

アドホックネットワークにおける移動特性とアクセス特性を考慮した複製配置方式の性能評価

林 秀樹 原 隆浩 西尾 章治郎

大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: {hideki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

アドホックネットワークでは移動体の移動に伴い、頻繁にネットワークが分断されるため、従来の固定ネットワークと比較してデータの利用率が低下してしまう。この問題を解決するため、これまでに筆者らは、データの利用率を向上させる複製配置方式を提案した。本稿では、実環境でのアドホックネットワークの利用を想定して、移動体の移動特性とアクセス特性を検討する。さらに、これらの特性を考慮して、筆者らがこれまでに提案した複製配置方式を評価し、各方式の特徴について議論する。

Performance Evaluation of Replica Allocation Methods Considering Mobility and Access Characteristics in Ad Hoc Networks

Hideki HAYASHI Takahiro HARA Shojiro NISHIO

Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: {hideki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

In ad hoc networks, network division frequently occurs due to the movement of mobile hosts. Thus, the data accessibility is lower than that in conventional fixed networks. To solve this problem, we have proposed replica allocation methods for improving data accessibility. In this paper, we assume ad hoc networks in a real environment and examine mobility and data access characteristics of mobile hosts. Moreover, considering these characteristics, we evaluate our replica allocation methods and discuss their features.

1 はじめに

近年、ルータ機能をもつ移動体のみで一時的なネットワークを形成するアドホックネットワークに関する研究への関心が高まっている。アドホックネットワークでは、移動体の移動によりネットワークが分断された場合に、分断された部分ネットワーク内のデータに対してアクセスできないため、データの利用率が低下してしまう。例えば、図1のアドホックネットワークにおいて、中央の2台の移動体間の無線リンクが切断された場合、左側の3台の移動体はデータ D_2 に、右側の3台の移動体はデータ D_1 にアクセスできなくなる。この問題を解決するために、移動体に他の移動体のもつオリジナルデータの複製を配置することが有効である [3, 4, 5, 6]。アドホックネットワークにおけるアプリケーションには、災害時の救助活動やセンサネットワーク等のデータ共有があり、移動体が他の移動体のもつデータにアクセスするものも多い。したがって、アド

ホックネットワークにおいて、データの利用率を向上させるための効果的な複製配置は重要である。

これまでに、筆者らは、文献 [1, 2] において、データの利用率を向上させるために、アドホックネットワークにおける複製配置方式を提案した。さらに、提案方式の性能をシミュレーション実験により評価した。これらの実験では、移動体は、シミュレーション領域の中からランダムに目的地を選択するものとした。また、移動体が、データにアクセスする場合、自身の現在位置とは無関係に、あらかじめ設定したアクセス頻度に基づいて、アクセス要求を発行するものとした。しかし、実環境では、移動体が、自身の現在位置に応じて、移動やデータアクセスの動作を決定することが一般的と考えられる。そこで本稿では、実環境でのアドホックネットワークの利用を想定して、移動体の移動特性とデータアクセス特性を検討する。さらに、これらの特性を考慮して、筆者らが文献 [1, 2] で提案した複製配置方式を評価し、各方式の特徴について議論する。



図 1: ネットワークの分断

以下では、2章で想定環境について述べ、3章で文献 [1, 2] での複製配置方式を説明する。4章で移動体の移動特性とアクセス特性を検討し、5章でこれらの特性を考慮した複製配置方式の評価結果を示す。最後に6章で本稿のまとめを述べる。

2 想定環境

本稿では、移動体は、自身のデータ領域に、他の移動体のもつオリジナルデータの複製を作成する。移動体がデータにアクセスする場合、アクセス対象のデータを自身のデータ領域にもつならば、即座に成功とみなす。そうでないならば、相互接続している移動体に問合せ、いずれかがオリジナルや複製をもつ場合、成功とみなす。なお、相互接続している移動体とは、1ホップ以上の無線リンクで相互に通信可能な移動体の集合を指す。一方、自身、または相互接続している移動体がアクセス対象のデータをもたない場合、アクセスは失敗とみなす。

想定環境のその他の詳細を以下に示す。

- 各移動体は、限られた平面内を自由に移動する。
- 各データは、サイズが等しく、特定の移動体にオリジナルデータとして保持される。また、簡単化のため、データの更新は、発生しないものとする。
- 各移動体は、自身のもつオリジナルデータ以外に、データ C 個分のデータ領域をもち、複製を作成する。

3 複製配置方式

本章では、筆者ら提案した複製配置方式について説明する。

まず、文献 [1] では、データへのアクセス頻度とネットワークトポロジを考慮して、周期的（再配置周期毎）に複製を配置する三つの方式を提案した。以下に、これらの方式の概要を示す。

SAF 方式：各移動体が、自身のデータ領域の許す限り、アクセス頻度の高いデータから順に複製を配置する。この方式では、同じアクセス特性をもつ移動体が、同じ種類のデータの複製を配置し、複製の重複が多くなるため、アクセス成功率が低い。

DAFN 方式：各移動体が SAF 方式で複製を暫定的に配置した後、隣接移動体間で複製の重複を解消する。しかし、2ホップ以上先の移動体同士のもつ複製の重複は解消できない。

DCG 方式：DAFN 方式よりも、広い範囲で複製の重複を解消するため、再配置周期毎に安定度の高い移動体のグループを作成し、グループ内で重複しないように複製を配置する。具体的には、ネットワークの2連結成分を一つのグループとして、グループ内の移動体のアクセス頻度が高いデータの複製を配置する。2連結成分をグループとするため、任意の一つの移動体がネットワークから離脱してもグループは分断されない。

文献 [1] の方式（特に DCG 方式）では、再配置周期毎に、ネットワーク内の全ての移動体の複製を再配置するため、データ転送によるトラヒックが大きくなる。そこで、文献 [2] では、トポロジ変化に応じて、局所的に複製を再配置する TC (Topology Changing) 方式を提案した。以下に、この方式の概要を示す。

TC 方式：各移動体は、自身から $N(\geq 1)$ ホップ内の移動体に関するトポロジ情報と保持データ情報を管理し、ネットワークが分断される直前の状況を検出すると、局所的に複製を再配置する。ここで、ネットワークが分断される直前とは、自身と隣接移動体との経路が一つしかなく、これらを接続する無線リンクが切断すると、ネットワークが分断される状況を示す。

4 移動特性とアクセス特性

文献 [1, 2] の性能評価では、移動体は、シミュレーション領域の中からランダムに目的地を選択し、移動するものとした。また、移動体がデータにアクセスする場合、自身の現在位置とは無関係に、あらかじめ設定したアクセス頻度に基づいて、アクセス要求を発行するものとした。しかし、アドホックネットワークを構築して、災害時の救助活動や遺跡発掘

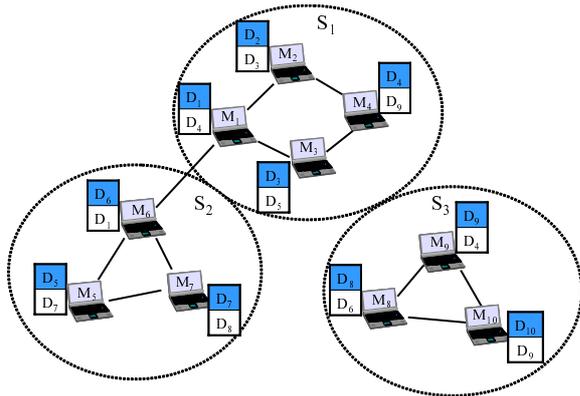


図 2: 移動特性とアクセス特性

調査等の協調作業を行う場合、作業領域をいくつか分割して、各移動体に各分割領域を担当させることで、作業の効率化を図るものと考えられる。このように、実環境では、移動特性やアクセス特性が位置に依存することが一般的である。以下では、このような場合の移動体の移動特性とアクセス特性について検討する。

- 移動特性

各移動体は、分割領域の一つを自身の担当領域とする。移動体が移動する際に目的地を選択する場合、担当領域内の点を高確率に、担当領域外の点を低確率に選択するものとする。後者の場合、移動体が自身の担当領域と異なる領域に入ると、その領域を自身の担当領域とする。したがって、移動体は、自身の担当領域が一度決まると、そこに長時間滞在し作業を行う。

- アクセス特性

移動体は、自身の担当領域での作業の効率化を図るため、自身と同じ領域を担当する移動体のもつオリジナル(領域内データ)に頻繁にアクセスするものとする。なお、各移動体は、自身の作業状況や周辺情報を、オリジナルデータとして管理している。一方、自身と異なる領域を担当する移動体のもつオリジナル(領域外データ)には、領域内データに比べて、アクセス頻度が小さくなる。

図 2 では、点線が分割領域、移動体間の直線が無線リンク、灰色の四角がオリジナル、白色の四角が複製を表す。上記の特性では、領域 S_1 を担当する移動体 M_1, M_2, M_3 、および M_4 は、 S_1 内に頻繁に移動し、領域外データ (D_5 と D_9) に比べ、領域

内データ (D_1, D_2, D_3 、および D_4) に頻繁にアクセスする。

5 性能評価

本研究では、前章の移動特性とアクセス特性を考慮し、3章で説明した方式の性能を評価した。以下では、その結果を示す。

5.1 シミュレーション環境

600[m]×600[m] の 2次元平面内に、45 個の移動体 ($M = M_1, \dots, M_{45}$) が存在するものとした。2次元平面は、縦横にそれぞれ均等に 3 分割して、9 個の 200[m]×200[m] ($S = S_1, \dots, S_9$) の領域に分割した。初期状態では、領域 S_j に 5 つの移動体 ($M_{5(j-1)+1}, M_{5(j-1)+2}, M_{5(j-1)+3}, M_{5(j-1)+4}, M_{5j}$) を担当させ、各移動体を担当領域内にランダムに配置した。移動体が移動する場合、目的地を選択して、0 から v [m/秒] (最大移動速度) の範囲でランダムに決定した速度で移動するものとした。目的地を選択する際、 β (領域内移動確率) の確率で担当領域内の点、 $1 - \beta$ の確率で担当領域外の点を選択するものとした。移動体が自身の担当領域と異なる領域に移動すると、その領域を自身の担当領域に変更するものとした。移動体は目的地に到達すると、0 から 1000[秒] の範囲でランダムに決定した時間で一時停止するものとした。なお、各移動体の無線通信範囲は、半径 80[m] の円とした。

ネットワーク内には、45 種類の 1[メガバイト] のデータ ($D = D_1, \dots, D_{45}$) が存在し、 D_j は M_j ($j = 1, \dots, 45$) にオリジナルデータとして保持されるものとした。各移動体はデータ領域に最大 C 個までデータの複製を配置できるものとした。なお、複製配置方式には、再配置周期を T [秒] に設定した SAF 方式、DAFN 方式、DCG 方式、および $N = 1, 2$ に設定した TC 方式を用いた。また、各移動体は、単位時間 (10[秒]) 毎に、領域内データに平均 0.3、標準偏差 0.001、領域外データに平均 0.001、標準偏差 0.0001 の正規分布に基づく確率でアクセス要求を発行するものとした。

表 1 に、シミュレーション実験で用いたパラメータを示す。各パラメータは、基本的には定数値をとるが、いくつかのパラメータは、シミュレーション実験において表中の括弧内の範囲で変化させた。

以上のシミュレーション環境において、50,000 単位時間を経過させたときの下記の評価値について調べた。

表 1: パラメータ設定

パラメータ	値
T	50 (50~10000)
β	0.9 (0.1~1)
v	1 (0.1~3)
C	7 (1~44)

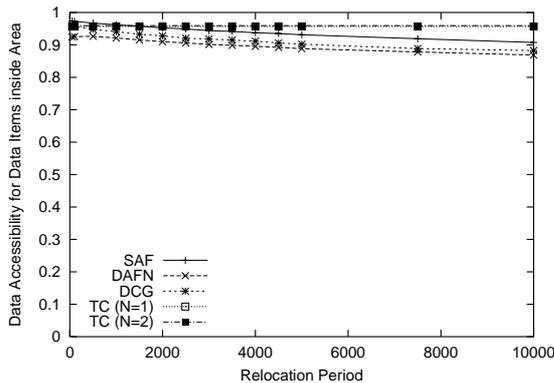


図 3: 再配置周期と領域内データへのアクセス成功率

- 領域内データへのアクセス成功率
領域内データへのアクセス要求の総数に対するアクセス成功回数の割合。
- 領域外データへのアクセス成功率
領域外データへのアクセス要求の総数に対するアクセス成功回数の割合。
- アクセス成功率
領域外データと領域内データへのアクセス要求の合計数に対するアクセス成功回数の割合。
- 複製の再配置によるトラヒック
複製を再配置する際に生じたデータ転送のホップ数に、そのサイズを掛けたものの総和。

5.2 再配置周期の影響

再配置周期 T を変化させたときの結果を、図 3、図 4、図 5、図 6 に示す。これらの横軸は再配置周期を示す。縦軸は、図 3 では領域内データへのアクセス成功率、図 4 では領域外データへのアクセス成功率、図 5 ではアクセス成功率、図 6 では複製の再配置によるトラヒックを示す。

図 3 の結果から、周期的な方式は、再配置周期が長くなると、領域内データへのアクセス成功率が低

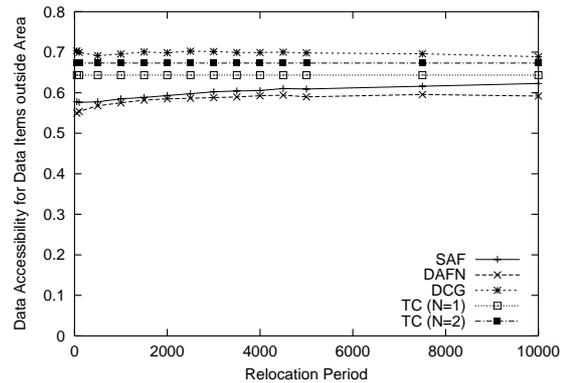


図 4: 再配置周期と領域外データへのアクセス成功率

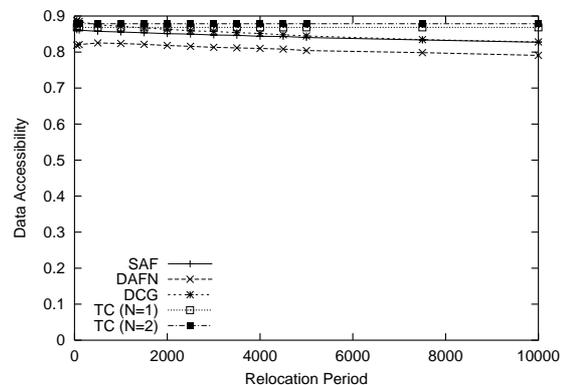


図 5: 再配置周期とアクセス成功率

くなることわかる。これは、移動体が別領域に移動しても、長い間複製が再配置されず、アクセス頻度の低い領域外データを保持し続けるからである。周期的な方式を比べると、SAF 方式の領域内データへのアクセス成功率が最も高いことがわかる。これは、SAF 方式では、各移動体が、他の移動体のもつデータを考慮せずに、アクセス頻度の高い領域内データを優先的に配置するからである。また、TC 方式は、再配置周期に関係なく、高いアクセス成功率を一定に保つことがわかる。

図 4 の結果から、SAF 方式と DAFN 方式は、再配置周期が長くなると、領域外データへのアクセス成功率が高くなることわかる。これは、別の領域から移動してきた移動体が、次の再配置周期まで、多くの領域外データを保持し続けるからである。一方、DCG 方式では、ほぼ一定の値になることがわかる。これは、DCG 方式では、相互接続している移動体が、領域外データも含めて、多種類のデータを保持するからである。

図 5 の結果は、図 3 と図 4 の結果から、領域内

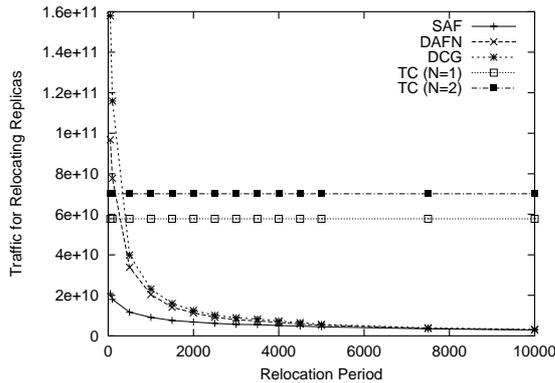


図 6: 再配置周期と複製の再配置によるトラヒック

データへのアクセス成功率に大きく影響を受け、再配置周期が長くなると、周期的な方式のアクセス成功率が低くなることを示す。これは、今回のシミュレーション環境では、各移動体が、領域外データよりも、領域内データに頻繁にアクセス要求を発行するからである。次節以降の実験では、周期的な方式のアクセス成功率が低下しないように、再配置周期を 50[秒] に設定する。

図 6 の結果から、周期的な方式は、再配置周期が短くなると、複製の再配置によるトラヒックが大きくなるのがわかる。これは、方式の性質上、自明の結果である。また、周期的な方式を比べると、DCG 方式のトラヒックが最も大きいことがわかる。これは、DCG 方式では、グループ内で複製が重複しないように多種類のデータを再配置するからである。

5.3 領域内移動確率の影響

領域内移動確率 β を変化させたときの結果を、図 7, 図 8, 図 9, 図 10 に示す。これらの横軸は領域内移動確率を示す。縦軸は、図 7 では領域内データへのアクセス成功率、図 8 では領域外データへのアクセス成功率、図 9 ではアクセス成功率、図 10 では複製の再配置によるトラヒックを示す。

図 7 の結果から、すべての方式は、領域内移動確率が大きくなると、領域内データへのアクセス成功率が高くなるのがわかる。これは、各移動体が頻繁に領域内を移動することで、領域内の移動体同士が切断されにくくなるからである。また、DAFN 方式は、他の方式と比べ、領域内データへのアクセス成功率が低いことがわかる。これは、DAFN 方式では、隣接移動体間で保持するオリジナルの重複を解消するため、切断した場合に領域内データにア

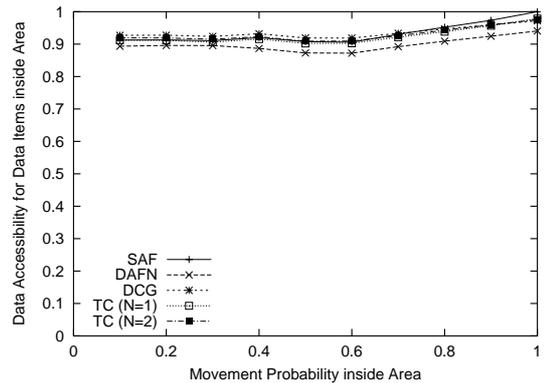


図 7: 領域内移動確率と領域内データへのアクセス成功率

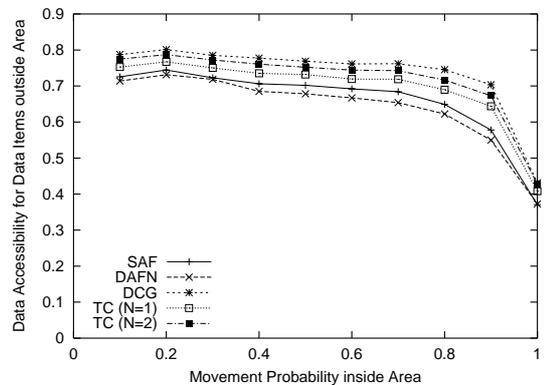


図 8: 領域内移動確率と領域外データへのアクセス成功率

クセスできない可能性があるからである。

図 8 の結果から、すべての方式は、領域内移動確率が大きくなると、領域外データへのアクセス成功率が低くなるのがわかる。これは、移動体が局所的に移動することで、異なる領域にいる移動体同士が接続しにくくなるからである。また、各方式の性能を比べると、DCG 方式の領域外データへのアクセス成功率が最も高いことがわかる。これは、DCG 方式では、相互接続している移動体間で、多種類のデータを共有するからである。一方、TC 方式は、 N の値が大きくなると、領域外データへのアクセス成功率が高くなるのがわかる。これは、広い範囲でネットワークが分断される直前の状況を検出し、移動体に領域外データをできるだけ多く配置するからである。

図 9 の結果は、図 7 と図 8 の結果から、領域内データへのアクセス成功率に大きく影響を受けていることがわかる。これは、図 5 の結果における考察と同様である。

図 10 の結果から、すべての方式は、領域内移動

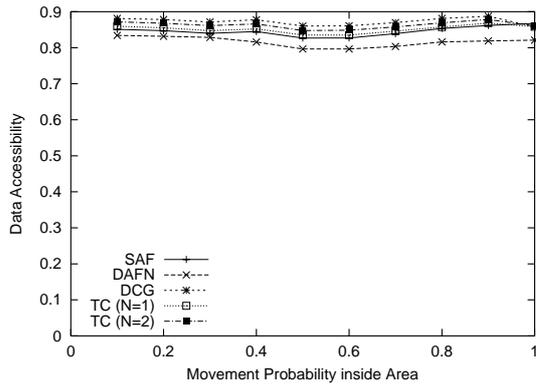


図 9: 領域内移動確率とアクセス成功率

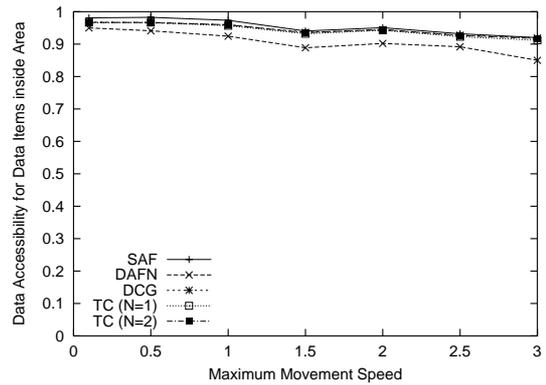


図 11: 最大移動速度と領域内データへのアクセス成功率

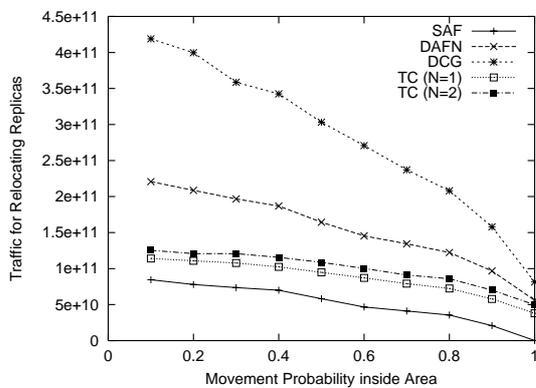


図 10: 領域内移動確率と複製の再配置によるトラフィック

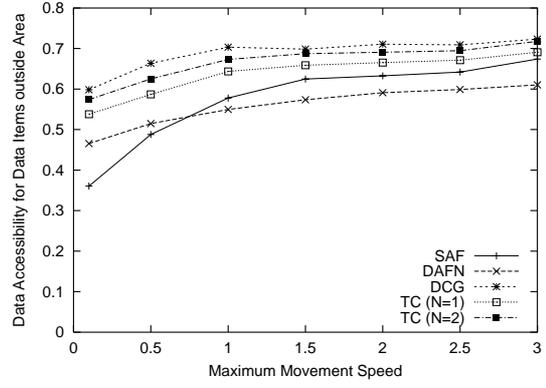


図 12: 最大移動速度と領域外データへのアクセス成功率

確率が大きくなると、複製の再配置によるトラフィックが小さくなることわかる。これは、異なる領域間で移動体が接続しにくくなり、多種類のデータが伝播しにくくなるからである。また、TC方式は、DCG方式とほぼ同じアクセス成功率で、複製の再配置によるトラフィックが小さいことわかる。これは、TC方式は、ネットワーク全体で複製を再配置することなく、トポロジ変化に応じて、局所的に複製を再配置するからである。

5.4 最大移動速度の影響

最大移動速度 v を変化させたときの結果を、図 11、図 12、図 13、図 14 に示す。これらの横軸は最大移動速度を示す。縦軸は、図 11 では領域内データへのアクセス成功率、図 12 では領域外データへのアクセス成功率、図 13 ではアクセス成功率、図 14 では複製の再配置によるトラフィックを示す。

図 11 の結果から、すべての方式は、最大移動速度が大きくなると、領域内データへのアクセス成功

率が低くなる傾向にある。これは、移動体が担当領域と異なる領域に早く移動するため、保持していたデータが、すぐに領域外のものになるからである。また、DAFN方式は、他の方式に比べ、領域内データへのアクセス成功率が低いことわかる。この理由は、図 7 の結果の考察と同様である。それ以外は、ほぼ同じ性能を示す。

図 12 の結果から、すべての方式は、最大移動速度が大きくなると、領域外データへのアクセス成功率が大きくなることわかる。この理由は、図 11 の結果における考察と同様である。また、最大移動速度が非常に小さい場合、SAF方式の領域外データへのアクセス成功率が非常に低いことわかる。これは、各移動体が同じ領域に留まる時間が長くなり、ネットワーク全体で多種類のデータが伝播しにくくなるからである。一方、TC方式は、 N の値が大きくなると、領域外データへのアクセス成功率が高くなる。この理由は、図 8 の結果の考察と同様である。

図 13 の結果は、図 11 と図 12 の結果から、領域

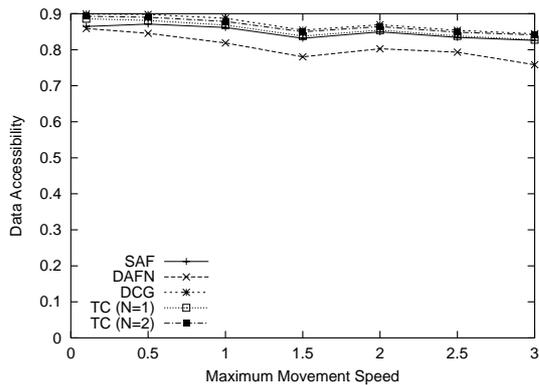


図 13: 最大移動速度とアクセス成功率

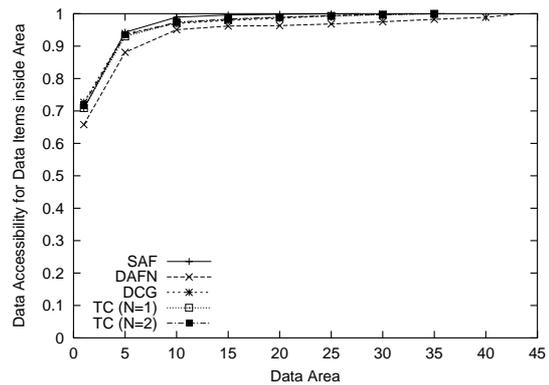


図 15: データ領域と領域内データへのアクセス成功率

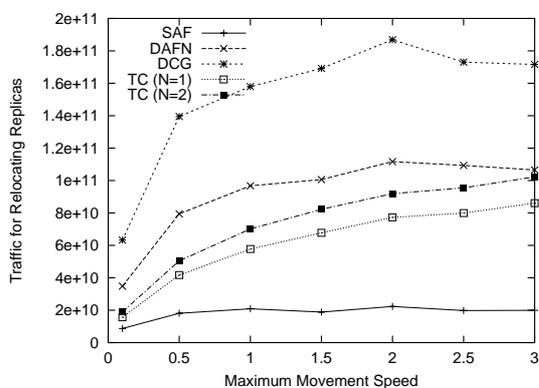


図 14: 最大移動速度と複製の再配置によるトラフィック

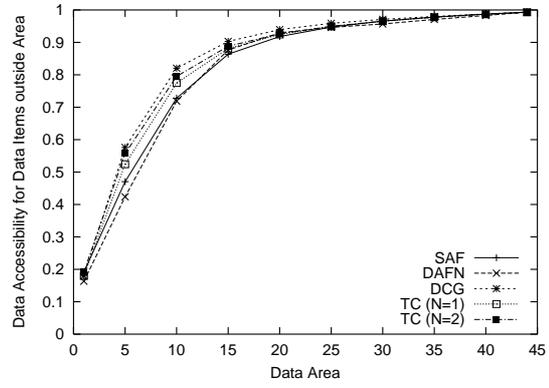


図 16: データ領域と領域外データへのアクセス成功率

内データへのアクセス成功率に大きく影響を受けていることがわかる。これは、図 13 の結果における考察と同様である。

図 14 の結果から、すべての方式は、最大移動速度が大きくなると、複製の再配置によるトラフィックが大きくなることがわかる。これは、次の再配置時まで大きくトポロジが変化しているため、周期的な方式では、移動体のもつ複製を多く変更するからである。一方、移動体同士の接続や切断の回数が増えるため、TC 方式では、複製を再配置する機会が多くなる。TC 方式は、DCG 方式とほぼ同じアクセス成功率を保ちながら、複製の再配置によるトラフィックが小さいことがわかる。

5.5 データ領域のサイズの影響

データ領域のサイズ C を変化させたときの結果を、図 15、図 16、図 17、図 18 に示す。これらの横軸はデータ領域のサイズを示す。縦軸は、図 15 では領域内データへのアクセス成功率、図 16 では領

域外データへのアクセス成功率、図 17 ではアクセス成功率、図 18 では複製の再配置によるトラフィックを示す。

図 15 の結果から、すべての方式は、データ領域が大きくなると、領域内データへのアクセス成功率が高くなることがわかる。これは、各移動体が、自身のデータ領域に領域内データを多く配置できるようになるからである。また、DAFN 方式以外の方式は、ほぼ同じ性能を示すことがわかる。

図 16 の結果から、すべての方式は、データ領域が大きくなると、領域外データへのアクセス成功率が高くなることがわかる。この理由は、図 16 の結果における考察に加え、領域外データも多く配置できるようになるからである。また、図 17 の結果と比べて、データ領域が大きくなると、すべての方式の成功率が緩やかに高くなる。これは、各方式が、アクセス頻度の高い領域内データを優先的に配置していることを示す。

図 17 の結果から、すべての方式は、データ領域が大きくなると、アクセス成功率が高くなることが

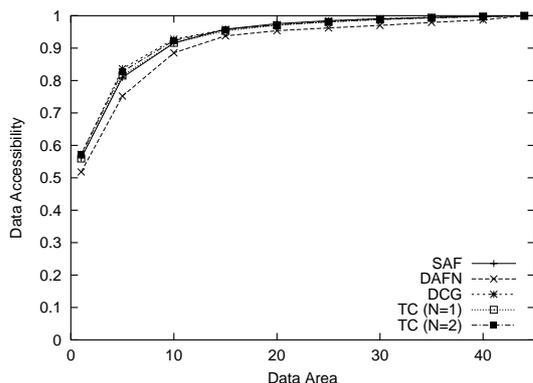


図 17: データ領域とアクセス成功率

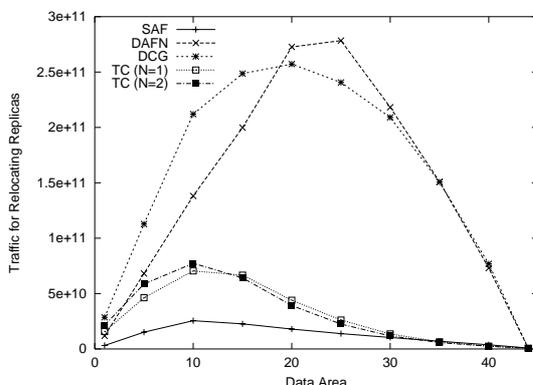


図 18: データ領域と複製の再配置によるトラヒック

わかる。これは、図 15 と図 16 の結果から明らかである。

図 18 の結果から、すべての方式は、データ領域が大きくなると、複製の再配置によるトラヒックが大きくなるが、ある値を超えると減少することがわかる。データ領域が小さい場合、各移動体が配置を変更する複製の数が少ないため、トラヒックがあまり生じない。一方、データ領域が大きい場合、各移動体がほぼ全種類のデータを保持するため、複製配置の変更自体があまり発生しなくなる。また、TC 方式は、複製配置の変更によるトラヒックが最大値となるデータ領域の値が、DAFN 方式や DCG 方式と比べて、小さくなることからわかる。これは、TC 方式が、データ領域がある程度大きくなると、分断される寸前のネットワーク間で前もってデータを保持することになり、無駄な複製の再配置が発生しないことを示す。

6 まとめ

本稿では、実環境でのアドホックネットワークの利用を想定し、移動体の移動特性とデータアクセス特性を検討した。さらに、これらの特性を考慮して、筆者らがこれまでに提案した複製配置方式を評価した。この結果から、移動体が自身の担当領域内のデータに頻繁にアクセスする環境では、周期的な方式は、再配置周期を短く設定しないとアクセス成功率が低くなることを確認した。また、TC 方式は、最もアクセス成功率を高める DCG 方式とほぼ同じ性能を保ちながら、複製の再配置によるトラヒックが小さいことを確認した。今後の課題は、本稿で述べた移動特性とデータアクセス特性を考慮して、さらに効果的な複製配置方式を検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」、文部科学省若手研究 (A)(16680005)、および (財) 立石科学技術振興財団の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 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,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J84-B, No. 3, pp. 632–642, 2001.
- [2] 林 秀樹, 原 隆浩, 西尾章治郎, “アドホックネットワークにおけるトポロジ変化に適応した複製の再配置について,” 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2004) 論文集, 2004.
- [3] G. Karumanchi, S. Muralidharan, and R. Prakash, “Information dissemination in partitionable mobile ad hoc networks,” Proc. Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS'99), pp. 4–13, 1999.
- [4] W.-C. Lee, G. Cao, and C.R. Das, “A novel caching scheme for internet based mobile ad hoc networks,” Proc. IEEE Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN'03), pp. 38–43, 2003.
- [5] J. Luo, J.P. Hubaux, and P. Eugster, “PAN: providing reliable storage in mobile ad hoc networks with probabilistic quorum systems,” Proc. ACM MobiHoc'03, pp. 1–12, 2003.
- [6] K. Wang, and B. Li, “Efficient and guaranteed service coverage in partitionable mobile ad hoc networks,” Proc. IEEE Infocom'02, Vol. 2, pp. 1089–1098, 2002.