

局所性のあるアドホックネットワークにおけるロボットを利用した複製伝播手法

谷口 哲也 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: {taniguchi.tetsuya, kanzaki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

本稿では、端末が局所的に存在するアドホックネットワークにおいて、データの可用性を向上させる複製伝播手法を提案する。提案手法では、データ転送（複製の伝播）のために移動する端末（ロボット）を導入する。このとき、ロボットが、移動経路の距離や、各端末が保持するアクセス要求およびデータをもとに、自身の移動経路を決定することで、複製を効果的に伝播させる。さらに、本稿では、シミュレーション実験によって、提案手法の有効性を評価する。

A Replica Propagation Method Using a Robot in Ad Hoc Networks with Locality

Tetsuya TANIGUCHI Akimitsu KANZAKI Takahiro HARA Shojiro NISHIO

Dept. of Multimedia Eng., Grad. Sch. of Information Science and Technology, Osaka Univ.

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

In this paper, we propose a replica propagation method for improving data availability in ad hoc networks in which the density of mobile hosts has locality. Our method utilizes a specially designed mobile host (robot) that moves around to deliver data items (replicas). The robot delivers replicas effectively by selecting its moving route considering the length of the route, pending access requests, and data items held by other mobile hosts. Furthermore, we verify the effectiveness of our method by simulation experiments.

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、ルータ機能を持つ端末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、端末同士が、基地局を介さずに、直接通信できる。また、各端末が中継機能を有することで、直接通信できない端末間でもマルチホップな通信が可能である。

ここで、実環境では、端末の移動特性に局所性のある場合が多いものと考えられる。例えば、災害発生時において、被災者や救助隊員は、避難場所や救助地点など一定の活動領域内のみを移動するものと考えられる。このような場合、複数の活動領域間におけるネットワークの分断が頻繁に発生し、端末間の通信が行えなくなる可能性がある。

これまでに、アドホックネットワークにおける、ネットワークの分断を考慮した、データ可用性の向上のための研究が盛んに行われている。まず、文献

[2] などにおいて、複数の端末にデータの複製を配置する手法が提案されている。また、文献 [1, 3] などにおいて、端末の移動を利用して、データを伝播する手法が提案されている。しかし、これらの手法は、各端末が領域全体を自由に移動する環境を想定しており、端末の局所性については考慮していない。そのため、端末が局所的に存在する環境では、他の活動領域に存在するデータへのアクセスが満足に行えず、データの可用性が低下してしまう可能性がある。

そこで本稿では、端末が活動領域と呼ぶ複数の局所的なエリアに存在するアドホックネットワークにおいて、データの可用性を向上させる複製伝播手法を提案する。提案手法では、文献 [4, 5] で提案されている、データ転送のために移動する特別な端末（ロボット）を導入し、複製の伝播に利用する。また、活動領域間の距離や、各端末が保持するデータやアクセス要求を考慮して、ロボットの移動経路を決定することで、複製の伝播を効果的に行う。

以下では、2章で関連研究について述べる。3章で本稿の想定環境について述べ、4章で本稿で提案する複製伝播手法について説明する。5章で性能評価について述べ、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

文献 [1] において、アドホックネットワークにおける接続性の向上を目的とした SFP (Store and Flood Protocol) が提案されている。SFP では、端末間の経路探索を行わず、直接データパケットをフラッディングする。また、フラッディングの際に、パケットを受信した端末がそのパケットを一定時間蓄積しておき、新たに接続した端末にも転送する。具体的には、データパケットに生存時間を設定し、生存時間が経過するまで各端末がパケットを蓄積し、フラッディングを続ける。図 1 に、SFP におけるデータ転送の例を示す。まず、上側のトポロジにおいて、端末 M_4 宛のデータ D_1 を保持している端末 M_1 は、データパケットをフラッディングする。このパケットを受信した端末 M_2 と M_3 は、 D_1 を一定時間蓄積しておく。その後、トポロジ変化により、端末 M_2 と M_4 が接続した場合、端末 M_2 は、蓄積していたデータ D_1 を端末 M_4 へ送信する。SFP は、各端末が、一定時間データを蓄積しながらフラッディングを行うことで、通信開始時にネットワークが分断されていても、端末の移動によってパケットを物理的に転送できる。しかし、全ての端末が領域内を自由に移動する環境を想定しているため、端末が局所的に存在する環境では、データの転送が満足に行えない可能性がある。

一方、文献 [4, 5] において、メッセージフェリーと呼ばれる端末が、領域内を移動し、データを転送する手法が提案されている。メッセージフェリーは、領域内を巡回し、接続した端末が保持するデータを受信する。その後、端末の位置情報とデータの生存時間に基づいて、決定した移動経路上を移動し、他端末にデータを転送する。メッセージフェリーを導入することによって、端末が局所的に存在する環境においても、データを効果的に転送できるものと考えられる。しかし、文献 [4, 5] で提案されている手法は、データ転送の到達率向上を目的としており、複製を配置する環境において、データの可用性を向上させることはできない。

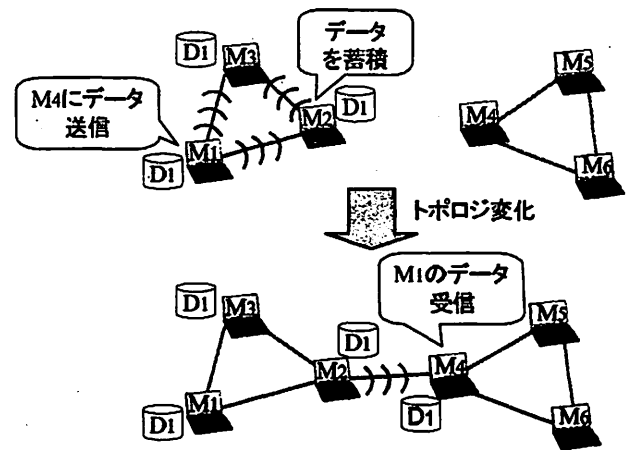


図 1: SFP におけるデータ転送

3 想定環境

本稿では、各端末が、自身または他の端末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。各端末は、自身の記憶領域にデータの複製を配置し、自身や他の端末がもつデータや複製にアクセスする。

想定環境の詳細を以下に示す。

1. 領域内には、 a 個のエリア (A_1, \dots, A_a) が存在する。各エリアは、注目点 (P_1, \dots, P_a) を中心とする半径 R の円とし、その位置は既知とする。
2. m 個の端末 (M_1, \dots, M_m) が存在し、各端末が定められたエリア内のみを移動する。また、各端末が存在するエリアは既知とする。
3. サイズの等しい m 個のデータ (D_1, \dots, D_m) が存在し、データ D_j は、端末 M_j にオリジナルデータとして保持される。簡単化のため、全てのデータのサイズは等しく、データの更新は発生しないものとする。
4. 各端末がデータを要求する時、自身のデータ領域にそのデータ (複製) が存在すれば、アクセスは即座に成功する。そうでない場合、アクセス要求を生成し、SFP に基づいてフラッディングする。データを保持する端末がアクセス要求を受信した場合、SFP に基づいて要求元にデータを返送する。要求元端末が、アクセス要求の生存時間内にデータを取得できなかった場合、アクセスは失敗となる。

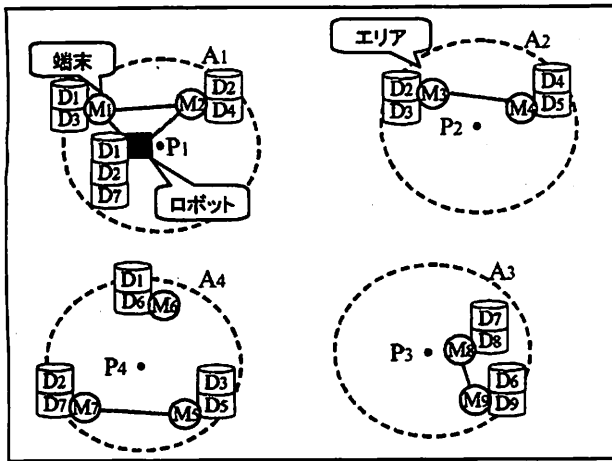


図 2: 想定環境の一例

5. 1つのロボットが存在し、エリア間を巡回する。また、SFPに基づいて、パケットの送受信および蓄積を行う。
6. 各端末とロボットは、それぞれデータ c_t 個、 c_r 個分の記憶領域をもち、データ（複製）を配置する。ここで、アクセス要求はデータと比較してサイズが非常に小さいものと考えられる。そのため、各端末およびロボットのアクセス要求保持数に制限はないものとする。

図 2 に、本稿で想定する環境の一例を示す。図において、白丸は端末を表し、黒色の四角はロボットを表す。また、4つの注目点 (P_1, \dots, P_4) を中心としたエリア (A_1, \dots, A_4) が存在し、各端末が、自身の存在するエリア内のみを移動する。

4 提案手法

本章では、本稿で提案する複製伝播手法について述べる。提案手法では、文献 [4, 5] と同様、データ転送のために移動するロボットを導入し、複製の伝播に利用する。また、ロボットが、エリア間の距離や、各端末が保持するアクセス要求およびデータをもとにして、自身の移動経路を決定する。

4.1 端末情報の管理

各端末は、ロボットとの接続時に、SFPに基づいて、自身のもつデータの情報およびアクセス要求を送信する。ロボットは、端末から受信したデータの識別子とアクセス要求を、端末情報として保持する。図 3 に、図 2 のロボットが管理する端末情報を示す。図 3 において、データリストは、各端末が保

データリスト		アクセス要求リスト	
端末	データ	端末	データ
M1	D1 D3	M1	D3 D5
M2	D2 D4	M2	D6
M3	D2 D3	M3	D1 D6
M4	D4 D5	M4	D7
M5	D3 D5	M5	D4 D8 D9
M6	D1 D6	M6	
M7	D2 D7	M7	D4
M8	D7 D8	M8	D2 D5
M9	D6 D9	M9	D3 D4

図 3: ロボットの管理する端末情報

持するデータの識別子を表し、また、アクセス要求リストは、各端末のアクセス要求を表す。

4.2 ロボットの移動方法

ロボットは、領域内の注目点を巡回する。ここで、ロボットが端末数やアクセス要求数が多いエリアを訪問すると、多くの端末がデータにアクセスできるものと考えられる。しかし、これらのみを考慮してロボットの移動経路を決定すると、端末数やアクセス要求数が少ないエリアに存在する端末がデータにアクセスできず、データの可用性が極端に低下してしまう可能性がある。そのため、提案手法では、以下に示す 2通りの移動方法を定義する。

- 巡回移動
全ての注目点を巡回する経路のうち、巡回経路の距離が最も小さいものを移動する。
- 選択移動
エリアごとの端末数やアクセス要求数、およびエリア間の距離を考慮して、移動経路を決定する。

4.2.1 選択移動

提案手法では、以下の事項について考慮し、選択移動時のロボットの移動経路を決定する。

1. エリア間距離
エリア間の距離が大きくなると、エリア間の移動時間が増大し、各エリアを訪問する頻度が減少する。また、生存時間内にデータを転送する機会が減少するものと考えられる。
2. アクセス要求数
エリア内の端末が保持するアクセス要求数が

多い場合、ロボットがそのエリアを訪問することで、端末が多くデータのアクセスできるものと考えられる。

3. 保持データ

ロボットが保持するデータのうち、訪れたエリアに存在しないものが多いほど、そのエリア内の端末が新たに得られるデータ数が多くなる。

ロボットは、 λ ($\lambda \leq a$) 個の注目点を通るごとに、現在地を除く λ 個の注目点を通る全ての経路を生成する。その後、以下に示す手順に従って、各経路 $R = \{P_{r1}, \dots, P_{r\lambda}\}$ の評価値を求め、評価値が最大となる経路を、自身の移動経路とする。

予測保持データの生成

経路上の各注目点 P_{ri} ($i = 1, \dots, \lambda$) を通過したとき、ロボットが保持していると予測されるデータを、予測保持データとして求める。ここで、ロボットは、1つ前に訪問した注目点 $P_{r(i-1)}$ を中心とするエリア $A_{r(i-1)}$ に存在する端末が保持するデータを保持している可能性が高いものと考えられる。そのため、 P_{ri} 通過時の予測保持データは、 $A_{r(i-1)}$ に存在するデータとする。各エリアに存在するデータは、4.1節で述べた端末情報から生成する。エリア $A_{r(i-1)}$ 内のデータ数がロボットの記憶領域よりも大きい場合、そのエリア内のアクセス頻度が高いデータを優先的に保持する。また、エリア内のデータ数がロボットの記憶領域よりも小さい場合、さらに前に訪問するエリアに存在するデータを、予測保持データに追加する動作を繰り返す。

例えば図4において、エリア A_1 に存在し、データ5個分の記憶領域をもつロボットが経路 $\{P_2, P_3\}$ をとる場合、 P_2 通過時の予測保持データは、 A_1 内に存在する $\{D_1, D_2, D_3, D_4, D_7\}$ となる。また、 P_3 通過時の予測保持データは、 A_2 内に存在する $\{D_1, D_2, D_3, D_4\}$ 、および A_1 内で最もアクセス頻度の高いデータとなる。

予測アクセス数の算出

P_{ri} を通過したときに、エリア A_{ri} 内に存在する端末が、予測保持データにアクセスすると予測される回数を、そのエリアの予測アクセス数として求める。

例えば図4において、ロボットが P_2 を通過したとき、エリア A_2 に存在する端末 M_3 および M_4 は、

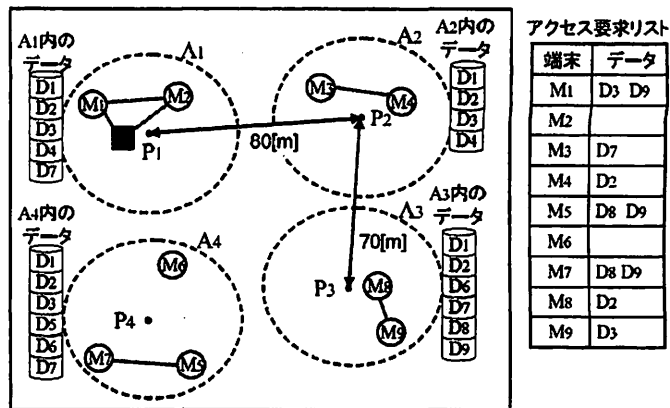


図4: 移動経路の決定例

予測保持データ内の D_2 および D_7 にアクセスするものと予測される。そのため、エリア A_2 の予測アクセス数は2となる。同様に、エリア A_3 に存在する端末 M_8 および M_9 は、 D_2 および D_3 にアクセスすると予測されるため、予測アクセス数は2となる。

経路の評価値 E の算出

ロボットは、次式によって経路の評価値 E を算出する。

$$E = \frac{\text{総予測アクセス数}}{\text{経路距離}}$$

上記の総予測アクセス数は、経路上の全エリアの予測アクセス数の総和である。一方、経路距離は、生成した経路全体の距離である。

例えば図4における経路 $\{P_2, P_3\}$ の評価値は、エリア間の距離および上述した予測アクセス数を用いて、 $(2+2)/(80+70)=0.0267$ となる。

4.2.2 移動方法の切り替え

ロボットは、前節で述べた選択移動を行うことで、自身が保持するデータがより多くアクセスされるエリアに頻繁に移動する。そのため、端末数やアクセス要求数が少ないエリアは、ロボットの移動先として選択されにくくなり、このエリアにおけるデータの可用性が著しく低下してしまう可能性がある。この問題を避けるため、ロボットは、選択移動を α 回行った後、自身の移動方法を巡回移動に切り替え、全エリアを一度ずつ巡回する。

5 性能評価

本章では、提案手法の性能を評価するために行ったシミュレーション実験の結果を示す。シミュレー

シミュレーション実験では、ロボットの移動方法として、選択移動と巡回移動を行う場合と、巡回移動のみを行う場合における性能を比較した。

5.1 シミュレーション環境

1,000[m] × 1,000[m] の2次元平面上に、40個 (M_1, \dots, M_{40}) の端末と1つのロボットが存在する。領域内には、10個 (P_1, \dots, P_{10}) の注目点を中心とする半径100[m]のエリア (A_1, \dots, A_{10}) が存在する。エリア A_i ($i = 1, \dots, 10$) に存在する端末数は、 $\frac{i^2}{\sum_{i=1}^{10} i^2}$ の割合に従って決定した。端末は、エリア内を1.0[m/秒]の速さでランダムに移動するものとし、ロボットの速さを10[m/秒]とした。端末とロボットの無線通信範囲は、半径60[m]の円とした。

ネットワーク内には、40種類のデータ (D_1, \dots, D_{40}) が存在し、 D_j ($j = 1, \dots, 40$) は M_j にオリジナルデータとして保持されるものとした。端末およびロボットが保持できるデータ数は、それぞれ $c_t = 8, c_r = 15$ とした。各端末は、 A_i 内に存在するデータに、平均 $1,200 \cdot (11-i)$ [秒] の指数分布に従う間隔でアクセスするものとした。また、複製の置き換えはLRU方式に従うものとした。選択移動時のパラメータは、 $\lambda = 4, \alpha = 2$ とし、シミュレーション時間は500,000[秒]とした。

以上の環境において、シミュレーションを20回試行した時の、提案手法の性能を評価した。

5.2 評価項目

シミュレーション実験では、次の2つの値を評価した。

1. データアクセス成功率
発生した全てのアクセス要求に対する、アクセスが成功した回数の割合。
2. 遅延時間
アクセスが成功するまでに要する時間の平均値。

5.3 評価結果

パケットの生存時間を変化させた場合のシミュレーション結果を図5、図6に示す。各グラフの横軸はパケットの生存時間、縦軸はそれぞれデータアクセス成功率、遅延時間を表す。

図5の結果より、両手法において、パケットの生存時間が大きいほど、データアクセス成功率が増加することが分かる。これは、パケットが長期間蓄積

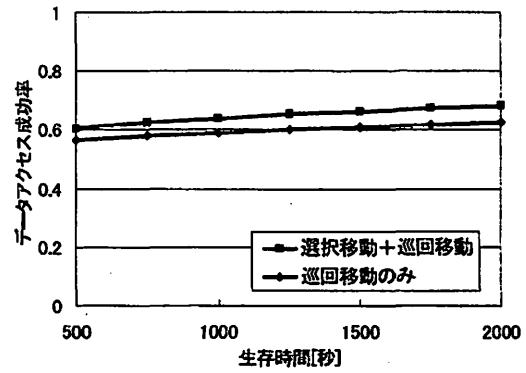


図 5: データアクセス成功率

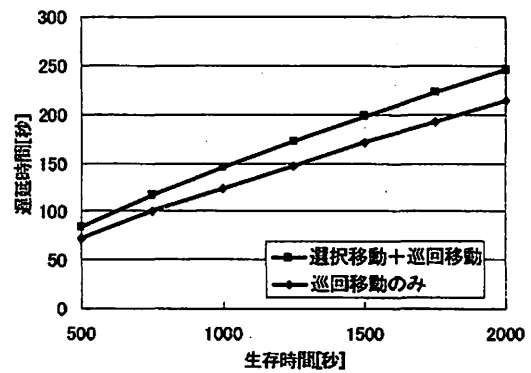


図 6: 遅延時間

されることで、端末が多くのデータにアクセスする機会が増加するためである。また、パケットの生存時間に関わらず、選択移動を行う場合のデータアクセス成功率が、巡回移動のみの場合より大きいことが分かる。これは、ロボットが効果的に移動することで、端末がロボットの保持するデータにアクセスする機会が増加するためであると考えられる。

図6の結果より、両手法において、パケットの生存時間が大きくなるほど、遅延時間が増加することが分かる。これは、端末が長期間データを蓄積することで、より古いデータにアクセスする機会が増加するためであると考えられる。また、パケットの生存時間に関わらず、選択移動を行う場合の遅延時間が巡回移動のみの場合より増加している。これは、選択移動を行うことで、各端末が、長期間蓄積されるデータにもアクセスできるためであると考えられる。

6 まとめ

本稿では、局所性のあるアドホックネットワークにおいて、データ可用性を向上させる複製伝播手法を提案した。提案手法では、データ転送のために移動する特別な移動端末（ロボット）を導入し、複製の伝播に利用する。また、各エリアのアクセス要求数、保持データおよび移動距離を考慮してロボットの移動経路を決定する。さらに、シミュレーション実験により、ロボットの移動経路を制御することによって、データアクセス成功率が向上することを確認した。

今後は、ロボットにおいて効果的に複製を配置する手法について検討する予定である。また、複数のロボットが存在する環境において、ロボットを協調的に動作させる方法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」、文部科学省科学技術振興調整費先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト、文部科学省若手研究 (A)(16680005)、および基盤研究 (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] 萩野 浩明, 原 隆浩, 塚本 昌彦, 西尾章治郎, “アドホックネットワークのための蓄積型フラッディングプロトコル,” 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.9, pp.2445-2454 (2000).
- [2] 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).
- [3] A. Vahdat, and D. Becker, “Epidemic Routing for Partially-connected Ad Hoc Networks,” *Technical report, Duke University* (2000).
- [4] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zugura, “A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proc. ACM Int'l Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2004)*, pp.187-198 (2004).
- [5] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zugura, “Controlling the Mobility of Multiple Data Transport Ferries in a Delay-Tolerant Network,” in *Proc. IEEE Infocom 2005*, Vol. 2, pp.1407-1418 (2005).