

## アドホックネットワークにおけるデータ更新を考慮した 一貫性管理方式の性能評価

澤井 陽平 篠原 昌子 神崎 映光 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: {sawai.yohei, sinohara.masako, kanzaki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

アドホックネットワークでは、データの複製を作成することでデータの利用率が向上するが、データ更新の発生により、複製間の一貫性が損なわれる可能性がある。そのため、クォーラムシステムを用いた複製間の一貫性管理が有効となる。これまでに筆者らは、少数の移動体でクォーラムを構成し、複製間の一貫性を管理する方式を提案した。本稿では、シミュレーション実験により、提案方式の性能を詳細に評価し、その有効性を検証する。

### Performance Evaluation of Consistency Management Methods Considering Data Update in Ad Hoc Networks

Yohei SAWAI Masako SHINOHARA Akimitsu KANZAKI  
Takahiro HARA Shojiro NISHIO

Dept. of Multimedia Eng., Grad. Sch. of Information Science and Technology, Osaka Univ.  
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: {sawai.yohei, sinohara.masako, kanzaki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

Data replication is effective for improving data availability in ad hoc networks. In an environment where data updates occur, replicas of a data item may be inconsistent. To solve this problem, quorum based consistency management is a promising approach. In our previous work, we have proposed a consistency management method that constructs quorums with a small number of mobile hosts. In this paper, we present simulation results to evaluate the performance of our proposed methods by simulation experiment.

## 1 はじめに

近年、ルータの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注目が高まっている。アドホックネットワークでは、移動体同士でデータを共有し、互いのもつデータにアクセスすることが多い。しかし、移動体の移動によりネットワークが分断された場合、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。この問題を解決するため、オリジナルデータをもつ移動体以外の移動体に、データの複製を配置することが有効である [1, 2, 4]。

ここで、実環境では、データ更新が発生することが一般的である。アドホックネットワークでは、ネットワークに存在する全ての複製に常にアクセスできるとは限らないため、データ更新が発生した場合、古い複製がネットワークに存在してしまう可能性がある。このような環境では、クォーラムシステムを用いた複製間の一貫性管理が有効である。

クォーラムシステムを用いた一貫性管理方式では、複数の移動体がクォーラムと呼ばれるグループを構成する。このとき、任意の書き込みクォーラムと読み出しクォーラムが、共通集合をもつように設定する。移動体がデータ更新（書込み）を行う場合、一つの書き込みクォーラムを構成する全移動体のも

つデータ（複製）に、書き込みを行う。一方、移動体がデータアクセス（読出し）を行う場合、一つの読出しクォラムを構成する全移動体のもつデータ（複製）を参照する。書き込みクォラムと読出しクォラムは共通集合をもつため、全ての読出しクォラムには、最新のデータをもつ移動体が必ず一つ以上存在する。したがって、参照したデータの中で、最も新しいデータを読み出すことで、複製間の厳密な一貫性を保持できる。なお、本論文における厳密な一貫性とは、移動体が必ず最新のデータにアクセスできることを指す。

ここで、クォラムを構成する移動体数が増えると、データの書き込みや読出しに要するトラフィックが増加する。そのため、クォラムを構成する移動体数は少ない方が望ましい。

これまでにクォラムシステムを用いた複製間の一貫性管理方式がいくつか提案されている。文献 [5, 6] の方式では、トラフィックを削減できるが、複製間の一貫性を厳密に保持できない。一方、文献 [3] の方式では、複製間の一貫性を厳密に保持できるが、全移動体の過半数でクォラムを構成するため、トラフィックが増加してしまう。そこで筆者らは、文献 [7] において、厳密な一貫性を保持しつつ、トラフィックを抑制する複製間の一貫性管理方式として、CQ (Crisscross Quorum) 方式を提案した。本稿では、CQ 方式の性能をシミュレーション実験により評価し、その有効性を検証する。

以下では、2章で本稿の想定環境について述べる。3章で筆者らが提案した CQ 方式の概要を述べ、4章で、提案方式の性能評価のために行なったシミュレーション実験の結果を示す。最後に5章で、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2 想定環境

本稿では、各移動体が、自身の記憶領域にデータの複製を配置し、自身または他の移動体のもつデータにアクセスするアドホックネットワークを想定する。ここで、各移動体がネットワーク内に存在する全ての複製のバージョンの同期をとることは困難である。そのため、文献 [3] と同様に、クォラムシステムを用いて、複製間の一貫性を管理する。また、移動体の移動可能領域を複数の部分領域に分割し、その部分領域（以下では単に「領域」と称する）を担当する移動体間で一貫性管理を行うものとする。

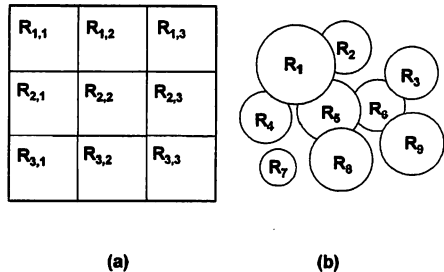


図 1: 部分領域の構成例

想定環境の詳細を以下に示す。

1. 移動体として、ピアとプロキシの 2 種類が存在する。
2. ピアとプロキシは、GPS などにより自身の現在位置を把握し、領域内を移動する。各プロキシは、特定の領域を担当し、自身の担当領域の内部のみを移動する。
3. 各プロキシが担当する領域の構成法には、特に制限を設けない。例えば、図 1(a) のような共通部分および隙間のない方形領域でもよいし、図 1(b) のような共通部分や隙間のある円形領域でもよい。ここで、図 1(b) のような場合を含め、任意の領域の構成法に対して、適当なラベル付けを行うことにより、仮想的に図 1(a) のような  $l$  行  $m$  列の領域とみなすことが可能である。そこで本稿では、図 1(a) のような領域の構成を用いて、議論を進める。
4. 全てのピアとプロキシは、全てのプロキシとその担当領域を把握している。
5. 各データは、ピアおよびプロキシによって、不定期に更新（書き込み）される。
6. 各ピアは、自身および他のプロキシがもつデータに対して、データアクセス（読出し）を行う。
7. 各プロキシの記憶領域に制限はなく、ネットワーク内に存在する全てのデータの複製を配置できる。
8. クォラムは、複数のプロキシで構成される。 $i$  行  $j$  列の領域  $R_{i,j}$  を担当するプロキシ  $r_{i,j}$  が書き込み操作および読出し操作に用いるクォラムを、それぞれ  $QW_{i,j}$ ,  $QR_{i,j}$  と表記する。

9. 各ピアが書込み（読出し）操作を行う場合、自身が所属する領域を担当するプロキシに書込み（読出し）操作依頼を送信する。各依頼を受信したプロキシは、書込み（読出し）操作用のクオーラムを構成し、クオーラム内のプロキシに書込み（読出し）操作要求を送信する。

### 3 CQ (Crisscross Quorum) 方式

本章では、筆者らが文献 [7] で提案した CQ 方式について述べる。CQ 方式では、移動体の移動可能領域を複数の領域に分割し、領域の位置関係に基づいて少数の移動体でクオーラムを構成する。これにより、複製間の一貫性を厳密に保持しつつ、データ操作に要するトラフィックを削減する。また、クオーラムを構成する移動体を探索する際に、領域の位置関係を考慮して探索範囲を制限することで、少ないトラフィックで移動体への経路を発見する。

#### 3.1 一貫性管理方式

提案方式では、書込み（読出し）操作用のクオーラムを、自身の担当領域を含む横一行（縦一列）の領域を管理するプロキシで構成する（図 2）。これにより、読出し操作と書込み操作が行われた複製集合に共通部分が必ず存在するため、複製間の厳密な一貫性を保持できる。ここで、書込み（読出し）操作を行うには、クオーラムを構成する全プロキシが相互接続している（1 ホップ以上の無線リンクで相互に通信できる）必要がある。そこで、ネットワークの接続状況に応じて、クオーラムを動的に再構成することで、書込み（読出し）の失敗を防ぐ。

以下では、まず複製間の一貫性を管理する具体的な手順について述べる。次に、書込み、および読出し操作用のクオーラムを構成する方法について、それぞれ説明する。

##### 3.1.1 書込み（読出し）操作

領域  $R_{I,J}$  に存在するピアは、あるデータに対して書込み（読出し）操作を行う場合、まず  $R_{I,J}$  を管理するプロキシ  $r_{I,J}$  に対して、書込み（読出し）操作依頼メッセージを送信する。依頼メッセージを受信した  $r_{I,J}$  は、依頼受領メッセージをピアに返信する。ピアは、一定時間内に  $r_{I,J}$  からの返信が

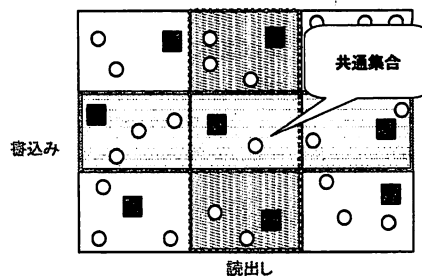


図 2: 書込み（読出し）操作クオーラム

ない場合、 $r_{I,J}$  と相互接続していないと判断し、別のプロキシに操作依頼メッセージを送信する。ピアは、 $R_{I,J}$  に近い領域から順に、プロキシが見つかるまで、この操作を繰り返す。一つのプロキシも見つからなかった場合、書込み（読出し）操作は失敗となる。

書込み（読出し）操作依頼メッセージを受信したプロキシは、3.1.2 節で述べるクオーラム構成法に基づいて、書込み（読出し）操作用のクオーラムを構成し、書込み（読出し）操作要求メッセージをクオーラム内の全プロキシに送信する。操作要求メッセージを受信したプロキシは、要求元のプロキシに、要求受領メッセージを返信する。操作要求を行ったプロキシは、クオーラム内の全プロキシからの要求受領メッセージを受信すると、書込み（読出し）操作を実行し、書込み（読出し）の成功をピアに通知する。全プロキシから受領メッセージを受信できなかった場合、クオーラムを再構成し、同様の操作を行う。これらの操作が全て失敗し、プロキシがそれ以上クオーラムを再構成できなかった場合、書込み（読出し）操作の失敗をピアに通知する。

##### 3.1.2 クオーラムの構成法

提案方式では、領域の位置関係を考慮してクオーラムを構成する。以下では、領域  $R_{I,J}$  を担当するプロキシ  $r_{I,J}$  が、書込み操作、および読出し操作用のクオーラムを構成する方法について、それぞれ説明する。

##### 書込み操作クオーラムの構成法

$r_{I,J}$  は、次式を用いて、書込み操作クオーラム  $QW_{I,J}$  を構成する。

$$QW_{I,J} = \{r_{I,j} | 1 \leq j \leq m\}$$

このクオーラムは、 $R_{I,J}$ を含む横一行の領域を担当する全プロキシから成る。 $r_{I,J}$ がクオーラム内の全プロキシと相互接続していない場合、 $r_{I,J}$ は、 $I$ に近いものから順に、別の横一行を担当するプロキシ（次式）で、 $QW_{I,J}$ を再構成する。

$$QW_{I,J} = \{r_{I',j} | 1 \leq j \leq m\}$$

$r_{I,J}$ は、クオーラム内の全プロキシと相互接続できるまでこの操作を繰り返す。

#### 読出し操作クオーラムの構成法

$r_{I,J}$ は、次式を用いて、読出し操作クオーラム  $QR_{I,J}$ を構成する。

$$QR_{I,J} = \{r_{i,J} | 1 \leq i \leq l\}$$

このクオーラムは、 $R_{I,J}$ を含む縦一列の領域を担当する全プロキシから成る。 $r_{I,J}$ がクオーラム内の全プロキシと相互接続していない場合、相互接続していないプロキシ  $r_{i',J}$ をクオーラムから削除し、 $r_{i',J}$ と同じ行で、 $r_{i',J}$ に近い領域を担当するプロキシを、新たにクオーラムに追加する。 $r_{I,J}$ は、この操作をクオーラム内の全プロキシと相互接続できるまで繰り返す。

提案方式では、書き込み操作クオーラムを、横一行の領域を担当する全プロキシで構成するため、読出し操作クオーラムは、各行から一つずつ選択した移動体で構成できる。そのため、読出し操作クオーラムは、書き込み操作クオーラムよりも柔軟に構成できる。

## 3.2 経路探索方式

各ピアがプロキシに書き込み（読出し）操作を依頼する場合や、プロキシが他のプロキシと通信する場合、移動体間の経路を求める必要がある。既存のルーティングプロトコルを用いて経路を構築する場合、移動体間の通信はユニキャストで行なわれる。一方、アプリケーション層で経路を構築する場合、問合せパケットのフラッディングが最も単純な方法となる。この方法では、相互接続している全ての移動体が問合せパケットを受信できるため、これらの移動体への経路を必ず発見できる。しかし、問合せパケットが広範囲に伝播するため、トラヒックが増加してしまう。そこで提案方式では、領域の位置関係を考慮して問合せパケットの伝播範囲を制限する。

以下では、伝播範囲を制限した経路探索の手順、

および伝播範囲の設定方法について、それぞれ述べる。

### 3.2.1 伝播範囲を制限した経路探索

移動体は、自身と宛先移動体の識別子に加え、これらの移動体が所属する領域の情報を含めた問合せパケットを、全隣接移動体に送信する。ここで、宛先移動体は必ずプロキシであるため、その所属領域は既知である。問合せパケットを初めて受信した移動体は、自身が宛先である場合、送信元に返信パケットを送信する。そうでない場合、3.2.2節で述べる伝播範囲内に自身が存在すれば、問合せパケットに自身の識別子を追加して、全隣接移動体に送信する。自身の識別子が問合せパケットに含まれる場合や、自身が伝播範囲外に存在する場合は、問合せパケットを破棄して、処理を終了する。

### 3.2.2 伝播範囲の設定

提案方式において、各ピアは、書き込み（読出し）操作を依頼するプロキシを、自身の存在する領域から近い順に選択する。また、各プロキシは、書き込み（読出し）操作クオーラムを横一行（縦一列）の領域を担当するプロキシで構成する。したがって、全領域に問合せパケットを伝播させなくても、移動体間の経路が求まる可能性が高い。一方、伝播範囲を制限すると、トラヒックを削減できる反面、相互接続している移動体への経路を発見できる確率が減少する。そのため、提案方式では、以下に示す2つの設定方法で伝播範囲を制限する。

**方形制限：** 問合せパケットに含まれる2つの領域（送信元と宛先が含まれる領域）を対角とする方形の領域

**斜形制限：** 問合せパケットに含まれる2つの領域と、それらの頂点を結ぶ線分で囲まれる領域

図3にプロキシ  $r_{2,2}$  がプロキシ  $r_{4,1}$  までの経路を求める場合の、方形制限と斜形制限による伝播範囲を示す。

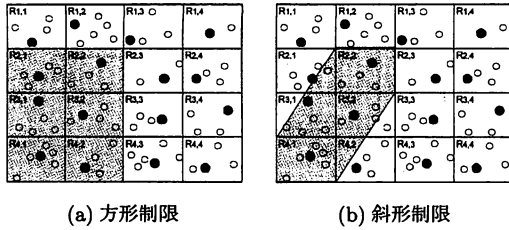


図 3: 伝播範囲の設定

## 4 性能評価

### 4.1 シミュレーションモデル

シミュレーション実験では、 $X$  [m]  $\times$   $X$  [m] の 2 次元平面を、 $X/6$  [m]  $\times$   $X/6$  [m] の  $6 \times 6$  領域に分割した。移動体数を 200 個とし、そのうち 36 個の移動体をプロキシ、その他の移動体をピアとした。各移動体は、全ての方向に等確率に、0 から 10[m/秒] 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。各移動体の無線通信範囲は半径 50[m] の円とし、各移動体の読出し操作と書き込み操作の頻度は、それぞれ 0.08[1/秒] とした。

以上の環境において、各移動体の初期位置をランダムに決定し、10,000[秒] を経過させたときの、以下の評価値について調べた。

- 書き込み（読出し）成功率  
シミュレーション時間内に発生した書き込み（読出し）操作要求の総数に対する、書き込み（読出し）成功回数の割合。
- トラヒック  
シミュレーション時間内に発生した、書き込み（読出し）操作要求メッセージの転送ホップ数の総和。
- 平均クォーラム構成回数  
書き込み（読出し）操作要求の際に、クォーラムを構成した回数の平均値。

### 4.2 クォーラム構成法の影響

本節では、何らかのルーティングプロトコルが動作しており、ユニキャストで通信が可能な環境を想定し、提案手法の性能を GC[3] と比較した。GC では、移動体の移動可能領域を複数の部分領域に分割し、各部分領域を管理する移動体間で一貫性を管

理する。このとき、書き込み、および読出し操作のクォーラムを構成する移動体数の和を、部分領域の総数より大きくすることで、複製間の一貫性を厳密に保持する。ここでは、書き込み、および読出し操作のクォーラムを構成するプロキシ数を、それぞれ 19, 18 とした。なお、ルーティングプロトコルの差異による性能への影響を受けないようにするため、通信バケットは、宛先への最短経路に沿って転送されるものとした。

$X$  を変化させた時のシミュレーション結果を図 4、図 5、図 6 に示す。各グラフの横軸は  $X$  を表し、縦軸はそれぞれ、書き込み（読出し）成功率、トラヒック、および平均クォーラム構成回数を表す。図 4 の結果より、 $X$  の増加に伴って、全ての方式で書き込み（読出し）成功率が減少することがわかる。これは、 $X$  が大きくなると、移動体同士が接続しにくく、クォーラムの構成に失敗しやすくなるためである。また、提案方式において、読出し成功率が、書き込み成功率に比べて若干高いことがわかる。これは、書き込み操作クォーラムが、横一行の領域を担当するプロキシで構成される必要があるのに対して、読出し操作クォーラムは、各行からそれぞれ一つの領域を担当するプロキシで構成できるためである。さらに、提案方式の書き込み成功率と読出し成功率が、GC とほぼ等しくなることがわかる。

図 5 の結果より、500[m] 程度までは、 $X$  の増加に伴って、全ての方式におけるトラヒックが増加することがわかる。これは、 $X$  が大きくなると、クォーラムを構成するプロキシ間のホップ数、およびクォーラムの構成回数が増加するため、ネットワーク全体のトラヒックが増加するためである。しかし、 $X$  がさらに大きくなると、全ての方式におけるトラヒックが減少することがわかる。これは、移動体同士が接続しにくくなり、バケットを転送する移動体数が小さくなるためである。これは図 4 の結果からも明らかである。また、提案方式における書き込み操作によるトラヒックが、読出し操作によるトラヒックより常に大きくなることがわかる。これは、プロキシが書き込み操作クォーラムを構成する場合、クォーラムを構成するすべてのプロキシを変更するためである。さらに、提案方式におけるトラヒックが、GC より、大幅に小さくなることがわかる。これは、提案方式において、クォーラムを構成するプロキシ数が、GC より小さいためである。

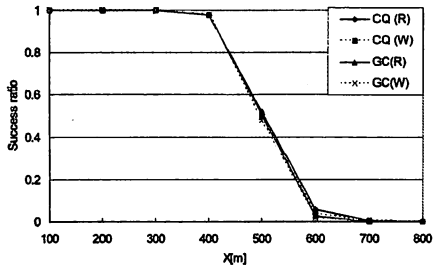


図 4:  $X$  と書込み（読出し）成功率

図 6 の結果より、 $X$  が小さい場合、プロキシが書込み（読出し）操作を最初に構成したクオーラムに対して実行できるため、平均クオーラム構成回数はほぼ 1 になる。一方、 $X$  が大きくなると、平均クオーラム構成回数は大きくなる。これは、移動体同士が接続しにくく、クオーラムの構成が失敗しやすくなるからである。本実験では、 $6 \times 6$  の領域を担当するプロキシでクオーラムを構成するため、平均クオーラム構成回数は最大構成回数である 6 に収束する。また、書込み操作の平均クオーラム構成回数は、読出し操作に対するそれよりも若干大きい。これは、図 4 の結果における考察と同様である。

### 4.3 経路探索方式の影響

3.2 節の経路探索方式を用いて経路探索を行う環境における評価結果を図 7, 図 8, 図 9 に示す。ここで、伝播範囲を制限しないフラッディングを行なう場合、全プロキシの識別子を問合せパケットに含める。これにより、一度のフラッディングで相互接続している全プロキシまでの経路を発見でき、クオーラムを構成するたびにフラッディングを行なう必要はない。そのため、提案方式と GC におけるトラヒックは同じ結果を示す。同様の理由で、提案方式と GC における書込み（読出し）成功率は同じ結果を示す。したがって、本節では提案方式の評価結果のみを示す。

図 7 の結果より、伝播範囲を制限すると、アクセス成功率が低くなることがわかる。また、斜形制限を適用した場合に、アクセス成功率の減少幅が大きくなることがわかる。これは、方形制限と比較して、斜形制限の方が、伝播範囲が小さく、移動体間の経路を発見できる機会が減少するためである。

図 8 の結果より、 $X$  が非常に小さい場合、全て

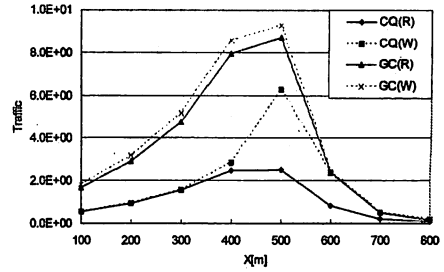


図 5:  $X$  とトラヒック

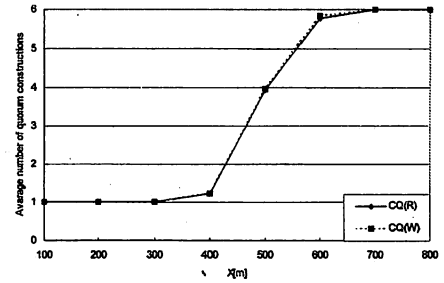
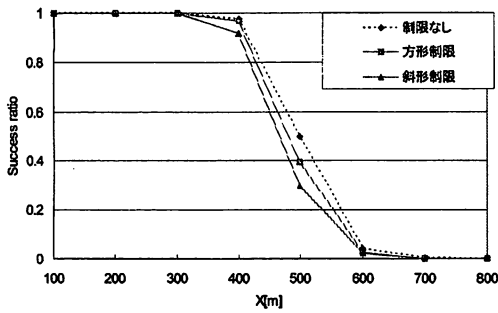


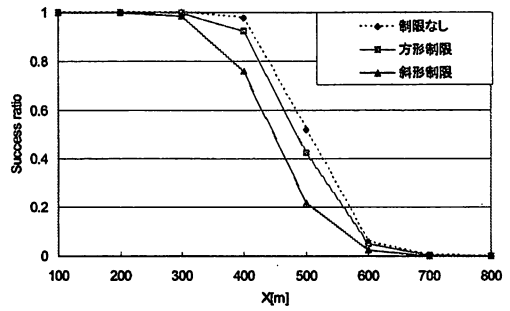
図 6:  $X$  と平均クオーラム構成回数

の方式においてトラヒックが非常に大きくなることがわかる。これは、すべての移動体がほぼ隣接しているため、パケットがほぼ全ての移動体に伝播するためである。一方、 $X$  が大きくなると、トラヒックが減少することがわかる。これは、図 4 の結果における考察と同様、移動体が他の移動体と接続しにくくなるためである。また、伝播範囲を制限すると、 $X$  が小さい範囲におけるトラヒックが大幅に減少することがわかる。これは、伝播範囲を制限することで、パケットが広範囲に伝播されるのを抑制できるためである。一方、 $X$  が大きい範囲では、伝播範囲を制限すると、制限しない場合よりトラヒックが大きくなることがわかる。これは、移動体間の接続状態が悪い状況では、伝播範囲を制限することで移動体間の経路を発見できる機会が減少し、クオーラムの構成回数が増加するためである。

図 9 の結果より、 $X$  の増加に伴って、方形制限と斜形制限による平均クオーラム構成回数が増加することがわかる。これは、図 4 の結果における考察と同様である。また、方形制限を適用した場合より小さくなることがわかる。これは、図 7 の結果

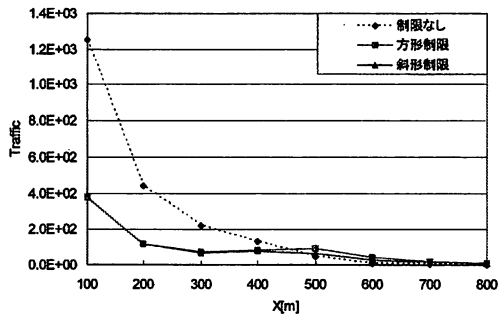


(a) X と書き込み成功率

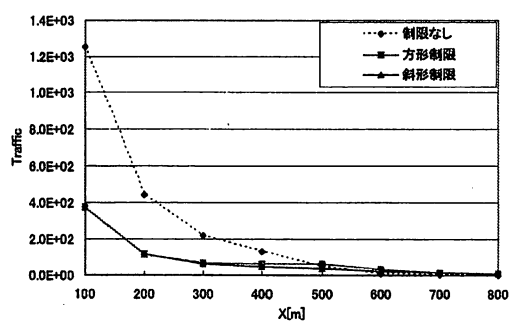


(b) X と読出し成功率

図 7: 書き込み成功率と読出し成功率



(a) X と書き込み操作によるトラヒック



(b) X と読出し操作によるトラヒック

図 8: 書き込み（読出し）操作によるトラヒック

における考察と同様で、斜形制限の方が移動体間の経路を発見できる機会が減少するため、クオーラムの構成に失敗しやすいからである。

## 5 おわりに

本稿では、筆者らが文献 [7] で提案した複製間の一貫性管理方式の性能を、シミュレーション実験により評価した。この結果から、提案方式は、従来方式と比較して、高いデータ利用性を維持しながら、トラヒックを削減することを確認した。また、問合せパケットの伝播範囲を制限することで、経路探索によるトラヒックを効果的に削減できることを確認した。

4章で述べたように、提案方式では、領域内の移動体密度が小さい場合、データ利用性が低下する。今後は、移動体密度が小さい環境において、一貫性

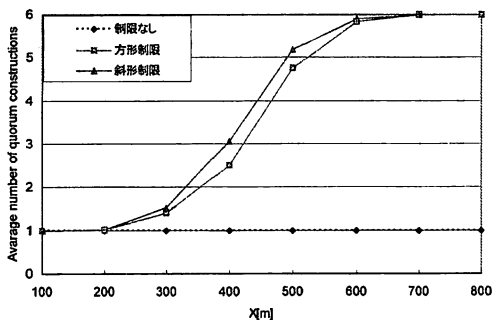
の厳密性を緩めるなど、データ利用性の低下を抑制する方式について検討する予定である。

## 謝辞

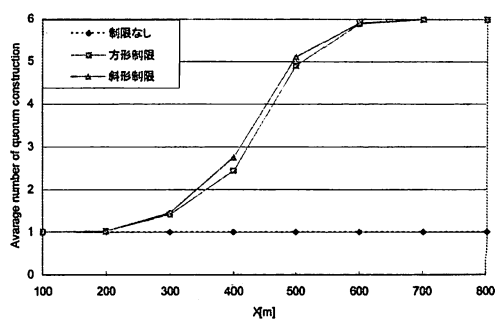
本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」、文部科学省若手研究 (A)(16680005)、および基礎研究 (A)(17200006) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 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,” 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol. J84-B, No. 3, pp. 632-642 (2001).
- [2] 原 隆浩, “アドホックネットワークにおける周期的なデータ更新を考慮した複製配置方式,” 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol. J84-B, No. 7, pp. 1391-1395 (2001).



(a) X と書き込み操作の平均クォーラム構成回数



(b) X と読み出し操作の平均クォーラム構成回数

図 9: 書き込み（読み出し）操作の平均クォーラム構成回数

- [3] T. Hara and S. K. Madria, "Consistency Management among Replicas in Peer-to-Peer Mobile Ad Hoc Networks," Proc. *SRDS'05*, pp. 3–12 (2005).
- [4] 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不定期データ更新を考慮した更新データ配布方式," 電子情報通信学会和文論文誌 D-I, Vol. J87-D-I, No. 2, pp. 188–201 (2004).
- [5] G. Karumanchi, S. Muralidharan, and R. Prakash, "Information Dissemination in Partitionable Mobile Ad Hoc Networks," Proc. *SRDS'99*, pp. 4–13 (1999).
- [6] 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).
- [7] 澤井陽平, 篠原昌子, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, "アドホックネットワークにおける複製間の一貫性管理について," 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, Vol. 2005, No. 19, pp. 156–160 (2005).