

無線アドホックネットワークにおける端末の移動情報を考慮した位置依存情報複製配布方式

土田元[†] 石原進[‡]

[†] 静岡大学理工学研究科 [‡] 静岡大学工学部

A replica distribution method with consideration of the movement information of terminals in wireless ad-hoc networks

Gen Tsuchida[†] Susumu Ishihara[‡]

[†] Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

[‡] Faculty of Engineering, Shizuoka University

1 はじめに

近年、無線移動端末など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。この応用として筆者らは移動端末を用いてアドホックネットワークを構築し、詳細な地域情報を収集するシステムを検討している。このシステムの利用場面としては、通信インフラに依存しない車々間通信による道路交通情報や街角情報の流通等を想定している。本論文では、車々間通信を考慮した場合のアドホックネットワーク上における位置依存情報の収集、共有を効率的に行う手法について検討する。以降、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。

アドホックネットワークの性質上、通信を行う端末同士が直接通信可能でない場合でも、他の端末を中継することで通信可能になるが、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は保障されないため、ネットワークの分断など、ネットワークトポロジの変化によってある端末がもつデータへのアクセスができなくなる可能性が生じる。そこで、ネットワーク上の各端末に複製データを持たせることでデータの可用性を高める複製配布方式が提案されている [1][2]。[1]では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ノードにネットワークトポロジとアクセス頻度に応じて定期的に複製を配置する手法を提案している。[2]ではグループ内で利用可能なデータの情報を定期的に広告することでデータの存在を明らかにし、ネットワークの分断を予測して複製を行うことでデータの可用性を向上する手法を提案している。

一方筆者らの研究グループは、データへのアクセス頻度が未知であり、位置依存データがアドホックネットワーク上で Geocast によって取得される環境において位置依存情報の複製を管理する手法として Skip Copy(SC)方式を提案している [3]。SC方式では、ネットワークの分断が起きることを想定して、データ取得時に投機的にデータの複製をデータ発生源の周辺にまばらに配付することで、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。車々間通信での応用を考えた場合、カーナビを搭載した自動車容易に取得できる速度や移動先の情報、容易に測れる周辺の端末密度などを複製の配置先の決定に利用できる。しかしながら、これまでの SC方式の研究においては、これらの応用に関して検討が行われていない。そこで、筆者らはそのような情報を利用した複製配布方式 3D方式 (Distance, Density and Direction Method)を提案している [4]。本稿では、提案した 3D方式の有用性について、シミュレーションに基づいて評価する。

2 位置依存情報複製配布方式

2.1 想定環境

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、交換を行う状況を想定する。具体的なアプリケーション例としては、車々間通信による交通情報や画像の交換、街中の店でセールをやっている、この店のランチがおいしいといった地域情報、災害復旧や救助活動時の情報流通等がある。このような状況で扱われる情報に注目すると、発生した情報は特定の場所に関係しているものが多い。これらのように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。

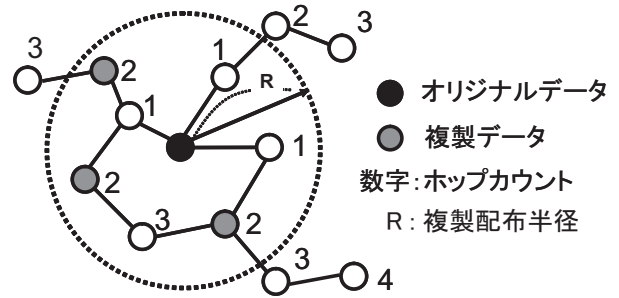


図 1: SC方式 (s=2) による複製配布

2.2 Skip Copy(SC)方式

筆者らの研究グループでは位置依存情報へ Geocast によってアクセスが行われることを前提に、移動端末の記憶容量や複製の利用効率を考慮した複製配布方式として SC(Skip Copy)方式を提案している。SC方式では移動端末が位置依存情報を取得後、直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ッディングによって配布する(図 1)。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。データ要求に応える際に、応答を転送する端末は応答元からのホップ数および端末と情報に関連した位置との距離に基づいて複製の再配置を行う。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。

2.3 3D方式

SC方式では、端末の地理的な密度が比較的小さい場合には効率的なデータ送信が可能である。しかし、端末が密集している場合は複製の配布先がホップ数のみで決まる関係上、複製が過度に多くの端末で保持される可能性があり、メモリ利用効率、トラフィックの観点から効率的な複製配置とならない恐れがある。また、SC方式では複製の配布先ノードの決定は複製配布元のノードからのホップ数と位置関係のみで行われ、カーナビ等から容易に取得可能な車の移動方向、速度は用いられていない。端末が利用するデータのアクセス頻度がこれら自動車の走行情報に依存して決定される場合、これらを利用して複製配布を行うことが有効と考えられる。そこで筆者らは、車両の走行情報を利用した複製配布手法 3D方式 (Distance, Density and Direction Method)を提案している。

3D方式では、複製データを受信した端末は以下のポリシーに従い、その複製に対する複製保持率 P_r を求め、複製を保持するかどうかを決定する。

1. 情報発生源からの距離:

情報発生源に近い端末ほど P_r を低くする。

情報源から近い端末は自分が積極的に複製を保持しなくても短いホップ数でその情報を取得することが容易であるため P_r が低くてもよい。

2. 移動方向:

情報発生源に近い端末ほど P_r を低くする。これは、情報源に近い端末は情報発生源で発生したデータに近い末

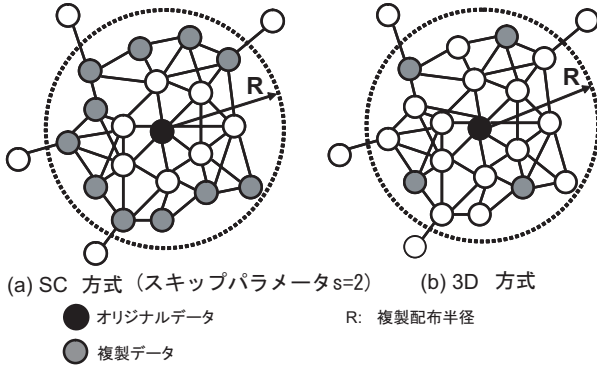


図 2: SC 方式と 3D 方式による複製配布

来に、比較的短いホップ数で容易に入手可能になる可能性が高いため。

3. 周辺の端末密度：

端末の地理的な密度が高いほど P_r を低くする。

端末の地理的な密度が高い場合は、周辺に存在する端末のうちいずれかが複製を保持すれば他の端末はそれにアクセスすることによりデータを入手出来るため。

上記のポリシーに従うことで、単位面積あたりの複製密度が一定になり、端末密度が高いときでも冗長な複製が配布されずにすむことになる(図 2)。

前述のポリシーに従った P_r の定式化を行う。複製を受信する端末の位置ベクトル、速度ベクトルをそれぞれ \vec{p} , \vec{v} 、その端末周辺の時刻 t における端末密度を $d(t)$ とする。 \vec{p} の原点は情報発生源とする。情報発生源、端末の位置は GPS 等で取得できるものとする。目的地の位置情報はカーナビ等で取得される。 $d(t)$ は $[t - \Delta t, t]$ 間に直接通信可能な端末から Hello パケットを受け取った端末数に等しいとする。なお、 Δt は Hello の通信間隔とする。

複製保持率の式を定義するにあたり、まず 3D 方式のそれぞれのポリシーによる複製保持率の式を定義する。それぞれのポリシーによる複製保持率の式は、以下ようになる。 k_p , k_v , k_d は調整用の係数である。

情報発生源からの距離

$$P_{r1} = k_p |\vec{p}| \quad (1)$$

移動方向

$$P_{r2} = k_v (\vec{p} \cdot \vec{v}) \quad (2)$$

周辺の端末密度

$$P_{r3}(t) = \frac{k_d}{d(t)} \quad (3)$$

式 (1), (2), (3) を元に、3 つのポリシーをまとめた複製保持率の式を以下に定義する。

$$P_r = \frac{k'_p |\vec{p}| + k'_v (\vec{p} \cdot \vec{v})}{d(t)} \quad (4)$$

3 性能評価モデル

提案した位置依存情報の複製配布について、シミュレーションによる評価を行った。本章ではそのためのモデルについて説明する。シミュレータとして GloMoSim [5] を用い、提案方式に基づく位置依存情報複製配布機構をアプリケーションとして実装した。

3.1 モデルの概要

1000[m] × 1000[m] の 2 次元平面上に 100 台の移動端末が存在すると仮定する。100 台のうち 50 台は、以下で説明するデータ取得・アクセスモデルに従って動作させる。残りの 50 台はデータの中継と、複製配布方式のルールに基づく複製データの保持のみを行う。

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。IEEE802.11DCF における RTS/CTS は

使用していない。複製データ及び要求メッセージの送信には UDP ブロードキャストを用いることとした。メッセージの転送はアプリケーションレベルで行われる。また各端末はネットワークポロジ把握のために 100 秒間隔 (= Δt) で 64bytes の Hello パケットを送信するものとする。

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こととした。端末は以下に述べるデータ取得モデルに従って現在位置に関わるデータを取得し、必要に応じて他の領域に割り当てられたデータをアドホックネットワークを介して要求する。

3.1.1 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で移動するものとした。各端末は Pause time = 3.0[sec] の静止後、移動領域内でランダムに決定する目的地へ、[0[m/sec], 15[m/sec]] の範囲でランダムに決定した移動速度で移動する。その後は上記の手順を繰り返す。なお、端末の初期配置はランダムに決定した。

3.1.2 データ取得モデル

データ取得を行う 50 台の端末は、平均 60 秒のポアソン到着モデルに従い、その時端末自身が存在するセルに関するデータを取得する。取得するデータは端末の存在するセルの中心位置に関連付けられており、UDP、IP ヘッダを含めた 1500bytes のパケットで配送されるものとする。各端末はデータを取得した時点で複製の配布を開始する。

3.1.3 データ要求モデル

データ要求を行う 50 台の端末は、平均 60 秒のポアソン到着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、128bytes のヘッダを含んでいるとする。

データの発生モデルには以下に示す 2 つを用意した。

目的地優先モデル

要求を行う端末の目的地に近い領域に関する情報ほど高い確率で要求を発生する。データ要求を行う端末 m の移動先を P_m , P_m を含む領域の ID を C_m 、領域 i に対応するデータを d_i 、そのデータの位置を P_{d_i} とし、端末 m の移動先とデータ d_i の距離を $\overline{P_m P_{d_i}}$ とする。領域の個数を n 個とすると、データ d_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は確率 $(1/P_m P_{d_i}) / \sum_{i=1}^n (1/P_m P_{d_i}) (i \neq C_m)$ で選ばれる。端末の現在位置を含む領域に対応するデータは選定されない。

一様アクセスモデル

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。端末の現在位置を含む領域に対応するデータは選定されない。

3.2 要求・応答の送信

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にのみ受け取った要求を再度ブロードキャストする。また、応答データを持っていた場合は応答データを要求元へ送信する。

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辿る方法をとることとした。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。

3.3 評価指標

3D 方式の評価を行うために以下の評価指標を用意した。

アクセス成功率 A_S

$$A_S = \frac{A_C}{R_C} \quad (5)$$

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。 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る。 A_S の算出はシミュレーション時間全体での A_C , R_C を利用した。

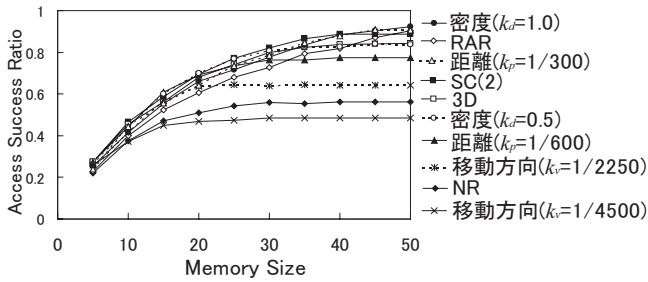


図 3: メモリサイズに対するアクセス成功率: (領域数=100, R=300[m], 目的地優先モデル)

通信トラフィック

データ要求, データ応答によるパケットの送信回数.

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 7 つの複製配布方式に対してシミュレーションを行った.

- (1) NR(No Replica): 複製を保持しない. ($s=\infty$)
- (2) RAR(Replica All in R): 複製配布範囲内の端末全てに複製. ($s=1$)
- (3) SC(2): SC 方式 ($s=2$).
- (4) 3D 方式: 3 つのポリシをまとめて評価 (式 4)
- (5) 距離方式 (式 1)
- (6) 移動方向方式 (式 2)
- (7) 密度方式 (式 3)

シミュレーションはシミュレーション上の時間で 5000 秒行った. このうち最初の 1000 秒間分は定常状態になるまでの猶予期間とし, データの計測を行っていない. 以降に示すシミュレーション結果の大半は, 各条件において, 各端末が保持できる最大のデータ数 N (複製オリジナルデータを区別しない, 以下メモリサイズ) を 5 から 50 まで 5 間隔で変化させて区別したものである. なお, 本来 SC 方式と 3D 方式では端末の移動に伴う複製配置の乱れを補正するために応答時に複製の再配置をするが今回のシミュレーションでは考慮していない.

4.1 アクセス成功率

図 3 に移動領域を 100[m] 四方に分割した場合, すなわち領域の分割数を 100 とし, 要求モデルに目的地優先モデルを用いた場合のそれぞれの手法におけるアクセス成功率とメモリサイズの関係を示す. なお, 式 (1), 式 (2), 式 (3) における k_p, k_v, k_d は図中にある数値を用い, 式 (4) における調整用の係数はそれぞれ $k_p = 1/300, k_v = 1/4500$ とした.

複製をまったく配布しない NR と比べて, 移動方向方式 ($k_v = 1/4500$) を除いた複製配布方式は A_S が増加している. メモリサイズが大きくなるにつれて, A_S の差はさらに大きくなる. 図 3 に示した結果より複製配布によってデータアクセスの信頼性を高めることができるといえる. 各複製配布方式の A_S に対する特性については, 以下のように分類できる.

1. メモリサイズの大小によらず, A_S が比較的大きい方式 (理想的): SC 方式, 3D 方式
2. メモリサイズが小さいときに A_S が大きい方式: 密度方式 ($k_d = 0.5$), 距離方式 ($k_p = 1/600$),
3. メモリサイズが大きいために A_S が大きい方式: 密度方式 ($k_d = 1.0$), 距離方式 ($k_p = 1/300$), RAR
4. メモリサイズによらず A_S が小さい方式: 移動方向方式 ($k_v = 1/2250$), NR, 移動方向方式 ($k_v = 1/4500$)

図 4 に要求モデルを一樣アクセスモデルとした場合のアクセス成功率とメモリサイズの関係を示す. 要求モデル以外の条件は図 3 と同じである. この要求モデルでは, 各端末は目的地優先モデルに比べてより遠い場所に対して要求を発生させる確率が高い. このため, 複製を保持している端末との距離が総じて長くなるため, ネットワークの分断やパケッ

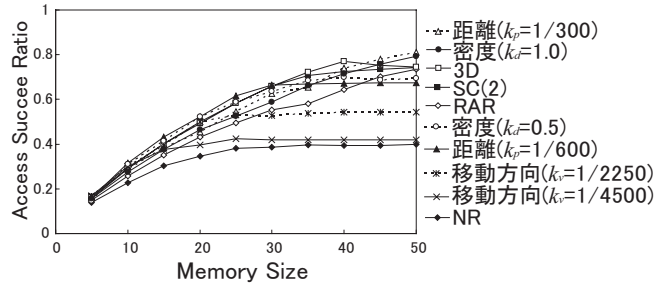


図 4: メモリサイズに対するアクセス成功率: (領域数=100, R=300[m], 一樣アクセスモデル)

トロスの影響が大きくなる. この結果アクセス成功率は目的地優先モデルに比べて小さくなっている.

一樣アクセスモデルにおいても, 各複製配布方式の A_S に対する特性は目的地優先モデルとほぼ同じであったが, 以下のような目的地優先モデルとの違いが観測された

- 3D 方式
SC 方式と比較して, 目的地優先モデルでは SC 方式の方がおおむね A_S が大きかったが一樣アクセスモデルでは 3D 方式の方が若干 A_S が大きい.
- 距離方式
他の方式と比較して, 一樣アクセスモデルにしたとき A_S の減少が少なく, 比較的高い A_S を示している.
- RAR
目的地優先モデルにおいてはメモリサイズが大きい場合に比較的高い A_S を示す. 具体的にはメモリサイズ 45 で 3D 方式よりも A_S が高い. 一方, 一樣アクセスモデルの場合は, メモリサイズ 45 のときは 3D 方式よりも A_S が低く, 密度方式 $k_d = 1.0$ や $k_p = 1/300$ の距離方式を大きく下回っている.

4.2 トラフィック

図 5, 図 6 にそれぞれ図 3, 図 4 と同条件のときの通信トラフィックを示す. ただし, 複製配布のトラフィックは, 複製配布方式の違いによらずほぼ同じ値になるので除外した.

要求時のトラフィックについては, 図 5, 図 6 の (a) より, 要求モデルの違いによらず, 4.1 で述べた分類における (3) メモリサイズが大きいためにアクセス成功率が高くなる複製配布方式ほど, メモリサイズの増加とともに, 要求時のトラフィックが減少している. 3D 方式と SC 方式を比較した場合, 目的地優先モデルではほぼ同じトラフィック量であるが, 一樣アクセスモデルにおいては, 若干 SC 方式の方が少ない. 距離方式と密度方式を比較した場合, 目的地優先モデルではほぼ同量のトラフィックであるが, 一樣アクセスモデルの場合は明らかに密度方式の方が少ない. ただし, メモリサイズが小さい場合は, 方式間のトラフィック量の差は小さい.

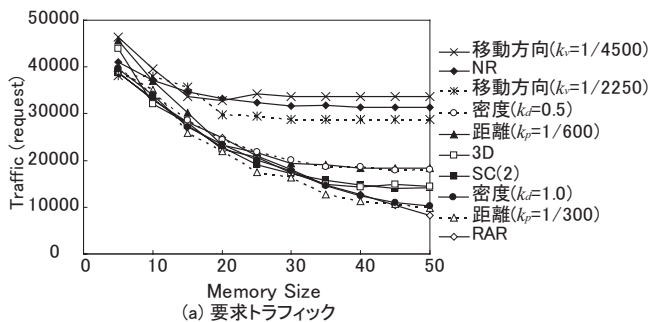
応答時のトラフィックについては, 図 5, 図 6 の (b) より RAR 以外の方式は, 方式間での差はあるが, メモリサイズの増加と共に応答トラフィックが少しずつ増加し, ある程度メモリサイズが大きくなると応答トラフィックの増加が頭打ちになるという傾向がある. 一方, RAR はメモリサイズの増加とともにトラフィックが減少していく. 3D 方式と SC 方式の応答トラフィックの量はほぼ同等である. 一方, 距離方式は, 目的地優先モデルに比べて一樣アクセスモデルのときの応答トラフィックが他の方式に比べて若干増加している. なお, メモリサイズが小さい場合は, 方式間のトラフィック量の差は小さい.

4.3 複製配布方式の比較

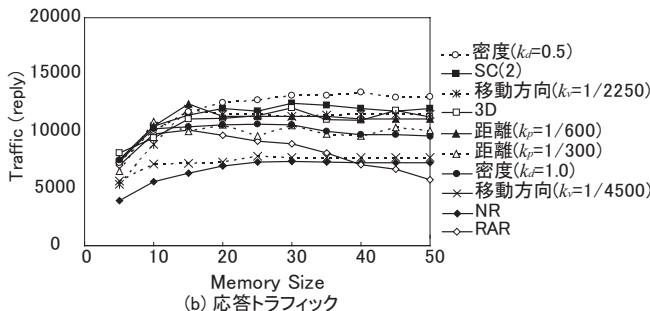
4.1, 4.2 に示した結果から提案した複製配布方式の性質は今回の条件下では以下のようにまとめることができる.

3D 方式は一樣アクセスモデルのような, 要求元がより遠くの位置に関連する情報を要求する場合には有効である.

3D 方式では距離方式の影響を受けて, 情報発生源から遠くにある端末へ多く複製が配布される. すなわち, 各端末は自身の現在位



(a) 要求トラフィック



(b) 応答トラフィック

図 5: メモリサイズに対するトラフィック: (領域数=100, R=300[m], 目的地優先モデル)

置からある程度離れた位置を発生源とする情報の複製をもつことになる。一方、SC方式やRARでは、新たな複製に受信によって複製のページを行っていくと、各端末のもつ複製は比較的その端末の現在位置に近い情報に偏ることになる。このため、3D方式ではSC方式やRARに比べて一様アクセスモデルにおいて要求端末に近い端末が複製をもつ可能性が高くなるので、 A_S が若干高くなる。

距離方式はより遠くの位置に関する要求を発生させる場合に、 A_S が大きくなるが応答トラフィックも大きくなる。

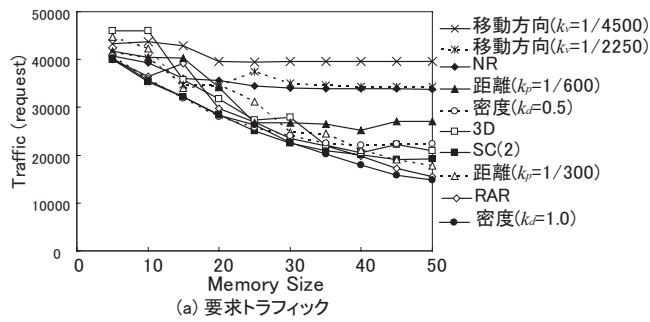
A_S に関する特性とそれを示す理由は前述の3D方式に関する場合と同じである。応答トラフィックが大きくなるのは、この方式が情報発生源から遠い端末を複製配布先とするため、結果として多数の端末が複製を持ち、かつこれらが別々の経路で要求元からの要求を受け取って応答を返すためである。

移動方向方式は、複製保持率が十分大きくない限り複製配布の効果が少ない。

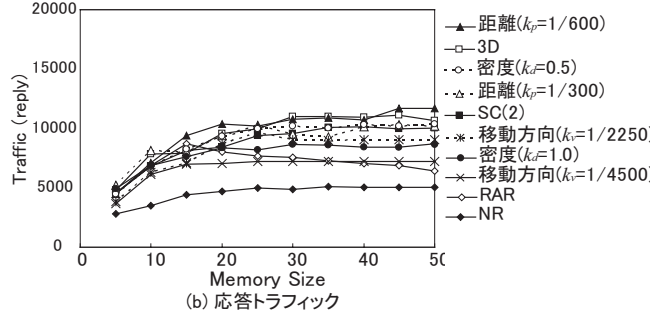
式(2)より、情報発生源に近づく端末は無条件で複製を保持しないため、確率的に複製を受信した端末の半数は無条件で複製を保持しないことになる。さらに、情報発生源からの距離と移動速度で複製保持端末を抑制しているため、移動速度が遅い、もしくは情報発生源に近い端末は複製を保持しにくくなり、同一の情報に関する複製をもつ端末が少なくなってしまう。例えば、自分が遠ざかっていく情報発生源Aからのデータの複製を受け取った端末は、自分の近くになる情報発生源Bからのデータの複製を破棄することになる。情報発生源Bのデータが欲しい端末はBの周辺に要求を送るが、B周辺の端末はデータの複製をもっていない確率が高く、要求に応えることができない可能性が高い。従って、情報発生源近くの要求元からのGeocastによる要求に対してはかえって不利になる可能性が高い。その結果 A_S は小さくなる。特に目的地優先モデルでは、要求元は自分の位置から遠い場所だけでなく近い場所に対しても要求を送るため、複製を全くしないNRよりも性能が悪くなる。複製配布の効果を上げるには、前述のように調整係数を大きくして複製保持率を大きくする、近づいてきてもすぐに遠ざかることがわかっている端末には複製保持率を高くする等の方法が考えられる。

密度方式は、要求モデルを問わず高い A_S を実現できる。

密度方式では、周辺にいる直接通信可能な端末数から複製保持可否かを決定する。つまり、周辺の端末が多いときには複製を積極



(a) 要求トラフィック



(b) 応答トラフィック

図 6: メモリサイズに対するトラフィック: (領域数=100, R=300[m], 一様アクセスモデル)

的にはもたず、少ないときは積極的にもつため、複製配布範囲内の複製密度が均一になるので、要求モデルの違いによらず少ないトラフィックで比較的高い A_S を実現できる。

5 まとめ

本稿では、車々間通信を指向した位置依存情報複製配布方式である3D方式について、その有効性についてシミュレーションによる評価を行ったこの結果、今回の条件下においては、3D方式の各特性を利用することでSC方式と同等の性能を得ることができた。しかしながら、これは単純な処理で高い性能(省メモリ, 高 A_S , トラフィック)の得ることのできるSC方式の有効性を際立たせることとなった。

ただし、今回のシミュレーションでは扱うデータオブジェクトはすべてIP層におけるフラグメントが起こらないサイズとし、要求モデル以外の条件、例えば通信範囲や移動端末数といったパラメータは固定していた、また、SC方式や3D方式におけるデータ送信時の複製の再配置、移動モデル、データのバージョンについては考慮されていない。今後は、

- 大きなサイズのデータ配送
- SC方式, 3D方式における複製の再配置
- より車両の移動に即した移動モデルへの変更
- データの更新に関する処理

以上の事項を考慮した評価が必要である。

参考文献

- [1] T. Hara: "Effective Replica Allocation in Ad Hoc Networks for Improving Data Accessibility," Proceedings of IEEE Infocom 2001, pp.1568-1576 (2001).
- [2] K. Chen, and K. Nahrstedt: "An integrated data looked up and replication scheme in mobile ad hoc networks," Proc. of SPEIE International Symposium on the Convergence of Information Technologies and Communications (2001).
- [3] M. Tamori, S. Ishihara, T. Watanabe and T. Mizuno: "A replica distribution method with consideration of the positions of mobile hosts on wireless ad-hoc networks," in proc. of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, MNSA2002, pp.331-335 (2002-7, Vienna/Austria)
- [4] 土田元, 鬼頭政貴, 石原進, 峰野博史: "端末の移動予測を用いたアドホックネットワーク上の位置依存情報の複製に関する検討," 情報処理学会研究報告, 2003-MBL-27, Vol.2003, No.114, pp.1-8 (2003).
- [5] GloMoSim: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.