

アドホックネットワークにおけるエピデミックモデルを利用した 更新データ配布方式

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、データの利用率を向上させるため、移動体が他の移動体のもつデータの複製を作成することが有効である。これまでに筆者らはデータ更新の発生する環境を想定し、更新データ配布方式を提案した。この方式では、自身のもつ複製が古いことを知った移動体は必ず更新データを要求するため、更新データの配布によるトラフィックが大きくなる。そこで本稿では、このトラフィックを削減するため、生物学の知見に基づくアプローチとして知られているエピデミックモデルを利用した更新データ配布方式を提案する。提案方式では、移動体が無効化情報を配布して古い複製を削除し、古い複製を削除した移動体は確率的に更新データを要求する。さらに本稿では、提案方式の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示し、その有効性を検証する。

An Updated Data Dissemination Method Exploiting an Epidemic Model in Ad Hoc Networks

Hideki HAYASHI Takahiro HARA Shojiro NISHIO

Dept. of Multimedia Eng., Grad. School of Information Science and Tech., 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, it is effective that each mobile host creates replicas of data items held by other mobile hosts for improving data accessibility. In our previous work, we assumed an environment where data items are updated and proposed two updated data dissemination methods. In these methods, the traffic for updated data dissemination is large since every mobile host necessarily requests updated data items when it knows that its own replicas are old. In this paper, we propose an updated data dissemination method exploiting an epidemic model, which is a popular bio-inspired approach, for reducing the traffic. In our method, mobile hosts disseminate invalidation reports and discard old replicas. Each mobile host that discards an old replica requests the updated data item with a certain probability. We also present simulation results to evaluate the performance of our method.

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、移動体の移動で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ため、移動体が他の移動体のもつデータの複製を作成することが有効である。アドホックネットワークの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におけるデータ共有があり、移動体間で相互にデータを参照し合うものも多い。したがって、データの利用率の向上を目的とした複製配置は重要な研究課題である。これまでに筆者らは、文献[3]で、データ更新の発生しない環境を想定し、ネットワークトポロジを考慮した複製配置方式を提案した。

ここで実環境では、一般的にデータ更新が発生し、移動体が古い複製にアクセスする可能性がある。古

い複製へのアクセスは無効となり、無駄なデータアクセスやロールバック処理の発生を伴うため、多くの電力を消費する。そこで筆者らは、文献[4]において、古い複製へのアクセス回数の削減とデータの利用率の向上を目的として、更新データ配布方式を提案した。この方式では、自身のもつ複製が古いことを知った移動体が必ず更新データを要求するため、トラフィックが非常に大きくなる。そこで本稿では、トラフィックを削減しながら、古い複製を効率的に更新するため、生物学の知見に基づくアプローチであるエピデミックモデル[2, 5]を利用した更新データ配布方式を提案する。提案方式では、移動体がデータを更新したときや、二つの移動体が新しく接続(隣接)したときに、無効化情報を配布して古い複製を削除する。さらに、古い複製を削除した移動体は確率的に更新データを要求する。また本稿では、提案方式の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示し、その有効性を検証する。

以下では、2章で想定環境について述べる。3章で、文献[4]で提案した従来方式を説明する。4章で

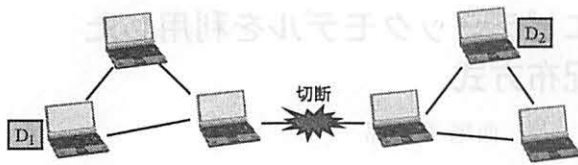


図 1: ネットワークの分断

提案方式を説明し、5章でシミュレーション実験の結果を示す。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、アドホックネットワークを構成する移動体が、何らかの複製配置方式を用いて、データの複製を作成する環境を想定する。

移動体のデータへのアクセス要求は、移動体がオリジナルにアクセスした場合、またはオリジナルと同じバージョン（タイムスタンプ）の複製にアクセスした場合に成功とみなす。アクセス要求は、自身もしくは相互接続している移動体が、アクセス対象のオリジナルをもつ場合、即座に成功となる。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の集合を指す。自身もしくは相互接続している移動体が、アクセス対象のオリジナルをもたず、複製のみをもつ場合、暫定的に複製にアクセスする。その後、オリジナルをもつ移動体と接続したときに、アクセスが成功か失敗かを問合せる。アクセスが失敗した場合、複製にアクセスした前の状態に回復できるようにロールバック処理を行う。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オリジナルや複製をもたない場合、アクセス要求は失敗となる。

想定環境のその他の詳細を以下に示す。

- m 個の移動体（識別子: M_1, M_2, \dots, M_m ）が存在し、自由に移動する。
- n 個のデータ（識別子: D_1, D_2, \dots, D_n ）が存在し、各データは特定の移動体にオリジナルデータとして保持される。
- 各データは、そのオリジナルをもつ移動体によって更新される。更新発生後の古い複製は無効なものとなる。

3 従来方式

これまでに筆者らは、文献[4]において、DU (Dissemination on Update) 方式と DC (Dissemination on Connection) 方式を提案した。これらの方式では、移動体が各データの最近の更新時刻（タイムスタンプ）を記録するタイムスタンプ表を保持する。

DU 方式: データを更新した移動体がタイムスタンプを含む無効化情報をフラッディングして、他

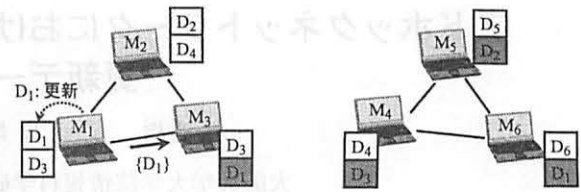


図 2: DU 方式による更新データの配布

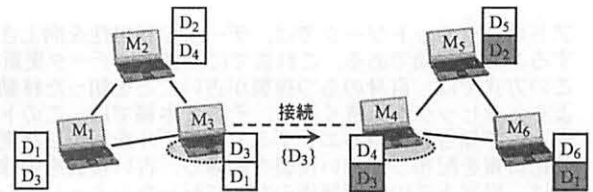


図 3: DC/OO 方式による更新データの配布。

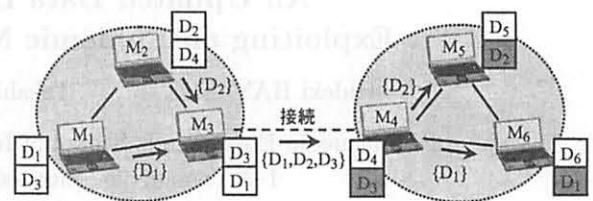


図 4: DC/GG 方式による更新データの配布

の移動体のもつ古い複製を削除する。古い複製を削除した移動体は、データを更新した移動体に更新データを要求する。図2は、 M_1 が D_1 を更新したときに、 M_3 に D_1 の更新データを配布する様子を示す。図中の四角はデータ、灰色の四角は古い複製を表す。

DC 方式: 新しく接続した二つの移動体がタイムスタンプ表を比較して、もともと相互接続していた移動体に無効化情報をフラッディングした後、更新データを配布する。ここで、サイズの大きな更新データの配布はシステム性能に大きな影響を与える。そこで、更新データの配布範囲が異なる方式を提案した。DC/OO(One-to-One)方式では接続した移動体間(図3)、DC/GG(Group-to-Group)方式では接続したグループ間(図4)で更新データを配布し合う。なお、DC方式はDU方式と併用される。

DU方式では、データ更新時のみ更新データが配布されるため、DC方式よりトラフィックは小さくなる。一方、DC方式はDU方式より広範囲に更新データを伝播するため、データの利用率が高くなる。

4 提案方式

本章では、エpidemickモデルについて述べた後、提案する更新データ配布方式について説明する。

表 1: 提案方式における移動体の管理情報

表名	属性
タイムスタンプ表	データ ID, TS, IR 受信時刻, IR/UD 配布終了時刻
アクセス状況表	データ ID, アクセス頻度, アクセス要求数

表 2: 提案方式で用いる制御パケット

パケット名	要素
無効化情報	データ ID, TS, 経路情報
更新データ要求	移動体 ID, 宛先 ID, データ ID

4.1 エピデミックモデル

エピデミックモデルは、伝染病の伝播過程を模した情報伝播モデルである。

まず、病原体は、ある確率でヒトに侵入し、ヒトを病気に感染させる。感染者は未感染者に接触すると、ある確率で病気をうつす。感染者はある期間が経つと、回復して、未感染者に病気をうつさなくなる。また、回復したヒトはその病気への免疫がつき、他の感染者から病気をうつされなくなる。

4.2 更新データの配布

提案方式では、移動体がデータを更新したときや、二つの移動体が接続したときに、確率的に更新データを配布する。表 1 に移動体の管理情報、表 2 に制御パケットを示す。表中の ID は識別子、TS はタイムスタンプ、IR は無効化情報、UD は更新データを示す。また、無効化情報の経路情報には、無効化情報が転送された経路上の移動体の順に、移動体の識別子とそのデータをもつか (1) 否か (0) を示すフラグからなる要素が挿入される。

まず、データを更新した移動体は、相互接続している移動体に無効化情報をフラッディングする。このとき、古い複製を削除した全移動体が更新データを要求すると、トラヒックが非常に大きくなる。そこで、エピデミックモデルを利用して、移動体が要求確率 P_{req} (4.3 節参照) に基づいて、近くの移動体に更新データを要求するか否かを決定する。

また、更新データを広く伝播させるため、エピデミックモデルを利用して、移動体が他の移動体と接続したときに、感染者のように無効化情報や更新データを配布する。ここで、移動体が継続的に無効化情報や更新データを配布する場合、無駄なトラヒックが生じる。そこで、移動体 (感染者) が無効化情報を受信してからある期間 (配布期間) が経過すると、他の移動体と接続しても、無効化情報や更新データ (病原体) を配布しないようにする。

以下では、移動体がデータを更新したときと、他の移動体と接続したときの動作について説明する。

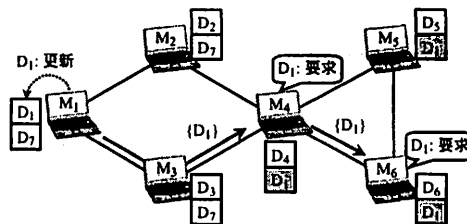


図 5: データ更新時の更新データの配布

[データ更新時の動作]

以下に、 M_i が D_k を更新したときの動作を示す。

1. M_i は自身のもつタイムスタンプ表の D_k の情報を更新する。TS と IR 受信時刻はデータの更新時刻にし、IR/UD 配布終了時刻は受信時刻に配布期間 T_{snd} を加えたものにする。 T_{snd} は事前に設定される定数である。
2. M_i は隣接移動体に無効化情報を放送する。経路情報には、 M_i と 1 にセットしたフラグからなる要素が挿入される。
3. 無効化情報を受信した移動体 M_j は、 M_i と同様に、タイムスタンプ表の D_k の情報を更新する。 D_k の古い複製をもつ場合、それを削除して、 P_{req} に基づいて更新データを要求する。要求先には、無効化情報の経路情報から、 D_k をもつ最も近い移動体を選ぶ。その後、 M_j は隣接移動体に無効化情報を放送する。経路情報には、 M_j と、更新データを要求した場合には 1、そうでない場合には 0 にセットしたフラグを挿入する。無効化情報を受信した移動体は手順 3 に従い動作する。

図 5 は、 M_1 が D_1 を更新したときに、 M_4 と M_6 が更新データを要求する様子を示す。

[接続時の動作]

以下に、 M_i と M_j が接続したときの動作を示す。

1. $M_i(M_j)$ は、現在時刻より大きな IR/UD 配布終了時刻をもつ各データの無効化情報を $M_j(M_i)$ に送信する。
2. $M_j(M_i)$ は、タイムスタンプ表のタイムスタンプと無効化情報のタイムスタンプを比較する。 $M_j(M_i)$ のもつタイムスタンプの方が小さい場合、タイムスタンプ表を更新する。TS は無効化情報のタイムスタンプ、IR 受信時刻は現在時刻、IR/UD 配布終了時刻は現在時刻と T_{snd} の和にする。 $M_j(M_i)$ が古い複製をもつ場合、それを削除して、 P_{req} に基づいて更新データを要求する。要求先には、無効化情報の経路情報から、そのデータをもつ最も近い移動体を選ぶ。その後、 $M_j(M_i)$ は、隣接移動体に無効化情報を放送する。経路情報には、 $M_j(M_i)$ と、

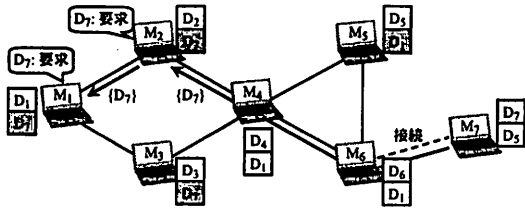


図 6: 接続時の更新データの配布

更新データを要求した場合には 1, そうでない場合には 0 にセットしたフラグを挿入する。

3. 無効化情報を受信した移動体は $M_j(M_i)$ と同様の動作を行う。

図 6 は, M_6 と M_7 が接続したときに, M_1 と M_2 が D_7 の更新データを要求する様子を示す。

4.3 更新データの要求確率

古い複製を削除した移動体は, 要求確率 P_{req} に基づいて更新データを要求する。 P_{req} が高いほど更新データを受信しやすくなるため, $1/P_{req}$ はエビデミックモデルの伝染病への免疫力に相当する。

まず, 移動体が長い間, あるデータの無効化情報を受信していない場合, 分断された部分ネットワークに存在し, そのデータにアクセスできなかった可能性が高い。したがって, このような移動体に優先的に更新データを配布することは有効である。さらに, 頻繁にアクセスされるデータの更新データを優先的に配布することは有効である。以上の点を考慮して, 移動体が D_k の無効化情報を受信したときの P_{req} は以下の式で定義される。

$$P_{req} = \alpha \cdot \frac{ET_k}{MAX_ET} + (1 - \alpha) \cdot \frac{A_k}{MAX_A}. \quad (1)$$

ここで, α ($0 \leq \alpha \leq 1$), MAX_ET (> 0), MAX_A (> 0) は事前に設定される定数, ET_k は D_k の無効化情報を前回受信してからの経過時間, A_k は D_k のアクセス頻度を示す。なお, $ET_k > MAX_ET$ の場合 $ET_k = MAX_ET$, $A_k > MAX_A$ の場合 $A_k = MAX_A$ とする。 ET_k はタイムスタンプ表の IR 受信時刻から計算できる。 A_k は時間 Δt ごとに以下の式を用いて計算される。

$$A_k = \beta \cdot A'_k + (1 - \beta) \cdot A_k(\Delta t). \quad (2)$$

ここで, β ($0 \leq \beta \leq 1$) は事前に設定される定数, A'_k は現在から過去 Δt 時間前に計算された D_k のアクセス頻度, $A_k(\Delta t)$ は現在から過去 Δt 時間の間の D_k へのアクセス頻度, つまり自身と他の移動体が D_k にアクセス要求した回数を Δt で割ったものである。各移動体は, 表 1 に示すアクセス状況表に, D_k の要求パケットの受信回数を, アクセス要

表 3: パラメータ設定

パラメータ	値	
U	100~3,000	[秒]
T	1,000	[秒]
T_{snd}	1,000	[秒]
α	0.5	
MAX_ET	1,000	[秒]
MAX_A	0.005	[1/秒]
β	0.5	
Δt	1,000	[秒]

求数として記録する。なお, アクセス要求数は A_k が計算されるたびに 0 にリセットされる。

5 シミュレーション実験

本章では, シミュレーション実験の結果を示す。

5.1 シミュレーション環境

500[m]×500[m] の 2 次元平面上に, 40 台の移動体 (M_1, \dots, M_{40}) が存在し, ランダムウェイポイントモデル [1] に従って移動するものとした。このとき, 移動体の移動速度を 0.01 から 1[m/秒] の範囲から, 一時停止時間を 0 から 1,000[秒] の範囲からランダムに決定した。なお, 移動体の無線通信範囲は, 半径 70[m] とした。

ネットワーク内には 40 種類の 1[メガバイト] のデータ (D_1, \dots, D_{40}) が存在し, M_j ($j = 1, \dots, 40$) が D_j のオリジナルをもつものとした。 M_j の D_j へのアクセス頻度は, $p_{ij} = 0.0005 \times (1 + 0.0001 \times j)$ [回/秒] とした。また, 移動体は, 自身のもつオリジナルを平均 U [秒] (平均更新間隔) の指数分布に基づいた間隔で更新するものとした。一方, 各移動体は, 筆者らが文献 [3] で提案した DCG (Dynamic Connectivity based Grouping) 方式を用いて, 自身のデータ領域に最大 10 個の複製を配置するものとした。 DCG 方式は, T [秒] ごとに安定度の高いグループを作成し, グループ内で複製を共有する。

表 3 に, 本実験で用いたパラメータを示す。本実験では, 提案方式と文献 [4] の方式を比較するため, 各移動体の初期位置をランダムに決定して, 500,000[秒] 経過後の下記の評価値について調べた。

アクセス成功率: アクセス要求の総数に対するアクセス成功回数の割合。

古い複製にアクセスした割合: アクセス要求の総数に対する, 古い複製へのアクセス回数の割合。

トラヒック: 更新データの送信に要する通信ホップ数に, そのサイズを掛けたものの総和。

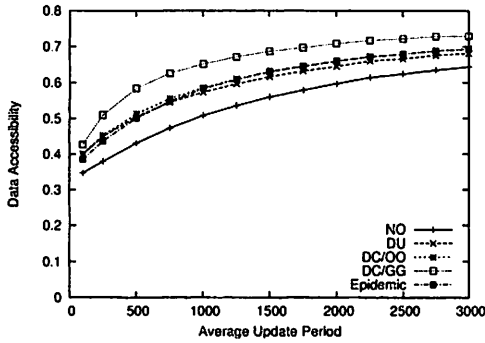


図 7: 平均更新間隔とアクセス成功率

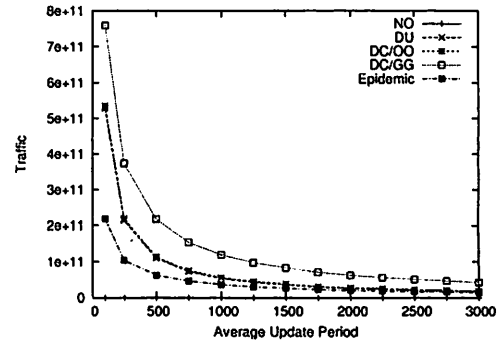


図 9: 平均更新間隔とトラフィック

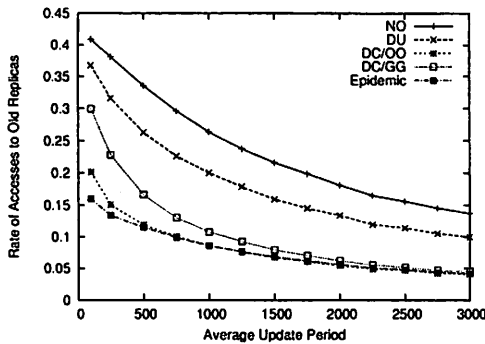


図 8: 平均更新間隔と古い複製にアクセスした割合

5.2 平均更新間隔 U の影響

平均更新間隔 U を変化させたときの各方式の結果を、図 7、図 8、図 9 に示す。これらのグラフにおいて、提案方式を“Epidemic”、無効化情報と更新データを全く配布しない場合を“NO”と表記する。

図 7 の結果から、平均更新間隔が大きくなると、複製の有効な時間が長くなるため、いずれの方式でもアクセス成功率が高くなる。平均更新間隔が非常に小さい場合、提案方式は DU 方式よりアクセス成功率が低い、平均更新間隔が大きくなると、DC/OO 方式とほぼ同じ成功率になる。提案方式では平均更新間隔が小さくなると、無効化情報の受信間隔が小さくなり、要求確率が小さくなるからである。一方、DC/GG 方式は、最も広く更新データを配布できるため、成功率が最も高くなる。

図 8 の結果から、平均更新間隔が大きくなると、図 7 の結果と同様の理由で、各方式の古い複製にアクセスする割合が低くなる。平均更新間隔が小さい場合、提案方式は古い複製にアクセスする割合が最も低い。これは、移動体が効果的に無効化情報を配布して、古い複製を削除していることを示す。

図 9 の結果から、平均更新間隔が大きくなると、更新データの配布頻度が減少するため、各方式のトラフィックが小さくなるのがわかる。また、提案方式では、移動体が確率的に更新データを要求するた

め、トラフィックが最も小さくなる。

6 まとめ

本稿では、エピデミックモデルを利用した更新データ配布方式を提案した。提案方式では、無効化情報を受信して古い複製を削除した移動体は、確率的に更新データを要求する。

シミュレーション実験の結果より、提案方式のアクセス成功率は DU 方式、DC/OO 方式とほぼ同じになり、トラフィックが最も小さいことを確認した。

今後は、適用環境に基づいて、提案方式で決定する必要のあるパラメータを適切に調節する方法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」、および文部科学省若手研究 (A)(16680005)、基盤研究 (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] J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.C. Hu, and J. Jetcheva, “A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols,” Proc. of MobiCom’98, pp. 85–97, 1998.
- [2] A. Datta, S. Quarteroni, and K. Aberer, “Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Wireless Mobile Ad-Hoc Networks,” Proc. of Int’l Conf. on Semantics of a Networked World (ICSNW’04), pp. 126–143, 2004.
- [3] 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.
- [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] C. Lindemann, and O.P. Waldhorst, “Consistency Mechanisms for A Distributed Lookup Service Supporting Mobile Applications,” Proc. of ACM Int’l Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access (MobiDE’03), pp. 61–68, 2003.