

アドホックネットワークにおける不定期データ更新とユーザの 行動スケジュールを考慮した複製配置

原 隆浩* Sanjay Kumar Madria**

*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: hara@ist.osaka-u.ac.jp

**Dept. of Computer Science, University of Missouri-Rolla

E-mail: madrias@umr.edu

アドホックネットワークにおけるデータアクセスの成功率の向上を目的として、これまでにいくつかの複製配置方式が提案されている。本稿では、これらの方式のより一般的な拡張として、データ更新が不定期に発生する環境に適した複製配置方式を提案する。また提案方式では、実環境ではユーザが何らかのスケジュールに従って行動することが多い事実に基づいて、複製配置の際にユーザの行動スケジュールも考慮する。さらに本稿では、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。

キーワード: アドホックネットワーク, 複製配置, データ更新, 行動スケジュール

Replica Allocation Considering Aperiodic Data Update and User Schedule in Ad Hoc Networks

Takahiro Hara* Sanjay Kumar Madria**

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

**Dept. of Computer Science, University of Missouri-Rolla

Several replica allocation methods have been proposed for ad hoc networks. We improve upon these existing replication methods by considering aperiodic updates. The extended methods also take into account user profiles consisting of mobile users' mobility schedules, access behavior and read/write patterns. We show results of simulation experiments regarding performance evaluation of our extended methods.

Keywords: ad hoc network, replica allocation, data update, user schedule

1 まえがき

近年の無線・有線における通信技術の発展により、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、移動体の移動によってネットワークトポロジが変化し、ネットワークの分断が頻繁に発生する。ネットワーク分断後は、分断した移動体集合のもつデータにアクセスできなくなるため、アドホックネットワークにおけるデータアクセ

スの成功率は、従来の固定ネットワークよりも低くなる。今後のアドホックネットワークの普及を考慮すると、ネットワーク分断時におけるアクセス性効率の低下を防ぐことは、重要な課題である。しかし、これまでのアドホックネットワークの研究は、IETF (Internet Engineering Task Force) を始めとして、通信パケットのルーティングに関するものがほとんどである [7, 8, 9, 10]。

分散データベースの研究分野では、これまでに多くの複製配置方式が提案されているが [11, 12, 13],

これらはノードの移動は考慮していない。一方、移動体が無線通信を用いて基地局に接続する通常の移動体計算環境を想定して、いくつかの複製配置方式がこれまでに提案されている [2, 6]。しかし、これらの方式は、移動体が 1 ホップの無線通信によって固定ネットワーク上の基地局に接続することを想定しており、移動体自体が相互接続してマルチホップ通信を行い、トポロジが動的に変化するアドホックネットワークとは根本的に異なる。

文献 [4, 5] では、移動体の移動によるネットワーク分断時のデータ利用性の低下を防ぐために、アドホックネットワークにおけるデータの複製配置方式が提案されている。文献 [4] の方式では、各移動体の各データへのアクセス頻度およびネットワークポロジを考慮して、配置する複製を決定する。また文献 [5] では、文献 [4] の方式を、周期的にデータ更新が発生する環境に適応するように拡張している。しかし実環境では、データ更新は周期的よりもむしろ不定期に発生することが一般的である。

そこで本稿では、従来方式のより一般的な拡張として、データ更新が不定期に発生する環境に適した複製配置方式を提案する。さらに提案方式では、実環境ではユーザが何らかのスケジュールに従って行動するケースが多い事実に基づいて、ユーザの行動スケジュールを考慮した複製配置を行う。

本稿の以下の部分では、2章で提案する複製配置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。最後に4章で本稿のまとめとする。

2 アドホックネットワークにおける複製配置方式

本章では、まず本稿の提案方式の基本方針および想定環境について述べ、その後、提案方式の詳細について説明する。

2.1 基本方針

まず、RW 値と呼ぶ、次の評価値を定義する。

$$\text{RW 値} = R_{ij} / W_j \quad (1)$$

ここで、 R_{ij} は移動体 M_i のデータ D_j に対する単位時間当たりの読出し回数（読出し頻度、アクセス頻度）、 W_j は D_j に対する単位時間当たりの書込み頻度（更新頻度）である。つまり、RW 値は更新頻

度に対する読出し頻度の比である。RW 値が高いとき、更新よりも読出しが高い頻度で発生するため、提案方式では、複製を配置する。一方、RW 値が低いときは、更新後のデータにアクセスする可能性が高くなるため、複製を配置しない。このように、RW 値の高いデータの複製を配置することで、データアクセスの成功率が向上するものと考えられる。

さらに提案方式では、ユーザの移動スケジュールやアクセス特性を記録したプロファイル情報 [14] を利用して、ユーザの位置や状態に応じた複製配置の変更を行う。これにより、個々のユーザの要求にできるだけ応じた複製配置が可能となる。通常、移動体（ユーザ）はランダムに移動せず、現在従事している行動がアクセスするデータと強く関係するため、ユーザの行動スケジュールから移動パターンやアクセス特性を予測することが可能である。しかし、ユーザは必ずしもスケジュール通りに行動するとは限らない。この場合を含めて、提案方式では、文献 [14] のオープンオブジェクトの概念に基づき、過去の統計情報を用いてアクセス特性を予測し、複製の配置を決定する。より詳細には、下記の通りである。

ユーザプロファイル：ユーザプロファイルは、各ユーザの行動スケジュールとアクセスの統計情報からなる。行動スケジュールは、1日の行動予定を含み、その各項目は、時間、場所、行動内容および要求するデータの情報を含む。

アクセスの統計情報は、各データに対する読出し、書込み操作の履歴が記録されている。スケジュール通りに行動しているユーザが近い将来にアクセスするデータは、プロファイル情報内の明示的な指定およびアクセス統計情報から予測される。全データ集合のうちで、近い将来にユーザからアクセスされることが予測されるデータ集合を、オープンオブジェクトと呼ぶ。一方、スケジュール通りに行動していないユーザが近い将来にアクセスするデータは、アクセス統計情報のみから予測される。

緊急イベント・オブジェクト：ユーザの行動には、緊急イベントが含まれる場合がある。これは、早急に確実な応答を必要とするイベントであり、そのため、このイベントで要求されるデータ（緊急オブジェクト）は確実にアクセスでき

なければならない。したがって、緊急イベントに従事する移動体には、緊急オブジェクトの複製は無条件に配置される。

2.2 想定環境

本稿では、アドホックネットワークにおいて、他の移動体もつデータに対してアクセスする環境を想定する。想定環境の詳細を以下に示す。

- m 個の移動体 (M_1, M_2, \dots, M_m) が存在する。
- サイズの等しい n 種類のデータ (D_1, \dots, D_n) が存在し、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。
- 各移動体は、自身が持つオリジナルデータ以外に、データ C 個分のデータ記憶領域をもつ。ネットワークトポロジが変化する度に複製を再配置することは困難なため、一定の周期（再配置周期）ごとに複製を再配置する。
- 緊急オブジェクトの複製は、無条件に配置される。
- 各データ D_j ($j = 1, \dots, n$) は、そのオリジナルを持つ移動体によって不定期に更新される。更新発生後の古い複製は無効となる。
- 各データに対するアクセス（読出し）頻度および更新頻度 W_j は、統計情報により全移動体で既知とする。

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行したとき、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。

2.3 複製配置方式

前節の想定環境において、下記の三つの複製配置方式を提案する。

1. E2-SAF (Extended Extended Static Access Frequency) 方式：各移動体が RW 値の高いデータの複製を配置する。
2. E2-DAFN (Ex. Ex. Dynamic Access Frequency and Neighborhood) 方式：E2-SAF 方式で複製を暫定的に配置した後、隣接移動体間で複製の重複を解消する。
3. E2-DCG (Ex. Ex. Dynamic Connectivity based Grouping) 方式：安定度の高い移動体のグループを作成し、グループ内で RW 値の高い複製を共有する。

以下では、各手法の詳細について説明する。

2.3.1 E2-SAF 方式

E2-SAF 方式では、再配置周期ごとに、各移動体が物理領域の許す限り、RW 値が高いデータから順にその複製を配置する。詳細な手順は下記の通りである。

1. 再配置周期がくると、各移動体において、各データに対する RW 値を計算する。ここで、緊急オブジェクトの RW 値は、“Max_Value/アクセス時間” で計算される。Max_Value は、緊急オブジェクトの RW 値が、その他すべてのデータの RW 値よりも大きくなるように設定される十分大きな値である。アクセス時間は、その緊急オブジェクトにアクセスを開始するまでの残り時間である。
2. 各移動体は、データ記憶領域の許す限り、オープンオブジェクト、その他のデータの順で、RW 値の降順に、配置する複製を決定する。

E2-SAF 方式は、複製配置の際に他の移動体と情報交換を行う必要がないため、複製配置のオーバーヘッドが小さい。一方、各移動体が自身の RW 値のみに基づいて複製を配置するため、同様のアクセ特性をもつ複数の移動体は同じ複製を作成してしまう。相互接続している移動体同士は、他の移動体が所持するデータや複製にアクセスできるため、

データや複製の重複を少なくして共有する方が、アクセス成功率を向上できる。したがって、この方式は、同様のアクセス特性をもつ移動体が多い場合にアクセス成功率が低下する。

2.3.2 E2-DAFN 方式

E2-DAFN 方式では、E2-SAF 方式の複製の重複が多いという問題を軽減するために、隣接移動体間で重複を解消する。そのアルゴリズムは次のようになる。

1. 再配置周期がくると、各移動体は各データの RW 値を、E2-SAF 方式と同様に計算する。さらに、自身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。
2. 各移動体は、E2-SAF 方式に基づいて、配置する複製を暫定的に決定する。
3. 識別子 M_i の添字 i が最も小さい移動体から、幅優先探索の順に全ての隣接する移動体間で、以下の手順を繰り返す。隣接する移動体とデータや配置する複製に重複があるとき、一方がオリジナルデータの場合は複製をもつ移動体、両方とも複製の場合はそのデータの RW 値が低い方の移動体において、配置すべき複製を変更する。変更の際には、両方の移動体において複製配置の対象となっていないデータのうち、その移動体の RW 値が最も高いものの複製を配置する。

E2-DAFN 方式では、隣接移動体間で複製の重複を解消することで、多種類の複製を共有する。ただし、隣接移動体間でのみ複製の重複を解消するため、2 ホップ以上離れた移動体では全く同じ複製を作成することが起こり得る。さらに、再配置周期ごとに隣接移動体間での情報交換と複製の再配置が行われるため、E2-SAF 方式に比べてオーバーヘッドやトラフィックが大きい。

2.3.3 E2-DCG 方式

E2-DCG 方式では、さらに広範囲の移動体間で複製の共有を行う。効率的に複製を共有するためには、複製を共有する移動体のグループの安定性が高く、トポロジーの変化によって分断されにくいこと

が好ましい。そこで、この方式ではネットワークの 2 連結成分 [1] をグループとする。2 連結成分とは、1 つの頂点を除いてもグラフが連結されている（分断されない）極大な部分グラフのことである。DCG 方式では、再配置周期ごとに、次のアルゴリズムに基づいて複製の再配置を行う。

1. 再配置周期がくると、各移動体は各データの RW 値を、E2-SAF 方式と同様に計算する。さらに、各移動体は自身の識別子をブロードキャストする。これにより、自身と相互接続している移動体を知る。
2. 識別子 M_i の添字 i が最も小さい移動体から、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、発見された 2 連結成分をグループとする。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のみに含まれる。
3. グループとしての各データの RW 値を、グループ内の移動体からの RW 値の合計として計算する。
4. グループとしての RW 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。ただし、グループ内の移動体のいずれかがオリジナルデータとして所持しているものについては配置を行わない。グループ内での配置先は、空き領域がある移動体のうちで、そのデータの RW 値が最も高いものとする。
5. すべての種類のデータ（複製）の配置を決定した後、グループ内の移動体に空き領域がある場合は、空き領域がなくなるまで、グループとしての RW 値が高いデータから順にさらに複製の配置を決定する。グループ内での配置先は、そのデータ（複製）を所持しておらず、かつ、空き領域のある移動体のうちで、そのデータの RW 値が最も高いものとする。

E2-DCG 方式では、安定性の高い移動体のグループ内で、多種類のデータ（複製）を共有するため、アクセス成功率の向上が期待できる。ただし、再配置周期ごとに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やトラフィックが大きい。

3 シミュレーション評価

本章では、提案したキャッシング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。

3.1 シミュレーションモデル

500×500m の二次元平面上に、40 個の移動体 ($\mathbf{M} = \{M_1, \dots, M_{40}\}$) が存在する。各移動体が従事するイベントは 8 種類あり、それぞれが一つの基本位置と一つの緊急オブジェクト、四つのオープンオブジェクト（緊急オブジェクトではない）をもつ。各イベントの基本位置、緊急オブジェクト、オープンオブジェクトは、シミュレーションの開始前にそれぞれランダムに決定した。各移動体が一つのイベントに従事する時間は 3,600 秒とし、終了後は別のイベントに従事する。従事するイベントの順序は、シミュレーション開始前に各移動体でランダムに決定し、最後のイベントの終了後は、最初のイベントに戻るものとする。

あるイベントが終了する毎に、移動体は次のイベントのスケジュールに確率 E で従う。 E をスケジュール従事確率と呼ぶ。スケジュールに従う移動体は、そのイベントの基本位置に移動し、イベント従事中は基本位置に静止する。移動速度は、イベント開始時に 0 から V の範囲で、ランダムに決定する。一方、スケジュールに従わない移動体は、ランダムウェイポイントモデル [3] に従って移動する。つまり、ランダムに決定したある地点に向けて、0 から 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。40 種類のデータ ($\mathbf{D} = \{D_1, \dots, D_{40}\}$) が存在し、データ D_i は移動体 M_i にオリジナルとして所持されている。各データは、オリジナルをもつ移動体によって不定期に更新され、その更新発生間隔は、平均 $1/W$ (W : 更新頻度) の指数分布にしたがって決定する。各移動体は、 C 個までの複製を作成し、複製は再配置周期 T で再配置される。各移動体 M_i の各データ D_j に対するアクセス（読み出し）頻度 R_{ij} は、下記のように与えられる。

ケース 1: $R_{ij} = 0.125\{1 + (j - 20)/400\}$
(スケジュールに従事)

表 1: パラメータ設定値

パラメータ	値
V	10 [m/秒]
S	1 [秒]
R	70 [m]
C	10
T	100 [秒]
W	0.05 [1/秒] (0.001 ~ 0.021)
E	0.2 (0 ~ 1)

ケース 2: $R_{ij} = 0, 1$ (スケジュールに非従事)

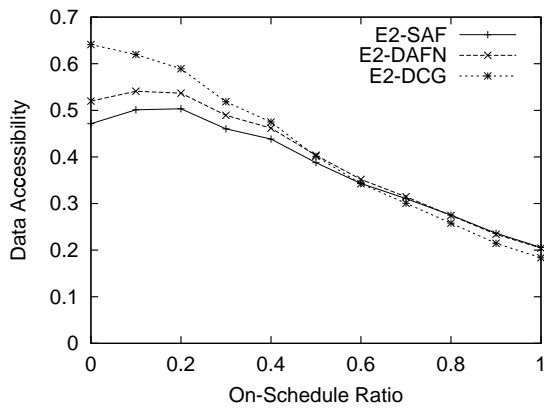
ケース 1 はスケジュールに従っていない移動体に対するものであり、すべての移動体が同一のアクセス特性をもち、各データへのアクセス頻度のばらつきが小さい場合を表している。ケース 2 はスケジュールに従っている移動体に対するものであり、緊急オブジェクトとオープンオブジェクトに毎秒アクセスすることを表している。また、これらに対するアクセス開始は、イベント開始時刻とする。

表 1 に、シミュレーションで用いるパラメータ値を示す。各パラメータは、基本的には表中の値に固定され、一部は括弧内の範囲で変動される。シミュレーション実験では、1 単位時間を 1 秒とみなし、500,000 秒を経過させたときの各方式のアクセス成功率とトラフィックを比較する。アクセス成功率は、シミュレーション時間内に発生した全アクセス要求に対する成功回数の比である。トラフィックは、複製の再配置のためのデータ転送の総ホップ数であり、これには複製配置のメッセージ交換のためのトラフィックは含まない。

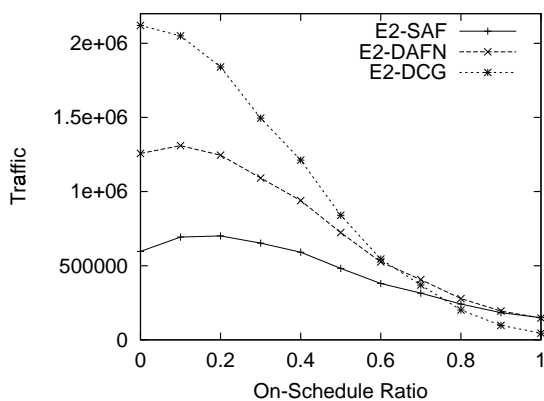
3.2 スケジュール従事率の影響

スケジュール従事率の提案方式への影響を調べた。シミュレーション結果を図 1 に示す。図では、横軸がスケジュール従事率 E 、縦軸が (a) ではアクセス成功率、(b) ではトラフィックを表している。

図 1(a) の結果から、スケジュール従事率が高くなると 3 方式のアクセス成功率が低くなるのが分かる。これは、スケジュールに従事している移動体は 5 つのデータのみアクセスしながら基本位置に留まるため、スケジュール従事率が高くなると、他の移動体を持つデータにアクセスする機会が少なくなるためである。同様の現象が図 1(b) でも確認



(a) アクセス成功率



(b) トラフィック

図 1: スケジュール従事率の影響

できる。スケジュール従事率が高くなると、必要な複製を作成できない場合が多いため、トラフィックが低下している。

3方式を比較すると、ほとんどの場合でE2-DCG方式が最も高いアクセス成功率を示し、トラフィックも最も高くなっている。スケジュール従事率が0.7以上のときにE2-DAFN方式よりアクセス成功率が低くなっているのは、多くの移動体が5つのデータにしかアクセスしないにも関わらず、E2-DCG方式ではアクセス頻度の低いデータの複製を配置することを強いられるためである。さらに、それらのデータの複製配置はほとんどの場合で失敗するため、トラフィックも小さくなっている。

ここで、緊急オブジェクトを優先的に配置することの効果調べた。図2は、各方式における、スケジュールに従事していない移動体のアクセス成功率に対する、スケジュールに従事している移動体のオープンオブジェクトと緊急オブジェクトのアクセ

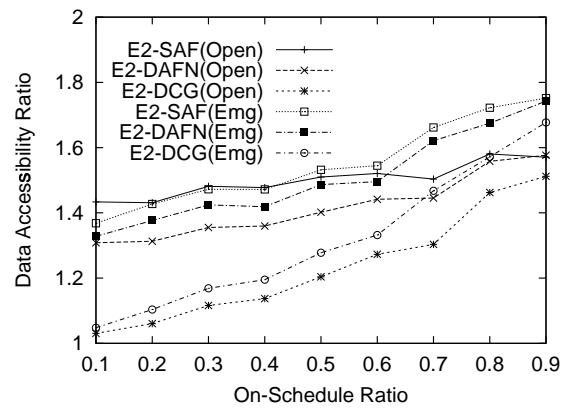


図 2: 緊急オブジェクトを優先する効果

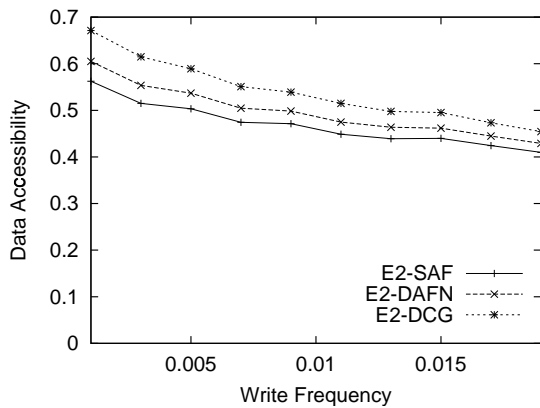
ス成功率の比を表している。この比をアクセス成功率比と呼ぶ。図では、‘OPEN’および‘Emg’は、それぞれオープンオブジェクトおよび緊急オブジェクトのアクセス成功率比を示している。この結果から、オープンオブジェクトおよび緊急オブジェクトのアクセス成功率比が、常に1以上となっている。特に、緊急オブジェクトを優先する効果が高いことが確認できる。E2-SAF方式とE2-DAFN方式が、E2-DCG方式よりも高いアクセス成功率比を示しているのは、アクセス成功率がもともと低いため、配置を優先することの効果が大きく現れるためである。

3.3 更新頻度の影響

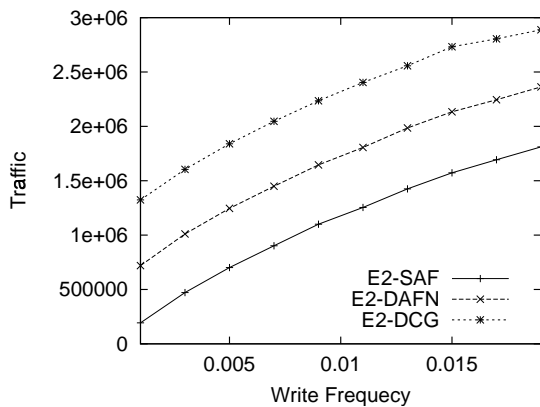
3方式に対する更新頻度の影響を調べた。シミュレーション結果を図3に示す。図では、横軸が更新頻度 W を、縦軸が (a) ではアクセス成功率、(b) ではトラフィックを表している。

図3(a)の結果から、更新頻度が高くなると、各方式のアクセス成功率が低下することが分かる。これは、配置した複製の有効期間が短くなるためである。3方式を比較すると、E2-DCG方式のアクセス成功率が、常に最も高くなっている。

図3(b)の結果から、更新頻度が高くなると、各方式のトラフィックが大きくなる事が分かる。これは、無効になった複製を、最新のものへと改めて配置する回数が増えるためである。3方式を比較すると、E2-DCG方式のトラフィックが最も高く、それにE2-DAFN方式が続いている。



(a) アクセス成功率



(b) 更新頻度とトラフィック

図 3: 更新頻度の影響

4 むすび

本稿では、データ更新が不定期に発生する環境に適した複製配置方式を提案した。実環境ではユーザが何らかのスケジュールに基づいて行動する場合が多いため、提案方式ではユーザの行動スケジュールも考慮する。シミュレーション実験による性能評価の結果、提案方式の有効性を確認した。

今後は、実環境において提案方式を適切に選択する指標を得るために、提案方式を実システム上に実装し、複製再配置のための情報交換や、配置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。

5 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 西尾章治郎教授に感謝の意を表す。

なお、本研究の一部は、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」、文部科学省 21 世紀 COE プログラム（研究拠点形成費補助金）の研究助成によるものである。

参考文献

- [1] A.V. Aho, J.E. Hopcroft, and J.D. Ullman, "The design and analysis of computer algorithms," Addison-Wesley, 1974.
- [2] D. Barbara and T. Imielinski, "Sleepers and workholics: Caching strategies in mobile environments," Proc. ACM SIGMOD'94, pp.1-12, 1994.
- [3] 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. Mobicom'98, pp.159-164, 1998.
- [4] T. Hara, "Effective replica allocation in ad hoc networks for improving data accessibility," Proc. IEEE Infocom 2001, pp.1568-1576, 2001.
- [5] T. Hara, "Replica allocation in ad hoc networks with periodic data update," Proc. Int'l Conf. on Mobile Data Management (MDM 2002), pp.79-86, 2002.
- [6] Y. Huang, P. Sistla, and O. Wolfson, "Data replication for mobile computer," Proc. ACM SIGMOD'94, pp.13-24, 1994.
- [7] D.B. Johnson, "Routing in ad hoc networks of mobile hosts," Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.158-163, 1994.
- [8] M.R. Pearlman and Z.J. Haas, "Determining the optimal configuration for the zone routing protocol," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.17, No.8, pp.1395-1414, 1999.
- [9] C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," Proc. ACM SIGCOMM'94, pp.234-244, 1994.
- [10] C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad hoc on demand distance vector routing," Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.90-100, 1999.
- [11] M. Stonebraker, "Concurrency control and consistency in multiple copies of data in distributed INGRES," IEEE Trans. Software Eng., Vol.3, No.3, pp.188-194, 1979.
- [12] R.H. Thomas, "A majority consensus approach to concurrency control for multiple copy databases," ACM Transaction on Database Systems, Vol.4, No.2, pp.180-209, 1979.
- [13] O. Wolfson and A. Milo, "The multicast policy and its relationship to replicated data placement," ACM Transaction on Database Systems, Vol.16, No.1, pp.181-205, 1991.
- [14] S.-Y. Wu and Y.-T. Chang, "An active replication scheme for mobile data management," Proc. of Int'l Conf. on Database Systems and Advanced Applications, pp.143-150, 1999.