

車々間アドホックネットワークにおける車両の移動特性を考慮した位置依存情報複製配布方式

山中麻理子 † 土田元 ‡ 石原進 ‡

† 静岡大学大学院工学研究科 ‡ 静岡大学創造科学技術大学院

A position-dependent information distribution on ad hoc networks in consideration of the characteristics of vehicle movement

Mariko Yamanaka†, Gen Tsuchida‡ and Susumu Ishihara‡

†Graduate School of Engineering, Shizuoka University

‡Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

1 はじめに

無線技術の進歩に伴い、通信インフラに依存せず、無線端末のみで動的にネットワークを構成するアドホックネットワークが注目され、災害時や車々間通信などへの応用が期待されている。アドホックネットワークでは、直接通信不可能な端末とも他の端末を中継することでマルチホップの通信が可能となる。

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、道路交通情報のように、ある特定の地域に関連付けられた情報（以下、位置依存情報）をネットワーク内の端末が収集・共有を行うアプリケーション（SOLA：system for Sharing Objects with Location information on Ad hoc networks）の検討を行っている。アドホックネットワークにおいてデータの共有を行うことを考えた場合、端末の移動や無線リンクの状態の変化により端末間の接続性が保証されず、以前利用可能であった情報にアクセスできなくなってしまうという問題点がある。この問題点の改善策として複製配布が提案されている [1]。この技術では、ネットワーク内の端末に複製を配布し、複数端末が複製を保持することで情報の可用性を高める。文献 [1] では、各端末が各データに対するアクセス頻度および端末のトポロジに従って複製の配布先の決定を行っている。

一方、筆者らは、SOLA において、各端末がどのようなデータを保持しているかは未知であり、位置依存情報への要求が Geocast によって行われるような環境を想定した複製配布手法として Skip Copy(SC) 方式を提案している [2]。しかし、市街地における車々間通信に SC 方式を適用する場合、道路によって制限される端末の移動特性、および大きな移動速度が考慮されておらず、適切に複製が配布されない可能性がある。そこで、本稿では道路の構造を考慮し、複製配布のタイミングに注目した Road-aware SC (RSC) 方式を提案し、シミュレーションにより評価を行う。

2 位置依存情報複製配布方式

2.1 SC 方式

SC 方式は、SOLA において、位置依存情報への Geocast による要求に対し、高いアクセス成功率を達成することを目標とし、端末の有限な記憶容量を考慮に入れた複製管理の一方式である。SC 方式では、各端末は情報生成後、直ちに複製配布範囲内の周辺端末に複製を配布し、生成端末から s ホップごとの端末に複製を保持させる。しかし、一度複製を複数の端末に配布しても、複製を保持している端末が移動してしまうと、Geocast によって転送される要求メッセージに応えることのできる端末が存在しなくなるため、アクセス成功率が低下してしまう。そこで、SC 方式では、情報に対する要求への応答返送時に複製配布時と同様に、複製の返送パス上で複製配布範囲内にいる端末

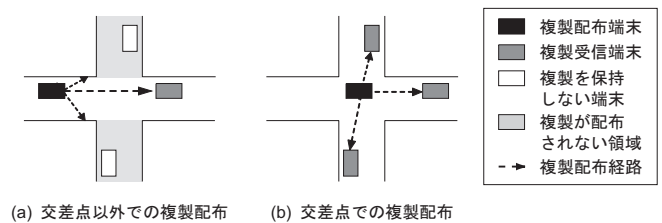


図 1: 複製配布位置における配布状況の違い

上に s ホップおきに複製の再配置を行い、複製を情報発生源周辺に留める。これらの手法を用いることにより、SC 方式は端末の記憶容量を有効に利用しながら情報の可用性を高めている。

2.2 車々間通信時の SC 方式の問題点

SC 方式のこれまでの設計では、端末は歩行者の速度でのオープンフィールドでの移動が想定されている。一方、市街地における車々間通信では、端末は道路に沿って移動し、車両の移動速度は大きいという特徴を持つ。さらに、ビルなどの障害物により、通信が遮断されてしまう可能性もある。

市街地における車々間通信を想定した場合、道路構造は交差点と交差点以外の大きく 2 つに分けられる。交差点以外の道路では、対向車線にいる車両との相対速度は大きいいため、通信中に経路断絶が起こりやすくなる可能性がある。また、車両の移動方向が車線に沿った方向のみであるため、複製の配布方向が限られてしまう。一方、交差点では、車線に沿う方向に加え、交差する方向にも複製の配布が可能となる。さらに、対向車線よりも交差する車線にいる車両との相対速度の方が小さくなり、また、車線数増加に伴い車両密度も大きくなるため、通信の成功率が高くなると考えられる。以上のことから、複製配布を行うには交差点が適していると考えられる。

SC 方式では、道路の構造に関係なく、情報生成後直ちに複製配布を行うため、端末が交差点以外にいるときには、図 1(a) のように複製が配布されない領域ができてしまう可能性がある。また、SC 方式では、情報に対する要求への応答時に複製の再配置を行うことで情報発生源周辺に複製を配置させているが、要求がなかった場合、複製の再配置が行われず、車々間通信では端末の移動速度が大きいため、車々間の通信が可能うちに再配置が行われなかった場合には、次に要求が来たときに、複製を保持している端末が既に情報発生源周辺に存在しない可能性があり、情報に対するアクセス成功率が低下してしまうと考えられる。これらの点から、SC 方式をそのまま車々間通信における複製配布に適用することは難しい。そこで、道路の構造を考慮に入れた Road-aware SC (RSC) 方式を提案する。

2.3 RSC 方式

SC 方式では、各端末は情報生成・複製受信直後に複製配布を行うが、RSC 方式では、受信端末が多くなると予想される交差点で複製配布処理を行うように、複製配布のタイミングを調節する。すなわち、各端末は、情報生成・複製受信直後に加え、以下で述べる複製配布を行う端末に該当する端末が、情報の有効期限の間に複製配布範囲内の最初に到達した交差点において複製配布を行うという動作を繰り返すことで、情報発生源周辺に情報の複製を留める。この方法では、要求頻度の高低に関わらず複製の配布が行われ、要求頻度の低い情報も配布され続けてしまうが、車々間通信を想定した場合には、端末の記憶容量は十分に確保できると考えられるため、記憶容量上の問題は発生しない。なお、情報生成・受信後、直ちに複製配布を行うのは、端末の進行方向とは異なる方向にも広く複製を配布するためである。また、RSC 方式でも、SC 方式と同様の方法で複製の再配置を行う。

2.3.1 情報生成時・複製受信時の処理

RSC 方式による複製配布処理の様子を図 2 に、擬似コードを図 3 に示す。図 3 の第 1~6 行は情報生成時、第 8~28 行は複製受信時の複製配布処理を示している。また、第 30~57 行は、交差点に到達するか、複製受信後、最大複製配布遅延時間 T_{max} が経過したときに、配布待ちの複製があれば複製配布を行う処理を示している。 T_{max} は、交差点間距離や車両の走行速度に応じて動的に与えるのが適当と考える。

情報生成端末は、情報生成直後に複製配布を行い（図 2：端末 A）、その後、最初に到達した交差点において一度複製配布を行う（図 3：4~5 行）。複製にはその情報の有効期限が付加されている。

有効期限内の複製を新たに受信した端末は、その後の移動方向（情報発生源から離れる/近づく）に応じて、複製配布処理を行う。複製受信端末が情報発生源から離れる場合には、時間が経てば交差点に到達するため、複製受信後直ちに複製を配布するのではなく、最初に到達した交差点において複製を配布すればよいと考えられる。そのため、全ての複製受信端末が交差点に到達するまで複製の配布延期を行い（図 2：端末 B、B'（B の移動後の状態））、複製配布範囲内の最初に到達した交差点において、1 ホップのブロードキャストを 1 回行うことにより複製の配布を行う。

一方、情報発生源に近づく場合には、複製の配布延期を行うと、端末の進行方向とは逆の方向へ複製を配布することができなくなってしまう。そのため、全ての複製受信端末が複製受信後直ちにブロードキャストにより複製配布を行う（図 2：端末 C）。このとき、全ての複製受信端末が、複製受信直後に複製配布を行うため、複製配布が繰り返されていくことになり、多くの端末が複製を受信することになる（図 2：端末 C~F）。その後、これらの全ての端末が配布延期を行い、最初に到達した交差点において再び複製の配布を行うと、複製配布時に膨大なトラフィックを生じてしまう。これを防ぐために、複製受信端末の

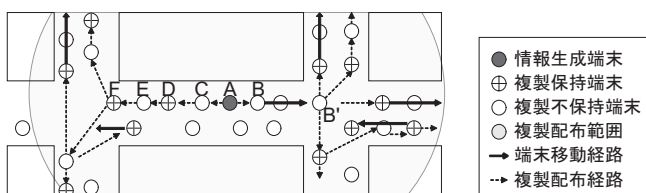


図 2: RSC 方式における複製配布 ($s=2$)

```

1: // Replica distribution after data generation
2: distAfterGeneration(data) {
3:   data.hop = 0;
4:   broadcast(data);
5:   delayedDist(data);
6: }
7:
8: // Distribution of Received Replica
9: distAfterReceived(data) {
10:  data.hop++;
11:  if (now() < data.expire
12:    && notReceivedYet(data)
13:    && isThisNodeInsideDistRegionOf(data)) {
14:    if (isLeaving(data.originalLocation)) {
15:      delayedDist(data);
16:    } else {
17:      broadcast(data);
18:      if (data.hop mod S == 0) {
19:        delayedDist(data);
20:      }
21:    }
22:    if (data.hop mod S == 0) {
23:      copyToLocal(data);
24:    } else {
25:      discard(data);
26:    }
27:  }
28: }
29:
30: // Postpone Replica Distribution
31: delayedDist(data) {
32:   if (isThisNodeNearNextCrossing()) {
33:     broadcast(data);
34:   } else {
35:     waitList.add(data);
36:     sleep(Tmax);
37:     distAfterDelay(data);
38:   }
39: }
40:
41: // Update Location of a node
42: updateLocation() {
43:   if (isThisNodeNearNextCrossing()) {
44:     distAfterDelay(data);
45:   }
46:   sleep(1);
47:   update();
48: }
49:
50: // Distribution of delayed Replica
51: distAfterDelay(data) {
52:   if (waitList.get(data) != null
53:     && isThisNodeInsideRegionOf(data)
54:     && now() < data.expire) {
55:     broadcast(data);
56:     waitList.remove(data);
57:   }
58: }

```

図 3: RSC 方式の擬似コード

うち、複製保持端末（後述）のみが、自身が交差点に到達するまで複製の配布延期を行った後、最初に到達した交差点において、再び複製の配布を行う（図 3：14~22 行）。

2.3.2 複製保持端末の決定

RSC 方式では、複製を受信したすべての端末が複製を保持した場合、既に述べた複製配布時のトラフィックに加え、要求に対する応答返信時のトラフィックも増大してしまう。そこで、RSC 方式でも SC 方式と同様、正の整数である複製保持密度決定パラメータ s に従い、情報生成端末から s ホップごとの端末が複製を保持する（複製保持端末）（図 3：10~12 行）。こうすることで、無駄なトラフィックが削減され、かつ記憶容量の利用効率が向上すると考えられる。

3 シミュレーションモデル

提案した RSC 方式の性能について、実際の地図データを用いたシミュレーションにより評価を行った。シミュレータは JiST/SWANS[3] を使い、STRAW (STreet RANdom Waypoint)[4] を導入することにより、より現実に近い端末の移動を実現している。

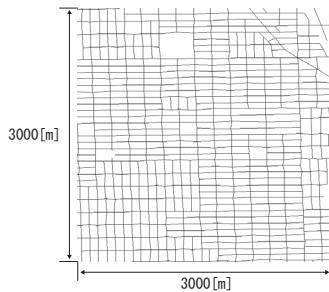


図 4: シミュレーション領域の地図

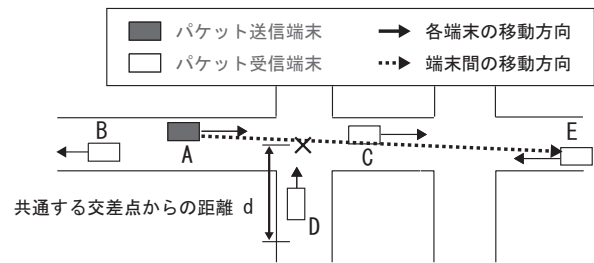


図 5: 障害物による影響のモデル

3.1 モデルの概要

シミュレーションエリアとして米国シカゴの 3000[m] 四方の領域 (図 4) を用い、その道路上に 3000 台の移動端末をランダムに配置した。そのうちの半数は、後述するデータ生成・要求モデルに従って動作し、残りの半数は、データの中継および複製配布方式のルールに基づきデータの複製の保持のみを行う。

各端末は、無線 LAN IEEE802.11b によって通信を行う。通信帯域幅を 11[Mbps] に固定し、通信可能半径は 100[m] とした。要求と複製の配布は UDP ブロードキャストで行い、応答はユニ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断を行うためである。

3.1.1 移動モデル

STRAW には、simple STRAW と STRAW OD の 2 つの移動モデルが用意されているが、今回のシミュレーションでは各端末は、移動領域内の道路上を、simple STRAW で移動するものとした。simple STRAW とは、次に進む方向を交差点ごとに確率的に決定し、次の交差点まで道路上をランダムな速度で移動することを繰り返すものである。端末の最高移動速度は高速道路や地方道路のように道路の種類ごとに設定されており、端末の最高速度は約 11 ~ 35 (m/s) であり、端末は 0 ~ 35 (m/s) の速度で移動する。

3.1.2 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、シミュレーションエリアを正方形の領域に等間隔に分割し、端末は各領域の中心に関連付けられたデータを生成することとした。小領域のサイズは 300[m] × 300[m] とし、シミュレーション領域全体を 100 個に分割した。データ生成端末は、平均 60 秒のポアソンモデルに従い、その時に端末自身が存在する領域の中心に関連付けられたデータを生成する。生成されるデータは、端末の存在する領域の中心位置と発生時刻を含み、UDP、IP ヘッダを含めて 1000bytes のパケットで配送されるものとする。

3.1.3 データ要求モデル

データの要求を行う端末は、平均 60 秒のポアソンモデルに従い要求メッセージを生成する。端末密度の高い領域ほどデータの要求が行われる頻度が高いと考えられるため、要求生成端末は、端末密度が高い領域ほど高い確率で要求を行うものとした。シミュレーションにおいては、あらかじめ移動シナリオに基づいてシナリオ全体における端末の平均密度を求め、このデータに従って要求確率を決定した。要求メッセージは目的領域の ID を持ち、パケットサイズは UDP、IP ヘッダを含めて 128bytes とした。

3.2 要求・応答の送信

要求メッセージの送信には LBM (Location Based Multicast) [5] を用いた。この方式では、要求メッセージを送信・中継する端末は、宛先の小領域の位置と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のうち、要求メッセージを作成した端末と宛先小領域の座標から決定される static forwarding Zone 内にある端末のみが、受信した要求を再度ブロードキャストする。また、要求に該当するデータを保持していた端末は、応答データを要求元へ送信する。応答データの送信は、要求メッセージが中継されてきた経路の逆経路を用いることとした。

3.3 障害物の考慮

シミュレーションでは、通信を行う端末の位置と端末の進行方向を基に通信可能かどうかの判断を行い、通信可能距離内の端末間の通信を制限した。端末間の通信が可能である条件は以下のように設定した。

- 通信を行う端末同士が同じセグメント (交差点間の区間) にいる場合 (図 5: 端末 A-B)
- 通信を行う端末同士が異なるセグメントにあり、共通する交差点を持つ場合
 1. 両端末の移動方向のなす角度が閾値 P_1 以下の場合 (図 5: 端末 A-C)
 2. 両端末の移動方向のなす角度が閾値 P_1 以上であるが、通信を行うどちらかの端末が共通する交差点からの距離が d 以下の場合 (図 5: 端末 A-D)
- 通信を行う端末同士が異なるセグメントにあり、共通する交差点を持たない場合

両端末の移動方向のなす角度が閾値 P_1 以下かつ、各端末の移動方向と両端末間の移動方向のなす角度がそれぞれ閾値 P_2 以下の場合 (図 5: 端末 A-E)

なお、シミュレーションでは、 $P_1 = \pi / 6$ 、 $P_2 = \pi / 36$ とした。

3.4 評価指標

RSC 方式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 (Access Success ratio)

$$A_s = \frac{A_c}{R_c} \quad (1)$$

R_c (Request Count) は、各端末が要求メッセージを送信した回数の総和であり、 A_c (Answer success Count) は、要求メッセージの送信元が、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。

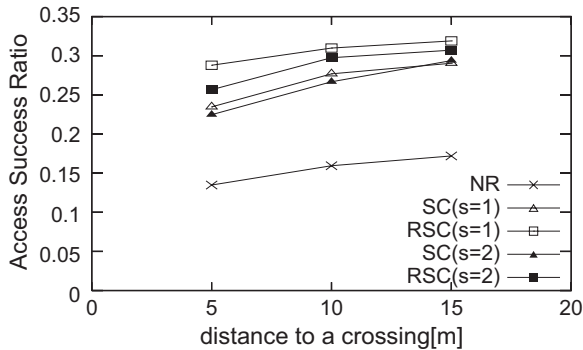


図 6: Access Success Ratio vs. d

- 複製配布時のトラフィック T_r
 T_r を複製配布時の転送トラフィックとし、各端末が複製を送信した回数の総和と定義する。
- データ取得遅延 T_D
 データ取得遅延とは、要求メッセージを発生した端末が、要求メッセージを送信してから応答データを受信するまでにかかった時間の長さである。

4 シミュレーション結果と検討

前章のモデルに基づき、以下に示す 3 つの複製配布方式に対してシミュレーションを行った。

- NR (No Replica) : 複製を保持しない
- SC 方式
- RSC 方式

シミュレーションはシミュレーション上の時間で 10000 秒行った。最初の 1000 秒は定常状態になるまでの猶予期間とし、データの計測は行っていない。シミュレーションでは、障害物による影響を調べるため、通信可能と判断する交差点からの距離 d を 5, 10, 15[m] と変化させた。 d が小さいほど障害物により通信が遮断されやすくなる。なお、以降に示すシミュレーション結果では、データ生成後の有効期間を 600[s]、複製配布半径を 500[m] とした。

4.1 アクセス成功率

図 6 はアクセス成功率と d との関係を示している。複製を全く配布しない NR に比べ、SC, RSC 方式は高いアクセス成功率を達成しており、複製配布の効果が現れていることがわかる。SC, RSC 方式ともに、 $s=1$ のときには、全ての端末が受信した複製を保持するため、 $s=2$ に比べ、高いアクセス成功率を達成している。また、RSC 方式では SC 方式よりも高いアクセス成功率が得られている。さらに、通信可能と判断する交差点までの距離が長い場合 ($d=15$ [m]) に比べ、この距離が短い場合 ($d=5$ [m])、RSC 方式と SC 方式のアクセス成功率の差が大きくなっている。この結果より、交差点において複製を配布するという RSC 方式の効果が表れているといえる。

4.2 トラフィック T_r

図 7 は複製配布時のトラフィックと d との関係を示しており、RSC 方式は他の手法に比べ、複製配布時のトラフィックが大きくなっている。トラフィックが大きいうことは、各端末により多くの複製配送機会を与えていることを意味し、その結果、アクセス成功率の向上につながっていると考えられる。しかし、RSC 方式の $s=1$ では、全ての複製受信端末が複製保持端末となり、最初の交差点において複製配布を行うため、トラフィックの増大が顕著に表れている。 $s=2$ の場合と比較すると、スキップパラメータ s によって複製配布を行う端末を制限する効果が表れていることがわかる。

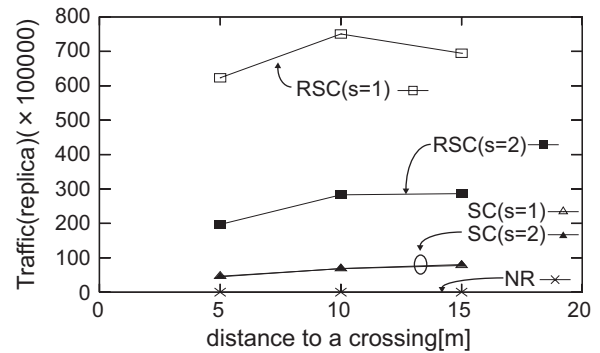


図 7: Traffic of distribution of replica vs. d

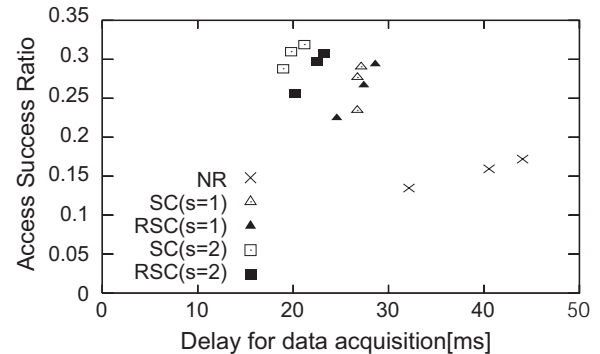


図 8: Delay for data acquisition vs. Access success Ratio

4.3 データ取得遅延

図 8 にアクセス成功率とデータ取得遅延との関係を示す。図 8 を見ると、RSC 方式では、その他の方式に比べ、データを取得するまでにかかる時間が小さく、かつ高いアクセス成功率を達成していることがわかる。また、 d が大きくなるにつれてデータ取得遅延が大きくなるのは、障害物の影響を受けにくくなることで遠くまで要求を送信することが可能となるためであると考えられる。

5 まとめ

本稿では、車々間通信を想定した位置依存情報複製配布方式である RSC 方式を提案した。この方式は、道路構造による車両の移動特性の違いに注目し、より広範囲に複製を配布するために交差点において複製配布を行う。シミュレーションの結果、障害物の影響を受けやすいような環境下において、RSC 方式は SC 方式と比較して小さいデータ取得遅延で高いアクセス成功率を達成しており、RSC 方式の有効性を示すことができた。今後の課題としては、アクセス成功率を保ちながらも複製配布時のトラフィックを削減する手法の検討や要求メッセージの送信方法の検討などが挙げられる。

参考文献

- 原隆浩: “アドホックネットワークにおけるデータ利用性向上のための複製配置”, 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol. J84-B, No. 3, pp. 632–642 (2001).
- 土田他: “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手法”, 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol. J88-B, No.11, pp.2214–2227 (2005).
- JiST – Java in Simulation Time / SWANS – Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator: <http://jist.ece.cornell.edu/index.html>
- David R. Choffnes and Fabian E. Bustamante: “An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks”, VANET’05, September 2, 2005, Cologne, Germany.
- 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).