

「劣通信環境における情報流通のためのネットワーク制御技術」
関西学院大学理工学部情報科学科 巳波 弘佳

1 研究の背景と目的

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 (Delay- and Disruption- Tolerant Networking)の必要性が高まっている。

DTNを実現するための重要な技術の一つとして蓄積搬送型通信がある。これは、災害時の建物内など本質的に短距離の通信しか前提とできない状況において、ノードが移動する場合に適した通信方式である。移動するノードが近接して相互に通信範囲に入ると、それぞれが保持する情報を交換・共有することを繰り返し、情報を伝播させる。これによって、ノード間の通信や多数のノードからの情報収集が可能となる。蓄積搬送型通信は災害時における情報流通に適しているが、これだけでは本質的に伝播時間の短縮は困難なので、現実に導入するためには、さらに効率的な制御方法と組み合わせることが必要不可欠である。

災害時における情報流通の必要な場面は多々あるが、建物内部地図推定は重要な課題の一つである。救助者や救助ロボットが被災者の探索や救助を行う際、通行可能箇所に関する情報を共有しなければならないが、劣通信環境においては情報共有が困難であり、また現実的には精度の低い位置情報しか得られない。したがって、劣通信環境において複数の救助者やロボットが探知した情報を効率的に共有する方法に加え、位置情報履歴を統合して地図推定を行う方法が必要不可欠である。

そこで、本研究は災害時の情報流通技術の確立を目指し、特にここでは災害時の情報共有と地図推定を対象とした技術の研究開発を行った。具体的には、劣通信環境における蓄積搬送型通信に基づく情報共有・収集を効率化する制御方式の設計、蓄積搬送型通信を利用した災害時の地図推定法の設計を行った。

2 研究方法・研究内容

本研究では、劣通信環境における蓄積搬送型通信について、主に以下の項目について研究を行った。

- ・劣通信環境における蓄積搬送型通信の性能限界の解明に関して：主に、最適化理論・確率過程理論に基づくアプローチによる解析を行い、情報伝播特性、特に情報の伝播速度や情報収集に必要な時間を明らかにする。これにより、達成可能な目標点を明確化する。

- ・蓄積搬送型通信に基づく情報共有・収集を効率化する制御方式の設計に関して：効率の良い情報収集・共有のための制御を離散最適化問題として定式化し、最適化理論の観点からの解析を行う。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を設計する。

- ・蓄積搬送型通信を利用した、地図推定法の設計に関して：累積距離や方位変化など、低コストだがノイズや欠落を含む移動経路情報、および複数の救助者やロボットが相互に邂逅した時刻と位置に関する情報などを入力情報とし、精度の高い建物内部地図を推定する。そのために、マルコフ連鎖モンテカルロ法など汎用的な確率的推定法を利用して本研究対象に応じた推定法を設計する。

3 研究成果

(1) 劣通信環境における蓄積搬送型通信の性能限界の解明に関して：

- ・概要

劣通信環境における蓄積搬送型通信の性能限界について調べた。その結果、一般

的な移動ノードはランダムウォークではなく、ある性質を持ったウォークモデルが現実の観測結果と整合性があることを発見した。新たなウォークモデルを提案し、その性質を理論的かつ実験的に解明した。さらに、このウォークモデルを用いて、下記の新たな蓄積搬送型通信方法の有効性を示した。

・成果詳細

まず、性能評価尺度として、少なくとも1つのノードがすべての情報を収集するまでにかかる時間 T_1 と、すべてのノードがすべての情報を収集するまでにかかる時間 T_2 を考え、 T_1 、 T_2 の(補累積)分布関数をそれぞれ $F_1(t) = P(T_1 > t)$ 、 $F_2(t) = P(T_2 > t)$ とする。

空間が非有界な場合、1次元および2次元における分布関数は漸近的にべき分布にしたがい、そのべき指数はノード数の増加にしたがって大きくなる。これらは、一般には情報共有に長時間がかかる可能性は無視できないが、ノード数が十分多いと、情報共有時間が短く、かつばらつきも小さくなり、情報共有が効率よく進むことを意味する。一方、3次元空間においては、ノード同士が出会えない確率が正となり、蓄積搬送通信による情報共有が本質的に不可能である。実際のアプリケーションは3次元空間で使われるが、宇宙空間などをのぞき、通信範囲の大きさに比べノード位置の上下方向のばらつきは小さいため、実質的には2次元空間での利用とみなせることが多い。

空間が有界の場合は、分布関数は漸近的に指数関数にしたがう。

屋内の通路や街中の道路上の移動を考える場合、空間構造をグラフとして扱う必要がある。グラフの有界性より、情報収集時間の分布関数は漸近的に指数関数にしたがう。グラフからある辺数以上の辺を取り除くと、情報収集時間は急激に増加する。これは、辺を除去により閉路が減少し木構造に近くなるため、直径が増加して移動ノード同士が出会うまでの時間が延びることに加え、連結度が下がって独立な経路数が減少し、移動ノード同士が出会う可能性も減少することが要因と考えられる。実際、グラフの直径が大きくなるほど情報収集時間も大きくなるという相関がある。

以上から、空間が有界・非有界・ネットワーク形状か否かに関わらず、ノード数の増加にしたがって情報収集時間は短くなるため、災害時に大勢の被災者が存在するような状況においては、蓄積搬送型通信は通信手段として有効であることがわかる。また、効率性を高めるためには、有界性を持つように領域を限定したり、直径が小さくなるような通行経路の優先復旧が有効である。

次に、移動や遭遇特性を表すためのモビリティモデルとして、これまで人間の移動パターンは Levy Walk (LW) にしたがうということ知られていた。これは、特に2次元空間の場合、次の目的地までに直線的に移動する距離が1である確率がべき乗則にしたがうことを意味する。また、同一の人間同士が出会う時間間隔の確率分布がべき分布にしたがい、その裾に指数減衰するカットオフが存在するという事も知られていた。しかし、これまで人間同士がすれ違う頻度に関する統計則の研究は行われていなかったため、すれ違った Bluetooth 端末のデータを収集するモバイル無線通信実験を行い、すれ違い頻度(Contact Frequency (CF))を調べた。すれ違い頻度とは、ある人がその他の Bluetooth デバイスとすれ違った回数である。その結果、すれ違い頻度の補累積分布関数がべき乗則にしたがうことがわかった。これまで知られている RW や LW などのモビリティモデルについて、すれ違い頻度分布を調べてみると、いずれもべき乗則にはしたがわない。これは、LW であっても、実際の移動・遭遇特性を反映しておらず、モビリティモデルとして不十分であることを意味している。そこで、LW において一定確率で活動拠点に帰還する Homesick Levy Walk (HLW) モデルを提案した。これは、人間を含めて移動する多くの生物は、「家」や「巣」などの活動拠点を中心に移動することが多いという事実を反映したもので

ある。この HLW のすれ違い頻度分布は、べき乗則にしたがう。つまり、一定確率による活動拠点への再帰（ホームシック性）と時々の高距離移動（移動距離のスケールフリー性）の両方の要因が、すれ違い頻度分布のべき乗則が現れる一つの条件であることがわかった。

すれ違い頻度がべき乗則にしたがうことは、遭遇頻度の高いノードの組は少なからず存在することを意味する。そのため、これらを抽出して利用すれば、目的のノードへ情報が中継される可能性が高いノードと出会ったときにのみ情報を転送するということが可能となる。実際、これに基づいた中継転送アルゴリズムを設計し、上記の限界以上の性能を実現できることを示した。

（２）蓄積搬送型通信に基づく情報共有・収集を効率化する制御方式の設計に関して：

・概要

効率の良い情報収集・共有のための制御を離散最適化問題として定式化し、最適化理論の観点からの解析を行った。最適停止理論を利用したアルゴリズムを設計し、上記の新たなウォークモデルを用いて有効性を評価し、その結果、現実的なウォークモデルにおいて他の様々な蓄積搬送型通信方式よりも高い性能を実現できることを示した[1]。また、残存した通信ネットワークと蓄積搬送型通信を組み合わせることにより、実用的な情報収集・共有の性能が得られることを東日本大震災時の実道路網トポロジを用いたシミュレーションによって示した[2]。

[1] A. Fujihara, S. Ono, H. Miwa, Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing Under Sequential Encounters for Delay Tolerant Networks, Proc. International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS2011), pp.279-286 Fukuoka, Japan, Nov.30-Dec.2, 2011.

[2] 木村裕太・辻広志・巳波弘佳, 東日本大震災時の実道路網トポロジに基づく Virtual Segment 方式の性能評, 電子情報通信学会技術報告 NS2011-233, pp.301-306, 2012.

・成果詳細

前項目の結果から、移動特性を考慮した中継転送の有効性が期待できることが分かった。そのため、実際に、過去の移動履歴から推定される目的ノードへの中継転送の可能性に応じて、実際に転送するか否かの判断を最適停止理論に基づくアルゴリズムで行うという方式を新たに設計し、その有効性を示した。

次に、蓄積搬送型通信の効率化の他の方法として、領域全体に分散配置されたベースノード（BN）と呼ばれるノード間を繋ぐ常時接続可能なコアネットワークの存在を仮定し、それと蓄積搬送型通信を組合せて活用する Virtual Segment (VS) 方式というものがあり、この高度化を行った。VS 方式においては、送信ノードは、移動ノードが近くにきた時にデータのコピーを渡し、データを受け取った移動ノードが他の移動ノードと出会った時、データのコピーを渡すことを繰り返し、データの伝播を行う。データを持つ移動ノードが BN を通りかかった際には、当該データを BN に渡し、コアネットワークを介して、目的ノードの近辺の BN にデータが転送される。その BN を通りかかった移動ノードが当該データを受け取り、データの伝播を繰り返し、最終的には当該データを持った移動ノードが目的ノードを通った時、目的ノードにデータを渡して通信が完了する。移動ノードとして車を想定し、残存して稼働している基地局などを BN として使用することにより、災害時における VS 方式は十分実現可能な方策と言える。VS 方式においては、BN の配置場所や、道路網のグラフ構造や交通量が性能に大きく影響する。そのため、BN 最適配置や、災害時に破損した道路網の復旧順序の最適化に関するアルゴリズムを設計し、災害時に VS 方式がより効果を発揮できるよう高度化を行った。また、東日本大震災時の実道路網トポロジを用いたシミュレーションによって、実用的な情報収集・共有の性能

が得られることを示した。

(3) 蓄積搬送型通信を利用した、地図推定法の設計に関して：

・概要

地図として任意の形状を想定するのではなく、現実的には形状が部分格子グラフ構造などを仮定できることを利用して地図の推定を高速化した。さらに、移動ノード同士が近距離に近づくことによって地図情報を共有する際の地図の結合を高速化した。このような、地図形状のある種の離散化により、計算量を大幅に削減することが可能となり、携帯端末上での計算も可能になる。この地図推定方式による地図推定効果を調べるため、大規模なシミュレーション実験を行った。ここでは、移動ノードを被災者とし、蓄積搬送型通信により情報を更新しながら地図推定を行い、さらに避難場所への最短経路を移動する状況を想定し、避難場所への到達時間(避難時間)によって評価した。実際の東日本大震災直後の仙台市内の道路ネットワークを対象とした評価し、現実的な規模の地図を対象としても提案地図推定法が有効に働くことを示した[3]。

また、これに基づく避難誘導ナビの企画に対して、ITS Japan 主催の防災アプリアワード企画賞を受賞した[4][5]。

[3] 藤原明広・巳波弘佳, すれちがい通信を利用したリアルタイム災害時避難誘導, 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会 技術報告 IN2011-157, pp.121-126, 2012.

[4] 人と物の移動に役立つ I T S 防災アプリアワード企画賞, <http://www.its-jp.org/app-contest2012/result/>

[5] 日経 IT Pro, <http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20120312/385824/>

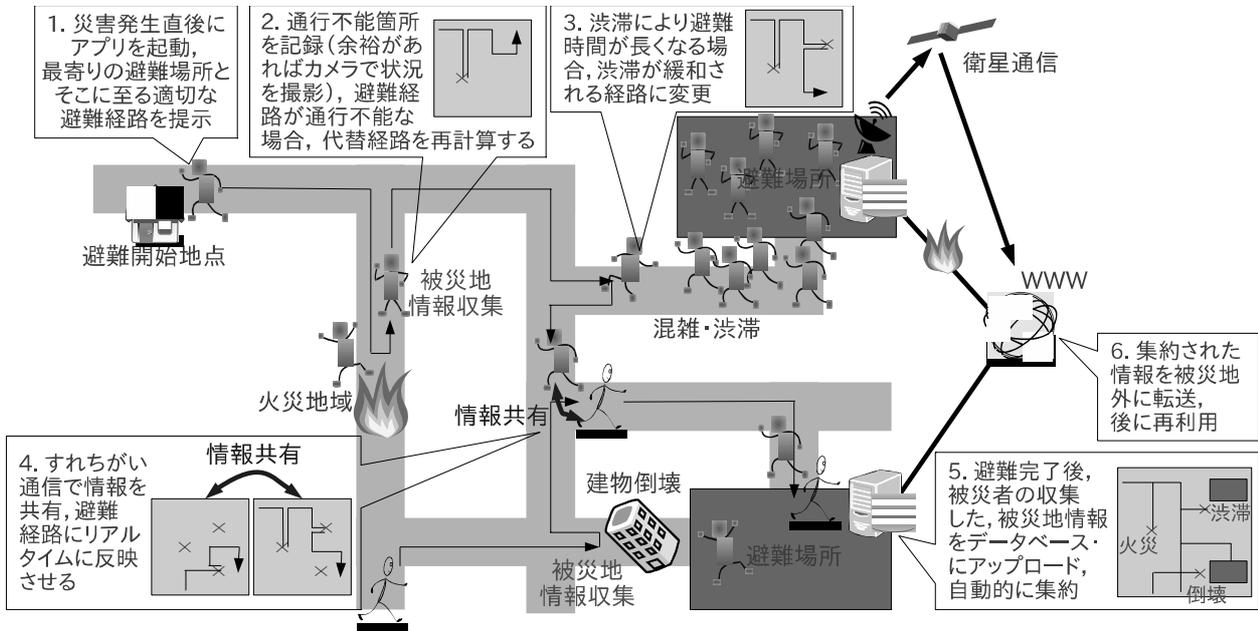
・成果詳細

大規模災害が都市部に起こった時、被災者の多くは携帯電話を持っていることが想定されるため、この携帯電話を用いた有効な避難誘導を指示する研究が行われてきている。都市部での災害は、ビルの倒壊や火災などにより、通行不能箇所や危険地帯が突然出現し、不十分な被災地情報を元にした避難を行うことになることによる様々な混乱が生じることが分かっている。また、都市部の人口の多さから、多くの被災者が出ることが予想されるため、避難時の避難者の混雑が高い確率で起こりうる。各避難者がリアルタイムに被災地情報を十分に収集することが可能になれば、避難時の混乱を防ぎ、効率的な避難誘導が可能になる。ここで問題になるのは、携帯電話で災害情報を収集しようとしても、平常時に使用できるモバイル通信サービスが使用不能になってしまうことである。2011年に起きた東日本大震災においても、避難誘導が必要な地域ほど、メール以外の通信手段は不可能になり、所持していた携帯電話は情報収集にまったく役立たなかったという報告が多方面から指摘されている。災害時避難誘導のためのアプリも存在するが、ウェブ・サービスへのアクセスを前提にしていたり、平常時から使用していないためにいざという時にアプリを起動するという発想にならなかつたり、起動しようとしてもアプリを探すことができなかつたり、など現状ではいろいろと問題がある。一方、スマートフォンと呼ばれる携帯電話は高性能センサや様々な無線通信デバイスの搭載により、非常に高度な機能を持ち、様々な処理を行うことが可能になってきている。このスマートフォンを避難誘導に役立てることができれば、都市部での効率的な避難誘導に役立つ道具となり得る。そこで、スマートフォンを持って避難している被災者を移動体で、かつスマートフォンが自律的に Bluetooth や Wi-Fi といった近距離無線通信を用いて蓄積搬送型通信を行うことにより、効率的な避難誘導が可能になると考えられる。

そこで、災害時避難誘導における情報のリアルタイム性の問題を解決し、避難の混乱の解消を目指す為に、蓄積搬送型通信を利用したリアルタイム災害時避難誘導

を検討した。これは、被災者がスマートフォンの機能を用いて被災地のリアルタイム情報を収集し、すれちがい通信を通じて収集した情報を共有し、自律的に適切な避難経路に誘導する通信ネットワーク・システムである。ここで、避難経路は被災者が迅速に避難できるように、現在位置から最寄りの避難場所までの最短経路を提示する。また、迅速な避難経路の決定に重要な通行不能箇所や混雑地の位置情報を避難者自身が逐次記録していくことを仮定した。避難者同士が近距離無線通信が可能な場合、蓄積搬送型通信を行って被災地情報を共有、その情報を反映して現在の避難経路に問題があれば、本研究項目の地図推定方式によって推定された地図上で代替経路を再計算して提示する。

都市部の道路ネットワークをグラフとみなし、その上を避難者に見立てた粒子が移動する確率モデルとしてモデル化した。そして、通行不能箇所の情報共有が避難誘導に与える影響について、避難時間を指標として性能評価を行った。その結果、被災地の被害の大小に関係なく、通行不能箇所の情報共有が避難時間の短縮に非常に有効であることが分かった。また、混雑の影響により情報共有が加速し、避難場所から離れている被災者の避難時間も短縮できることも分かった。



図：避難誘導ナビのコンセプト

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究成果により、劣通信環境における蓄積搬送型通信に基づく情報共有・収集を効率化する制御方式として、現実的に有効なものが設計できた。また、蓄積搬送型通信を利用した、災害時の地図推定法についても、現実的に有効なものが設計できた。現在は、これらを実際のAndroid端末上に実装し、災害時の避難誘導に用いることができるアプリケーションとしての実用化を進めている。これにより、災害時の被災者の迅速な避難が実現でき、人的被害の軽減に貢献できると考えられる。

また、「リアルタイム群衆誘導」という新たな研究領域が創出された。これまでも、固定的な誘導経路の設計に関する研究は行われてきたが、近年のスマートフォンの機能向上、および今回の研究による蓄積搬送型通信の高度化に関する成果により、スマートフォンを用いたリアルタイムでの誘導の可能性が拓かれた。しかし、より高度で精密な誘導制御に向けて、さらなる研究開発の領域が広がっていることが明らかになった。今回の研究の次の段階として、これまでの研究成果に基づき、「リアルタイム群衆誘導」の研究開発を推進し、特に災害時の被害軽減のための技術の確立を目指す。