすることにより、遅延時間は短縮され、到達確率も大きくできることが期待できる。まず、この Virtual Segment 方式において、適切なベースノード配置法を提案した。一般に、ベースノードの配置場所によって到達確率や遅延時間が変わる。適切な配置場所を決定する問題を最適化問題として定式化し、NP 困難性を証明し、ヒューリスティックアルゴリズムを設計した。さらに、ベースノード故障時の優先的復旧ノード決定法も提案した。一度にすべての故障ベースノードを復旧することは現実的には困難であるため、全体の性能が改善するベースノードから優先的に復旧することが有効であると考えられる。これについても、ヒューリスティックアルゴリズムの設計を行った。これらについて、別途開発してきた道路網トポロジ推定システムによって推定した、東日本大震災直後における実際の道路網トポロジを利用し、さらに重力モデルによって実際の居住人口から推定した地区間交通量に基づき、シミュレーションによってア

ルゴリズムの性能を評価した。その結果、東日本大震災時に、この通信方式を利用したシステムが使われた場合の情報流通効果を定量的に評価でき、有効性を示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

1. Yuki Takayama, Hiroyoshi Miwa, Quick Evacuation Method for Evacuation Navigation System in Poor Communication Environment at the Time of Disaster, Proc. INCoS2014, pp. 415-420, 2014. (査読有)

2. Akihiro Fujihara, Hiroyoshi Miwa, Homesick Levy Walk: A Mobility Model Having Ichi-Go Ichi-e and Scale-Free Properties of Human Encounters," Proc. IEEE COMPSAC2014, pp. 576-583, 2014. (Best Paper Award) (査読有)

3. 藤原明広, 巳波弘佳, すれちがい通信を利用した災害時避難誘導法, 電子情報通信学会和文論文誌 B (震災復興や新興国の近未来に役立つ情報ネットワーク技術特集号), J96-B 巻 6 号, pp.580-588, 2013 年. (査読有)

4. Hiroshi Tsuji, Akihiro Fujihara, Hiroyoshi Miwa, Methods for Determining the Restoration Order of Base Nodes in the Virtual Segment Network, Proc. INCoS2013, pp. 456-461, 2013. (査読有)

5. Akihiro Fujihara, Hiroyoshi Miwa, On the Use of Congestion Information for Rerouting in the Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication, Proc. ADMNET2013, pp. 563-568, 2013. (査読有)

6. 木村裕太, 巳波弘佳, 東日本大震災時の実道路ネットポロジに基づく Virtual segment 方式の性能評価, 電子情報通信学会技術報告, Vol. NS-111, No. 468, pp. 301-306, 2012. (査読無)

7. Akihiro Fujihara, Shiro Ono, Hiroyoshi Miwa, Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing Under Sequential Encounters for Delay Tolerant Networks, Proc. IEEE INCoS, pp. 279-286, 2011. (Best Paper Award) (査読有)

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 巳波弘佳, 劣通信環境下における情報流通を実現する技術と理論, 第 3 回 知識科学研究科セミナー, JAIST, 石川県, May.16, 2014. (招待講演)

2. 巳波弘佳, 劣通信環境下における情報流通技術とそれを支える数理, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2014 年春季シンポジウム, 大阪大学(大阪府豊中市), Mar. 5, 2014. (招待講演)

3. Hiroyoshi Miwa, Delay Tolerant Networking Technology for Disaster Management - Theoretical and Practical Aspects of Opportunistic Communications, Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication sciences, Seoul, Korea, Nov.22, 2012. (招待講演)

4. 巳波弘佳, 人と人のすれ違い頻度分布の性質と蓄積搬送型通信への応用, 電子情報通信学会情報ネットワーク科学研究会, 首都大学東京秋葉原キャンパス(東京都), Oct. 28, 2011. (招待講演)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

巳波弘佳 (HIROYOSHI MIWA)  
関西学院大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40351738

### (2) 研究分担者

藤原明広 (AKIHIRO FUJIHARA)  
福井工業大学・経営情報学科・准教授  
研究者番号: 70448687

内田真人 (MASATO UCHIDA)  
千葉工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20419617