

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

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

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、データの利用性が向上する。この場合、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ため、クォーラムシステムを用いた複製間の一貫性管理を行うことが有効である。ここで、クォーラムを構成する移動体数は少ない方が通信オーバーヘッドによるトラヒックを削減できる。そこで本稿では、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する。

On Consistency Management among Replicas 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.

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. To reduce communication overhead, it is better to make the number of mobile hosts in each quorum small. In this paper, we propose a consistency management method that constructs quorums with fewer mobile hosts.

1 はじめに

近年、無線通信技術の発展と計算機の小型化に伴い、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、データの利用性が低下してしまう。例えば、図1の中央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、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。図1の例では、ネットワークの切断前にデータ D_1 と D_2 の複製をそれぞれ左側と右側の3台の移動体のいずれかに配置することで、切断後もそれぞれのデータにアクセスできる。

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。こ

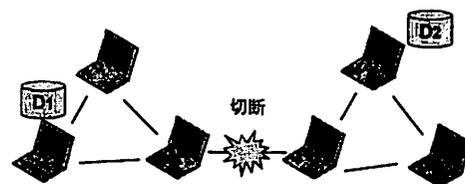


図1: ネットワークの分断

のような環境では、動的クォーラムに基づく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り、これまでにいくつかの一貫性管理方式が提案されている [2, 4, 5]。クォーラムシステムを用いた方式では、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。ここで、全てのクォーラムは、互いに共通集合をもつように設定する。移動体がデータ更新を行う場合、一つのクォーラムを構成する全移動体に、最新データの書き込みを行う。これにより、各クォーラムには、最新のデータが必ず一つ以上存在する。一方、移動体がデータの読出しを行う場合、一つのクォーラムを構成する全移動体を参照することで、最新のデータを必ず取得できる。

クォーラムシステムを用いて、複製間の一貫性を厳密に保持する場合、相互接続している移動体からクォーラムを構成する必要がある。ここで、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を指す。アドホックネッ

ネットワークでは、移動体の離脱や移動によって、ネットワークの分断が頻繁に発生する。そのため、データ利用性の向上や通信オーバーヘッドによるトラヒックの削減のために、クオラムを構成する移動体数は少ない方が望ましい。

そこで本稿では、少数の移動体でクオラムを構成し、複製間の一貫性を厳密に管理する方式を提案する。提案方式では、移動体の移動可能領域を複数の部分領域に分割し、部分領域の位置関係に基づいてクオラムを構成することで、複製間の一貫性を厳密に保持し、通信オーバーヘッドによるトラヒックを削減する。

以下では、2章で関連研究について紹介し、本研究との比較を行う。3章で想定環境について述べ、4章で提案する一貫性管理方式について説明する。5章で考察を述べ、最後に6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

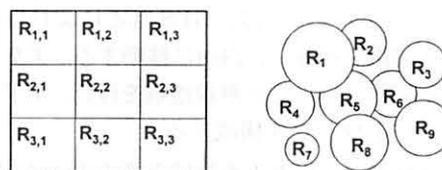
2 関連研究

近年、アドホックネットワークにおいて、ネットワーク内に存在する複製間の一貫性管理に関する研究が盛んに行われている [1, 2, 3, 4, 5].

文献 [4] では、サーバの役割を担う一定数の移動体に複製を配置し、それらがクオラムを構成することで、複製間の一貫性を管理する方式を提案している。また、文献 [5] では、確率的なクオラムシステムを用いて複製間の一貫性を管理する方式を提案している。これらの方式は、クオラムシステムを用いて複製間の一貫性を管理する点で本研究のアプローチと類似している。しかし、複製間の一貫性を厳密に保持しないため、移動体が常に最新のデータにアクセスできるとは限らない。

文献 [2] では、様々な一貫性レベルを定義し、クオラムシステムを用いた実現方式について考察している。厳密な一貫性レベルを保持する方式では、移動体の移動可能領域を複数の部分領域に分割し、領域を管理する移動体間で一貫性を管理する。このとき、書込み、および読出し操作のクオラムを構成する移動体数の和を、部分領域の数より多くすることで、複製間の一貫性を厳密に保持する。この方式は、複製間の一貫性を厳密に保持する点で、本研究のアプローチと類似している。しかし、クオラムを構成する移動体数が多いため、通信オーバーヘッドによるトラヒックは増加してしまう。

一方、文献 [1] では、アドホックネットワークに



(a) (b)
図 2: 部分領域の構成例

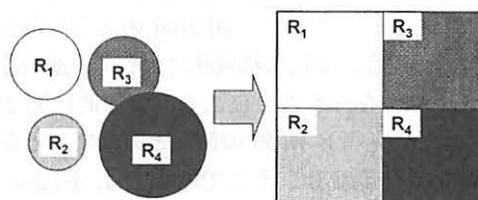


図 3: 領域の変換

において、データ更新を考慮した複製配置方式を提案している。また、文献 [3] では、更新データを配布する方式を提案している。これらの方式では、更新発生後の古い複製を無条件に無効と判断することで、ネットワーク内に存在する複製間の一貫性を厳密に保持する。これらの方式は、複製間の一貫性を厳密に保持する点で本研究のアプローチと類似している。しかし、暫定的な古い複製へのアクセスを認めるため、無駄なデータアクセスやロールバック処理によるシステム性能の低下が考えられる。

3 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間の一貫性を厳密に保持することは困難であるため、文献 [2] と同様に、動的クオラムに基づくクオ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。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。各プロキシは、先述の領域を担当し、自身の担当領域の内部のみを移動する。例えば、緊急災害時の救助活動では、プロキシは特定領域を担当するグループのリーダーとなり、グループ内の作業状況を把握し、領域内のピアに新たな指示を出すものと考えられる。

2. 各ピアとプロキシは、GPS などにより自身の現在位置を把握し、自由に移動する。また、他のピアやプロキシと無線通信を行い、アドホックネットワークを構成する。
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 2(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 2(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 2(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 2(a) のような l 行 m 列の領域とみなすことが可能である (図 3)。そこで本稿では、図 2(a) のような領域の構成を想定して、議論を進める。
4. 各ピアは、各領域を担当するプロキシを把握している。
5. 各データは、そのオリジナルをもつピアによって、不定期に更新 (書込み) される。
6. 各ピアは、自身もつオリジナル、および他のプロキシもつオリジナルや複製に対して、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. クオーラムは、複数のプロキシで構成される。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に用いるクオーラムを、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。

4 提案方式

本章では、本稿で提案する複製間の一貫性管理方式について説明する。

提案方式では、書込み (読出し) 操作のクオーラムを、自身の領域を含む横一行 (縦一列) の領域を管理するプロキシで構成する。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、複製間の一貫性を保持できる。ここで、クオーラムを構成する全プロキシが相

互接続していない場合、書込み (読出し) 操作は行えない。そこで、ネットワークの接続状況によって、クオーラムを構成するプロキシを動的に変更することで、データの利用率を向上させる。

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。最後に、クオーラムを構成するプロキシまでの効果的な経路探索方法について説明する。

4.1 一貫性保持方式

領域 $R_{i,j}$ に存在するピアが、あるデータに対して書込み (読出し) 操作を行う動作について説明する。

ピアは、まず $R_{i,j}$ を管理するプロキシ $r_{i,j}$ に対して、4.3 節で述べる経路探索に基づいて、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、一定時間の内に $r_{i,j}$ からの返信がない場合、 $r_{i,j}$ 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、 $R_{i,j}$ に近い領域から順番に、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、4.2 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。要求メッセージを受信したプロキシは、要求を行ったプロキシに、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。プロキシがクオーラムを構成できなかった場合、操作の失敗をピアに通知する。

4.2 クオーラムの構成法

クオーラムシステムを用いて、複製間の一貫性を厳密に保持する場合、クオーラムを構成する移動体は、相互接続している必要がある。ここで、通信

オーバーヘッドによるトラヒックを削減するため、クオラムを構成する移動体数は少ないほうが望ましい。また、一貫性を保持するため、最新の書込み操作と読出し操作が行われた複製集合には共通部分が存在しなければならない。そこで提案方式では、領域間の位置を考慮してクオラムを構成する。以下では、領域 $R_{I,J}$ を担当するプロキシ $r_{I,J}$ が書込み操作作用、および読出し操作作用のクオラムを構成する方法についてそれぞれ説明する。

4.2.1 書込み操作作用クオラムの構成法

$r_{I,J}$ は、次の式を用いて、書込み操作作用クオラム $QW_{I,J}$ 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構成される。 $r_{I,J}$ がクオラム内の全プロキシと相互接続している場合、書込み操作をこのクオラムに対して実行する。相互接続していないプロキシが存在する場合、 $R_{I-1,J}$ または $R_{I+1,J}$ を含む横一行の領域を担当するプロキシで、 $QW_{I,J}$ を再構成する。

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

上式の I' は $I+1$ または $I-1$ である。 $r_{I,J}$ は、この操作をクオラム内の全プロキシと相互接続できるまで繰り返す。図4に、 $r_{2,2}$ が、書込み操作作用クオラムを構成する動作を示す。図において、黒丸はプロキシ、白丸はピアを表す。まず $r_{2,2}$ は、 $\{r_{2,1}, r_{2,2}, r_{2,3}, r_{2,4}\}$ を書込み操作作用クオラムとして設定する。 $r_{2,2}$ がこれら全てのプロキシと相互接続していない場合、 $\{r_{1,j} | 1 \leq j \leq 4\}$ または $\{r_{3,j} | 1 \leq j \leq 4\}$ (図4では $\{r_{3,j} | 1 \leq j \leq 4\}$) でクオラムを再構成する。

4.2.2 読出し操作作用クオラムの構成法

$r_{I,J}$ は、次の式を用いて、読出し操作作用クオラム $QR_{I,J}$ 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構成される。 $r_{I,J}$ がクオラム内の全プロキシと相互接続している場合、読出し操作をこのクオラムに対して実行する。相互接続していないプロキシが存在する場合、そのプロキシ $r_{i,J}$ をクオラムから削除し、 $r_{i,J}$ から近い領域のプロキシ、すなわち $r_{i,J-1}$ または、 $r_{i,J+1}$ を新たにクオラムに追加する。 $r_{I,J}$ は、この操作をク

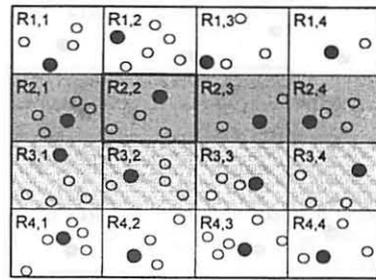


図4: 書込み操作作用クオラムの構成例

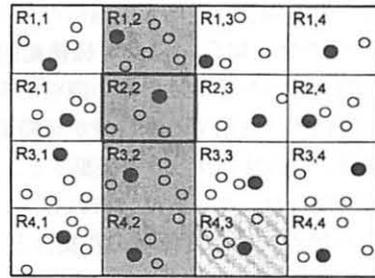


図5: 読出し操作作用クオラムの構成例

オラム内の全プロキシと相互接続できるまで繰り返す。図5に、 $r_{2,2}$ が、読出し操作作用クオラムを構成する動作を示す。まず $r_{2,2}$ は、 $\{r_{1,2}, r_{2,2}, r_{3,2}, r_{4,2}\}$ を読出し操作作用のクオラムとして設定する。ここで、 $r_{2,2}$ が $r_{4,2}$ と相互接続していない場合、 $r_{4,2}$ をクオラムから削除し、代わりに $r_{4,1}$ または $r_{4,3}$ (図5では $r_{4,3}$) をクオラムに追加する。

4.3 効果的な経路探索

各ピアが領域を担当するプロキシに書込み(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、何らかの方法で、移動体間の経路を求める必要がある。最も簡単な経路探索方式として、パケットのフラッディングが挙げられる。

フラッディングを用いると、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、トラヒックが増加する。そこで提案方式では、問合せパケットを伝播させる範囲を制限する。以下では、伝播範囲を制限した経路探索の動作について説明する。

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、

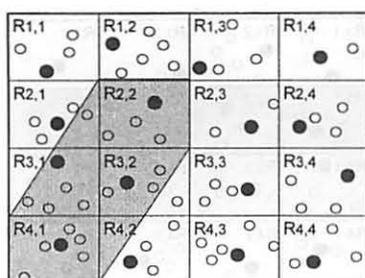


図 6: 問合せパケットの伝播範囲

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、自身が伝播範囲内に存在すれば、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。自身が伝播範囲外に存在する場合、問合せパケットを破棄する。ここで、伝播範囲は、問合せパケットに含まれる二つの領域と、それらの頂点を結んだ領域の和集合とする。

図 6 に、領域 $R_{2,2}$ に存在するプロキシが、 $R_{4,1}$ に存在するプロキシまでの経路を求める場合の、問合せパケットの伝播範囲を示す。この方式では、ネットワーク全体のトラヒックを低減できるが、相互接続している移動体への経路を発見できない可能性がある。

5 考察

提案方式では、領域の位置関係を考慮することで、少数のプロキシでクォーラムを構成でき、通信オーバーヘッドによるトラヒックを削減できる。ここで、書込み（読出し）操作用クォーラムを、横一行（縦一列）の領域を担当するプロキシから構成しているため、データの利用率はネットワークの接続状況によって異なる。例えば、ピアが移動可能領域の中央部分に密集している場合、横一行（縦一列）の両端の領域を担当するプロキシと相互接続しにくく、クォーラムを構成できない可能性がある。

また、提案方式では、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。ここで、ネットワークが疎な場合、問合せパケットの伝播範囲を小さく設定すると、経路探索に失敗する確率が高くなる。そのため、問合せパケットの伝播範囲は、ネットワークの密度に応じて設定する必要がある。

提案方式では、各領域の位置関係を仮想的に設定し、方形領域とする環境を想定した。しかし、実際に位置関係を仮想的に設定する場合、実領域間の

ネットワーク的距離を考慮する必要がある。また、書込み操作と読出し操作の割合に応じて l と m を定めることで、より効果的にクォーラムを構成できると考えられる。

6 まとめ

本稿では、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。提案方式では、移動体の移動可能領域を複数の部分領域に分割し、部分領域の位置関係に基づいてクォーラムを構成する。これにより、複製間の一貫性を厳密に保持しつつ、通信オーバーヘッドによるトラヒックを削減できる。

今後は、5章で述べた問合せパケットの伝播範囲の設定方法や、領域の構成方法について検討する予定である。また、文献 [2] における複製間の一貫性管理方式との比較を行い、データの利用率やトラヒックについて、提案方式の性能を評価する予定である。

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).
- [2] 原 隆浩, S.K. Madria: “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関する一考察,” 電子情報通信学会データ工学研究会報告 (DE2003-110), Vol.103, No.355, pp.45-50 (2003).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [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).