

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330107

研究課題名(和文)位置と接触の履歴情報を用いた遅延耐性ネットワークの経路制御技術

研究課題名(英文)Routing Method for Delay Tolerant Networks using Location and Contact Histories

研究代表者

北須賀 輝明 (KITASUKA, Teruaki)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70343332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：遅延耐性ネットワーク(DTN)を使ったメッセージ送信時に、受信者にいつ頃メッセージが届くかを、送信者に提示することを主たる目的として、利用者と周辺の人々との接触履歴を準計画的接触モデルとしてモデル化し、このモデルを使って配信時刻を予測する方法を示した。遅延耐性ネットワークは、送受信端末間を結ぶ経路全体がどの時点においても存在しないような連結性が低いネットワークでも通信可能なように移動する端末がメッセージを蓄積・運搬するネットワークである。あらかじめ接触モデルを流通させておくことで、配信時刻を予測できるようにする。インターネット網や携帯電話網に依存できない環境での利用が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：For delay/disruption tolerant networks (DTNs), we provide a function of delivery time prediction for a sender can know the delivery time when the sender wants to send a message to a receiver. For this function, we propose a semi-scheduled contact model that is modeled on the contact histories between a person and his/her neighboring persons. We also explain the method to predict message delivery time using the model. DTNs has low connectivity such that there is no guarantee of existence of any path between a sender and a receiver at any time. To deliver messages to the receiver, intermediate moving nodes are needed to receive, store and carry messages even if the messages are not addressed to themselves. We assume that the semi-scheduled contact model of the receiver is distributed to the sender proactively. The method is suitable for environments that cannot depend on the Internet or mobile phone networks.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク 遅延耐性ネットワーク 接触履歴 位置情報 小直径グラフ

1. 研究開始当初の背景

遅延耐性ネットワーク (DTN と略す、delay/disruption tolerant networks) とは、送受信端末間を結ぶ経路全体がどの時点においても存在しないような連結性が低い場合でも、送信端末や中継端末がパケットを蓄積する、あるいはパケットを蓄積したまま端末が移動する (つまりパケットを運搬する) ことで、受信端末にパケットを届けるネットワークである。DTN では、送受信するデータの単位を、パケットと呼ぶ代わりにバンドルと呼ぶ。従来の TCP/IP を基盤としたネットワークでは、電子メールや UUCP などを除いて、そのほとんどが、パケットを送信するときに送受信端末間の経路全体が存在することを前提にしていた。DTN は、その時々では経路の一部のみしか存在しないような、惑星や宇宙ステーション間の通信、動物のモニタリングなどのための通信などを対象に研究されてきた。現在では、インターネット接続環境の整備が遅れている地域への低コストの通信基盤としても DTN が研究されている。

本研究では、インターネット接続環境の整備が遅れている地域を対象にした DTN の経路制御技術を研究する。研究代表者はこれまで、ロケーションセンシング技術や無線マルチホップネットワークの経路制御技術に関して研究してきた。本研究で対象とする DTN でも、モバイルアドホックネットワーク等の無線マルチホップネットワークと同様に端末が移動することを活用して、バンドルを蓄積し運搬して転送する。端末の移動に関する知見は、本研究でも生かすことができる。また、ロケーションセンシング技術の研究から位置情報の取り扱いに関しても知見を持ち、この知見はバンドルの転送先を決定する際に、転送先との接触場所や接触時刻を推定するために活用できると考える。

2. 研究の目的

本研究では、インターネット接続環境の整備が遅れている地域や、低コストな通信基盤の需要がある地域で遅延耐性ネットワーク (DTN) が利用されやすくなるように、DTN の経路制御技術について研究する。地域住民が携帯する端末によってバンドル (TCP/IP のパケットに相当) を蓄積・運搬する前提で、効率よく蓄積・運搬する経路を決めるために、地域住民の接触を予測する。本研究では、住民の位置や移動の履歴と住民同士の接触の履歴を用いて、人々の接触を予測し、経路を求める方法を明らかにする。また、受信端末に届けられる見込み (いつまでに何%の確率で届くか) を、送信時に求められる手法にすることで、利用者が理解しやすい仕組みを作る。

3. 研究の方法

本研究では、地域住民の接触を予測することで、経路を決定する。この予測のために、住民の位置や移動の履歴と住民同士の接触の履歴を用いる。これらの履歴は、プライバシー保護の観点や、履歴を集めるための通信コストを考えると、おそらくすべての端末の履歴を用いるのは現実的ではない。そのため、送信端末と受信端末の履歴に加えて、これらの端末と接触した端末の履歴のみを用いるか、さらに絞ってこれらの履歴の一部を用いることとする。位置や移動、接触の履歴は、曜日ごと、月ごと、年ごとなどの周期に基づいてモデル化し、周期的な接触や、接触の定時性をうまく表現できるデータ構造を明らかにする。周期性や定時性に乏しい接触 (買い物など) に関しても滞在時間などや訪問周期などの統計情報を用いることで、予測に活用する。

接触履歴収集自体の技術的な難しさから、地域住民の代わりにある大学に在籍している大学生を想定し、接触の履歴として大学生の履修登録のデータを活用する。同じ科目を履修している学生は毎週その時間帯に講義室等で接触しているとみなすことができる。

また、経路制御技術への波及効果を目指して、無線 LAN の周波数選択性フェージングや伝送タイミング制御、少ない中継で通信可能な小直径グラフの構成方法についても研究する。

4. 研究成果

本研究の主題である経路制御技術への関係性の順に述べる。時系列ではない。

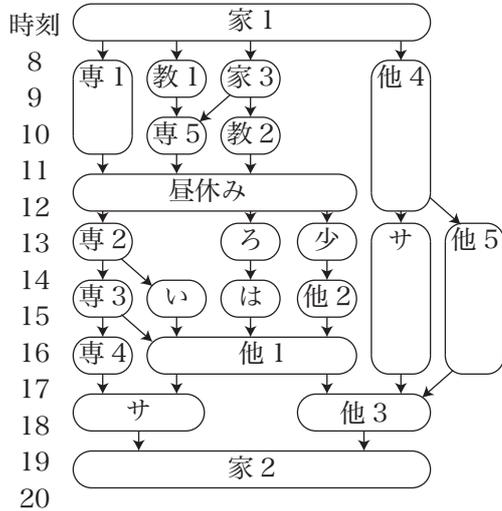
(1) 準計画的接触モデル (学会発表[1,5])

人の日々の移動は、時刻表に沿った公共交通機関ほどの定常性はないものの、通勤や通学などある程度の周期性を伴ったものであると言える。また、移動先で接触する人々についても、いつも (あるいは頻繁に) 同じ時間帯や場所で会う人、ごくたまにしか合わない人など様々である。準計画的接触モデルは、このように頻繁に同じ時間帯に接触する相手をモデル化したものである。毎日あるいは毎週、毎年などの周期的な時間帯を扱う。なお、ここでいう接触とは、同じ部屋にいたり、バスや電車の車両など同じ乗り物に乗っているなどの互いの携帯端末が通信可能な程度に近づいている状態を指す。ある程度の規則的な生活をしている人では、このような接触にはある種の規則性があると推測される。

例を使って説明する。この例では 24 時間周期の毎日のモデルを生成する。生成に使う接触履歴に相当するものとして 1 週間の接触予定を使う。1 週間の予定から 1 日のモデル

時間	月	火	水	木	金	土	日
8:40-	専	専		教			
10:20-	専	専	専	専	教		
11:50-	昼休み						
12:50-	専	専	専	ろ	少	サ	
14:30-	専	専	い	は		サ	
16:10-		専				サ	
18:00-	サ	サ	サ		サ		

(a) 1週間の接触予定



(b) 準計画的接触モデル

図 ある学生の接触予定と準計画的接触モデル

を生成することで、接触履歴が一定ではない非定常な状態のモデル化方法とする。図に、ある学生の接触予定と準計画的接触モデルを示す。図(a)はモデル化する学生の1週間の行動予定である。「専・教・い・ろ・は・少」はそれぞれ授業科目で同じ記号の時間帯は同じ学生が履修していることを意味する。「サ」はサークル活動を意味する。例えば月曜日は昼休みをはきんで16時頃まで同じ学生たちと接触し、18時からサークルの友人と過ごし、帰宅する。

この学生が授業やサークルで接触する学生のグループを次のように7つ定める。(1)「専」と「教」を履修している同一クラスの学生、(2) 同じサークルの学生、(3)から(6)はそれぞれ「い・ろ・は・少」の4科目それぞれを履修している学生、(7)は平日に昼食をとる場所で顔をあわせることがある学生とする。二つ以上のグループに同一学生が含まれることはあるかもしれないが、異なるグループには一方にしか含まない学生がいると仮定する。

接触モデルは状態遷移図で表す。状態の遷移は時刻によって起こる。各状態はその時間帯に接触する人々(例では学生グループ)を指定し、その状態を抜ける時刻を保持する。各状態が接触する人々のリストを持つことで、そのタイミングでネットワークを構成し、メッセージを中継あるいは送信できる相手

をモデル化している。一つの状態から複数の状態に遷移する場合があるので、状態間の矢印(有向枝)には根元の状態から矢印の先の状態に遷移する確率を付与する。ある状態から出る矢印の確率を足すと1になる。完全に計画的な接触であれば各状態から出る矢印は1本であり、複数本の矢印が出ることを許すところが、準計画的接触モデルの特徴である。

図(a)の接触予定から生成した接触モデルを図(b)に示す。モデルの各状態は、まず接触予定の各曜日と時間帯ごとに状態を作る。その後、同じ時間帯に同じグループと接触する曜日が複数あればそれらの状態は一つの状態にまとめる。また、連続する時間帯で同じグループと接触する場合も一つのグループにまとめる。このようにして接触モデルを作成する。例えば、状態「専1」は接触予定の月曜日と火曜日に対応し、状態「家1」から状態「専1」への遷移は7日のうち2日なので、2/7(およそ29%)になる。接触予定が特でない時間帯は「家3」や「他1」などのようにまとめて表現する。状態名は説明のためにつけたもので、意味はない。

実際の接触履歴の場合、接触時間帯のぶれやグループを構成する人々のリストが日によって微妙に異なるなどの外乱要因が多く含まれるであろうが、基本的なモデルの生成方法あるいは生成方針については明らかにできたものとする。実際の接触履歴を用いたモデルの評価は今後の課題である。

(2) 遅延耐性ネットワークの配信時刻予測(学会発表[1])

現在のTCP/IPを基盤としたネットワークでは、電子メールやLINEなどのメッセージは即座に相手に届く(正確には相手の端末やサーバに届く)と利用者は考えている。一方、遅延耐性ネットワークは即座に届けられるほどの通信環境が整っていない場合にも届けようとする代わりに、いつ届くか、あるいは届かないかということがメッセージ送信時点では明らかではない。遅延耐性ネットワークを使ってメッセージを送信しようとするときに、郵便や宅配便などと同様に、いつ届きそうかをユーザが知りたいと思うのは自然なことであろう。

本研究では、様々な制約が残り、また未評価ではあるものの、(1)の準計画的接触モデルを使ってメッセージ送信時に配信時刻を予測する方法を明らかにした。送信者が受信者にメッセージを送る場合を考える。このとき送信者の準計画的接触モデルG1と受信者の準計画的接触モデルG2を送信者が持っていると仮定する。この仮定は互いに知人であれば難しくない。また、メッセージは互いの知人を中継者として配信されるとする。送信者から複数の知人に中継を依頼することはあっても、中継者が別の知人に中継を依頼す

る場合は考えない、いわゆる2ホップ配信のみを対象にする。互いの知人とは、G1とG2のどちらにも含まれている利用者である。

配信時刻予測のために、まず2ホップ配信の経路探索(中継者のリストアップ)と送信者の状態推定を行う。2ホップ配信の経路探索は、モデルG1とG2に含まれる人々の共通部分を抜き出す。G1の各状態についてその状態で接触する人々を調べ、一つ以上の状態で接触する人のリストを作成する。G2についても同様にリストを作成し、G1のリストとG2のリストのどちらにも現れる人々を中継候補者集合 X とする。

続いて、送信者の状態を推定する。受信者の現在の状態を推定するために、現在周囲にいる人々(接触している人々)のリスト S とモデルG1を使う。現在時刻に対応するG1のすべての状態を取り出す。そこに含まれるそれぞれの状態 i について、状態 i に含まれる人のリスト S_i を取り出し、 S_i と S との類似度に応じて、現在の状態を確率的に推定する。

最後に、接触した人すべてにメッセージの中継を依頼すると仮定して、受信者にメッセージが配信される時刻を予測する。現在の送信者の状態推定結果を元に、時刻経過をシミュレートすることで、将来の時刻 t の状態確率を推定する。G1の各状態の接触者リストを使うことで、各時刻 t までにメッセージが届く中継者集合 $X'(t)$ を求める。受信者の状態がわからないので、モデルG1の定常状態分布を求めて時刻 t での状態を確率的に推定し、各状態で $X'(t)$ と接触する場合にメッセージが受信者に届くとみなす。このようにして時刻 t までにメッセージが届く確率を求められる。この確率が一定値を超えた時刻を配信予想時刻とする。

これらの処理をメッセージ送信時に行うことで、メッセージが受信者に届くであろう時刻を利用者に提示することができる。配信予想時刻の予測精度の調査は今後の課題である。また、準計画的接触モデルで十分であるかという点も継続して検討していく。

(3) 端末密度の高い無線マルチホップネットワークにおける経路制御メッセージ削減(雑誌論文[1])

OLSR (optimized link state routing) プロトコルは、経路制御メッセージを削減する方法として、MPR (multipoint relay) 集合を使っている。MPR 集合は周辺ノード集合の部分集合である。あるノード i が送信または中継した経路制御メッセージ(TCメッセージ)を周辺ノードが受信した際に、周辺ノードのうちノード i にMPRとして選ばれたノードのみがそのメッセージを中継する。MPR 集合のノードは周辺ノードの一部に過ぎないが、これらのノードが中継することですべての2ホップノードに届くようにMPR 集合は選ばれる。さらに、MPR に選ばれたノードのみが経路制

御メッセージを生成することで、生成メッセージ数も減らす工夫がされている。

本研究では、経路制御メッセージの生成数をさらに減らせる可能性があることを示した。基本的なアイデアは次のとおりである。OLSRでは、各ノードが独立にMPR 集合を選んでいるが、あるノードが選んだMPR 集合と近隣ノードが選んだMPR 集合との共通性は気にしていない。本研究では、いずれかのノードによってMPR に選ばれたノードの総数を減らすことで、経路制御メッセージの生成数をさらに減らすことができることを示した。解析的に議論し、計算機シミュレーションによる評価によって削減可能な生成数を調査した。ある程度高密度なネットワーク、つまり狭い範囲に多数のノードが存在するネットワークでは、メッセージ生成ノード数を10%程度削減できる余地があることを示した。この削減を実現するルーティングプロトコルの設計は今後の課題であり、分散アルゴリズムで削減余地をすべて削減可能とは限らないことに注意が必要である。

(4) メッセージフェリー型DTNにおけるメッセージの到達時刻の推定(学会発表[6])

メッセージフェリー型DTNは、定時運行している公共交通機関の乗り物(メッセージフェリーと呼ぶ)をメッセージ配送に使う遅延耐性ネットワークである。(2)の準備として行った研究で、メッセージ送信者はフェリーをまったく意識しない場合についてメッセージの到達時刻の推定を試みた。フェリーを意識しないとは、路線バスに郵便ポストが備え付けられている状況に例えると、送信者はバスの到着時刻を意識せずに移動し、たまたまバス停の前を通りがかったときにバスがいれば投函することに相当する。メッセージ到達時刻を推定するために、送信者からフェリーにメッセージ転送が完了するまでの時間の期待値と、フェリーから受信者にメッセージ転送が完了するまでの時間の期待値を定式化した。The ONE を用いた計算機シミュレーションで到達時刻の推定誤差を示した。

(5) 無線LAN周波数選択性フェージングの屋内測位への応用(学会発表[7])

周波数選択性フェージングとは無線LANの一つのチャンネル内の伝達関数が周波数の変化に対して一様でなくなる現象である。OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) を用いている無線LANでは一つのチャンネルに複数の副搬送波を使い、無線LANデバイスはフレーム受信時にサブキャリアごとのチャンネル状態情報(CSI)を観測している。CSIを参照することで無線LANアクセスポイントと無線LANクライアントが存在する環境、つまり屋内か屋外かを特定できないか試みた。予備実験からサブキャリアごとの

信号強度が中心周波数を中心とした対称性が特定のキーになると推察された。屋内などの複雑な環境では対称性が崩れ、屋外などの単純な環境では対称性が保たれるという推察である。実験の結果は推察の通りにはならず、屋外と講義室、廊下の3ヶ所で測定したがこれらの中で対称性の違いを明らかにすることはできなかった。

(6) 無線メッシュネットワークにおける伝送タイミング制御 (学会発表[8])

無線メッシュネットワークとは、一部の無線LANアクセスポイントのみが有線LAN経由でインターネットに接続され、他のアクセスポイントはアクセスポイント間でパケットを中継することでインターネットに接続するネットワークである。遅延耐性ネットワークと比べると高価なインフラであるが、各アクセスポイントが有線LANに接続するよりは安価なインフラである。このようなネットワーク内で伝送タイミングを制御することでスループットを向上させる手法を提案した。提案手法は、次ホップノードに送信権を譲渡する方法とTCPエンドノードで送信間隔を均等にする方法の二つからなる。前者はCSMA/CAによるランダムバックオフ待ち時間を削減する効果を狙い、後者は連続パケット間の衝突確率低下を狙う。ns-2でシミュレーションしたところ、単一のTCPフローを4,5ホップ先のアクセスポイントまで中継する場合、スループットを7%程度増加させつつ、パケット伝送回数を10%程度減少されることが明らかになった。

(7) 小直径グラフの探索 (学会発表[2, 3, 4])

遅延耐性ネットワークのみならずネットワークでは、一般に経路長を短くすることで効率的に通信できる。ネットワーク上の機器(移動端末やルータ)をグラフの節点、機器間の接続をグラフの枝と捉えることで、ネットワークをグラフでモデル化できる。グラフの直径はもっとも離れた節点間の距離である。より正確には、あるグラフについて二つの節点を結ぶ最短路の枝の数をこの節点間の距離といい、すべて二節点間の距離の最大値をこのグラフの直径という。本研究では、節点数(位数)と各節点を持つ枝数(次数)の上限を与えたときに、どのように枝を加えることでグラフの直径が小さくできるかを探索した。また、直径を小さくするのみではなく、平均距離が短いグラフを探索した。この問題はorder/degree問題と呼ばれ、2015年からNIIが主催するGraph Golf competitionで盛んに探索されている問題である。本研究代表者は飯田全広と松崎貴之(熊本大学)と協力して2015年の(位数, 次数) = (4096, 60), (4096, 64)をはじめいくつかのグラフにおいて、最小直径, 最小平均距離の

グラフを発見し、2016年にWidest improvement awardを、2017年にGeneral graph widest improvementとGrid graph deepest improvement awardを受賞した。

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1件)

[1] Teruaki Kitasuka and Shigeaki Tagashira, "Shared MPR Sets for Moderately Dense Wireless Multihop Networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2015, art. 486023, 11 pages, 2015. 査読有.
DOI:10.1155/2015/486023

[学会発表] (計8件)

[1] 北須賀 輝明, 「準計画的接触モデルと遅延耐性ネットワークの配信時刻予測についての基礎検討」, 電子情報通信学会技術報告, vol. 117, no. 115, MoNA2017-14, pp. 37-41, 2017年7月.

[2] Takayuki Matsuzaki, Teruaki Kitasuka, and Masahiro Iida, "Making smallest-diameter graphs at "Graph Golf", " The Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR'17), Higashihiroshima, Japan, Nov. 2016.

[3] Teruaki Kitasuka and Masahiro Iida, "A Heuristic Method of Generating Diameter 3 Graphs for Order/Degree Problem," Proceedings of 2016 Tenth IEEE/ACM International Symposium on Networks-on-Chip (NOCS), 6 pages, Sep. 2016. 査読有.
DOI:10.1109/NOCS.2016.7579334

[4] 北須賀 輝明, 飯田 全広, 「グラフゴルフのはじめ方 - 手書きグラフから経験的手法によるグラフ生成まで」, 第15回情報科学技術フォーラム(FIT2016), 富山大学, 2016年9月.

[5] 北須賀 輝明, 田中 諒介, 前田 浩幸, 「履修科目でみる大学生間ソーシャルネットワークの分析事例」, 2015年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 2015年9月.

[6] 田中 諒介, 北須賀 輝明, 「メッセージフェリー型DTNにおけるメッセージの到達時刻の推定手法」, 電子情報通信学会技術報告, vol. 114, no. 308, MoNA2014-57, pp. 49-54, 2014年11月.

[7] 前田 紘志, 北須賀 輝明, 「無線LAN屋内測位への周波数選択性フェージング応用方法の検討」, 電子情報通信学会技術報告, vol. 114, no. 308, MoNA2014-53, pp. 25-29, 2014年11月.

[8] 北須賀 輝明, 中原 史博, 眞鍋 雄貴, 有次 正義, 「無線メッシュネットワークにお

ける伝送タイミングタイミン制御に関する一検討」, 電子情報通信学会技術報告, vol. 114, no. 31, MoNA2014-12, pp. 173-178, 2014年5月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北須賀 輝明 (KITASUKA, Teruaki)
広島大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70343332

(2) 研究分担者

なし