

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500056

研究課題名（和文）

劣通信環境下における情報転送技術に関する研究

研究課題名（英文）

Research on Information Transfer in Challenged Networks

研究代表者

滝根 哲哉 (TAKINE TETSUYA)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00216821

研究成果の概要（和文）：劣通信環境下における情報転送技術に関する研究を行った。具体的には、疎密度モバイルアドホック網における到達確率を最大化し、平均転送遅延を最小化するバッファ管理方式の考案ならびに平均メッセージ遅延が最小なる中継端末候補群を各端末において利用可能な局所的情報のみを用いて、近似的に求める手法を考案した。また、単一コピー転送方式ならびにエピソードルーティングを用いた階層型 3 次元水中センサー網の最適設計手法を考案した。さらに、1 グループ内でのメッセージフェリーの平均遅延を最小化する巡回経路の決定手法ならびにクラスタ群のグループ化手法を考案した。

研究成果の概要（英文）：Research on information transfer in challenged networks was conducted. We developed a buffer management scheme in sparsely populated mobile ad hoc networks, aiming to maximize the delivery ratio and to minimize the mean delivery delay. We also developed a method of finding relay nodes so as to minimize the mean delivery delay, which utilizes local information only available at each node. We also developed system parameter optimization methods for layered 3D underwater sensor networks with single-copy routing and epidemic routing. Furthermore, we developed methods of finding an optimal visiting order of clusters and grouping clusters in ferry-assisted delay tolerant networks in order to minimize the mean delivery delay.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：通信トラヒック工学

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：劣通信環境，耐遅延網，情報転送技術，疎密度モバイル網，蓄積運搬転送

1. 研究開始当初の背景

現状の TCP/IP 通信技術やこれらを利用するソフトウェアは、送受信端末間に適当な往復遅延と小さな損失確率をもつ安定した通

信路が存在し、通信中、常にその通信路が利用可能であることを前提に開発されている。例えば、DNS による名前解決、受信先端末からのフィードバック情報に基づく TCP の

輻輳制御、隣接ルータとの通信路が常に確立していることを前提とした IP パケット転送などは全てこの前提の下でのみ正常に機能する。

一方、このような前提が成立しない状況が実際には存在する。例えば、非常に変化の激しい、あるいは、各端末が孤立しているモバイルアドホック網やモバイルセンサ網、災害等によって通信インフラが破壊された地域における通信、通信インフラが整備されていない極地や砂漠等、極端な僻地における通信、惑星間通信、水中での通信などである。このような劣悪な環境下におかれている通信ネットワーク、ならびに、そのようなネットワークにおける通信技術は DTN (delay tolerant network) と呼ばれており、近年、下記に示すように活発な研究が行われている。

まず、IRTF DTNRG が 2002 年頃から活動を開始し、DTN を含む多様な通信網の相互接続の実現に向けて、バンドル層アーキテクチャや名前解決のための遅延バインド等、DTN における汎用技術の標準化を進めている。一方、学術面では、ACM SIGCOMM、MobiCom 等、主要な国際会議において DTN に関するワークショップ やチュートリアルが併設され、本年 6 月には主要国際学術雑誌である IEEE JSAC が DTN 特集号を発行した。また、海外の大型研究開発プロジェクトに関しては、米国 NSF/FIND において少なくとも四つの DTN 関連プロジェクトが採択され、EU では FP-7 の下、N4C が本年度から活動を開始している。国内では、NICT 九州リサーチセンタにおいて、研究代表者らも参画している DTN 関連プロジェクトが平成 18 年度から平成 20 年度に進行中であった。更に、実証実験の例としては、動物生態調査のため省エネルギーセンサ網や公共交通機関車両を用いた情報転送網等があげられる。

2. 研究の目的

本研究は、劣通信環境下、すなわち DTN における情報転送技術の研究開発を目的としている。一般に DTN と称される通信網では、網資源が乏しく、高遅延、高パケット損失確率、頻繁な、あるいは、長時間の回線断等が存在する。よって、送受信端末間に安定した通信路が存在し、適宜、受信先端末からのフィードバック情報が利用できることを前提とした TCP/IP に基づく従来技術は正常に機能しない。このような劣通信環境下において、通信網がもつ潜在的な能力を十分引き出し、状況に応じて最適な通信を行うことが可能な情報転送技術の確立を目指す。

具体的には、DTN の代表例である疎密度モバイルアドホック網に焦点をあて、上記で述べた要素技術を組み合わせた統合的情報

転送技術の確立を目指す。疎密度モバイルアドホック網とは、アドホック網を構成する移動端末の密度が低く、ほぼ、如何なるときでも送信元端末と宛先端末の間に通信路が確立できないようなネットワークを指す。このような状況下でも通信を可能にする考え方の一つに蓄積運搬転送 (store-carry-forward) パラダイムがある。すなわち、各端末は、移動中、自身が送信元であるメッセージや他の端末からの中継メッセージをバッファに保持し、他の端末と交信可能になった際にメッセージ転送を行うことで、最終的に宛先端末へメッセージを配送するという考え方である。

また、移動端末の動きが鈍い状況下では、メッセージフェリーと呼ばれる特別な端末を巡回させ、孤立している各端末が保持する送信メッセージを回収する手法も検討されている。一般に、複製を用いて冗長化を行うことで、メッセージが宛先端末へ到達する確率や配送遅延の改善が可能であるが、一方で、冗長化はバッファや電力といった網資源を消費するため、性能と網資源消費量の間にはトレードオフが存在する。本研究では、様々な個別状況下において、性能と網資源消費量のバランスが取れた最適な情報転送手法を並行して開発すると共に、そこから得られる知見を統合し、劣通信環境下における統合的情報転送技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、(i) 疎密度モバイルアドホック網におけるバッファ管理方式ならびに中継端末選択方式、(ii) 階層型 3 次元水中センサ網の最適設計手法、(iii) メッセージフェリーの巡回経路決定手法ならびにクラスタ群のグループ化手法について並行して研究を進める。

疎密度モバイルアドホック網では、端末が搭載するバッファ容量が不十分な場合には、移動端末が他の端末と交信可能になった際、本来転送すべき全てのメッセージを転送できなかつたり、新規メッセージが発生した際にバッファ容量が不足するといった現象が起こる。このため、メッセージの保持・破棄を決定する効率的なバッファ管理方式が必要となる。本研究の準備として、メッセージの発生時刻のみに基づく複数のバッファ管理方式の性能比較を既に終えており、管理方式の違いによって、メッセージの到達確率や配送遅延に大きな差が生じることが明らかとなっている。初年度は、メッセージの発生時刻に加えて、オリジナルと複製、メッセージの世代による区別を行う方式を考察し、各種バッファ管理方式の基本的性質を明らかにする。また、平均メッセージ遅延が最小となるような中継端末選択方式を動的計画問

題として定式化することを試みる。さらに動的計画法によって導かれる解の性質を詳細に検討することにより、各端末において利用可能な局所的情報のみを用いて、準最適な中継端末群を求める手法を見いだす。

階層型 3 次元水中センサー網に関しては、はじめに、効率的に構築された階層型 3 次元水中センサー網は、転送方式によらず、平均転送遅延を最小化することを実験的に確認する。さらに、この知見に基づいて、もっとも単純な転送方式である単一コピー転送方式におけるシステムパラメタの最適値の算出手法の確立を目指す。さらに、最も積極的な方式であるエビデミックルーチングを用いた際の最適なシステムパラメタを求める手法を開発する。システムパラメタが与えられたとき、エビデミックルーチングにおける平均メッセージ遅延を計算するアルゴリズムは既に確立しており、システムパラメタの決定問題は制約付き最適化問題として定式化可能である。そこで、無制約最適化問題に対する勾配を用いない手法とペナルティ法を組み合わせることで、この最適化問題の準最適解を求める手法を開発する。

メッセージフェリーの巡回経路決定手法に関する従来の研究では、この問題は巡回セールスマン問題として扱われてきた。その結果、各地域へメッセージフェリーが到達する時間間隔は確率的に等しくなり、その期待値を最小化することで効率化を図っている。しかし、各地域におけるメッセージ発生率は一般に異なるため、この方式では平均メッセージ遅延は最小とはならない。各地域におけるメッセージ発生率が与えられたという条件下で、巡回経路を決定する問題をポーリングモデルとしてとらえ、近似解の導出を試みる。さらに多数のクラスタが存在する場合、これらを複数のグループ分割し、各グループ内のクラスタ群を独立に扱うという想定で、平均遅延時間が最小となるようなグループ分け手法の確立を目指す。

4. 研究成果

(i) 疎密度モバイルアドホック網におけるバッファ管理方式ならびに中継端末選択方式

平均転送時間を最小化するためには、網内にある各メッセージの複製数を同数に保つような戦略が必要であることを明らかにし、そのためには、新たなメッセージが発生した後、初期の段階では複製を積極的に作成し、その後は抑制的に振る舞うようなバッファ管理方式が効率化に資することを見いだした。また、到達確率を最大化し、平均転送遅延を最小化することは、網内に滞留する複製メッセージ数が均等になるように制御することと等価であることを数学モデルを構築することで示し、これを近似的に達成するバ

ッファ管理方式を考案した。さらに、平均メッセージ遅延が最小となるような中継端末選択方式を考案した。具体的には、まず、メッセージの複製個数に上限が設けられており、網内の端末の性質が全て既知であるという条件下で、平均メッセージ遅延が最小なる中継端末候補群を見いだす問題を動的計画法を用いて定式化した。さらに動的計画法によって導かれる解の性質を詳細に調べ、各端末において利用可能な局所的情報のみを用いて、準最適な中継端末群を求める手法を考案した。

(ii) 階層型 3 次元水中センサー網の最適設計手法

まず、はじめに、効率的に構築された階層型 3 次元水中センサー網は、転送方式によらず、平均転送遅延を最小化することを実験的に見だし、この知見に基づいて、もっとも単純な転送方式である単一コピー転送方式におけるシステムパラメタの最適値の算出手法を確立した。さらに、数値実験を通じて、このパラメタに従いシステムを構築すればいかなる転送方式の下でも効率的にメッセージ転送が行えることを確認した。一方、単一コピー転送方式の際の最適パラメタが一般の転送方式においても準最適解を与えるが、方式毎の最適解は単一コピー転送方式とはかなり異なることも判明した。そこで、最も積極的な方式であるエビデミックルーチングを用いた際の最適なシステムパラメタを求める手法を考案した。システムパラメタが与えられたとき、エビデミックルーチングにおける平均メッセージ遅延を計算するアルゴリズムは既に確立しており、システムパラメタの決定問題は制約付き非線形混合整数計画問題として定式化可能である。そこで、無制約最適化問題に対する勾配を用いない近似解法とペナルティ法を組み合わせることで、この最適化問題の準最適解を求める手法を開発した。ランダムに多数のパラメタ群を生成して数値実験を行った結果、開発した手法で得られる準最適解はかなり良い性能を示すことを確認した。

(iii) メッセージフェリーの巡回経路決定手法ならびにクラスタ群のグループ化手法

まず、複数の端末群が地理的に分散し、それぞれ孤立している状況下において、メッセージフェリーの効率的運用を目指した情報集約手法について検討した。一般に、メッセージフェリーは各端末を巡回し、メッセージの回収と配信を担う。ここでは、端末群が孤立しているとき、各端末で発生する他の端末群宛あるいは広域網宛のメッセージを端末群毎に少数の端末に集め、メッセージフェリーが巡回すべき端末数を削減することで効率化を図る手法を考案する。各端末群内での情報集約を担うインフラが利用できない場

合, 端末群毎に, いずれかの端末がこの使命を担う必要がある. しかし, これにはバッファや消費電力等の資源消費を伴うため, 積極的にこの使命を担う端末は少ないと考えられる. そこで, 利己的な個々の個体の動作が社会全体の秩序を生み出す機構を解明する理論的道具である進化ゲーム理論を援用して, 利己的な端末で構成される集団内において各端末が互いに駆け引きを行い, 最終的に少数の端末が情報集約の使命を担うようになる自律分散型の端末制御手法を開発した. その上で, 各クラスタにおけるバンドル発生率が異なるという仮定の下で, メッセージフェリーのクラスタ巡回を待ち行列モデルの一種であるポーリングモデルと見なし, メッセージが生成されてからシンクノードへ到達するまでの平均遅延を解析した. さらに, 非巡回型のポーリングモデルを用いて, 巡回経路決定問題を定式化し, ポーリングモデルの最適設計手法を援用しながら, メッセージフェリーの巡回経路決定手法を確立した. さらに, 多数のクラスタが存在する際に, これらを単一のメッセージフェリーを割り当てる複数のグループに分割する問題を非線形整数計画問題として定式化し, シフト近傍と交差近傍を併用した局所探索法を用いて準最適解を見いだす手法を考案した.

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)

[雑誌論文] (計 5 件)

① K. Habibul Kabir, M. Sasabe and T. Takine, Evolutionary Game Theoretic Scheme for Stable and Resilient Data Aggregation in DTNs, International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, 査読有, 掲載決定

② M. Sasabe and T. Takine, Continuous-Time Analysis of the Simple Averaging Scheme for Global Clock Synchronization in Sparsely Populated MANETs, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 査読有, vol.31 (2013) 782-793

③ Y. Yamawaki, T. Matsuda and T. Takine, Passive Coding-Based Epidemic Routing in Sparsely Populated Mobile Ad Hoc Networks, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E95-B, (2012) 169-177

④ K. Habibul Kabir, M. Sasabe and T.

Takine, Optimal Visiting Order of Isolated Clusters in DTNs to Minimize the Total Mean Delivery Delay of Bundles, Numerical Algebra, Control and Optimization, 査読有, vol.2011, (2011) 563-576

⑤ T. Matsuda, T. Noguchi and T. Takine, Survey of Network Coding and Its Applications, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E94-B, (2011) 698-717

[学会発表] (計 4 件)

① K. Habibul Kabir, M. Sasabe and T. Takine, Integer Programming Formulation for Grouping Clusters in Ferry-Assisted DTNs, The Second International Workshop on Complex Network Flows, 2012.3.27, Fukuoka-Shi, Japan

② 木村共孝, 滝根哲哉, 蓄積運搬転送型ルーチングにおける中継先端末選択法, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2012.3.9, 宮崎市

③ K. Habibul Kabir, M. Sasabe, and T. Takine, Self-Organized Data Aggregation among Selfish Nodes in an Isolated Cluster, The 1st Workshop on Bio-inspired Models and Technologies for Ambient Information Society (BioAmBIS 2010 Workshop), 2010.12.2, Boston, MA (Best Workshop Paper Award 受賞)

④ 鶴正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田晃, 松田崇弘, 巳波弘佳, 山村進也, "DTN 技術の現状と展望," 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 2011 年 3 月 (電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン論文賞受賞)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滝根 哲哉 (TAKINE TETSUYA)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00216821

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

松田 崇弘 (MATSUDA TAKAHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50314381

笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10379109