

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複製配置 Replica Allocation Considering Aperiodic Data Update in Ad Hoc Networks

原 隆浩†
Takahiro Tara

1. まえがき

近年、移動体のみで一時的に形成されるアドホックネットワークが注目されている [1]。アドホックネットワークでは、互いに無線通信範囲外の移動体同士でも、その間に存在する移動体がパケットを中継することで、マルチホップの通信を行える。

アドホックネットワークでは、移動体の移動に伴ってネットワークの分断が頻繁に発生する場合、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 (図 1)。この問題を解決する新しいアプローチとして、データの複製を作成し、オリジナルデータをもつ移動体以外にそれを配置することが有効である。

そこで筆者らは、文献 [4] において、移動体のデータ記憶領域に制限がある環境を想定し、アドホックネットワークにおける効果的な複製配置方式を提案した。さらに、文献 [5] において、これらの提案方式を周期的なデータ更新が発生する環境に適用するように拡張した。しかし、実環境では、データ更新は非周期的に発生することがより一般的と考えられる。そこで本稿では、これまでの提案方式を、非周期的なデータ更新が発生する環境に適用するように拡張をする。

2. 想定環境とこれまでの提案方式

2.1 想定環境と複製配置の方針

本稿では、次のようなシステム環境を想定する。

- 各データ D_j ($j = 1, \dots$) のサイズは等しく、各々が特定の移動体にオリジナルデータとして保持されている。
- 各データ D_j は、そのオリジナルを持つ移動体によって更新される。更新発生後、古い複製は無効になる。更新発生の時間間隔は、確率密度関数 $F_j(t)$ によって定義される。
- $F_j(t)$ および移動体 M_i のデータ D_j へのアクセス頻度 p_{ij} は既知とする。

移動体が、自身が持つオリジナルデータにアクセス要求を発生したとき、アクセスは即座に成功する。それ以外のときは、アクセス要求をブロードキャストする。その結果、オリジナルデータをもつ移動体から応答パケットを受け取った場合、オリジナルデータにアクセスを行う。オリジナルデータをもつ移動体からの応答はないが、相互接続している (自身を含む) 移動体が複製をもつ場合、その複製に暫定的にアクセスする。それ以外はアクセスは失敗となる。暫定的なアクセスは、後にオリジナルデータをもつ移動体と相互接続した際に、成功・失敗が決定する。なお本稿では、相互接続された移動体とは、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。

ネットワークポロジが変化する度に、最適な複製配置を再計算することは、現実的に不可能なため、本研究では、次の方針に基づくヒューリスティックなアプローチを用いる。

- 複製を一定の周期 (再配置周期) で再配置する。
- 各移動体の各データへのアクセス頻度、データ更新発生の時間間隔 ($F_j(t)$)、再配置周期の時点でのネットワークの接続状態に基づいて再配置を決定する。

2.2 これまでの複製配置方式

本節では、データ更新が周期的に発生する環境を想定して提案した、文献 [5] の複製配置方式を概説する。

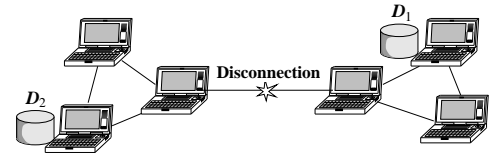


図 1: ネットワークの断線とデータアクセス

まず、PT 値と呼ぶ評価値を、次のように定義する。

$$p_{ij} \cdot \tau_j = p_{ij} \cdot (T_j - t_j) \quad (1)$$

τ_j は D_j が次に更新されるまでの時間、 T_j は D_j の更新周期、 t_j は D_j が更新されてから経過時間である。PT 値は、そのデータが次に更新されるまでに発生するアクセス要求の平均回数を表している。したがって、再配置周期において PT 値の高いデータの複製を配置することで、アクセス成功率が向上する。

文献 [5] では、PT 値に基づく以下の複製配置方式を提案した。

E-SAF 方式：再配置周期ごとに、各移動体がデータ記憶領域の許す限り、PT 値が高いデータから順に複製を配置する。この方式は、他の移動体と情報交換を行わないため、オーバーヘッドが小さい。しかし、アクセス特性が等しい移動体は同じ複製を作成してしまう。

E-DAFN 方式：再配置周期がくると、各移動体は、E-SAF 方式に基づいて配置する複製を暫定的に決定し、その後、隣接移動体間で複製の重複がある場合は、そのデータに対する PT 値が小さい方の移動体が複製を変更する。これにより、E-SAF 方式の複製の重複が多いという問題を軽減できる。ただし、2 ホップ以上離れた移動体では同じ複製を作成する可能性がある。

E-DCG 方式：再配置周期がくると、ネットワークの 2 連結成分で移動体をグループ化し、グループとしての PT 値を、グループを構成する移動体の PT 値の和として計算する。その後、グループとしての PT 値が高いデータから順に、グループ内でのその複製の配置を決定する。この方式では、安定性の高いグループ内で、多種類の複製を共有するため、アクセス成功率が向上する。しかし、グループ内での情報交換や複製の再配置が行われるため、他の 2 方式に比べてオーバーヘッドが大きい。

3. 不定期なデータ更新を考慮した拡張

3.1 拡張方式

不定期なデータ更新が発生する場合、オリジナルをもつ移動体と相互接続していなければ、更新の有無を確認することができない。したがって、古いデータのアクセスをロールバックできないアプリケーションに対しては、複製作成の有効性は低い。しかし、調査データの統計処理などでは、処理スループット、つまり新しいデータに基づいて計算した有効な処理数が重要となる。この場合、古いデータに基づいて計算したものは、その事実が発覚したときに無効化したり、ロールバックすればよい。本稿では、このようなデータ利用を想定して、まず最新のデータにアクセスする総数を最大にするように、これまでの提案方式を拡張する。また、移動体は通常資源に乏しく、特に電力消費を抑えることが重要であるため、無駄な計算が好ましくない場合も多い。このような場合も想定して、古いデータにアクセスする確率を一定値以下に抑えるような拡張も行う。

3.1.1 アクセス成功回数を最大にする拡張

直前の更新から時間 t_j だけ経過したデータ D_j の複製をもつことの有効性は次式で与えられる。

†大阪大学大学院情報科学研究科

Grad. Sch. of Information Science and Tech., Osaka Univ.

$$p_{ij} \int_0^{\infty} F_i(t+t_j) \cdot t \quad (2)$$

この値は、 D_j の次の更新までに発生するアクセス要求の平均回数を表している。本稿では、この値をPT'値と呼ぶ。本節の拡張方式では、E-SAF方式、E-DAFN方式、E-DCG方式において、PT'値をPT'値に置換えて複製の配置を行う。その結果、不定期なデータ更新が発生する環境において、アクセス成功回数の向上が期待できる。ここで、 $F_j(t)$ がインパルス関数($F_j(t) = \delta(T_j)$)で表されるとき、PT'値はPT値と等しくなる。したがって、E-SAF方式、E-DAFN方式、E-DCG方式は、拡張方式の特別な場合を表している。

3.1.2 無効データへのアクセス率を抑える拡張

前節の拡張方式では、アクセス成功回数は多くなるが、古いデータのアクセス回数も多い可能性がある。その結果、無駄な計算による負荷やロールバックが性能に影響する場合がある。そこで、本節の拡張方式では、全データアクセスに対する無効なアクセスの割合を、一定値内に抑えることを目的とする。

直前の更新から時間 t_j だけ経過したデータ D_j の複製を、時間 τ'_j の間持つときの D_j に対する有効なデータアクセスの平均発生回数は次式で与えられる。なお、この値をPT''値と呼ぶ。

$$p_{ij} \int_0^{\tau'_j} F_j(t+t_j) \cdot t dt \quad (3)$$

一方、データアクセスの総数が $p_{ij}\tau'_j$ となるため、このときの無効なデータアクセスの平均発生回数は次式で与えられる。

$$p_{ij} \left\{ \tau'_j - \int_0^{\tau'_j} F_j(t+t_j) \cdot t dt \right\} \quad (4)$$

したがって、全データアクセスに対する無効なデータアクセスの割合を一定値 α 以下に抑えたい場合は、次式を満たす τ'_j を計算によって求めればよい。

$$1 - \frac{1}{\tau'_j} \int_0^{\tau'_j} F_j(t+t_j) \cdot t dt \leq \alpha \quad (5)$$

本節の拡張方式では、再配置周期において各データに対して上式を満たす τ'_j を求め、その値を用いてPT''値を計算する。その結果得られたPT''値を、E-SAF方式、E-DAFN方式、E-DCG方式のPT値として用いることで複製の配置を行う。

3.2 考察

本稿の拡張方式は、データ更新が不定期に発生するアドホックネットワークにおいて、効果的な複製配置を決定できる。先述のように、E-SAF方式、E-DAFN方式、E-DCG方式は、拡張方式の特別な場合を表している。E-SAF方式、E-DAFN方式、E-DCG方式では、データ更新がほぼ一定の間隔で発生したとしても、その間隔に少しのずれがある場合には、性能が劣化してしまう可能性がある。しかし、そのずれを含めたデータ更新の発生間隔が、何らかの確率密度関数 $F_j(t)$ で表される場合、本稿の拡張方式を適用できる。

実環境では、 $F_j(t)$ は通常、オリジナルをもつ移動体において、データ更新のログを記録し、定期的な解析により見積もることができる。見積もった $F_j(t)$ は、複製配置に用いるために、他の移動体に伝搬される。しかし、オリジナルをもつ移動体と接続していない移動体は、 $F_j(t)$ を知ることはできない。また、データ更新の発生が何の特性をもたない場合、オリジナルをもつ移動体が $F_j(t)$ を正確に見積もることができない。このように、実環境では、正確な $F_j(t)$ が得られない状況が多く存在する。本稿の拡張方式の性能は、 $F_j(t)$ の精度に依存するため、今後、このような状況の対処法について検討する必要がある。

3.3 関連研究

移動体計算環境上のデータベースシステムにおいて、データをキャッシュしたり複製を作成する手法はいくつか提案されて

いる[2, 3, 6, 7, 8]。これらの研究は、移動体上にデータの複製を作成する点で本研究と類似しているが、固定ネットワーク上のサイトに1ホップの無線通信でデータアクセスを行うことを想定しているため、移動体間でマルチホップの通信を行ってデータアクセスをする本稿の想定環境とは根本的に異なる。

上記の従来研究は、アドホックネットワーク環境にそのまま適用はできないが、いくつかの有効なアイデアが含まれている。例えば、文献[2, 6, 8]では、更新発生後の複製の無効化情報を効率良く放送する手法を提案している。この技術を拡張方式に取り入れることで、古い複製に対する無駄なデータ操作やロールバックを防ぐことができる。また、文献[3, 7]では、任意の移動体が任意のデータに対して更新操作を行う環境において、複製間の一貫性を保持する手法を提案している。この技術を取り入れることで、拡張方式の柔軟性が増すものと考えられる。

4. むすび

本稿では、データ更新が不定期に発生するアドホックネットワークを想定して、筆者らがこれまでに提案した複製配置方式を拡張した。拡張方式として、アクセス要求が成功する回数を最大にする方式と、更新された古いデータを読む確率をあるしきい値以下に抑える方式を提案した。これらの拡張方式によって、不定期にデータ更新が発生する環境においても、効果的に複製を配置することが可能となる。

今後は、更新発生間の時間間隔を表す確率密度関数 $F_j(t)$ を正確に見積もることができない状況において、拡張方式の性能が劣化しないような対応策を検討する予定である。

謝辞 日ごろ、御指導頂いている大阪大学大学院工学研究科西尾章治郎教授並びに塚本昌彦助教授に感謝の意を表す。

本研究の一部は、文部科学省平成13年度科学技術振興調整費「モバイル環境向P2P型情報共有基盤の確立」、日本学術振興会若手研究(B)(13780330)の研究助成によるものである。

参考文献

- [1] D. Baker, J. Wieselthier, and A. Ephremides, "A distributed algorithm for scheduling the activation of links in a self-organizing, mobile, radio network," Proc. IEEE ICC'82, pp.2F6.1-2F6.5, 1982.
- [2] D. Barbara and T. Imielinski, "Sleepers and workholics: Caching strategies in mobile environments," Proc. ACM SIGMOD'94, pp.1-12, 1994.
- [3] J. Gray, P. Helland, P. O'Neil, and D. Shasha, "The dangers of replication and a solution," Proc. ACM SIGMOD'96, pp.173-182, 1996.
- [4] 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," 信学論(B), vol.J84-B, no.3, pp.632-642, Mar. 2001.
- [5] 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," 信学論(B), vol.J84-B, no.7, pp.1391-1395, July 2001.
- [6] J. Jing, A. Elmagarmid, A. Helal, and R. Alonso, "Bit-sequences: An adaptive cache invalidation method in mobile client/server environments," Mobile Networks and Applications, vol.2, no.2, pp.115-127, 1997.
- [7] E. Pitoura and B. Bhargava, "Data consistency in intermittently connected distributed systems," IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, vol.11, no.6, pp.896-915, 1999.
- [8] K.L. Tan, "Organization of invalidation reports for energy-efficient cache invalidation in mobile environments," Mobile Networks and Applications, vol.6, no.3, pp.279-190, 2001.