

遅延耐性ネットワークにおける安定リンクの推定と維持に基づくブロードキャスト効率化手法

澤村 雄介^{†1} 寺西 裕一^{†1,†2} 竹内 亨^{*1,†2}
春本 要^{†3} 西尾 章治郎^{†1}

本論文では、遅延耐性ネットワーク (DTN : Delay Tolerant Network) において、実装で発生するリンク確立遅延と接続台数制限を考慮し、短時間でネットワーク中の多くの端末へメッセージを配信可能とするブロードキャスト手法を提案する。本手法では、通信範囲内の通信可能な端末との間のリンク (安定リンク) を維持し、端末がリンクを確立する回数を削減する。また、多くのメッセージを交換できると期待できる端末に優先的にリンクを切り替えることで、メッセージ拡散遅延を抑制する。安定リンクの推定は、他端末との過去の接触パターンに基づいて行う。多くのメッセージを交換できると期待される端末の推定は、受信メッセージが過去に経由した端末が記録されているホップリストを用いて行う。提案手法をシミュレーションにより評価し、経過時間の早い段階においてメッセージの配送の遅延を 40%削減できることを確認した。

An Efficient Broadcast Method Based on Estimation and Preservation of Stable Links in Delay Tolerant Networks

YUSUKE SAWAMURA,^{†1} YUICHI TERANISHI,^{†1,†2}
SUSUMU TAKEUCHI,^{*1} KANAME HARUMOTO^{†1}
and SHOJIRO NISHIO^{†1}

In this paper, we propose a broadcast method that can achieve high message delivery ratio and low latency considering upper limit of links and latency of link establishments caused by implementations on Delay Tolerant Networks. In our proposal, nodes reduce the number of times of link establishments by preserving links with nodes which are in transmission range for a longer time and establish links with nodes which have more messages to transfer. The link preservation is based on estimation using past contact pattern with other

nodes. The prediction of nodes that have more messages to transfer is based on the message hop list that contains nodes that have contributed to transfer the message. We evaluated our method by simulations. Our proposal reduced message delivery latency by 40% at the early stage of elapsed time.

1. はじめに

近年、スマートフォン、タブレット PC などの携帯端末と、Bluetooth や WiFi などの近距離無線技術の普及により、端末間を無線通信で結びつけ構築できる通信基盤に関する関心が高まっている。このような通信基盤を実現するために、モバイルアドホックネットワーク (MANET) に関する研究が多く行われている。MANET では、端末が自身の無線通信範囲内に存在する端末と通信する場合、固定の基地局を介さずに直接通信できる。自身の無線通信範囲内に存在しない端末と通信する場合、それらの端末の間に存在する端末がメッセージを中継する。MANET は、自律分散的にネットワークを構築できるため、災害時など固定の通信基盤を利用できない状況への応用が期待されている。

MANET では、端末が密に存在する環境においては、メッセージの到達率は高いが、端末が疎になるにつれ、到達率は低下する。したがって、端末が疎に分布する環境においては、自律的なネットワーク構築が困難となる問題がある。

MANET において、端末の疎密が存在する環境であっても、メッセージの到達率を保つために、蓄積型転送に基づいてメッセージ転送を行う技術が提案されてきた。蓄積型転送では、端末は伝搬すべきメッセージを自身のバッファに蓄積し、他端末と通信可能になった時点で、メッセージを伝搬する。蓄積型転送に基づいた情報伝搬技術は遅延耐性ネットワーク (DTN : Delay Tolerant Network) 技術と呼ばれている。

DTN では端末間のリアルタイム通信が不可能となる代わりに、高いメッセージ到達率を達成できる。よって、ネットワークに参加している全ての端末へメッセージを送信するアプ

^{†1} 大阪大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 独立行政法人 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

^{†3} 大阪大学 大学院工学研究

Graduate School of Engineering, Osaka University

*1 現在、日本電信電話株式会社未来ねっと研究所

Presently with NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

リケーションに適している。例えば、広告配信、ポッドキャスト配信⁶⁾、遊園地やショッピングモールでのイベント情報配信などに適している。これらの情報は同期通信程度のリアルタイム性は要求しないが、情報の配信は一定の期間中に完了する必要がある。

DTN を実際の端末上で実装する場合、ネットワークのプロトコルスタックの各層に技術的制約が生じる。第一に、端末が接続を試みてから、メッセージを転送可能となるまでに遅延が発生するという制限がある。この遅延をリンク確立時間と呼ぶ。遅延は、各層の遅延の合計であり、コネクション指向プロトコルのセッション確立、暗号鍵の交換、端末の状態情報の交換などによる遅延が要因となりうる。例えば、Bluetooth のコネクション指向プロトコルである L2CAP では、セッションの確率までに約 2 秒かかる。第二に、同時に維持できる他の端末との間で通信するためのリンク数の上限という制限がある。多くの実装では、同時に維持できるリンク数は数台である。例えば、Piconet⁵⁾ の仕様では、端末は同時に 7 つのリンクまでしか維持できない。スマートフォンである Android 端末の中に、3 つより多いリンクを維持できないものもある。

DTN 技術の研究分野では、Epidemic Routing³⁾ を始めとするルーティング手法⁷⁾⁻¹⁰⁾ や、ブロードキャスト手法⁴⁾ が提案されている。しかし、いずれも上記の実装上の制約がない前提となっている。既存手法では、通信可能となった端末に無条件に接続を行うため、端末が密な環境においては、即座に端末の維持リンク数は上限に達してしまう。そのため、全ての端末とメッセージを交換するには、維持しているリンクを切断する必要がある。リンク切断を行うと、通信範囲内への端末の出入りが頻繁であるほど、リンク確立の回数が増加する。その結果、リンクをメッセージの転送に利用できる時間が減少し、転送可能な総メッセージ量が減少する。さらに、頻繁なリンクの切り替えにより、端末の通信範囲に入っている端末とのリンクが切断されてしまい、隣接端末との高メッセージ転送の遅延が増加してしまう。

そこで、本研究では、端末分布に疎密が存在する環境において低遅延で高いメッセージ配信率を達成可能なブロードキャスト手法を提案する。高い配信率と低い配信遅延を達成するため、提案手法では、端末は、他端末との接触履歴とメッセージが経由した端末情報を利用して、長時間接続できる安定リンク、多くのメッセージを交換できる端末を推定し、接続を要求すべき端末と切断すべき端末を決定する。

以下では、2 節で想定環境について述べ、3 節で提案手法について説明する。4 節で提案手法の評価結果について説明し、最後に、5 節で本研究の結論を述べる。

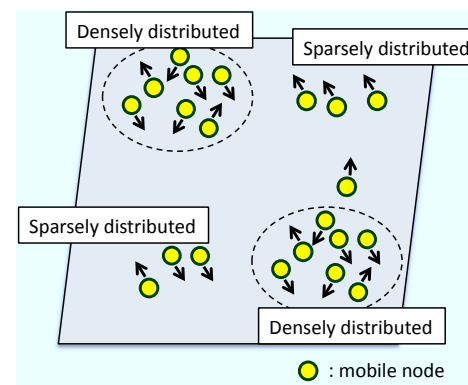


図 1 想定環境

2. 想定環境

本節では、想定環境とアプリケーション、DTN 環境の端末やプロトコルスタックのモデルについて述べる。

2.1 想定環境とアプリケーションについて

想定環境では、図 1 に示す通り、二次元平面上に複数の端末が存在する。端末は自律的に移動し、端末の分布には疎密があるとする。点線で囲まれた領域は端末が集中して分布している。実際の例としては、映画館やショッピングモールなどが挙げられる。この環境下において、各端末はネットワーク中の全端末へメッセージをブロードキャストするものとする。

端末としては、人に持ち運ばれるスマートフォンや PDA などの携帯端末を想定する。端末はメッセージを周囲の端末へブロードキャストする。メッセージには生存時間が設定されている。また、端末間の接触時間の分布には偏りが生じるとする。例えば、ショッピングモールでは店員は一部の場所に存在し、客は様々な場所を訪れる。そのため、店員は一部の店員と長期間接触可能だが、店員は客と短い期間しか接触できない。

それぞれの端末は、同等の計算能力、バッファ容量、通信半径、帯域幅、PID や MAC アドレスなどの一意な識別子を持つ。また、バッファ容量に上限は設けないものとする。端末が GPS などの位置推定システムを利用して位置情報を取得することはここでは想定しない。また、各端末は他端末の接触情報や将来の接触情報を知ることはできない。

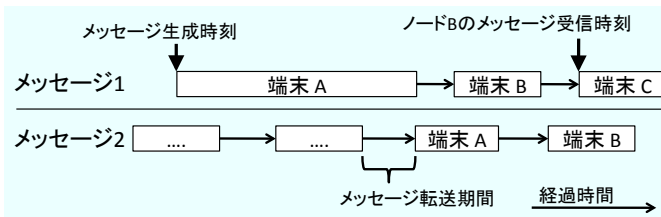


図 2 メッセージホップリストの例

端末はネットワークの機能として、通信範囲内に入った端末を検出でき、同時にその端末の識別子を取得できるものとする。その後、接続が成功すれば、端末は互いが保持していないメッセージを交換しあう。端末の検出には検波やビーコンを用いる。通信半径の大きさは、二次元平面全体を覆わない大きさとする。したがって、ネットワーク分断が発生する想定となる。

3. 安定リンク維持によるブロードキャスト

本章では、提案手法である PSL (Preserve Stable Linke) と、PSL-I (Preserve Stable Link with Indirect Link Estimation) について述べる。

3.1 提案手法の概要

想定環境における提案手法の目標は次の二つである。

- (1) メッセージの生存時間中にメッセージを受信する端末の数を増加させる。
 - (2) それぞれの端末へメッセージが配信されるまでの遅延の平均を削減する。
- それぞれの端末が安定リンクをなるべく維持すれば、リンク確立回数の合計が減少し、通信可能な時間が増加する。提案手法では、安定リンクを過去の接触パターンから接触期間を見積もることで推定する。

一方、長時間接触していない端末同士はお互いに保持していないメッセージが多いと考えられるため、優先的にリンクを確立するほうが拡散速度が向上する。そのため、提案手法では、接触情報とメッセージのホップリストから、そのような端末を推定する。この手法は、端末間でメッセージを交換する機会が増加すれば、メッセージ配信率が向上するという仮定に基づいている。

3.2 利用可能な情報

各端末が保持している情報として次を想定する。

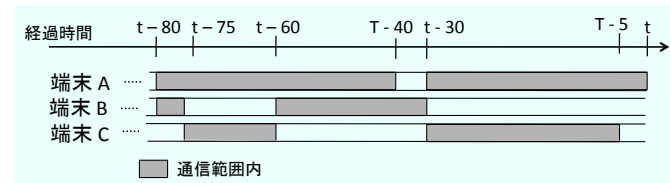


図 3 接触パターン例

表 1 接触表の例

ID	$F_{a,b}$	$I_{a,b}$	$\Gamma_{a,b}$	$O_{a,b}$
端末 A	2	$t - 30$	35	None
端末 B	2	$t - 60$	12.5	$t - 30$
端末 C	2	$t - 30$	20	$t - 5$

- 端末の識別子
各端末は通信範囲内の端末の識別子を知ることができる。
- 端末が通信範囲を出入りした時間
各端末は他の端末が自身の通信範囲を出入りした時刻を記録、保持している。
- メッセージの送信時刻・生成時刻
メッセージのヘッダには、メッセージが送信者に生成された時刻と、現在保持している端末がメッセージを受信した時刻を保持しているとする。
- ホップリスト
メッセージのヘッダにはホップリストも含まれている。ホップリストはメッセージが経由した全ての端末の識別子を含んでいる。端末は、ホップリストを利用して、他端末とのメッセージ交換機会の有無を判定することができる。

図 2 は、ホップリストの例である。それぞれの矩形は、メッセージが端末上に存在する期間を示している。矩形の左端はメッセージが受信された時刻とを示し、右端はメッセージが送信開始された時刻を示す。この図から、メッセージ 1 は端末 A、端末 B、端末 C を経由したことがわかる。

3.3 接触表

以下では、ネットワークに参加している端末の集合を N と表記する。端末 $a \in N$ の接触表を T_a と表記する。接触表は他の端末との接触パターンを示す表である。表の各エントリ $T_{a,b}$ は端末 b との接触パターンを示す。 $T_{a,b}$ は次の要素から成り立つ。

- $F_{a,b}$: 端末 a が端末 b と接触した頻度
- $I_{a,b}$: 端末 b が端末 a の通信範囲内に入った最終時刻.
- $O_{a,b}$: 端末 b が端末 a の通信範囲から出た最終時刻.
- $\Gamma_{a,b}$: 端末 b が端末 a と継続して接触し続けた時間の平均

接触表は次の通り更新される. ただし, 現在時刻を t とする.

- 端末 a の接触表に含まれていない端末 b が通信範囲中に入ったとき, 端末は接触表に端末 ID を追加し要素の値を次の通り初期化する.

$$F_{a,b} = 1, I_{a,b} = t, \Gamma_{a,b} = 0, O_{a,b} = None$$

- 端末 a の接触表に含まれている端末 b が通信範囲に入ったとき, 端末 a は接触表を次の式で更新する.

$$F_{a,b} = F_{a,b_{old}} + 1, I_{a,b} = t, O_{a,b} = None$$

- 端末が通信範囲から出たとき, 端末は接触表を次の通り更新する.

$$\Gamma_{a,b} = \frac{F_{a,b} - 1}{F_{a,b}} \times \Gamma_{a,b_{old}} + \frac{1}{F_{a,b}} \times (t - I_{a,b}), O_{a,b} = t$$

接触パターンと接触表の例を図 3 と表 1 に示す.

3.4 長時間接続可能な端末の推定

端末 a は接触表を用いて他の端末 b との接触可能時間を見積もる. 接触可能時間の見積りは, 過去の接触における継続時間と同等であると仮定する. 具体的には, 接触可能時間 $D_{a,b}$ を計算する際, 次の式を用いる.

$$D_{a,b} = \begin{cases} \Gamma_{a,b} & (O_{a,b} \neq None) \\ \frac{F_{a,b} - 1}{F_{a,b}} \times \Gamma_{a,b_{old}} + \frac{1}{F_{a,b}} \times (t - I_{a,b}) & (O_{a,b} = None) \end{cases}$$

3.5 メッセージ交換機会の有無の推定

端末 a は自身が $[t - T_w, t]$ の期間中に端末 b とメッセージを交換する機会があるかどうかを推定する. 推定には, メッセージのホップリスト, メッセージの生成時刻, メッセージの受信時刻, 接触表を用いる. はじめに, 端末 a は自身が接触する機会がなかった端末の集合 S_d を求める. 全ての端末 $x(x \in S_d)$ は次の条件を満たす.

$$O_{a,x} \neq None, (t - O_{a,x}) \leq T_w$$

過去の一定期間 $[T_n - T_w, T_n]$ にメッセージ交換機会があった端末を間接接触端末と呼ぶ. 現在時刻 t における間接接触端末集合 S_t を以下の通りとする. まず, 端末上の過去全ての

受信メッセージ集合に対し, $m \in M$ が経由した端末の集合を H_m , 生成時刻を T_{c_m} , 受信時刻を T_{r_m} とする. ただし, H_m は要素が m が経由した順に並べられた順序集合であるとする. このとき, m の経路上の間接接触端末集合 S_m を以下の通りとする. ($t_r(n_i \in H_m)$) がメッセージが n_i に受信された時刻であれば, n_i は条件 ($(i < j) \rightarrow (t_r(n_i) < t_r(n_j))$) を満たす.)

$$S_t = \bigcup_{m \in M} \{h \in H_m \mid \frac{T_{r_m} - T_{c_m}}{|H_m|} \times \text{index}(h, H_m) < (t - T_w)\}$$

ただし, $\text{index}(x, S)$ は x の S 中の順序を示す番号である. T_w は端末が互いにメッセージを交換できる確率が高くなる値である. 端末がランダムに動き, 通信範囲が小さければ, T_w は小さく設定されるべきである.

3.6 安定したリンクの維持

本研究では, PSL (Preserve Stable Link) と PSL-I (Preserve Stable Link with Indirect estimation) の二つの手法を提案する. PSL と PSL-I の違いは, リンクを維持する対象の端末集合が異なる点である. 提案手法の詳細を Procedure 1, 2, 3 に示す. Procedure1 は, コネクション承認時の擬似コード, Procedure2 は, コネクション要求時の擬似コード, Procedure3 は, 端末の優先付けを行う関数の擬似コードを示す. PSL は端末集合 S_m とのリンクを維持し, PSL-I は端末集合 S_d とのリンクを維持する. 端末集合 S_m と S_d の間の優先順位と, 各集合内での優先順位は次の通りとなる. 最も優先される端末集合は, PSL では S_d , PSL-I では, S_t である. これらの集合に属する端末間の順位は $\Gamma_{a,b}$ が大きい順に優先度が高い. その他の端末はその次の優先度となり, その他の端末集合に属する端末間の順位は発見時間順である.

端末が他の端末を発見した場合, その時点で維持しているリンクの数が L 未満であれば, 端末は維持しているリンク数が上限 L に達するまで, 優先順位順に通信範囲内の端末へ接続を要求する. その時点でリンク数が上限 L に達している場合, 端末は優先順位が一番低い端末を切断し, 他の通信範囲内の端末へ接続する. PSL では, S_d に属する端末へ接続を試み, PSL-I では, S_m に属する端末へ接続を試みる.

端末が他の端末から接続要求を受信した場合, その時点で維持しているリンクの数が L 未満であれば, 端末はその端末の優先順位が L 以下であれば, 接続要求を承認する. その時点でリンク数が上限 L に達している場合, 端末は優先順位が一番低い端末を切断し, 他の通信範囲内の端末へ接続する. PSL では, S_d に属する端末へ接続を試み, PSL-I では,

S_m に属する端末へ接続を試みる。

リンクが確立されたのち、リンク両端の端末間でサマリベクタを交換する。サマリベクタとは、保持しているメッセージのリストである。これは、文献³⁾の Epidemic Routing と同等の動作である。各端末は、サマリベクタを元に、一方の端末に格納されていて、他方の端末に格納されていないメッセージを決定し、それらのメッセージを交換する。交換順序は First come First Service に基づいて決まる。双方の端末が全てのメッセージの転送を完了しても、リンクは維持し続ける。リンクを維持しているときに、メッセージが他の端末から転送されたり、自身がメッセージを生成した場合、双方の端末はサマリベクタの交換を行わずに、お互いにメッセージを交換する。

Procedure1 : コネクション承認時の擬似コード

定数と関数の説明

L - 維持できるリンク数の上限

n - 現在維持しているリンク数

NoExchangeOpportunity(Node) - PSL では端末が S_d に属している場合、True を返す。

PSL-I では、端末が S_t に属している場合、True を返す。

コネクション承認時の擬似動作

```
1: if  $n \leq L$  then
2:   if  $Priority(Node) \leq L$  then
3:     Accept(Node)
4:   end if
5: else
6:   if NoExchangeOpportunity(Node) =
   True and IsNotConnecting() == True then
7:     DisconnectAndAccept(getLeastPriorityNode(), Node)
8:   end if
9: end if
```

4. 性能評価

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション評価を行った。シミュレータとしては、The One Simulator¹⁾ を拡張したシミュレータを用いた。The One Simulator は、DTN プロトコルの評価のためのオープンソースの無線ネットワークシミュレータである。The One Simulator では、MAC 層と物理層は単純なモデル²⁾ で実装されているため、大規模ネットワークのシミュレーションを行うことができ、本手法の評価に適している。拡張

Procedure2 : コネクション要求時の擬似コード

```
1: if  $n \leq L$  then
2:   while (Node ← getNextDiscoveredNode.SortedByPriority())
   ≠ Null do
3:     if  $Priority(Node) \leq L$  then
4:       Connect(Node)
5:     end if
6:   end while
7: else
8:   while (Node ← getNextDiscoveredNode()) ≠ Null do
9:     if NoExchangeOpportunity(Node) = True then
10:      DisconnectAndConnect(getLeastPriority(Node), Node)
11:     end if
12:   end while
13: end if
```

Procedure3 : 端末の優先付け関数

function Priority(aNode)

```
1:  $n \leftarrow 1$ 
2: while (Node ← getNextDiscoveredNode()) ≠ Null do
3:   if Node = aNode then
4:     return Node
5:   end if
6:    $n \leftarrow n + 1$ 
7: end while
8: while (Node ← getNextDiscoveredNode.SortedByACCT())
   ≠ Null do
9:   if Node = aNode then
10:    return Node
11:   end if
12:    $n \leftarrow n + 1$ 
13: end while
end function
```

表 2 シミュレーションパラメータ

リンク確立遅延	5[s]
リンク数上限	7 [node]
メッセージサイズ	3 [KByte]
メッセージブロードキャスト間隔	10 [s]
メッセージ生存時間	5 [min]

した機能は、メッセージをブロードキャストする機能、リンク確立遅延と、リンク数上限の制限の追加である。

本シミュレーションで、PSL, PSL-I, および、比較手法として、PA (Preserve Always), PN (Preserve None) を評価した。PN は、端末は発見した端末に即座に接続を試み、切断するリンクは転送が終了しているリンクからランダムに選択する手法であり、PA は、端末は発見した端末に即座に接続を試み、リンクの切断は行わない手法である。PN が従来の Epidemic Routing などを用いられる手法に相当する。

移動モデルには、端末の分布に疎密が生じる移動モデルを用いた。ネットワーク中には、一片が 40[m] の正方形で表されるエリアが 4 つ存在し、隣接する二つエリアは 60[m] である。ネットワークの領域のサイズは 2000[m] × 2000[m] である。各エリアでは、 $\frac{N_a}{4}$ 台の端末がランダムウェイポイント (RWP) にしたがって移動している。各エリアを巡回する端末が N_i 台存在する。各端末はそれぞれに設定された静止時間の分布に従って一定時間ごとに静止を行う。分布は一様分布で範囲は $[a, a + 10]$, a は $[20, 1000]$ の範囲から決定される。通信範囲は、端末の位置を中心とした円形で、半径 r_c 内の端末に最大 375[Kbps] の速度でデータを転送する。メッセージのサイズは S_m で、 $T_c[s]$ の間隔で、ネットワーク中の一台の端末から配信開始される。

4.1 シミュレーション結果

シミュレーションパラメータとして、表 2 に示されているものを用いた。図 4 に示した結果は、生成された各メッセージの各端末への配布率の時間変化である。X 軸はメッセージが生成されてからの経過時間を示し、Y 軸は各メッセージが達成できた配布率の時間変化の平均を示す。

結果より、PSL-I は、PSL, PA, PN の手法と比べ、経過時間の早い段階でより多くの端末にメッセージを配布できていることがわかる。例えば、PSL-I は経過時間の早い段階でメッセージ配布遅延を 40[s] から 25[s] に削減している。具体的には、PSL-I, PSL, PA では、端末は既に接続しているメッセージに対して効率よくメッセージを配布できている。

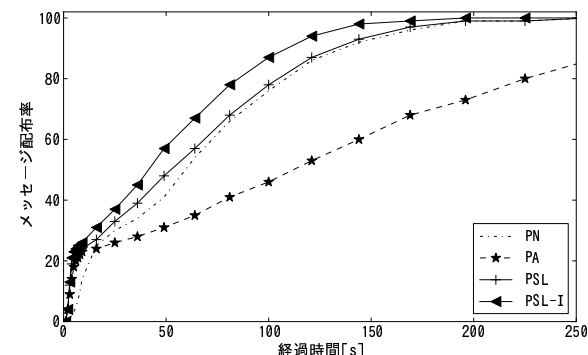


図 4 メッセージ配布率の時間変化

また、PSL-I, PSL, PN では、エリア間を巡回している端末に対してメッセージを送信できている一方で、PA ではそれらの端末にメッセージを送信出来ていないため配布率の上昇が少なくなっている。従って、PSL と PSL-I は PN と PA の双方の利点を持っているといえる。

上記結果より、PSL-I は一番高い性能を持っていることがわかる。PSL, PSL-I 双方では、無駄なコネクション確立を削減することで、メッセージ転送に利用できる時間を増加させているが、PSL では、PSL-I と比較し無駄が多い。例えば、シミュレーション環境において、PSL では、エリア内に入った巡回端末に対し、エリア内の多くの端末がリンク確立要求を行うが、PSL-I では、そのような無駄な要求が発行される回数が削減されている。

4.2 巡回端末数の影響

巡回端末数に応じて、メッセージが各端末に配布されるまでの平均遅延の変化を図 5 に示す。メッセージの生存時間中にメッセージを受信した端末の数の変化を図 6 に示す。図より、巡回端末数の減少により、全ての手法において、平均配布遅延が増加していることがわかる。特に、PA において、平均のメッセージ配布遅延は大きく増加しており、図 6 によると、配布率が減少している。これは、巡回端末が少なければ、あるエリアから他のエリアにメッセージを送信する機会が少ないためである。PA において、巡回端末に接続が行われる唯一の機会、維持リンク数がリンク上限数に達していない場合のみであるためである。

巡回端末数が増加すると、平均のメッセージ配布遅延は減少する。特に PA ではその傾向が顕著である。これは、あるエリアから他のエリアにメッセージを送信する機会が増加する

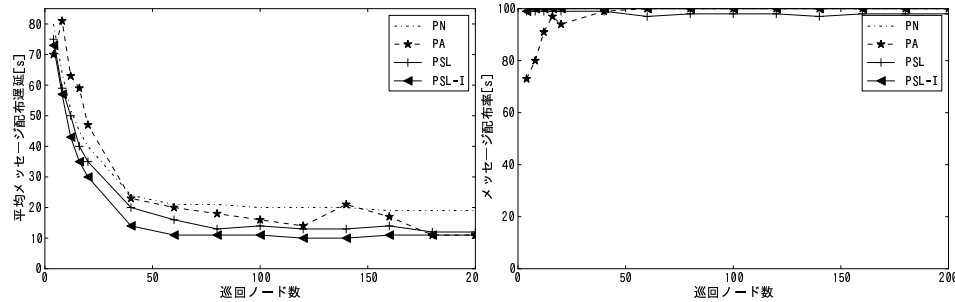


図 5 巡回端末数の変化に対する平均配布遅延の変化 図 6 巡回端末数の変化に対するメッセージ配布率の変化

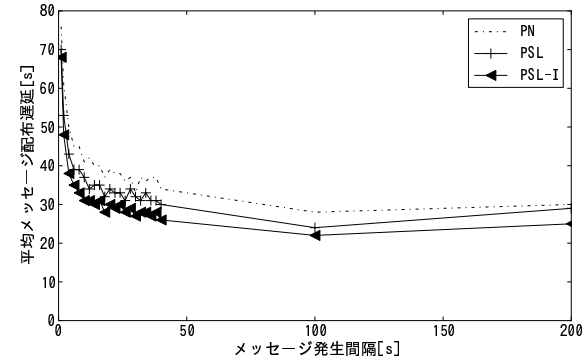


図 9 メッセージ発生間隔による平均メッセージ配布遅延の変化

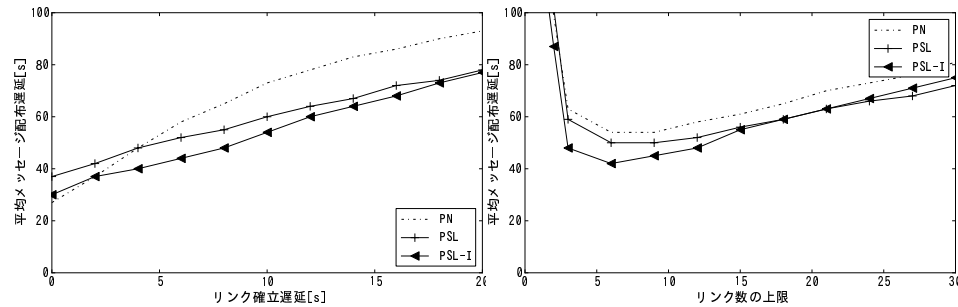


図 7 リンク確立時間の変化によるメッセージ配布遅延の変化 図 8 リンク数上限による平均メッセージ配布遅延の変化

ためであると考えられる。巡回端末が増加することで、グループ間で巡回端末を經由して通信することが可能になるため、その傾向が強くなっている。以下のシミュレーション結果では、PA は配布率が 100% に達していないため、表示しない。異なるエリアの端末間巡回端末を經由して通信できないようにするために、巡回端末数は 40 に設定した。他のパラメータは本結果のパラメータと同じとする。

4.3 リンク確立時間の影響

図 7 は、リンク確立遅延に対する平均メッセージ配布遅延の変化を示している。リンク確立遅延の減少に伴い、PA のメッセージ配布遅延は PSL, PSL-I と比較し減少している。これは、リンク確立回数が増加による影響が少なくなっているためである。従って、リンクを維持するコストが、リンクを切り替えるコストを上回っているためといえる。

リンク確立遅延の増加に伴い、PN において、平均遅延は急激に増加している。結果として、PN の遅延は、PSL, PSL-I と比較し大きくなっている。したがって、PSL, PSL-I はリンク確立遅延が大きい際に有効な手法であるといえる。

4.4 リンク数上限の影響

図 8 は、リンク数上限の変化による平均メッセージ配布遅延の変化を示す。L はリンク数上限を示す。L が 3 から 6 においては、全ての手法において、平均遅延が大きく削減されていることがわかる。これは、極端にリンク数上限が低い環境において、端末のリンク数がすぐに上限に達してしまい、別エリア間だけでなく、同エリア内でもネットワークの分断が発生してしまうためである。そのため、近くの端末であっても配布に時間がかかってしまい、平均的な配布遅延が大幅に増加している。L が 6 以上の場合、リンク数の上限の増加により、平均メッセージ配布遅延が増加している。これは、リンク数の増加に伴い、リンク一本あたりのビットレートが低下してしまい、結果として、メッセージ転送にかかる時間が増加してしまうためである。従って、リンク数上限は、巡回端末に渡せる最低限の上限あれば性能を向上でき、それ以外の場合は、意図的に制限する必要もあることがわかる。

4.5 メッセージ発生間隔の影響

図 9 は、メッセージ発生間隔の変化による、平均メッセージ配布遅延の変化である。間隔の減少に伴い、配信遅延は全ての手法において増加する。これは、メッセージ数の増加により、交換すべきメッセージ数が増加し、接触期間中に交換できないメッセージ量が増加するためである。間隔が増加した場合、全ての手法において、配布遅延は減少する。これは、

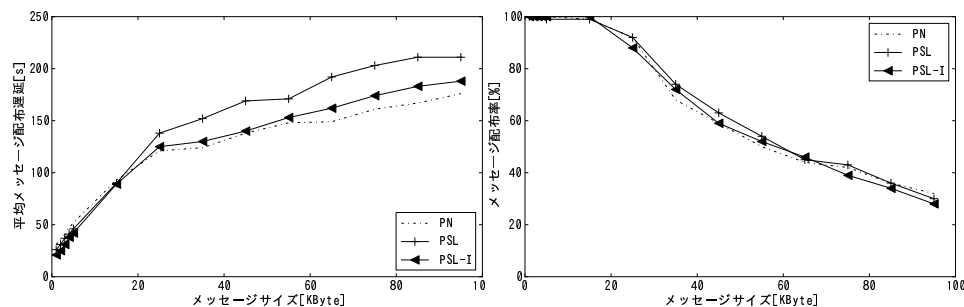


図 10 メッセージサイズの変化によるメッセージ配布遅延の変化 図 11 メッセージサイズの変化による平均メッセージ配布遅延の変化

接触時間中に交換できるメッセージ量が増加するためである。

4.6 メッセージサイズの影響

メッセージサイズを変化させたときの提案手法の性能を調べた。図 10 にメッセージ到達率の変化を示し、図 11 に平均メッセージ配布遅延の変化を示す。メッセージサイズが 20[KB] 以下の環境では、全ての手法において、メッセージの配信率を維持したまま、配信を行っていることがわかる。メッセージサイズが 20[KB] を超えた場合、全ての手法で巡回端末への切り替えは行っているが、交換しなければならないメッセージサイズが大きいため全てのメッセージを送信し切れなくなっている。そのため、全ての手法において、メッセージ配信遅延が増加している。さらに、この条件では PSL-I、PSL は PA よりも遅延が大きい。これは、PA ではメッセージ転送が終了するまで他の端末へリンクを切り替えないため、メッセージを確実に転送できていることによる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、端末分布に疎密が存在する環境において、メッセージの配布遅延を削減しつつ、高いメッセージ配信率を達成できる DTN ブロードキャスト手法を提案した。提案手法はリンク確立遅延や、リンク数上限などの実装上の問題を考慮して設計した。シミュレーション結果より、提案手法が、拡散経過時間の早い段階でのメッセージの配布遅延を 40%削減できることを確認した。

今後の課題としては、第一にメッセージのサイズに関する検証がある。本研究では、各端末は等しい確率でメッセージを配信すると仮定されており、配信されるメッセージのサイズ

も全て等しいと仮定した。実環境においては、配信する端末に偏りがあり、メッセージのサイズも数 KB から、数 MB まで幅がある。例えば、ショッピングセンターで広告配信を行う場合においては、客よりも定員が配信を行う場合が多い。また、メッセージのサイズは広告が、数 KB であるのに対し、ポッドキャスト配信データは、数 MB のサイズである。第二に実環境における評価が挙げられる。今後 Android などの携帯端末に提案手法を実装し、実際に実験を行うことで、手法の実環境での有効性を実装可能性を確認する予定である。

謝 辞

本研究の一部は NICT・大阪大学共同研究「異種広域センサーネットワークの統合管理技術の研究開発および検証」による成果である。

参 考 文 献

- 1) A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The one simulator for DTN protocol evaluation," Proc. Int. Conf. on Simulation Tools and Techniques (ICST'09), pp.1-10, March 2009.
- 2) P. Gupta and P. Kumar, "The capacity of wireless networks," IEEE Transactions on Information Theory, vol.46, no.2, pp.388-404, March 2000.
- 3) A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," Technical Report, Duke University, Apr. 2000.
- 4) H. Gong and J. Kim, "A prioritization-based application-oriented broadcast protocol for delay-tolerant networks," Proc. IEEE Conf. on Wireless Communications & Networking Conf. (WCNC'09), pp.1-6, Apr. 2009.
- 5) F. Bennett, D. Clarke, and J.B. Evans, "Piconet: embedded mobile networking," IEEE Personal Communications, vol.4, no.5, pp.8-15, Oct. 1997.
- 6) V. Lenders, M. May, G. Karlsson, and C. Wacha, "Wireless ad hoc podcasting," Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'07), vol.12, pp.65-67, Jan. 2008.
- 7) T. Abdelkader, K. Naik, A. Nayak, and N. Goel, "A socially-based routing protocol for delay tolerant networks," Proc. Global Communications Conf. (GLOBECOM'10), pp.241-250, Dec. 2010.
- 8) E.M. Daly and M. Haahr, "Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs," Proc. ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'07), pp.32-40, Sept. 2007.
- 9) W. Gao, Q. Li, B. Zhao, and G. Cao, "Multicasting in delay tolerant networks: a social network perspective," Proc. ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Net-

working and Computing (MobiHoc'09), pp.299–308, May 2009.

- 10) G. Gamberini, F. Giudici, E. Pagani, and G.P. Rossi, “Impact of history on epidemic broadcast in DTNs,” Proc. IFIP Wireless Days (WD'08), pp.1–5, Nov. 2008.