

無線アドホックネットワークにおける近隣端末情報を利用した位置依存情報複製配布スケジューリング手法

土田 元[†] 石原 進[†]

無線アドホックネットワークでは、端末の移動や無線リンクの状態の変化により、トポロジの変化が頻発し、ある端末が保持するデータに対してアクセスが不可能な状況が起きてしまう。このような問題の解決方法として各端末が持つデータの複製を他の端末に持たせる方法があるが、筆者らはその一方式として SC (Skip Copy) 方式を提案してきた。SC 方式では位置依存情報をサーバレスのアドホックネットワークで扱うことを前提として、利用されるデータが Geocast によってアクセスされることを想定し、データ発生時に複製をデータ発生源周辺に疎らに配置する。SC 方式は端末密度が比較的高い状態では高いアクセス成功率を示す一方、端末密度が低い状態では複製配置先の不足によりアクセス成功率が向上しないという問題が存在した。その問題を解決するための手法として筆者らは Persistent Skip Copy (PSC) 方式を提案する。本論文ではシミュレーションにより PSC 方式の評価を行った、評価の結果、PSC 方式は端末密度が低く、端末の移動速度が速い場合において SC 方式よりも高いアクセス成功率を示した。

Scheduling Scheme for Replica Distribution of Location Dependent Data Using Information of Neighboring Nodes on Ad Hoc Networks

GEN TSUCHIDA[†] and SUSUMU ISHIHARA[†]

In mobile ad hoc networks, due to the change of topology caused by movements of terminals and disconnections of radio links, it is difficult to maintain connection between terminals. Therefore, situations where mobile nodes cannot access the data on other terminals occur. As solution methods of such a problem, replica distribution methods which distribute the replicas of data items to other terminals and maintain them have been proposed, and we have proposed Skip Copy (SC) method as one for location dependent data. This method distributes location dependent data items requested using geocast destined for the source locations of the data items, and achieves high accessibility to data when the node density is relatively high. However when the node density is low, the access success ratio is small because of the lack of links between the original terminal and other terminals. In this paper, we propose Persistent Skip Copy (PSC) method in situations where the node density is small. Simulation result showed that PSC method achieves high access success ratio compared to SC method when node density is small and node moves fast.

1. はじめに

近年、無線端末等を用いて通信インフラのない場所に一時的にネットワークを構築できる無線アドホックネットワークが注目されている¹⁾。この応用として筆者らは移動端末で構築されたアドホックネットワークにおいて詳細な地域情報を収集するシステムを検討している。このようなシステムの利用場面の例としては、車々間通信による道路交通情報や街角情報の流通、災害復旧時で既存のインフラが利用できない場合の作業

員どうしでの情報交換等があげられる。以下、移動端末が収集する特定の位置に関連付けられた情報を位置依存情報と呼ぶ。

無線アドホックネットワークの性質上、通信を行う端末どうしが直接通信不可能な場合でも、他の端末を中継することで通信可能となるが、端末の移動や無線リンクの状態の変化によって端末間の接続性は保障されないため、通信性能が大きく変動する。さらにネットワークの分断等、ネットワークトポロジの変化によってある端末が持つデータへのアクセスができなくなる状況(図1)が発生する。

そこで、ある端末が取得したデータの複製を別の端末に持たせることでデータ可用性を高く保つ手法が提

[†] 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka
University

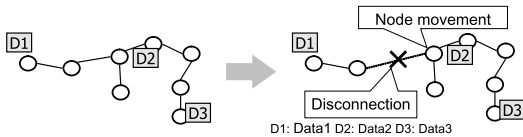


図 1 無線アドホックネットワークの問題点
Fig. 1 Issue of mobile ad hoc network.

案されている^{2),3)}。Hara は文献 2) でノードごとのアクセス頻度が既知のデータに対して、アドホックネットワーク上の端末にネットワークポロジとアクセス頻度に応じて定期的に配置する数種類の手法を提案している。後にデータの更新への対応やリンクの状態に応じて複製の配置先を決定する拡張を行っている。Yin は文献 3) でサーバと要求者の経路上にある端末がデータの複製を持つ端末への経路あるいはデータそのものをキャッシュする手法を提案している。

対象とする情報が位置依存情報である場合、情報の所有者をネットワーク上で特定できなくても、これらの情報を保持する端末が情報に関連づけられた位置周辺に存在するならば、この位置周辺に存在する端末に問合せを行うことで、目的とする情報を入手できる。特定の場所にいる複数の端末にパケットを転送する技術である無線アドホックネットワーク上の Geocast^{4),5)} を用いればこのような問合せは実現可能である。しかし、無線アドホックネットワークにおいては、前述の問題点があるため、端末が Geocast によって転送された要求を受信できなくなる状況が発生する。

筆者らは、サーバレスのアドホックネットワークにおいて、GPS 等により自身の位置を把握可能な複数の移動端末によって収集される位置に関連した情報、位置依存情報—たとえば、道路上のある地点の混雑度や事故発生を示す情報、その場所の写真等—を Geocast を使用して相互に参照するモデルを前提として、これら位置依存情報の複製を効率的に管理する手法を提案してきた⁶⁾。文献 2), 3) の手法では、アクセス頻度およびトポロジに従って複製の配置先の決定を行うが、文献 6) の手法では、サーバレスのアドホックネットワーク上で位置依存情報を扱うことを仮定し、各端末が位置依存情報を生成後、投機的に情報取得端末の周辺端末に複製を疎らに配置する。文献 6) の手法ではこの具体的手法として複製の配置密度に送信元からのホップ数を用いる Skip Copy (SC) 方式を提案し、シミュレーションにより端末の記憶容量節約、ならびにアクセス成功率の向上という効果を確認している。

SC 方式はデータの冗長度を低く抑えつつデータへのアクセス成功率を高めている。しかし SC 方式では端末密度が高い場合において複製が過剰に配置されて

しまう問題⁷⁾と端末密度が低い場合において複製の配置先が少なくなりアクセス成功率が低下するという問題があった。筆者らはこれまでに論文 7) において端末密度が高い場合における過剰な複製配置の解決策を提案・評価している。

本論文では端末密度が低い状況での問題点を解決する手法として Persistent Skip Copy (PSC) 方式を提案する。PSC 方式では、SC 方式におけるデータ生成時の投機的複製配布において、端末間の接続性が得られるまで、複製のブロードキャストを延期することで、確実に複製を配布する。以下、2 章で SC 方式の概要とその問題点を述べる、3 章でその解決策として PSC 方式を提案する。4 章で PSC 方式について評価を行い、5 章にまとめを述べる。

2. 位置依存情報複製配布方式

本章では、文献 6) で提案された SC 方式の概要を説明する。

2.1 想定環境

SC 方式ならびに本論文で提案する PSC 方式では以下の利用環境を想定している。

- アドホックネットワークにおいて複数の端末が自由に移動し、情報の収集、交換を行う。
- 各端末は現在位置を GPS 等により取得可能である。
- 固定のデータサーバは存在せず、各端末は目的とする位置依存情報を持っているホストを特定できない。
- 各端末は、目的とする位置周辺の情報を持っていない場合に、その位置の近辺にいる複数の端末へ Geocast により要求を行う。
- 各端末の記憶領域の大きさは制限されている。
- 各端末は、現在位置によって識別されるデータを発生する。各データにはその発生時刻と有効期限が与えられる。

2.2 Skip Copy (SC) 方式

SC 方式では移動端末が位置依存情報を生成・取得後、この情報の冗長度を高めるため、ただちに複製を複製配布半径 R 内に存在する他の端末にフラディングによって配布する(図 2(a))。ただし、過去に一度受け取った複製と同じ ID、生成時刻を持つ複製を受信した場合は、これを再配布しない。複製を受信した端末のうち、複製配布元の端末からの最小ホップ数 s に基づいて選ばれる一部の端末のみがその複製を保持し、以後の Geocast によるデータ要求に応える。またデータ要求に応える際に、応答を転送する端末のう

ち、応答元から s_r の倍数ホップ離れ、情報に関連した位置（情報発生位置）との距離が R_r 以内であるものは複製を保持する（図 2 (b)）。こうすることで、複製データの数を抑制しつつ、高いアクセス成功率を得ることを可能としている。なお、本論文では簡単のため $s = s_r, R = R_r$ とする。また、複製を記憶する領域が一杯の状況で新たなデータを生成または受信した場合、Least Recently Used 法を用いて過去の短い期間内に利用頻度が低いデータを破棄する。

ある位置 A で発生した位置依存情報が更新された場合、更新データが位置 A 周辺の端末に配布される。ただし、ある位置 A で発生した位置依存情報を更新するのは、最初に位置依存情報を更新した端末であるとは限らない。更新された位置依存情報の複製を受信した端末のうち、更新される前の位置依存情報を保持している端末は、古い複製を破棄し、SC 方式のルールに従って更新された複製を保持する。

また、ある位置 A で発生した位置依存情報に対する要求を受信した端末のうち、位置 A で発生した有効期限切れの位置依存情報を持つ端末は、その情報を破棄し、要求を転送する。

2.3 端末密度が低い状況における複製配布の問題点

端末密度が低い状況では、情報発生源周辺に配布した複製を受信する端末が少なく、または存在しないため、情報発生源周辺に複製を配置できない可能性がある（図 3 (a)）。このため、情報を生成した端末への接続性が確保されない限り、その情報への要求が成功し

なくなってしまう。また、位置依存情報の複製が情報発生源周辺に存在しないため、要求元から情報を持った端末までの経路が長くなり、Geocast による要求が通信エラー等で失敗してアクセス成功率を下げってしまう可能性がある。このため、端末密度が低い状況においても情報発生源周辺の端末へ確実に複製を配布し、情報発生源周辺に複数の複製を存在させる手法が必要とされる。

3. Persistent Skip Copy (PSC) 方式

本章では前述した SC 方式の解決策として Persistent Skip Copy (PSC) 方式（図 4）を提案する。以下各端末が定期的な Hello パケット送信によって、周辺に存在する直接通信可能な端末数を知っていることを前提とする。

PSC 方式ではオリジナルデータを生成した端末は、生成したデータをすぐにブロードキャストするのではなく、自身が直接通信可能な端末数 N を参照し、必要に応じてブロードキャストを延期する。オリジナルデータ生成端末は、 N が閾値 D_N 以上であれば生成したデータをすぐにブロードキャストする。 N が D_N 未満となった場合、ブロードキャストを延期する。また複製データの中継する端末は、受信した複製データをすぐに転送するのではなく、前複製送信端末を除く自身が直接通信可能な端末数を参照し、データ生成端末の場合と同様に複製の転送を延期するかどうかを判定する。ブロードキャストの延期時間 T は式 (1) によって与える。 k_T は調整用の係数で正の定数とする。

$$T = k_T(D_N - N) \tag{1}$$

複製配布を延期している間に直接通信可能な端末数 N が更新された場合、 N に応じて式 (1) の T を再計算する。再計算された待ち時間を T_1 、最初の転送延期決定からの経過時間を T_2 とすると、直接通信可能な端末数が更新された後の待ち時間 T_{new} は、

$$T_{new} = T_1 - T_2 \tag{2}$$

となる。 $T_{new} \leq 0$ となった場合は、複製をただちにブロードキャストする。また、複製配布を延期している端末が複製配布範囲の外に離れた場合、その端末は、

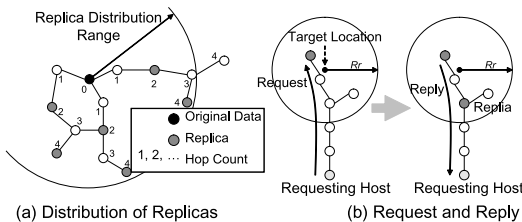


図 2 SC 方式 ($s=2$) による複製配布と要求、応答、複製の再配置 ($s_r=2$)

Fig. 2 SC method ($s=2$), request, reply and relocation of replicas ($s_r=2$).

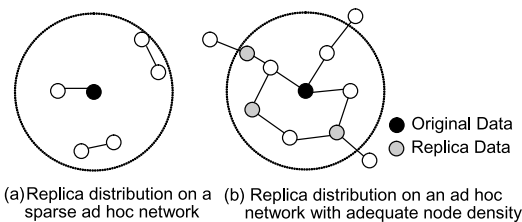


図 3 SC 方式の問題点
Fig. 3 Issue of SC method.

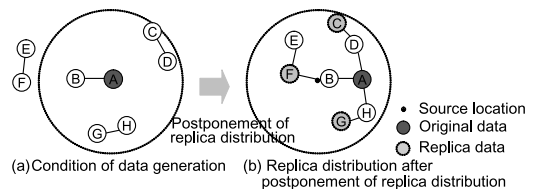


図 4 PSC 方式による複製配布
Fig. 4 PSC method.

複製配布延期終了後、複製配布範囲の外であっても複製配布を行う。

上記で提案した手法は文献 8) で分類されているアドホックネットワークにおける 4 つのブロードキャストの手法である、(i) 単純なフラッディング、(ii) 確率型、(iii) 領域情報利用型、(iv) 隣接ノード情報利用型のうち、周辺ノードの接続関係を利用する隣接ノード情報利用型に属しているといえる。隣接ノード情報利用型のブロードキャスト手法は文献 9) のほか多くの提案がある。これらの手法は高密度なアドホックネットワーク上でのブロードキャストの効率化を目指している。一方、PSC 方式は、配送遅延が許容されるデータを低密度なアドホックネットワークにおいて確実に配布することで、位置依存情報へのアクセス成功率を高めることを目指したものである。

4. 評価

提案した PSC 方式について、シミュレーションによる評価を行った。シミュレータとして GloMoSim⁽¹⁰⁾ を用い、提案方式である PSC 方式に基づく位置依存情報複製配布の保留機構を実装した。

4.1 シミュレーションモデル

1,000 [m] × 1,000 [m] の 2 次元平面上に n 台の移動端末が存在すると仮定する。各端末は以下で説明するデータ生成および後述するデータ要求モデルに従って動作させた。

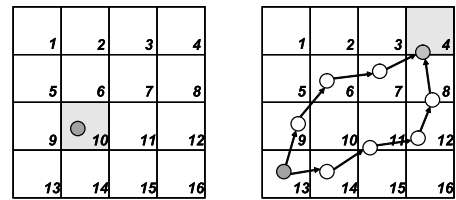
MAC 層プロトコルには IEEE802.11 を用い、通信帯域幅を 2 [Mbps]、通信可能半径を 100 [m] とした。要求、応答、複製配布、すべての通信は UDP ブロードキャストで行うものとした。ルーティングはアプリケーションレベルで行われ、アドホックネットワーク用の IP ルーティングプロトコルは使用していない。これは、各メッセージを中継する端末が応答に必要な複製を保持しているかの判定、および複製の配置の判定を行うためにアプリケーションレベルで扱う必要があるためである。

4.1.1 移動モデル

各端末は移動領域内をランダムウェイポイントモデル⁽¹¹⁾ で移動するものとした。移動速度は $0 \sim v$ ($v = 2 \sim 20$) [m/s] とし、Pause Time = 3 [sec] とした。端末の初期位置はランダムに決定した。

4.1.2 データ生成モデル

位置依存情報の取り扱いを容易にするため、シミュレーション上の移動領域を正方形の領域に等分割し、端末はその現在位置をカバーする領域の中心に関連付けられたデータを取得する。端末は以下で述べるデー



(a) Data generation in region 10 (b) Request forwarding for data generated by region 4

図 5 データ生成と要求

Fig. 5 Data generation and request.

タ生成モデルに従って現在位置に関連するデータを取得し (図 5 (a)), 後述するデータ要求モデルに従って他の領域に関連したデータをアドホックネットワークを介して要求する。

移動領域の分割サイズは 100 [m] とした。したがって、100 力所から異なるデータが発生することになる。本評価では生成データに有効期限 T_{TTL} を設定して、データのバージョンの違いを考慮することとした。各端末は最大 M 個の位置依存情報を保持することができる。シミュレーションの初期状態ではどの端末もデータを保持していない。

データ生成を行う端末は平均 100 秒のポアソンモデルに従い、そのとき端末自身が存在するセルに関するデータを取得する。取得されるデータは、端末の存在するセルの中心位置と発生時刻をパラメータとして持ち、UDP、IP ヘッダを含めて 1,500 bytes のパケットで配送されるものとする。SC 方式では、各端末はデータを生成後ただちに近隣の端末へ複製を配布する。一方 PSC 方式では、データ生成後複製配布を延期するかどうかの判定を行う。複製配布を延期しないという判定がされた場合は、ただちに近隣の端末へ複製を配布する。複製配布を延期する場合は、自身が直接通信可能な端末数から決定される時間 T だけ複製配布を延期する。

4.1.3 データ要求モデル

半数の端末は平均 100 秒のポアソンモデルに従ってデータ要求を行う。データ要求パケットは目的データが存在する位置をキーとして持ち、サイズは UDP、IP ヘッダを含めて 128 bytes とした。

データ要求モデルには文献 6), 7) における評価で用いたモデルの 1 つである一様アクセスモデルを用いる。一様アクセスモデルは、すべての領域に対応するデータに対し、同じ確率で要求を発生させるモデルである。本評価に一様アクセスモデルを用いる理由は、データアクセスに偏りがある場合、SC、PSC 方式では、頻繁にアクセスされるデータが再配置されるため、

PSC 方式による複製配布の効果に影響を及ぼす可能性があるからである。

4.1.4 要求・応答の送信

要求メッセージは Geocast によって目的となる領域の中心に向かって転送される(図 5(b)). アドホックネットワーク上の Geocast については文献 4), 5) 等で検討されているが, 今回のシミュレーションでは以下で述べる手法を用いた。

要求メッセージを送信・中継する端末 i は, 宛先の位置と自分自身の現在位置を含んだ要求メッセージを UDP によりブロードキャストする。このメッセージを受信した端末 j は, 直前にメッセージを送信した端末 i の位置と宛先の位置, および自分自身の位置と比較して, 自分自身が i よりも宛先の位置に近く, かつ応答データを持っていない場合は, 受け取った要求を再度ブロードキャストする。要求に該当し, かつ発生からデータの有効期限 T_{TTL} が経過していないデータの複製を所持している場合, この複製を応答として要求元へ送信する。そうでない場合は要求を再度ブロードキャストする。今回の評価では T_{TTL} を 2,000 [sec] とした。

応答データの送信には, 要求メッセージが中継されてきた経路の逆順をたどる方法を用いることとした。各端末は要求メッセージを中継するときに, 自身の識別子を経路情報として要求メッセージに付加する。応答端末は応答データにその経路を付加してブロードキャストをする。そのデータを受信した端末は経路情報を参照し, 自身が中継を行うか否かを判断する。

応答データを受信した要求端末は, 応答データをローカルに保存する。応答データのサイズは応答経路の情報を含めて 1,500 bytes とした。

4.1.5 評価指標と評価項目

提案手法の評価を行うために以下の評価指標を用いた。

アクセス成功率 A_S

$$A_S = \frac{A_C}{R_C} \quad (3)$$

R_C (Request Count) は各端末がアクセス要求を送信した回数の総和であり, A_C (Answer success Count) はアクセス要求元が対象となる応答データを受け取り, 要求が完了した回数の総和である。 A_S の算出にはシミュレーション時間全体での A_C , R_C を利用した。

複製配布トラフィック T_{data}

複製配布のためのデータ送信回数を T_{data} とする。

表 1 シミュレーション条件
Table 1 Simulation parameters.

Parameter	Default value	Range
Number of cells	100	
Data size [KB]	1.5	
Number of nodes	20	10 to 60
v_{max} [m/s]	2, 10	2 to 20
Pause Time [sec]	3	
Bandwidth [Mbps]	2	
Communication range [m]	100	
Replica distribution range [m]	200	
Data generates interval [sec]	100	
Data requests interval [sec]	100	
T_{TTL} [sec]	2,000	
k_T	5	1 to 10
D_N	2, 4	1 to 5
T_{Hello}	100	

発生したオリジナルデータ数に対する複製の数の割合 R_e (以下冗長度とする)

$$R_e = \frac{N_{replica}}{N_{orig}} \quad (4)$$

N_{orig} (Number of Original Data) はシミュレーション全体で発生したオリジナルデータの総数である。 $N_{replica}$ (Number of Replica Data) はネットワーク全体における複製数である。 R_e の算出にはシミュレーション時間全体での $N_{replica}$, N_{orig} を利用した。

評価する複製配布方式は以下の 4 通りである。

- PSC(1): $s = 1$ とした PSC 方式。
- PSC(2): $s = 2$ とした PSC 方式。
- SC(1): $s = 1$ とした SC 方式。
- SC(2): $s = 2$ とした SC 方式。

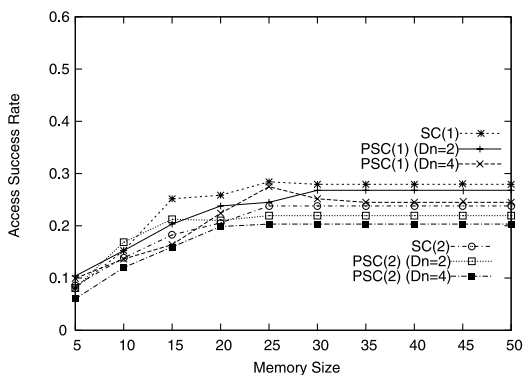
本評価において上記の 4 通りの方式を比較する理由は, 複製配布を延期する効果を評価するためである。

4.2 シミュレーション結果と考察

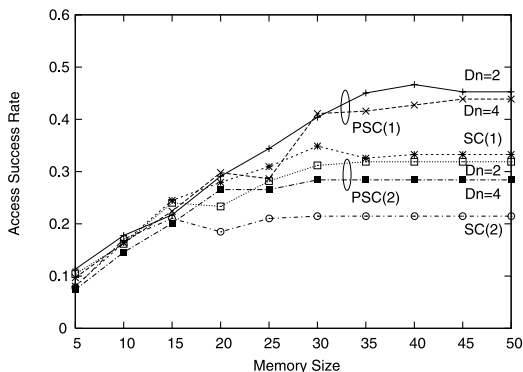
表 1 にシミュレーション条件を示す。シミュレーションはシミュレータ上の時間で 5,000 秒行った。このうち最初の 1,000 秒分は定常状態になるまでの猶予期間とし, 評価値の計測を行っていない。以降に示すシミュレーションの大部分は各端末が保持できる最大のデータ数 M (メモリサイズ) を 5 から 50 まで 5 間隔に変化させて得たものである。また, PSC 方式における式 (1) の延期時間決定に関わる係数 k_T は 5 とし, 閾値 D_N は 2, 4 とした。また, Hello パケットの送信間隔 T_{Hello} は 100 秒とした。

4.2.1 アクセス成功率に対する影響

図 6 に端末数を 20 台, 複製配布半径 R を 200 [m] とした場合のメモリサイズ M に対するアクセス成功率の変化を示す。図 6(a) における端末の移動速度は $v = 2$ [m/s], 図 6(b) における端末の移動速度は



(a) 低速移動時, $v = 2$ [m/s]



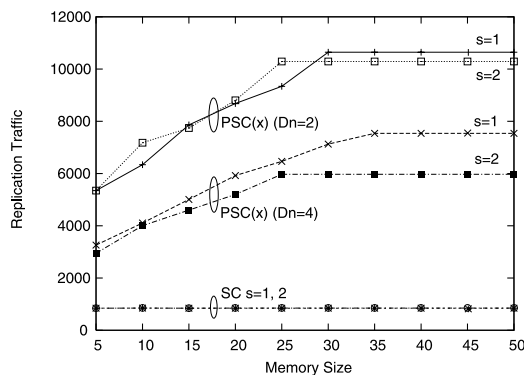
(b) 高速移動時, $v = 10$ [m/s]

図 6 メモリサイズに対するアクセス成功率の変化 (端末 20 台, $R=200$ [m])

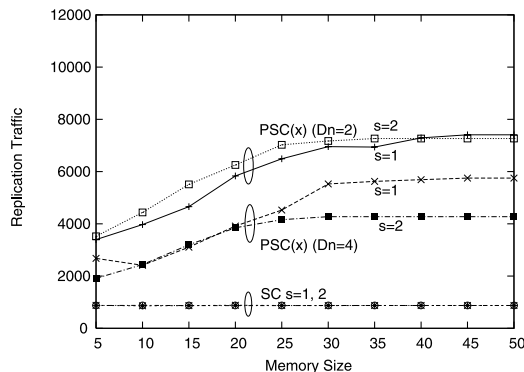
Fig. 6 Access success ratio vs. memory size (20 nodes, $R=200$ [m]).

$v = 10$ [m/s] である。移動速度が遅い場合 (図 6(a)), PSC 方式の方が SC 方式よりも若干アクセス成功率が小さくなっている。一方, 移動速度が速い場合 (図 6(b)), 全般に移動速度が遅い場合と比較してアクセス成功率が高い。またメモリサイズが小さい場合, SC 方式と PSC 方式のアクセス成功率に差はないが, メモリサイズが 30 以上の場合, SC 方式よりも PSC 方式の方がアクセス成功率が高くなる傾向にある。また, $D_N = 2$ の PSC 方式と $D_N = 4$ の PSC 方式を比較した場合, $D_N = 2$ の PSC 方式のアクセス成功率が高いことが分かる。

SC 方式, PSC 方式両方において $s = 1$ の場合のアクセス成功率が $s = 2$ の場合よりも大きくなっている。端末密度が低い状態では, 端末間の接続性が小さくなる。 $s = 2$ では, 少なくとも 2 ホップ先までリンクがつながっていないと複製が配置されないため, 2 ホップ以上での端末間の接続が行われていないと複製が配置できない。一方, $s = 1$ は 1 ホップでも複製配置が可能である。ネットワーク上の複製の数を $s = 2$



(a) 低速移動時, $v = 2$ [m/s]



(b) 高速移動時, $v = 10$ [m/s]

図 7 メモリサイズに対する複製配布トラフィックの変化 (端末 20 台, $R=200$ [m])

Fig. 7 Replication traffic vs. memory size (20 nodes, $R=200$ [m]).

の場合に比べて十分多く確保できるため, $s = 1$ のアクセス成功率が $s = 2$ に比べて高くなる。

これまでの評価で, SC 方式では, 移動速度が遅い場合, 各端末は同じ場所で発生したデータばかりを持つ傾向にあり。移動速度が速い場合は各端末は様々な場所で発生したデータを保持する傾向にあることが分かっている。ただし, 両者におけるアクセス成功率に差はない。一方, PSC 方式では, 移動速度の違いによってアクセス成功率に差がでている。この詳細については 4.2.3 項で検討する。

4.2.2 複製配布トラフィック, 冗長度に関する検討

図 7 に図 6 と同じ条件におけるメモリサイズに対する複製配布トラフィックの変化を, 図 8 に冗長度の変化を示す。図 7 より, PSC 方式は SC 方式に比べて大幅に複製配布トラフィックが増加している。これは, 遅延後の複製配布により, 複製を受信できる端末が増加し, これらの端末が再度複製配布を行うためである。また PSC 方式では, $D_N = 2$ のときの複製配布トラフィック量が $D_N = 4$ のときよりも多い。こ

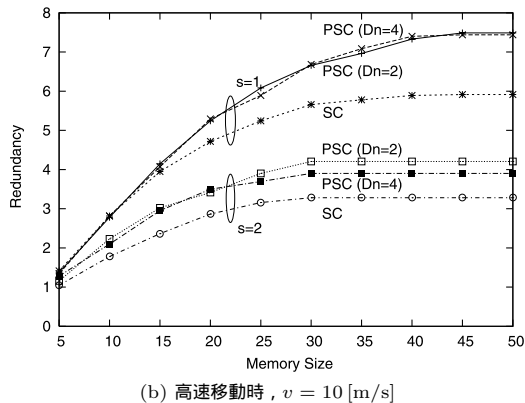
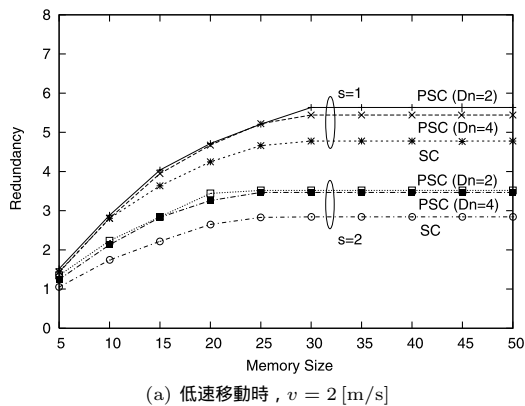


図 8 メモリサイズに対する冗長度の変化 (端末 20 台, $R=200$ [m])

Fig. 8 Replication traffic vs. memory size (20 nodes, $R=200$ [m]).

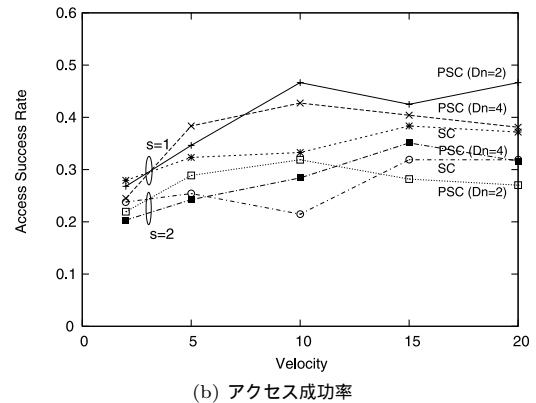
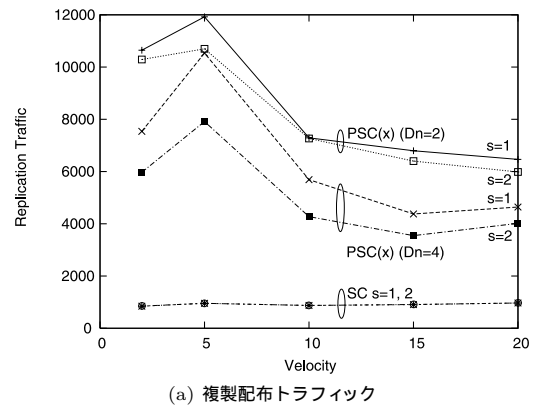


図 9 移動速度の影響 (端末 20 台, メモリサイズ 40, $R=200$ [m])

Fig. 9 Affect of velocity (20 nodes, memory size 40, $R=200$ [m]).

の理由は以下のとおりである。 D_N を大きくすると、複製配布延期時間が長くなる。延期時間が長くなることで、複製配布を延期している端末が複製配布範囲から外れてしまい、複製配布のためのブロードキャストが行われる回数が減少してしまう。また、隣接端末数 N が D_N に達した場合にも、端末が複製配布範囲の中心から外れてしまう可能性が高いため、このときブロードキャストされた複製を受信した端末がさらに複製を配布しようとしても、複製配布範囲内で行う可能性が低くなる。したがってブロードキャストの回数が減少する。一方 D_N が小さいと、複製配布延期時間が短く、より少ない隣接端末数であっても複製を配布する。また複製配布延期中に直接通信可能端末数 N が更新されたときに、 T_{new} が 0 になる可能性が高い。この結果として複製配布が行われる回数が増える。また、図 8 より、PSC 方式の冗長度が SC 方式よりも大きいことが分かる。このことから、PSC 方式を用いて複製配布を延期することで、より多くの端末に複製を配置していることが分かる。

移動速度の違いに注目すると、図 7 より PSC 方式において、移動速度が速いときの複製配布トラフィックが移動速度が遅いときよりも少ないこと、図 8 より移動速度の速い場合の冗長度が移動速度が遅い場合よりも大きいことが分かる。この詳細については 4.2.3 項で検討する。

4.2.3 移動速度の影響

次に端末の移動速度に着目して検討する。図 9 に端末数を 20 台、メモリサイズを 40 としたときの移動速度と複製配布トラフィック、アクセス成功率の関係を示す。図 9 (b) より、移動速度が速いほどアクセス成功率が高い傾向にあることが分かる。また、図 9 (a) より、各端末の移動速度が速くなるに従い、PSC 方式の複製配布トラフィックは減少する傾向にあることが分かる。これらのことから、全般に移動速度が速くなると、複製配布トラフィックが減少してアクセス成功率が増加するということがいえる。この理由は以下のとおりである。端末の移送速度が速いと、端末が情報発生源から遠ざかるまでの時間が短く、複製配布延

期中に複製配布半径の外に移動してしまう可能性が高い。したがって、複製配布回数が少なくなる可能性が高い。一方で端末の移動速度が速いと、トポロジが頻繁に変化する。PSC方式では、隣接端末数が増加した場合、複製配布延期時間が短くなり、複製配布の機会が多くなる。移動速度が速い場合は、トポロジが変化し、隣接端末数が増加したときに複製が配られ、より多くの端末が複製を保持する。このため、要求が成功する可能性が高くなる。また、端末が移動後に複製を配布することで、より少ないブロードキャストの回数で広い範囲に複製の配布が可能となる。このため、複製配布トラフィックが減少しアクセス成功率が増加する。

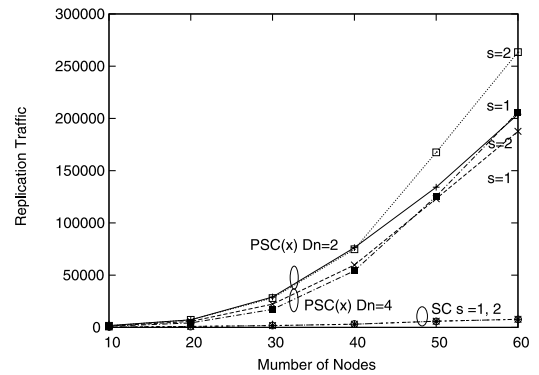
図6～図9までの結果より、PSC方式では、移動速度に対して適切な長さの延期の時間が確保されているならば、複製配布範囲内において、より多くの端末との接続機会が増えるので、より多くの端末に複製が配置され、結果としてアクセス成功率が向上する。移動速度に対して適切な長さの延期時間を確保するには、式(1)で用いられるパラメータ k_T 、 D_N を端末の移動速度に対して適切に設定する必要があると考える。 k_T 、 D_N の影響については4.2.5項で評価し検討する。

4.2.4 端末密度の影響

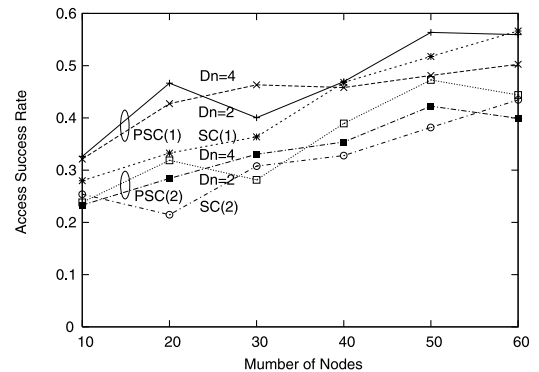
次に、端末密度がPSC方式に与える影響について調べる。図10にメモリサイズを40、移動速度を $v = 10$ [m/s]としたときの端末数と複製配布トラフィック、アクセス成功率の関係を示す。図10(a)より、PSC方式はSC方式と比較して、端末数の増加に対して複製配布トラフィックが大きく増加していることが分かる。端末密度が高の場合、端末密度が低い場合と比較して、複製配布を延期することで複製受信端末が増加する割合が高い。複製受信、送信端末が増加するため、複製配布トラフィックは増加する。しかし、図10(b)よりアクセス成功率に着目すると、端末数が30以下のときはPSC方式のアクセス成功率がSC方式よりも高いが、40以上の場合はPSC方式、SC方式の間に大きな差は見られない。このため、端末密度が高い場合は複製配布を延期することによって複製配布トラフィックが増加しても、それがアクセス成功率の増加には結び付かないと考える。

4.2.5 複製配布保留時間の長さに関する検討

図11にメモリサイズを40、端末数を20台、 $s = 1$ 、 $k_T = 5$ とし、移動速度を2～20 [m/s]と変化させたときの閾値 D_N とアクセス成功率、複製配布トラフィックの関係を示す。図11(a)に示すとおり、移動速度が極端に遅い場合は、PSC方式を用いて複製配布を延



(a) 複製配布トラフィック

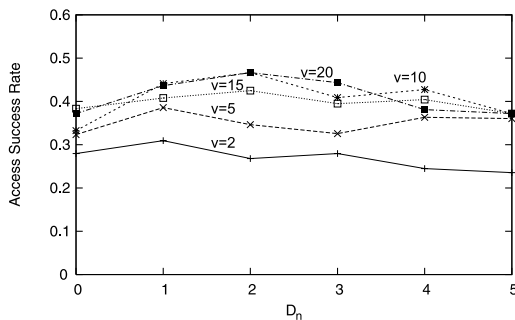


(b) アクセス成功率

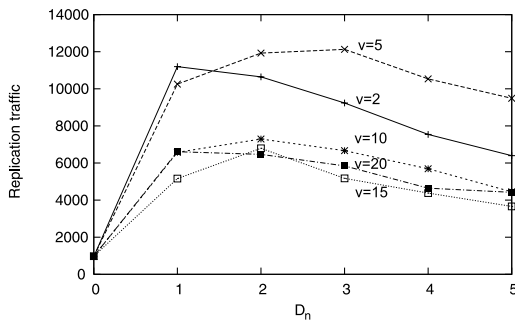
図10 端末密度の影響 ($v = 10$ [m/s], メモリサイズ 40, $R = 200$ [m])

Fig. 10 Affect of node density ($v = 10$ [m/s], memory size 40, $R = 200$ [m]).

期する効果が小さいことが分かる。また、移動速度が速い場合であっても、 $D_N = 1, 2$ の場合と $D_N = 4, 5$ の場合を比較すると、 $D_N = 1, 2$ のアクセス成功率が数%高いことが分かる。移動速度が極端に遅い場合、複製配布を延期してもトポロジがほとんど変化しないため、複製保持端末が増加する確率が低い。このためPSC方式の効果が小さい。一方、移動速度が速い場合、複製配布延期時間が長すぎると複製配布範囲外に移動する確率が高い。複製配布範囲外に移動すると複製配布を行わないため、複製保持端末が減少する。このことは、図11(b)に示すように、閾値 D_N が大きくなると、複製配布トラフィックが減少することからも分かる。この理由は次のように説明できる。閾値 D_N が小さいと、より少ない隣接端末数であっても複製を配布する。これに対して、 D_N が大きいと、複製配布延期時間が長く、隣接端末数が増加しない限り延期時間が短くならない。端末密度が低い状況では、隣接端末数が増加する確率が低い。この結果、延期時間が長くなりすぎると複製配布回数が減少し、複製保持



(a) アクセス成功率



(b) 複製配布トラフィック

図 11 閾値 D_N の影響 (端末 20 台, $s = 1$, $k_T = 5$, メモリサイズ 40, $R=200$ [m])

Fig. 11 Affect of threshold D_N (20 nodes, $s = 1$, $k_T = 5$, memory size 40, $R=200$ [m]).

端末が少なくなり、アクセス成功率が低下する。

図 12 にメモリサイズを 40, 端末数を 20 台, $s = 1$, $D_N = 2$ とし, 移動速度を 2–20 [m/s] と変化させたときの調整係数 k_T とアクセス成功率の関係を示す。図 11 の結果と同様に, 移動速度が遅い場合は PSC 方式の効果が小さく, 移動速度が速い場合には, $k_T = 0$, すなわち SC 方式と比較してアクセス成功率が向上する。ただし, k_T が大きすぎると, アクセス成功率がピークの値と比較して減少している。すなわち, 延期時間を長くしすぎるとアクセス成功率が低下する。この理由は前述した D_N の影響と同一で, 延期時間終了時に端末が複製配布範囲を外れてしまい, 複製配布機会が減少するためである。なお, 移動速度が遅い場合, 移動速度が速い場合に比べ, k_T が大きくても, 延期時間の間に端末が複製配布範囲を外れることが少なくなるので, アクセス成功率が最大となる k_T の値は大きくなると予想される。しかし, 今回のシミュレーションの範囲では, アクセス成功率が最大となる k_T と移動速度との関係は明確にはならなかった。これは, PSC 方式によるアクセス成功率向上が端末の移動速度が速い場合に顕著であり, 端末の移動速度が遅い場合には, k_T によるアクセス成功率の向上の効果が少

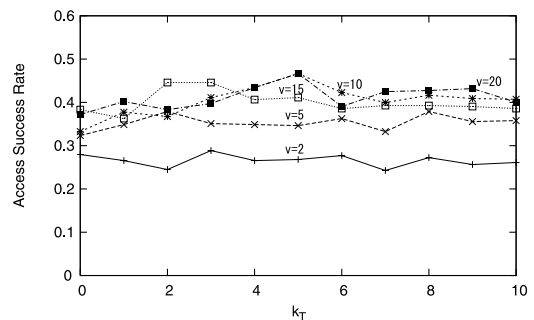


図 12 閾値 k_T の影響 (端末 20 台, $s = 1$, $D_N = 2$, メモリサイズ 40, $R=200$ [m])

Fig. 12 Affect of threshold k_T (20 nodes, $s = 1$, $D_N = 2$, memory size 40, $R=200$ [m]).

ないことを意味すると考える。

以上のことから次のことがいえる。PSC 方式は, 移送速度が極端に遅い場合は効果が小さい。また移動速度が速い場合は, アクセス成功率の向上に寄与する。ただし複製配布延期時間が, データ生成端末が複製配布範囲から外れない程度の値となるように k_T と D_n の値を決定する必要がある。

5. まとめ

本論文では, 無線アドホックネットワーク上の位置依存情報の複製管理手法 SC 方式の端末密度が低い状況での問題点を明らかにし, その解決策として PSC 方式を提案した。PSC 方式では, 直接通信可能端末数が少ない場合に新たな複製配布先が現れるまで複製配布を延期することで, 端末密度が低い状況でも確実に複製配布を行い, 複製が配置されないことによるアクセス成功率の低下を防止する。

シミュレーションの結果, 提案した複製延期機構を導入した複製配布方式 (PSC 方式) では, SC 方式に対し, (i) メモリサイズが比較的大きい場合により多くの複製を配置できること, (ii) 端末密度が低く, 端末の移動速度が極端に遅くない状況において高いアクセス成功率を達成できることが確認できた。ただし, ネットワーク全体での端末密度が高い場合には, 複製配布トラフィックが多くなる一方でアクセス成功率は SC 方式と同程度であった。このため, PSC 方式を用いる場合には, 局所的に端末密度が低いだけなのか, 全体の端末密度が低いのかを判断して用いることが必要である。

今回の評価では, 複製配布を延期して複製配布先を増やす効果に着目した。そのため, SC 方式や, 文献 7) で提案されている複製配布トラフィック削減手法との連携については考慮しなかった。実環境においては,

時間によって端末密度が動的に変化するため、端末密度に応じて利用する方式を決定する必要がある。今後は、端末密度に応じてPSC方式、SC方式と文献7)で提案した手法を併用した場合について検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(A)(16680002)によるものである。ここに記して謝意を示す。

参 考 文 献

- 1) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.C. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98)*, pp.85-97 (1998).
- 2) Hara, T.: Effective Replica Allocation in Ad Hoc Networks for Improving Data Accessibility, *IEEE INFOCOM 2001* (2001).
- 3) Yin, L. and Cao, G.: Supporting Cooperative Caching in Ad Hoc Networks, *IEEE INFOCOM 2004* (2004).
- 4) Ko, Y.B. and Vaidya, N.H.: Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms, *IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, pp.101-110 (1999).
- 5) Ko, Y.B. and Vaidya, N.H.: Flooding-Based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol.7, No.6, pp.471-480 (2002).
- 6) 土田 元, 沖野智幸, 田森正紘, 渡辺 尚, 水野忠則, 石原 進: 無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配置手法, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J88-B, No.11, pp.2214-2227 (2005).
- 7) 石原 進, 佐仲貴幸, 土田 元, 水野忠則: 無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布方式のトラフィック削減手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.12, pp.2834-2847 (2005).

- 8) Williams, B. and Camp, T.: Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks, *3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2002)*, pp.194-205 (2002).
- 9) Wu, J. and Dai, F.: Broadcasting in Ad Hoc Networks based on Self-Pruning, *IEEE INFOCOM 2003* (2003).
- 10) GloMoSim.
<http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>
- 11) Perkins, C.E.: *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley (2001).

(平成 18 年 4 月 1 日受付)

(平成 18 年 10 月 3 日採録)



土田 元 (学生会員)

昭和 56 年生。平成 16 年静岡大学工学部システム工学科卒業。平成 18 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学創造科学技術大学院博士後期課程在学中。モバイルアドホックネットワークに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



石原 進 (正会員)

昭和 47 年生。平成 6 年名古屋大学工学部電気学科卒業。平成 11 年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。平成 10 年日本学術振興会特別研究員。平成 11 年静岡大学情報学部助手。平成 13 年同大学工学部助教授。平成 18 年同大学創造科学技術大学院助教授。博士(工学)。平成 9 年電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞受賞。モバイルコンピューティング, 無線環境用 TCP/IP, モバイルアドホックネットワークに関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。