

# アドホックネットワークにおける プッシュ型配送データの協調キャ ッシング方式

## Cooperative Caching Strategies of Push- based Delivery Data in Ad Hoc Networks

原 隆浩<sup>△</sup>

Takahiro HARA

近年、データ放送を用いたプッシュ型情報システムに対する注目が高まっている。本論文では、移動体をクライアントとするプッシュ型情報システムを想定し、クライアントがアドホックネットワークを構成して協調的に放送アイテムをキャッシュする方式を提案する。提案方式では、移動体の各アイテムへのアクセス頻度、ネットワークの接続状態、および各アイテムの次の放送までの時間を考慮してキャッシュの置換えを決定することで、データアクセスの応答時間の短縮を図る。さらに、シミュレーション評価によって、提案方式の有効性を検証する。

Recently, there has been increasing interest in push-based information systems in which a server repeatedly broadcasts data to clients using a broadband channel. In this paper, assuming an environment where clients in push-based information systems are mobile hosts, we propose three caching strategies in which clients construct ad hoc networks and cooperatively cache broadcast data items. These strategies shorten the average response time for data access by replacing cached items based on access frequencies to the items, the network topology, and the time remaining until each item is broadcast next. We also show simulation results for performance evaluation.

### 1. はじめに

近年、地上波放送や衛星放送などの無線通信技術の発展により、サーバがさまざまなデータアイテムを周期的に放送することでクライアントにデータを配送するプッシュ型情報システムに対する注目が高まっている[1,2]。プッシュ型情報システムでは、サーバからの1回の放送によって複数のクライアントのデータ要求を満たすため、クライアント数が増加してもサーバやネットワークの負荷が増加しない。したがって、クライアント数が多い分散システムにおいて、データアクセスのスループットの向上が期待できる。プッシュ型情報システムの応用例としては、ショッピングセンターにおける広告配布や、駅周辺の公共交通機関情報配布など、携帯端末(移動体)を所有しているユーザを対象とするものが多い。

一方、移動体にルータの機能をもたせて、移動体のみの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

関する注目も高まっている[3,7]。アドホックネットワークでは、無線通信範囲の制限から直接パケットを送受信できない移動体間において、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実現する。アドホックネットワークは、特別なインフラを必要とせず手軽に構築できることから、軍事や商業などの分野において様々な応用が期待されている。

このように、移動体計算環境における基盤技術として、プッシュ型情報システムとアドホックネットワークが注目されており、これらに関する研究が盛んに行われている[4,5,6,8,9]。しかし、このような高い注目にも関わらず、両者を同時に想定した研究はこれまでに行われていない。つまり、プッシュ型情報システムのクライアントである移動体がアドホックネットワークを構築することは想定されていない。しかし、アドホックネットワークでは、相互接続している他の移動体が保持しているデータにもアクセスできるため、移動体間での共有を考慮して放送アイテムをキャッシュすることで、データアクセスの応答時間を短縮できる。

そこで本論文では、プッシュ型情報システムにおいて、クライアントである移動体が相互接続している他の移動体と協調して放送アイテムをキャッシュする方式を提案する。なお、本論文では、1ホップ以上の通信路によって相互に通信可能な移動体を「相互接続している」と定義する。想定環境の例としては、仲間同士で行動しているユーザが街中で放送されている周辺情報を受信する場合や、発掘調査を行っている研究チームがサブチームに分かれて行動し、気象情報や全サブチームの調査データが放送サーバにより放送されている場合などが考えられる。

本論文の以下の部分では、2章で提案方式について説明し、3章で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す。4章で考察を行い、最後に5章で本論文のまとめとする。

## 2. アドホックネットワークを構成する移動 体による協調型キャッシング方式

### 2.1 想定環境

本論文では、図1のように、プッシュ型情報システムにおいて、アドホックネットワークを構築する移動体間で協調して放送アイテムをキャッシュする環境を想定する。各アイテムに対するアクセス要求は、アクセス対象のアイテムを自身がキャッシュしていれば即座に成功する。自身がキャッシュしていない場合、そのアイテムの次の放送を待つよりも他の移動体のキャッシュアイテムにアクセスの方が応答時間が短いときには、ネットワーク内にアクセス要求をブロードキャストする。相互接続された移動体のいずれかがそのアイテムをキャッシュしていたとき、その移動体から要求アイテムを受信し終わった時点で、アクセスは成功する。それ以外は、そのアイテムが次に放送されるまで待つものとする。

想定環境の詳細を以下に示す。

- サーバは、 $m$ 種類のデータアイテム( $D=\{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ )を、各々の周期を $T_i$  ( $i=1, \dots, m$ )として放送する。各データアイテムのサイズは、等しく $|D|$ とする。
- $m$ 個の移動体( $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ )がクライアントとして存在し、各々が自由に移動する。
- 各移動体は、放送アイテムをキャッシュするために、アイテム $C$ 個分のデータ記憶領域をもつ。
- データの更新は発生しない。

<sup>△</sup> 正会員 大阪大学大学院情報科学研究科

[hara@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:hara@ist.osaka-u.ac.jp)

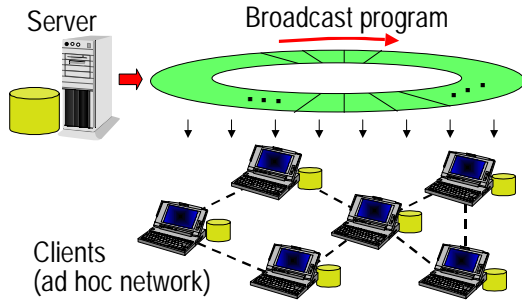


図1 想定するプッシュ型情報システム  
Fig.1 Assumed push-based information system

2.2 キャッシング方式

想定環境では、移動体が自由に移動するため、アイテム放送時にあらかじめ最適な置換えを知ることは不可能である。そこで本論文では、ヒューリスティックなアプローチとして、各データアイテムの放送時に、その時点でのネットワークポロジを考慮してキャッシングの置換えを行う。このようなアプローチに基づいたキャッシング方式として、次の3つの方式を提案する。これらの方式では、各アイテム放送時に、ある移動体の集合に対して、その時点のアクセスの平均応答時間が最も短くなるようにキャッシングの置換えを決定する。3方式は、置換えを決定する移動体の集合がそれぞれ異なる。

1. LOP(Local OPTimal)方式: 自身のみ。
2. GOP(Global OPTimal)方式: 相互接続している全移動体。
3. SOP(Stable group OPTimal)方式: 相互接続している移動体のうち安定度の高い集合。

2.2.1 LOP方式

サーバからの放送帯域を $B$ 、アイテム $D_j$ の次の放送開始までの時間を $L_j$ 、移動体間の無線通信帯域を $b$ とする。このとき、 $D_j$ に対するアクセス要求を、 $D_j$ の次の放送まで待つことで満たす場合の応答時間 $r_1(D_j)$ は、次式で表わされる。

$$r_1(D_j) = L_j + \frac{|D|}{B} \quad (1)$$

まず、各移動体 $M_i$ のアイテム $D_j$ に対するPR値と呼ぶ評価値を $P_{i,j} \cdot r_1(D_j)$ と定義する。ここで、 $P_{i,j}$ は移動体 $M_i$ のアイテム $D_j$ に対する単位時間あたりのアクセス確率(アクセス頻度)である。PR値は、その瞬間における、キャッシング内に $D_j$ を持たないことによる平均応答時間の増加分を表している。

LOP方式では、各移動体において、各アイテム $D_x$ の放送時に、 $D_x$ と自身がキャッシングしているアイテムについて、PR値を計算する。放送されるアイテム $D_x$ のPR値が、キャッシングしているアイテムのPR値の最小値よりも大きい場合は、PR値が最小値となるアイテムをキャッシング内から削除し、 $D_x$ をキャッシングする。

LOP方式では、他の移動体との情報交換の必要がないため、オーバーヘッドが小さい。さらに、アイテムに対するアクセス頻度や放送プログラムが変化しない限り、周期的に同じアイテムの置換えが発生するため、実際はアイテムの放送時にPR値を計算して比較する必要はない。そのため、キャッシングの置換えの計算量も $O(1)$ と小さい。

一方、同様のアクセス特性をもつ複数の移動体では同じアイテムをキャッシングしてしまうため、同様のアクセス特性をもつ移動体が多い場合に応答時間が長くなる。

2.2.2 GOP方式

LOP方式の問題点を解決するために、GOP方式では、相互接続された移動体間でのキャッシングアイテムの共有を考慮したキャッシングの置換えを行う。

移動体 $M_i$ の $D_j$ に対するアクセス要求を、自身と相互接続している移動体(自身を含む)がキャッシングしているデータアイテムにアクセスすることで満たす場合の応答時間 $r_2(M_i, D_j)$ は、次式で表わされる。ここでは、簡単のため、移動体間の通信の伝播遅延および処理遅延は無視できるほど小さいものと仮定する。

$$r_2(M_i, D_j) = \begin{cases} 0 & (\text{自身がキャッシング}) \\ |D|/b & (\text{他の移動体がキャッシング}) \\ \infty & (\text{キャッシングアイテムなし}) \end{cases} \quad (2)$$

したがって、移動体 $M_i$ のデータアイテム $D_j$ に対するアクセス要求の応答時間 $r(M_i, D_j)$ は次式で与えられる。但し、式中のMinは、引数のうち最も値の小さいものを返す関数である。

$$r(M_i, D_j) = \text{Min}(r_1(D_j), r_2(M_i, D_j)) \quad (3)$$

LOP方式では、式(3)を用いて、次のようにキャッシングの置換えを行う。

1. データアイテム $D_x$ の放送直前に、各移動体は自身の識別子およびキャッシングしているアイテムの識別子をブロードキャストする。すべての移動体のブロードキャストが終了すると、各移動体は受け取った識別子の情報から、自身と相互接続している移動体を知ることができる。
2. 識別子 $M_i$ の添字 $i$ が最も小さい移動体 $M_{c_0}$ が、相互接続しているすべての移動体( $M' = \{M_{c_0}, \dots, M_{c_m}\}, m \leq m$ )における可能なキャッシング置換えの全組合せの中から、次式の値が最も小さくなる組合せを発見する。

$$\text{Res} = \frac{\sum_{M_i \in M'} \sum_{D \in D} P_{i,j} \cdot r(M_i, D_j)}{\sum_{M_i \in M'} \sum_{D \in D} P_{i,j}} \quad (4)$$

この式は、相互接続している移動体の集合におけるデータアクセスの平均応答時間を表している。

3. 発見した最適な組合せに基づいて、 $M_{c_0}$ が、相互接続している移動体に対して、キャッシングの置換えを指示する。
4. 各移動体は、 $D_x$ の放送時に、 $M_{c_0}$ からの指示に基づいて、キャッシングの置換えを行う。

この方式では、アイテムの放送ごとに相互接続している隣接移動体間での情報交換が行われるため、LOP方式に比べてオーバーヘッドが大きい。さらに、手順2の計算量は最悪で $O(|M'| \cdot |D| \cdot (C+1)^{|M'|})$ となるため、キャッシングサイズや相互接続している移動体数が大きい場合には、実時間内に計算が終了しない。そこで、GOP方式では、 $(C+1)^{|M'|}$ の値が閾値 $t$ を超える場合には、手順2を計算量の小さいものに変更する。具体的には、放送アイテム $D_x$ のアクセス頻度が高い移動体から順に、 $D_x$ をキャッシングする方がシステム全体の応答時間が短縮する場合は $D_x$ をキャッシングするように決定する。変更後の手順2の計算量は、最悪で $O(|M'| \cdot C)$ となる。実環境では、 $t$ は計算機の性能などによって決定する。

2.2.3 SOP方式

GOP方式では、相互接続しているすべての移動体を考慮し

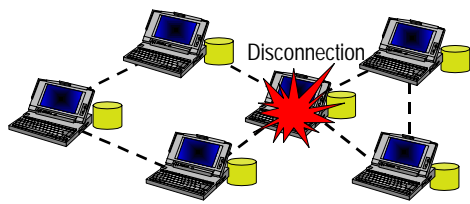


図2 断線の影響  
Fig.2 Influence of disconnection

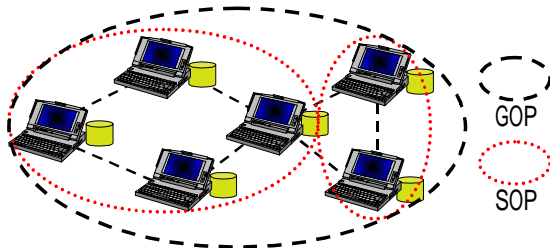


図3 GOP方式とSOP方式におけるグループ  
Fig.3 Groups in GOP and SOP strategies

てキャッシュの置換えを行うが、ネットワークの分断が起きやすい状況では、それが逆に悪い影響を与えることもある。例えば、移動体が図2のようなアドホックネットワークを構成している場合、GOP方式でキャッシュを配置した後、中央の移動体が断線してしまうと、ネットワークが分断してしまい、反対側の移動体もつキャッシュアイテムにアクセスできなくなる。

そこで、SOP方式では、相互接続している移動体のうちで、安定度の高いグループのみで協調したキャッシングを行う。具体的には、GOP方式の手順1と手順2の間で、識別子 $M_i$ の添字 $i$ が最も小さい移動体 $M_{i_0}$ から、ネットワークの2連結成分を発見するアルゴリズムを実行し、その結果発見された2連結成分をグループとする。ただし、2つ以上の2連結成分に含まれる移動体は、最初に発見された2連結成分のグループに含まれるものとする。その後、各グループにおいて、添字の最も小さい移動体から、GOP方式の手順2以下が実行される。

2連結成分をグループ化することで、1つの移動体がネットワークから離脱したり1つの無線リンクが切断してもグループが分断されないため、より効果的なキャッシュの置換えを行える。GOP方式およびSOP方式における、協調してキャッシングを行う移動体のグループの違いを図3に示す。

### 3. シミュレーション評価

#### 3.1 シミュレーションモデル

サーバは、1000種類のデータアイテム( $D_1, \dots, D_{1000}$ )を、等しい周期で、アイテム識別子の添字の昇順に放送している。500×500mの平面上に、40の移動体( $M_1, \dots, M_{40}$ )がクライアントとして存在する。各移動体は、ランダムウェイポイントモデル[4]に基づいて移動する。このモデルでは各移動体は、ランダムに決定した二次元平面内のある地点に向けて、0~ $V$ の範囲でランダムに決定した速度で直線的に移動する。目的の地点に到達した後は、時間 $S$ だけ休止する。休止時間の終了後は、再び上記のような移動を開始する。各移動体の無線通信範囲は、半径 $R$ の円とする。各移動体 $M_i$ の $D_j$ へのアクセス頻度は $P_{ij}=0.5$ とする。したがって、すべての移動体が同一のアクセス特性をもち、各データへのアクセス頻度も等しい。

表1 パラメータ設定  
Table 1 Parameter configuration

パラメータ	値	
$B$	100	[Mbps]
$b$	1	[Mbps]
$ D $	8	[Mbytes]
$V$	10	[m/秒]
$S$	1	[秒]
$R$	50	[m]
$C$	0~1000	[アイテム]
$t$	$10^6$	

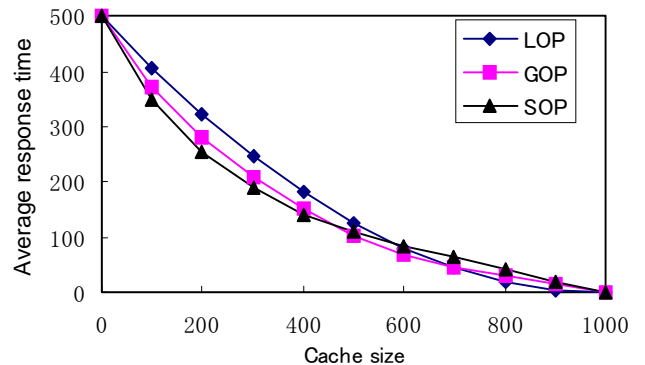


図4 シミュレーション結果  
Fig.4 Simulation results

表1に、シミュレーションで用いるパラメータ値を示す。これらのパラメータは、実環境を想定した適当な値を用いている。 $t=10^6$ は、協調してキャッシングを行う移動体数が2以下の場合に、式(4)を用いて総当たりに最適な組合せを発見することを表している。

シミュレーション実験では、1単位時間を1秒とみなし、1,000秒を経過させたときの、提案方式の平均応答時間を比較する。各移動体には、初期状態として、アイテム $D_{1001-C}, \dots, D_{1000}$ がキャッシュされているものとする。

#### 3.2 シミュレーション結果

キャッシュサイズの3方式への影響を調べた結果を、図4に示す。図では、横軸がキャッシュサイズ $C$ 、縦軸がデータアクセスの平均応答時間(秒)を表している。

この結果から、すべての方式において、キャッシュサイズが大きくなると多種類のアイテムをキャッシュできるため、応答時間が短くなっている。3方式を比べると、キャッシュサイズが放送アイテムの総サイズの半分以下程度の際には、SOP方式が最も短い応答時間を示している。しかし、キャッシュサイズがそれ以上のときには、GOP方式の方が応答時間が短くなる。また、キャッシュサイズが非常に大きいときには、LOP方式が最も良い結果を示している。キャッシュサイズが小さいときには、有効性の高い多種類のアイテムをキャッシュできる協調型の2方式の効果が見られるが、キャッシュサイズが大きい場合には、有効性の低いアイテムもキャッシュに残ってしまう。有効性の低いアイテムをキャッシュさせられた移動体がグループから分断すると、その移動体のアクセス要求の平均応答時間は非常に大きくなるため、全体としてLOP方式より結果が悪くなる。特に、協調してキャッシングを行う移動体のグループが小さいSOP方式では、GOP方式よりグループ数が多くなり、非効率な置換えを強いられ

る移動体数も多いため、キャッシュサイズが非常に大きいときに最も性能が悪くなる。

## 4. 考察

### 4.1 計算時間と通信時間

提案した3方式のうちで、LOP方式は $O(1)$ の計算時間でキャッシュの置換えを決定でき、他の移動体と情報交換を行う必要がない。そのため、1つのアイテムの放送に要する時間に関係なく、あらゆるアプリケーションに適用可能である。しかし、GOP方式とSOP方式は、キャッシュの置換えを決定するのに要する計算時間がLOP方式よりも大きい。1アイテムの放送時間が短く、移動体数やキャッシュサイズが大きいときには、アイテムの放送毎にキャッシュの置換えを決定できない可能性がある。さらに、相互接続している移動体間で情報交換が必要なため、これらの通信時間が1アイテムの放送時間より長くなる場合も、キャッシュの置換えを決定できない。特にSOP方式は、2連結成分の発見のために通信回数が多くなるため、その可能性が高くなる。

このような問題の解決法として、ネットワークポロジのチェックをアイテムの放送ごとではなく、より長い間隔で定期的に行うことが考えられる。この場合、キャッシュの置換え決定時には、他の移動体と情報交換が必要ないため、ユーリスティックに計算を行えば、ほぼアイテムの放送毎に置換えを決定できる。定期的にしかならなければ性能が劣化することが考えられるが、移動体の移動頻度や要求されるシステム性能に応じて、トポロジチェックの周期を決定することで、この問題をある程度は緩和できる。

### 4.2 放送プログラムとアクセス特性の変化

本論文では、サーバからの放送プログラムと各クライアントのアクセス特性が時間的に変化しないことを想定したが、実環境ではこれらが変化することが一般的である。そのため、提案方式を実環境で用いる場合には、これらの変化を検出して、キャッシュ置換えの計算に反映する仕組みが必要になる。

放送プログラムの変更を各クライアントに知らせる方法としては、放送プログラムの各サイクルの先頭に、プログラムの変更情報を記載することが一般的である。一方、アクセス特性の変化の検出法としては、各クライアントがアクセスに関するログ情報を記録しておき、それを定期的に解析することで、最近のアクセス特性を調べる方法が一般的である。このような方法を提案方式に適用することで、提案方式を実環境に適用することが可能になる。

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、プッシュ型情報システムにおいてアドホックネットワークを構成するクライアントが協調して放送アイテムをキャッシュする方式として、LOP方式、GOP方式、SOP方式の3方式を提案した。

シミュレーション評価により、キャッシュサイズの各方式への影響を調べた。また、さまざまな環境を想定したシミュレーション評価を行った結果、ほとんどの場合でSOP方式が最も応答時間を短縮できることを確認した。これらの結果については、紙面の都合上、本論文では紹介しない。一方、LOP方式は応答時間が最も長くなるが、他の移動体と情報交換を行う必要がないため、オーバーヘッドが最も小さい。実環境では、システムの特徴を考慮して、3方式の中から適切な方式を選択する必要がある。

今後は、提案方式を実システム上に実装し、キャッシュの置換えのための情報交換や、置換え決定のための計算のオーバーヘッドについて調べる必要がある。さらに、データ更新が起こる環境を想定して、効率的なキャッシュの置換え戦略やキャッシュの無効化戦略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、文部科学省特定領域研究(14019063)、文部科学省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。

### [文献]

- [1] Acharya, S., Alonso, R., Franklin, M., and Zdonik, S.: "Broadcast disks: Data management for asymmetric communication environments", Proceedings of ACM SIGMOD Conference, pp.199-210 (1995)
- [2] Acharya, S., Franklin, M., and Zdonik, S.: "Dissemination-based data delivery using broadcast disks", IEEE Personal Communications, Vol.2, No.6, pp.50-60 (1995)
- [3] Baker, D.J., Wieselthier, J., and Ephremides, A.: "A distributed algorithm for scheduling the activation of links in a self-organizing, mobile, radio network", Proceedings of IEEE ICC'82, pp.2F6.1-2F6.5 (1982)
- [4] Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.C., and Jetcheva, J.: "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols", Proceedings of Mobicom'98, pp.159-164 (1998)
- [5] Hameed, S. and Vaidya, N.H.: "Log-time algorithms for scheduling single and multiple channel data broadcast", Wireless Networks, Vol.5, No.3, pp.183-193 (1999)
- [6] Hara, T.: "Effective replica allocation in ad hoc networks for improving data accessibility", Proceedings of IEEE Infocom 2001, pp.1568-1576 (2001)
- [7] Perkins, C.E. and Bhagwat, P.: "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers", Proceedings of ACM SIGCOMM'94, pp.234-244 (1994)
- [8] Perkins, C.E. and Royer, E.M.: "Ad hoc on demand distance vector routing", Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.90-100 (1999)
- [9] Su, C.J., Tassiulas, L., and Tsotras, V.J.: "Broadcast scheduling for information distribution", Wireless Networks, Vol.5, No.2, pp.137-147 (1999)

### 原 隆浩 Takahiro HARA

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助手。1997年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。工学博士。1996年情報処理学会山下記念研究賞受賞。2000年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。データベースシステム、モバイルコンピューティングに関する研究・開発に従事。IEEE、情報処理学会、電子情報通信学会、日本データベース学会の各会員。