

# 研究計画書

## ポテンシャル値による学習と予測を組み合わせた DTN ルーティング・フォワーディング手法

慶應義塾大学環境情報学部

自署: \_\_\_\_\_

学籍番号 70647038

サイバーインフォマティクスプログラム (CI) 希望

2009 年 5 月 28 日

### 概要

近年、Delay and Disruption Tolerant Networking(DTN) の手法が提案されており、これまで困難であった遅延や分断のある環境にネットワークを拡大する手法として期待されている。しかし、既存の DTN ルーティング・フォワーディング手法は想定環境を強く限定しており、網構築の柔軟性に欠け、コンタクトを十分に利用できず、効率的な網を構成できないという問題があった。そこで、本研究ではネットワーク履歴に基づくコンタクトの学習とノードの移動に基づくコンタクトの予測をポテンシャル値という単一の指標で表現する新しいルーティング・フォワーディング手法を提案する。本研究の成果として幅広い環境に適用可能な DTN ルーティング・フォワーディング手法が開発され、多様な特性を持つノードが単一の DTN を構成することができるようになる。

## 1 背景

人類の活動領域には、未だ情報通信網の恩恵を受けていない環境がある。通信インフラの構築がコストに見合わないような僻地や未開地、地震・津波などの災害により既設の通信インフラの失われた被災地などである。情報通信網は社会の重要な基盤であり、そのような困難な環境にも情報通信網を拡げていかなければならない。

困難な環境にネットワークを拡大する研究として、歩行者や車両など移動体間の無線通信によりネットワークを構築する mobile ad-hoc network や無線による通信インフラ構築手法である wireless mesh network がある。しかし、それらの研究では無線の到達範囲とノードの地理的關係から生じるネットワークの分断が問題であった。

近年、遅延や分断のある環境にネットワークを拡大する Delay and Disruption Tolerant Networking(DTN) の手法が提案されている。遅延や分断のある環境にネットワークを拡大することで、様々な応用が可能になると考えられている。具体的には、僻地・未開地へのネットワークの拡大、被災地における被害状況の調査や被災者の捜索・救援を行う レスキューロボット、海洋調査や海底ケーブルの保守点検・障害物の除去を行う水中ロボット、無人航空機、自律運転車両など 無人移動体 のコントロール・協調動作への応用、遅延の大きい 惑星間通信 への応用などが可能になる。

DTN の研究は様々なグループで活発に行われている。例えば、2006 年には University of Massachusetts Amherst が IEEE 802.11b による接続性を持つ 40 台の市バスによる DTN 構築に成功 [1] した。2008 年には NASA が地球・月・火星圏の 11 ノードで、TCP/IP・LTP[2] からなる複数のネットワーク上に DTN を構築し、画像伝送実験を成功 [3] させている。情報通信網は重要な社会の基盤であり、DTN は人類活動の新たな領域を支えるネットワーク手法として期待されている。

## 2 本研究の目的と想定環境

本研究は DTN ルーティング・フォワーディングに新たな手法を取り入れることにより、DTN の適用範囲を拡大し、分断や遅延のあるネットワークで用いることのできる情報伝達手法の確立を目指す。

本研究では、特にレスキューロボットや自律運転車両などの無人移動体をノードとして構成されるネットワークを想定し、DTN ルーティング・フォワーディング手法の研究開発を行う。

想定環境の特徴は、ノードはあらかじめ入力されたプログラムに従い行動するが、事故回避や障害物回避・人命救助などの必要性から自律的な判断で行動する場合がある点である。そのようなノードで構成されるネットワークの網構成は、原則予測可能であるが突発的に変化する可能性があり、突発的な変化を柔軟に吸収できる網構築技術が必要となる。既存の DTN ルーティング・フォワーディング手法は想定環境を強く限

定しているため、網構築の柔軟さに欠け、効率的な網を構成できない。

そこで、本研究では複数のネットワーク情報に基づいた適用性の高いDTN ルーティング・フォワーディング手法を提案する。

本研究で提案するルーティング・フォワーディング手法は、上述した想定環境に限らず既存研究が対象とする環境への応用も可能である。

### 3 Delay and Disruption Tolerant Networking

DTN のアーキテクチャは RFC4838[4] として提案されており、遅延と分断のある環境にネットワークを構築し、トランスポート層上のオーバーレイネットワークとして既存のネットワークとも接続可能なアーキテクチャである。

DTN では、2 つのノードが通信可能な期間をコンタクトと呼ぶ。コンタクトのない期間はメッセージを転送できないため、DTN の中間ノードはストレージを備え、store-and-forward 型の中継を行う。store-and-forward 型の中継ではメッセージを受け取った中間ノードはメッセージを蓄積し、次の中継先とのコンタクトが始まるまでメッセージを保持し、コンタクトの発生に応じて転送を行う。(図 1)

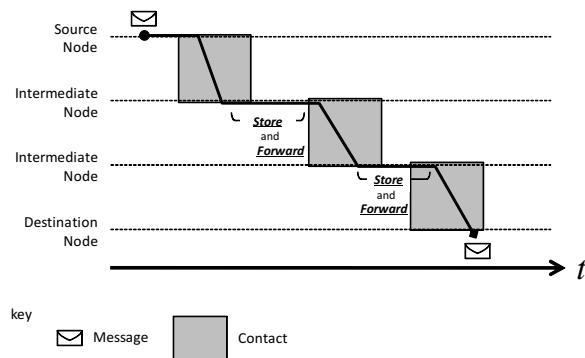


図 1 コンタクトと store-and-forward 型通信

コンタクトの帯域と持続時間の積であるコンタクトの容量と中間ノードの備えるストレージの容量、この二つの限られた資源を如何に過不足なく用いるかが DTN の網構築で重要な点と言える。

### 4 DTN ルーティング・フォワーディング

DTN の性能 (メッセージの到達率・メッセージの到達所要時間) は、コンタクト容量とストレージ容量と

いう DTN 網の限られた資源をどのようにメッセージ転送に用いるかで決まる。

DTN では、分断や遅延のあるネットワーク環境を想定するため制御メッセージを用いたネットワーク全体で情報の同期や、ネットワークの「現状」を用いたルーティング・フォワーディングを行う事ができない。よって、各ノードは自身の保持する情報とコンタクトのあるノードの情報のみを基に、ルーティング・フォワーディングを行わなければならない。

本研究では、既存研究をルーティング方式とフォワーディング方式の違いによりを分類する。なお、本研究では、コンタクトの中からメッセージの転送に用いるコンタクトを選び出す機能をルーティングと呼び、ストレージにあるメッセージの中から転送を行うメッセージを選び出す機能をフォワーディングと呼ぶ。また、フォワーディングの機能はさらにメッセージの重複転送を防ぎ、ストレージ中のメッセージの管理を行う。

RFC4838[4] では、コンタクトを、低軌道衛星と地上局の間の通信のようにコンタクト発生の予定があらかじめ判明している Scheduled Contacts、ネットワーク状態の履歴などからコンタクトの発生を推測できる Predicted Contacts、無作為に移動する歩行者間の短距離無線通信のようにコンタクトの発生が完全にランダムで予測不可能な Opportunistic Contacts の 3 種類に分類している。

#### 4.1 DTN ルーティング・フォワーディングにおける既存研究

DTN ルーティング手法は、通信可能なノード全てに転送を行おうとする no selection、過去のコンタクト履歴や制御メッセージからの学習結果を元に転送先ノードを選択する learning-based、ネットワークの外から与えられた事前知識を元に転送先ノードを選択する oracle-based の 3 種類に分類できる。

DTN フォワーディング手法は、メッセージの転送時に転送元のストレージにメッセージのコピーを残さない forward-based、転送元のストレージにメッセージのコピーを残す replicate-based の 2 種類に分類できる。表 1 に既存研究の分類を示す。

既存研究の中でも RAPID、PRoPHET、CGR ではルーティングアルゴリズムの提案だけでなく、ルーティングプロトコルの提案と実装が行われており、実際的な研究と言える。特にこの 3 つの既存研究のアプローチについて述べる。

RAPID の属する #2 群はフォワーディングベースのアプローチ群である。メッセージを可能な限りネットワーク上に複製し、その上で宛先に到達する見込み

表 1 既存研究手法

#	routing scheme	forwarding scheme	previous work
1	no selection	forward-based	FC[5]
2	no selection	replicate-based	Spray and Wait[6] Epidemic[7] RAPID[8]
3	learning-based	forward-based	DTLSR[9] MEED[10]
4	learning-based	replicate-based	PRoPHET[11] PEAR[12] MED[5]
5	oracle-based	forward-based	ED[5] CGR[13]
6	oracle-based	replicate-based	–

の低いノードに複製されてしまったメッセージを破棄する手法を取る。RAPID はルーティングによる転送先ノードの選択を行わない。複製の際はメッセージのサイズとコピー回数を元に優先度をつけ、メッセージの宛先とノードのコンタクト履歴を元にメッセージの宛先への到達見込みを判断する。

PRoPHET の属する#4 群はルーティングベースのアプローチ群である。メッセージの選択は行わず、過去のコンタクト履歴に基づいて宛先への到達見込みの高いノードへメッセージを転送していく。

CGR の属する#5 群はオラクル (予定情報) ベースのアプローチ群である。コンタクトの予定、ストレージの利用予定、トラフィックの発生予定などの予定情報を利用することでネットワークの将来にわたる変化を計算し適切な機会にメッセージの転送を行うことができる。

## 4.2 既存研究の問題点

既存研究にはそれぞれの想定環境があり、想定環境内は様なノードで構成されているという仮定のもとでルーティング・フォワーディング手法が設計されていた。たとえば、CGR はコンタクトの予定情報が必要とするため、惑星間ネットワークのような予測可能性の高いネットワーク以外には適用できない。逆に PRoPHET や RAPID はコンタクト予定情報が利用可能でもそれを活用することはできない。

DTN では様々な特性を持つノードが想定される。位置情報を取得可能なデバイスを持っていたり、行動パターンが予測可能なノードとそうでないノードで構成されるネットワークも想定される。既存研究の手法ではそのようなネットワークをルーティングドメインの分割なしに扱うことが不可能であるが、ルーティン

グドメインの分割にはルーティングドメインあたりのノード密度が低下してネットワーク全体でコンタクトを有効活用できなくなる問題がある。

ネットワークの資源を最大限活用するには、予測可能性のあるノードとそうでないノードを相互に含むネットワーク環境で動作する、ルーティング・フォワーディング手法が必要である。

また、ノードの予測可能性を元にネットワーク内で自律的にコンタクトの予定情報を生成する手法も十分に研究されていないため、この手法も必要である。

## 5 本研究の提案手法

予測可能性の高いノードで構成されたネットワーク、予測可能性の低いノードで構成されたネットワーク、その双方を含むネットワークの全てを扱えるルーティング・フォワーディングプロトコルを提案する。

ルーティング手法としては learning-based アプローチの一種であるポテンシャルベースルーティングを用いる。ポテンシャルベースルーティングは、ノード間の‘近さ’を表す値 (ポテンシャル値) を全てのノードの間に設定し、より近いノードへとメッセージをフォワーディングする手法である。

learning-based ルーティングの問題であるノードの予測可能性を活用できない点を修正するため、ネットワーク上で予定情報を生成する手法を提案する。生成された予定情報を基に、ポテンシャルベースルーティングのアルゴリズムに拡張を加え、学習と予定を単一のポテンシャル値に抽象化したルーティング手法を提案する。

予測可能性の低いノードで構成されるネットワークにおけるメッセージ到達確率を高めるため、フォワーディング手法としては replicate-based のアプローチを用いる。予測可能性の高いノードで構成されるネットワークに適應するため、メッセージのネットワーク上への拡散度合いやメッセージの有効期間 (ライフタイム)、メッセージのサイズなどの指標を基にメッセージに優先度をつけ、メッセージの到達確率を高めつつリソースの有効活用を目指す。

### 5.1 コンタクト予測

ノードの移動予測可能性は、あらかじめ移動目標がプログラムされている、測位デバイスを備えている、明らかな周期性を与えられているなど、様々な要因によって起こりうる。そういったノード自身の予測可能性を基に、自身の予測可能性をネットワークに広告し、他のノードから広告された予測可能性と自身の予測可能性をあわせてコンタクトの予定情報を生成する。

予測可能性の広告は、広告が生成された時刻のタイムスタンプと予測が示す座標系と時刻の情報を含む。広告を受信したノードは自身の予測可能性と広告の示す予測可能性を比較する。コンタクトが予測できる場合は、予測コンタクトリストに (コンタクト相手のノード, 時刻) のペアを保持する。

## 5.2 DTN フォワーディング

DTN フォワーディングの役割はリソースを最大限活用し、メッセージの到達率を高める事にある。

ノードの予測可能性が低いネットワークをカバーするために replicate の手法を取り入る。コンタクト容量を活用するためにメッセージの転送に優先順位を取り入れる。ストレージの容量を活用するためにメッセージの複製を破棄した際の影響を評価する仕組みを取り入れ、破棄の影響が小さいメッセージから破棄する仕組みを構築する。

## 5.3 DTN ルーティング

ネットワーク全体での同期が困難でトポロジが頻繁に変化する DTN の想定環境では、ネットワークの各部分、ノード単位の情報交換によって成立するルーティングプロトコルが必要である。そこで、ポテンシャルベースルーティングと呼ばれる手法を基にルーティングプロトコルを設計する。

ポテンシャルベースルーティングではネットワーク中の各ノード  $n$  はメッセージの宛先  $d$  に対して、'近さ'を表すポテンシャル  $P^d(n)$  を持つ。コンタクトのあったノード間で互いの持つポテンシャル情報を交換し、 $P^d(n)$  の値をノード  $d$  に '近い' と言えるノードほど値が高くなるように調整する。なお、 $P^d(n) \in [0, L]$  を満たす。  $L$  は定数。

転送先ノードの選択はノード  $n$  とコンタクト中のノードの集合を  $nbr(n)$  とすると、式 1,2 を用いて選択される。

$$nextrhop^d(n) = \{k | k \in nbr(n) \wedge F_{n \rightarrow k}^d > \alpha\} \quad (1)$$

$$F_{n \rightarrow m}^d = P^d(m) - P^d(n) \quad (2)$$

ポテンシャルの差が閾値  $\alpha (\geq 0)$  より大きいノードは、より宛先  $d$  にたいして '近い' ノードと言えるためメッセージの転送候補として選び出される。

ポテンシャル値の調整は、一定時間ごとに式 3 を用いてポテンシャル値を更新することで行われる。式 4 の適用により宛先と頻繁にコンタクトを持つノードのポテンシャルは高く、宛先と直接コンタクトを持たなかったノードも宛先までの '近さ' に応じて適当なポテ

ンシャルを持つようになる。

$$P^d(n)_{new} = P^d(n)_{tmp} + O^d(n) \quad (3)$$

$$P^d(n)_{tmp} = P^d(n) + D \times \max_{k \in nbr(n)} F_{n \rightarrow k}^d - \rho \quad (4)$$

$$P^n(n) = L \quad (5)$$

$$0 < \rho < D < 1 \quad (\rho, D \text{ は定数}) \quad (6)$$

$O^d(n)$  は本研究がポテンシャルベースルーティングにノードの予測可能性を取り込むため導入する修正項である。5.1 章の仕組みにより生成された予定コンタクトリストを検索し、宛先  $d$  に対して直近のコンタクト予定時刻を  $t_c$ 、コンタクトの予定が定まった時刻を  $t_o$  とすると  $O^d(n)$  は図 2 のような関数になる。 $O_{max}$  は、予想されるコンタクト容量に比例した値となる。

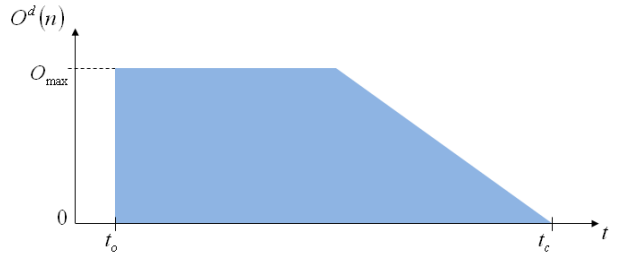


図 2  $O^d(n)$  概形

この予測可能性に基づく修正項により、予測可能性の高いノードの間のコンタクトを有効に活用できるようになり、ネットワーク全体の性能向上が期待できる。

## 5.4 研究の進め方と期待される成果物

本研究を進める上で、まずシミュレーションに基づく手法の評価を行う。シミュレーションによって本研究アプローチの正当性を検証するとともに、問題点が明らかになれば手法の改善を行う。

その後、本研究手法を用いた DTN ルーティングソフトウェアを実装し、同ルーティングソフトウェアを用いたテストベッドの構築を行う。テストベッドの構築には、バンドル層のリファレンスの実装として IRTF が公開し、DTN テストベッド構築の標準となっている DTN2[14] を用いる。DTN2 のルーティング部分はモジュール化されているため、構築したテストベッド上で他 DTN ルーティング・フォワーディング手法との比較を行うことが可能となる。

メッセージ到達率やメッセージ到達所要時間などの点から他手法との比較を行い、本研究手法を評価する。

実装された DTN ルーティングソフトウェアはそのコードを公開するとともに、ルーティングプロトコルについて IETF などの国際の場で標準化を行う。



## 6 今までの取り組み

学部 1 年次の春学期より徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤合同研究プロジェクトに所属し活動を行ってきた。また、1 年次の秋より WIDE Project に所属し、活動している。1 年次から 2 年次に掛けて RFID を用いた位置情報基盤を開発する Beluga Project の一員としての活動に組み、成果を DICOMO2007 にて発表した [15]。3 年次より DTN への関心が高まり、移動体通信を扱うインターネット自動車プロジェクトに参加するとともに、研究プロジェクト内で DTN 勉強会を主催しサーベを行い、'DTN におけるメッセージ有効期間の委譲を利用した Replicate 最小化のための Forwarding Scheme' を提案し WIDE 合宿 2009 春にて発表を行った。

ネットワークのオペレーション活動にも積極的に取り組んだ。1 年次の秋には研究室内のネットワーク・計算機資源を管理チームに加わり、以後管理チームの一員としてオペレーションを行ってきた。3 年次には、国内最大のネットワーク関連の展示会である Interop Tokyo 2008 に STM と呼ばれるネットワーク設営ボランティアとして参加している。今年度も Interop Tokyo 2009 に参加予定である。

## 7 政策・メディア研究科に進学を志望する理由

慶應義塾大学 政策・メディア研究科は平成 19 年度文部科学省 科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成」にて融合領域の研究拠点となっている。同プロジェクトではコ・モビリティ情報通信基盤技術・車両制御・時空間情報プラットフォームといったまさに本研究が想定する環境そのものの実現を目指しており、これらのプロジェクトと相互に関わりフィードバックを受けられる貴研究科こそが、本研究を行うにふさわしいと言える。

以上の理由から私は政策・メディア研究科への進学を強く志望する。

## 参考文献

- [1] J. Burgess, J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In B. Gallagher, editor, *Proc. 25th IEEE International Conference on Computer Communications INFOCOM 2006*, pages 1–11, 2006.
- [2] M. Ramadas, S. Burleigh, , and S. Farrell. Lick-

- lider transmission protocol - specification(rfc5326). September 2008.
- [3] NASA. Nasa space communications: Technology.
- [4] Vinton G. Cerf, Scott C. Burleigh, Robert C. Durst, Kevin Fall, Adrian J. Hooke, Keith L. Scott, Leigh Torgerson, and Howard S. Weiss. Delay-tolerant networking architecture (rfc 4838), April 2007.
- [5] Sushant Jain, Kevin Fall, and Rabin Patra. Routing in a delay tolerant network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34(4):145–158, 2004.
- [6] Thrasyvoulos Spyropoulos, Konstantinos Psounis, and Cauligi S. Raghavendra. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *WDTN '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 252–259, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [7] A. Vahdat and D. Becker. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. *Technical report, Duke University*, 2000.
- [8] Aruna Balasubramanian, Brian Neil Levine, and Arun Venkataramani. Dtn routing as a resource allocation problem. In *ACM SIGCOMM2007*, 2007.
- [9] Michael Demmer. Dtlr: Delay tolerant routing for developing regions. In *ACM SIGCOMM2007*, 2007.
- [10] EPC Jones, L. Li, JK Schmidtke, and PAS Ward. Practical routing in delay-tolerant networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(8):943–959, 2007.
- [11] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 239–254, 2004.
- [12] H Ochiai and H Esaki. Mobility entropy and message routing in community-structured delay tolerant networks. *ACM AINTECOA*, 2008.
- [13] Scott C. Burleigh. Dynamic routing for delay-tolerant networking in space flight operations. In *SpaceOps 2008 Conference*, 2008. AIAA2008-3406.
- [14] IRTF Delay Tolerant Network Research Group. Dtn2. <http://www.dtnrg.org/wiki/Code>, March 2008.
- [15] 波多野 敏明, 奥村 祐介, 佐藤 龍, 小原 泰弘, 加藤 文俊, and 南 政樹. 研究・教育を支援する位置情報提供サービスの構築と運用. In 「マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム」 論文集, pages 1275–1280, 2007.