

移動体サポート方式のトラヒック量比較

門林 理恵子[†] 塚本 昌彦^{††}

本論文では、コンピュータネットワークにおいてホストの移動をサポートするための5つの方式を、トラヒックに関して定量的に比較する。移動体をサポートするためには、移動体の位置管理機能と、現在地へのパケットフォワーディング機能が必要である。この2つの機能の実現の仕方によって、ブロードキャスト通知方式、ブロードキャストフォワーディング方式、ブロードキャスト問合せ方式、デフォルトフォワーディング方式、デフォルト問合せ方式の5つの方式が考えられる。まず、これらの方式を使用した場合に生じるトラヒックを解析によって求め、基本的な特徴を抽出する。次に、格子状ネットワークポロジータと二分木状ネットワークポロジータを用いて、ネットワーク規模や移動頻度の変化によるトラヒック量の変化を具体的に示す。そして、トラヒックの観点から見た最適方式がネットワーク規模、ネットワークポロジータ、移動の頻度、データパケットのサイズ等のネットワーク特性によって変わることを示す。

Traffic Comparison of Mobile Support Strategies

RIEKO KADOBAYASHI[†] and MASAHIKO TSUKAMOTO^{††}

In this paper, we quantitatively compare the performance of five strategies for mobile support in terms of the traffic. The major facilities that are required for a network protocol to support mobile hosts are location management and packet forwarding. We propose five basic strategies which use different methods to realize these facilities and compare them on performance. These five strategies are Broadcast Notification (BN), Broadcast Forwarding (BF), Broadcast Query (BQ), Default Forwarding (DF), and Default Query (DQ). As a result of analytical evaluation and comparison, it is shown that the optimal strategy depends upon the network conditions, such as number of routers, network topology, migration/communication ratio, data/control packet size ratio. In short, DF and DQ show the best performance in scalability, while BF and BQ are efficient for frequent migration. On the other hand, BN is suitable for a small network where mobile hosts rarely move.

1. はじめに

移動可能なホスト計算機（これを移動体と呼ぶ）が、コンピュータネットワーク上のどの地点に移動しても、他のホストと通信することが可能であり、同じ計算機環境を利用することができる環境、すなわち移動体通信環境を実現するうえで考慮すべき点として、操作透過性と性能透過性が指摘されている⁷⁾。

従来のコンピュータネットワークでは、各ホストはネットワークアドレスが割り当てられ、これを識別子として互いに通信を行ってきた。ネットワークアドレ

スは、所在を示すものとしても使用されるため、移動によって所在が変わると新たに割り当ててもらう必要があり、その結果、識別子が変わってしまい通信を続けることができないという問題があった。この問題を解決する能力、すなわち、移動体の移動中あるいは移動後に、特別な手続きを行うことなく、ファイル転送や電子メール等のネットワークアプリケーションを実行し続けることができる能力のことを操作透過性という。これまでの移動体通信の研究は、主に操作透過性を提供することを目的としており、数多くの移動体プロトコルが提案されている^{1),3),9),10),12)~15),17),18)}。

操作透過性を提供し、移動体をサポートするためには、ルータは、移動体の位置の管理や現在地へのデータパケットのフォワーディング（転送）を行わねばならないが、そのために余分なトラヒックが発生することになる。これらのトラヒックによるネットワーク資源の消費を抑え、移動体のユーザが、従来と同様のネッ

[†] 株式会社エイ・ティ・アール知能映像通信研究所
ATR Media Integration & Communications Research Laboratories

^{††} 大阪大学工学部情報システム工学科
Department of Information Systems Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University

トワーク性能を享受できるようにする能力を性能透過性という。移動体プロトコルの定性的な比較を行った研究⁷⁾で、どのようなネットワーク構成にも効率的であるプロトコルがないことが指摘されているように、適用するネットワークごとに、ネットワークの規模等の特性に応じた適切なプロトコルを選択する必要があるが、そのためには、性能透過性に関する定量的な評価が必須である。しかし、これまでのところ十分な議論がなされていない。

セルラ無線ネットワークにおいては、移動体をサポートするための方式について、定量的な比較を行った研究がある^{6),8)}。しかし、これらは、セルラネットワークという限られたネットワークモデルでの評価であり、必然的にネットワークトポロジーや移動のモデルが限定されること、移動体の位置情報の管理にかかるコストのみを評価の対象としており、データ通信にかかるコストを考慮にいないこと、評価に用いられているパラメータが数少ないこと等の問題があり、提案されている手法をそのまま、インターネット等の一般的なコンピュータネットワーク環境における移動体サポート方式の評価に用いることはできない。

そこで、本論文では、より一般的なネットワークのモデルにおいて、移動体の移動頻度や通信頻度、ネットワークの規模やトポロジー、パケットのサイズといったネットワークを特徴づける様々な特性を考慮して、移動体をサポートする方式の性能を評価する。前述のように、ネットワーク資源を消費し、移動体プロトコルの性能を決定づける大きな要因は、移動体の位置管理機能と現在地へのパケットフォワーディング機能によって生じるトラヒックである。これらのトラヒックはトレードオフの関係にあるため、それぞれの機能だけを評価しても不十分である。そこで、この2つの機能の実現の仕方によって、5つの移動体サポート方式を考え、これらの移動体サポート方式によって生じるトラヒック量を比較する。そして、ネットワークの特性の変化に応じて、最も効率の良い方式が変わることを示す。

以下では、まず、2章で、ネットワークのモデルと5つの移動体サポート方式について述べる。次に、3章でトラヒック量の観点から各方式の性能を評価し、トポロジーやネットワークの規模等を考慮した比較を行う。最後に、4章で本論文のまとめを述べる。

2. 移動体サポートのための5つの方式

2.1 ネットワークモデル

本論文で扱うネットワークの例を、図1に示す。図

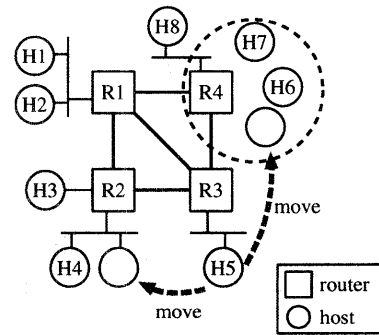


図1 ネットワーク構成例

Fig. 1 Example of network configuration.

中の実線は有線による接続を示す。破線の円は無線のセルを示し、セル内のルータとホストは無線によって通信が可能であるとする。ホストとネットワークとの接続は、H1, H2のように有線インタフェースであっても、H6, H7のように無線インタフェースであってもよい。また、H5のように両方のインタフェースを備えていてもよい。いずれの場合も、ホストはネットワークの別の部分へ移動することが可能であり、これを移動体と呼ぶ。移動体は、遠く離れた地点へオフライン移動することも、隣接する無線セルへオンライン移動することもできる。

これに対し、ルータは互いに有線ネットワークによって接続されており、移動しないものとする。ルータのうち、移動体の所在をつねに管理し、他のルータに移動体の位置情報を定期的に送信するルータをデフォルトルータと呼び、移動体が実際に接続しており、移動体あてのパケットを受信するルータをカレントルータと呼ぶ。移動のたびにカレントルータは代わるが、デフォルトルータは代わるとは限らない。1つのルータがデフォルトルータとカレントルータの両方の役割を兼ねる場合は、デフォルトルータと呼ぶ。

2.2 各方式の概要

このようなネットワークにおいて、移動体をサポートするためには、1章で述べたように移動体の位置管理と現在地へのパケットフォワーディング機能が必要である。この2つの機能の実現の仕方によって次の5つの移動体サポート方式が考えられる。

ブロードキャスト通知 (BN) 方式 移動体が移動するたびに、位置情報がすべてのルータに通知される方式である。カレントルータとデフォルトルータがつねに一致し、移動によってカレントルータが代わるたびに、新しいカレントルータがデフォルトルータになり、移動体の新しい位置情報を他のすべてのルータに通知する。また、以前のデフォ

ルトルータも、移動体が移動してなくなったことをすべてのルータに通知する。すべてのルータが移動体の最新の位置情報を保持しているため、データ通信時には、移動体の現在地へ直接転送することが可能である。

デフォルトフォワーディング (DF) 方式 BN方式と異なり、デフォルトルータが変化せず、位置情報は、新しいカレントルータからデフォルトルータにのみ送信される。デフォルトルータは、カレントルータにACKパケットを送信する。他のホストやルータからは、移動体はつねにデフォルトルータに接続しているように見える。そのため、移動体あてのデータパケットは、いったんデフォルトルータへ転送され、その後、デフォルトルータによってカレントルータへ転送される。

デフォルト問合せ (DQ) 方式 移動してもデフォルトルータが変化せず、位置情報がカレントルータからデフォルトルータにだけ送信され、それに対するACKがデフォルトルータからカレントルータへ送信される点はDF方式と同じであるが、通信時に、移動体の現在地を問い合わせしてからデータパケットを転送する点が異なる。移動体あてのデータパケットを受信したルータは、デフォルトルータへ問い合わせ、その結果に基づき移動体の現在地へデータパケットを転送する。

ブロードキャストフォワーディング (BF) 方式 この方式では、デフォルトルータが存在しない。カレントルータは、移動体が移動してもどのルータにも通知しないため、カレントルータ以外のルータは移動体の位置が分からない。そのため移動体あてのデータパケットを受信したルータは、すべてのルータにそのデータパケットをブロードキャストする。カレントルータはこのパケットを受信し、移動体へ送信するが、他のルータはパケットを廃棄する。

ブロードキャスト問合せ (BQ) 方式 デフォルトルータが存在せず、移動時にカレントルータが通知を行わない点はBF方式と同じである。BQ方式においてもカレントルータ以外のルータは、移動体の現在地を知らないため、データパケットを受信するたびに、他のルータすべてに移動体の位置を問い合わせるパケットをブロードキャストする。カレントルータがこの問合せに対し、移動体の現在地を知らせる応答パケットを返す。これに基づいて、データパケットが現在地へ転送される。ここで、図1において、移動体H5がルータR3に接

続しているときにホストH1との通信を開始し、その途中でルータR4の無線セル内へ移動した場合を考える。さらにルータR3が移動体H5のデフォルトルータであるとする。BN方式の場合は、ルータR4が移動体H5の新しい位置をすべてのルータに通知するので、ルータR1はホストH1から受信したデータパケットを直接ルータR4へ転送することが可能である。DF方式やDQ方式が採用されている場合は、ルータR4が、ルータR3にのみ移動体H5の移動を通知するため、ルータR1は、移動体H5の移動を検出できない。そのためルータR1は、移動体H5あてのデータパケットを受信すると、DF方式の場合は、ルータR3にデータパケットを転送し、DQ方式の場合は、ルータR3に移動体H5の所在を問い合わせ、その結果に基づき、ルータR4へとデータパケットを転送する。BF方式やBQ方式の場合は、ルータR4はどのルータにもH5の移動を通知しないため、ルータR1はBF方式の場合は、すべてのルータにデータパケットを転送し、カレントルータであるR4が受信できるようにし、BQ方式の場合は、すべてのルータに移動体H5の所在を問い合わせるパケットを送信し、ルータR4から返ってくる応答パケットによって現在地を知り、データパケットを転送する。

2.3 従来研究との関連

これまでに提案されている移動体プロトコルの違いは、移動体のアドレス体系の違いと、基礎としているプロトコルの違いから議論されることが多かった。すなわち、移動体を持つアドレスを従来どおり1つとするか、2階層にするかという差と、IP¹¹⁾をベースにするかCLNP⁴⁾をベースにするかの差である。しかし、性能透過性の違いについて議論する場合には、トラヒック量に関する定量的な評価に基づいて比較すべきであると考えられる。このような視点から筆者らは、CLNPをベースにした4種類の移動体サポート方式について性能の比較を行った¹⁶⁾。本論文では、対象とするネットワークをCLNP以外にも拡大し、所在の管理とデータパケットのフォワーディング機能の組合せとして考えられる5方式をすべて網羅した。この分類に従えば、従来の移動体プロトコルの研究は以下のように位置付けることができる。

IPをベースにした移動体プロトコルのうち、インターネットのMobile-IP作業部会で検討されているプロトコル⁹⁾やTeraokaら¹⁵⁾、Wadaら¹⁸⁾が提案するプロトコルでは、1つの移動体が、移動しても変化せず識別子として使用するアドレスと、移動のたびにに変化して所在を示すアドレスの2階層のアドレスを持

つ。データパケットはまず、識別子であるアドレスへと送られ、その後、デフォルトルータと同様の機能を持つホームエージェント⁹⁾、ホームルータ¹⁵⁾あるいはパケット転送サーバ¹⁸⁾によって現在地へと転送されるため、DF方式と考えられる。また、移動体だけの論理的ネットワークを構成し、1つの移動体には1つのネットワークアドレスだけを割り当てる Perkins ら¹⁰⁾と Ioannidis ら³⁾の方式のうち、前者には、デフォルトルータにあたるモバイルルータ¹⁰⁾が存在し、移動体を収容する無線基地局のアドレスで表される移動体の現在地へデータパケットを転送する役割を担うため、DF方式とみなせる。これに対し、後者では、デフォルトルータが存在せず、すべてのルータに移動体の所在を問い合わせるので、BQ方式である。

OSIのルーティングプロトコルであるIS-ISプロトコル⁵⁾は、ルータが隣接しているルータやホストのリストを定期的に作成して広めるプロトコルである。隣接しているルータやホストがダウンしたり、新たに接続したりするときも、リストを作成し、他のすべてのルータに広める。ネットワーク中のすべてのルータに情報を伝達するために、情報を受信したルータは、受信した回線以外のすべての回線に、その情報を送信するフラディングと呼ばれる手法が使用される。デフォルトルータとカレントルータはつねに一致し、かつ移動のたびに変わる。これは、BN方式にあたる。また、CLNPをベースにした移動体プロトコルのうち、Carlberg¹⁾のプロトコルはIS-ISプロトコルの単純な拡張であり、BN方式である。田中ら^{12),14)}、塚本ら¹⁷⁾のプロトコルは、IS-ISプロトコルを元に、デフォルトルータとカレントルータを区別し、移動時の位置情報の通知をこの二者間でのみ行うようにしたものであるため、BN方式とDF方式を組み合わせた方式といえる。

上述の議論を要約すると表1のようになる。

表1 移動体サポートのための5方式と提案されているプロトコルとの関連

Table 1 Mobile support strategies used in existing proposals.

	BN	BF	BQ	DF	DQ
Carlbergの方式	○				
Ioannidisらの方式			○		
IS-ISプロトコルの方式	○				
Mobile-IP WGの方式				○	
Perkinsらの方式				○	
田中、塚本の方式	○			○	
Teraokaらの方式				○	
Wadaらの方式				○	

3. 各方式のトラヒックの比較

本章では、移動体サポートのための5方式の性能を評価し、比較を行う。移動体通信において性能透過性に大きな影響を与えるのは、ルータのパケット処理能力よりもむしろネットワーク上に流れるトラヒックの総量である²⁾。そこで本論文では性能を評価する指標として、パケットホップ数×パケットサイズで表されるトラヒック量を用いる。

3.1 トラヒックの解析

本節では、1つの移動体が通信ならびに移動を行うときに、各方式によって生じるトラヒックを解析によって求める。移動体は、 N 個のルータが C 本の回線で接続されたネットワークにおいて、通信と移動をランダムに行い、ネットワーク内の任意の地点にランダムに移動するものとする。通信間隔と移動間隔は指数分布とし、各々の頻度を λ と μ とする。移動体が受信するデータパケットの平均サイズを d 、移動体の位置情報の通知や問合せ等に使用される制御パケットの平均サイズを c とする。ルータ間の平均距離 H は、ホップ数で測り、自分自身への距離を含むものとする。

まず、移動体が移動したときに生じるトラヒックについて考える。BF方式とBQ方式は、移動の通知を行わないためトラヒックが生じない。DF方式とDQ方式では、カレントルータからデフォルトルータへの移動通知パケットの送信と、それに対するACKパケットの送信によって、 $2Hc$ のトラヒックが生じる。ACKパケットは、プロトコルを頑健にするために使用されている^{12),14),15),17),18)}。BN方式では、移動前と移動後のデフォルトルータが、すべてのルータに移動を通知するため、 $2Cc$ のトラヒックが生じる。

次に通信時のトラヒックを考える。BN方式は、すべてのルータが現在地を知っており、最短ルートによってデータパケットをフォワーディングできるため、 Hd となる。DF方式では、データパケットがいったんデフォルトルータへフォワードされたのち、カレントルータへフォワードされるため $2Hd$ となる。DQ方式は、カレントルータとデフォルトルータ間で、問合せならびに応答のための制御パケットが交換されるため、 $2Hc$ のトラヒックが生じ、これに実際のデータフォワーディングのトラヒック Hd が加わるため、 $2Hc + Hd$ となる。BQ方式は、すべてのルータに問合せパケットを送信し、カレントルータから応答パケットを受信するための $(N+1)Hc$ と、データパケットをフォワードするための Hd によって、 $(N+1)Hc + Hd$ のトラヒックが生じる。BF方式は、データパケットをす

表2 5方式によって生じるトラフィック量の比較
Table 2 Traffic analysis for five strategies.

	BN	BF	BQ	DF	DQ
通信時	Hd	NHd	$(N+1)Hc + Hd$	$2Hd$	$2Hc + Hd$
移動時	$2Cc$	0	0	$2Hc$	$2Hc$
総トラフィック	$Hd\lambda + 2Cc\mu$	$NHd\lambda$	$(N+1)Hc\lambda + Hd\lambda$	$2Hd\lambda + 2Hc\mu$	$2Hc\lambda + Hd\lambda + 2Hc\mu$

すべてのルータにブロードキャストするため NHd となる。

総トラフィックは、上述の移動時のトラフィックと通信時のトラフィックについて、それぞれ移動頻度と通信頻度を考慮して足し合わせたものとなる。解析の結果をまとめると表2のようになる。

以上の解析により明らかとなった各方式の基本的な特徴は次のようにまとめられる。

BN方式は、通信時のトラフィックに関しては、つねに移動体の最新の位置情報が、すべてのルータによって管理されているため、データパケットを最短経路でフォワードすることができ、5方式の中で最も効率が良い。しかし、移動時は、新旧2つのデフォルトルータからネットワーク内のすべてのルータに位置情報がブロードキャストされるため、移動が頻繁な場合には、移動を通知する制御パケットが増加し、トラフィックが増加する。

BF方式は、移動時のトラフィックが0と最も少なく、頻繁な移動に対して有効である。しかし、データパケットをブロードキャストするため、ルータ数の増加やパケットサイズの増大にともなってトラフィックが増加し、ネットワークバンド幅の使用効率が悪くなる。

BQ方式は、BF方式と同様、移動時のトラフィックが0であり、5方式の中で最も少ない。また、データパケットを最短経路でフォワードすることができるため、データパケットのサイズが制御パケットに比べて大きい場合には、BF方式よりもトラフィックが少なくなる。しかし、問合せパケットをブロードキャストするために、ルータの数が増えるほどトラフィックが増加する。BF方式と同様、移動が頻繁な場合に有効である。

DF方式は、通信時にデータパケットが最短経路を通らないために、余分なトラフィックが生じることになる。これについては、拡散キャッシュ法¹⁵⁾を採用することで、ルーティング効率を上げられることが示されている¹⁴⁾。ただし、キャッシュの効果は、ネットワークポロジや移動のしかたに依存するため、本論文では、拡散キャッシュ法を考慮にいれない。移動時にはカレントルータとデフォルトルータ間で、位置情報の通知と確認のための制御パケットが交換されるだけであるため、BN方式に比べ、移動が頻繁な場合でも

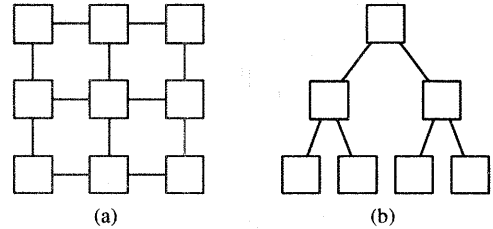


図2 ネットワークポロジの例。(a) $n \times n$ 格子状ポロジ ($n=3$)、(b) 深さ n の二分木ポロジ ($n=3$)

Fig. 2 Example of network topologies: (a) $n \times n$ grid topology; (b) n depth binary tree topology.

制御パケットの増加を抑えることができる¹⁴⁾。

DQ方式は、移動時のトラフィックがDF方式と同じであり、BN方式に比べ効率的であるといえる。通信時は、いったん、デフォルトルータへ問合せパケットを送信する必要があるが、データパケットは最短経路を通ることができるため、データパケットのサイズが大きい場合は、DF方式よりも効率が良くなる。

3.2 トラフィック量変化の比較

各方式によって生じる総トラフィックは、表2に示すように、 H と C によって変化する。つまり、ネットワークポロジによって変化する。そこで、本節では具体的事例として格子状ポロジと二分木ポロジを取りあげ、ルータ数や移動頻度の増加によって各方式のトラフィックがどのように変化するかを示す。

まず、図2の(a)に示すように、1辺に n 個のルータが格子状に接続されたネットワークポロジを考える。このとき、ルータ数、回線数、平均ルータ間距離は、それぞれ

$$\begin{aligned} N &= n^2, \\ C &= 2n(n-1), \\ H &= \frac{2(n-1)(n+1)}{3n} \end{aligned}$$

である。

したがって、 $k = \mu/\lambda$ 、 $l = d/c$ とおくと、平均パケット量 ($l=1$ としたときのトラフィック量 $/\lambda$) は

$$\begin{aligned} \text{BN: } & \frac{2(n-1)(6kn^2 + n + 1)}{3n} \sim O(n^2), \\ \text{BF: } & \frac{2n(n-1)(n+1)}{3} \sim O(n^3), \end{aligned}$$

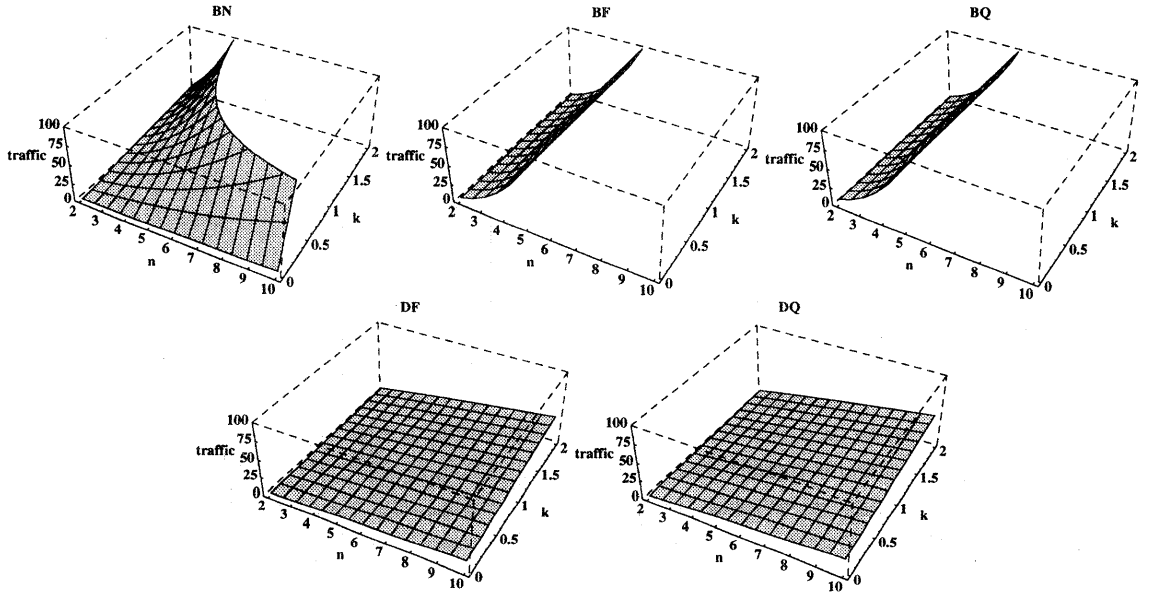


図3 格子状ネットワークにおける平均パケット量比較
 Fig. 3 Comparison of average packet volume in a grid topology network.

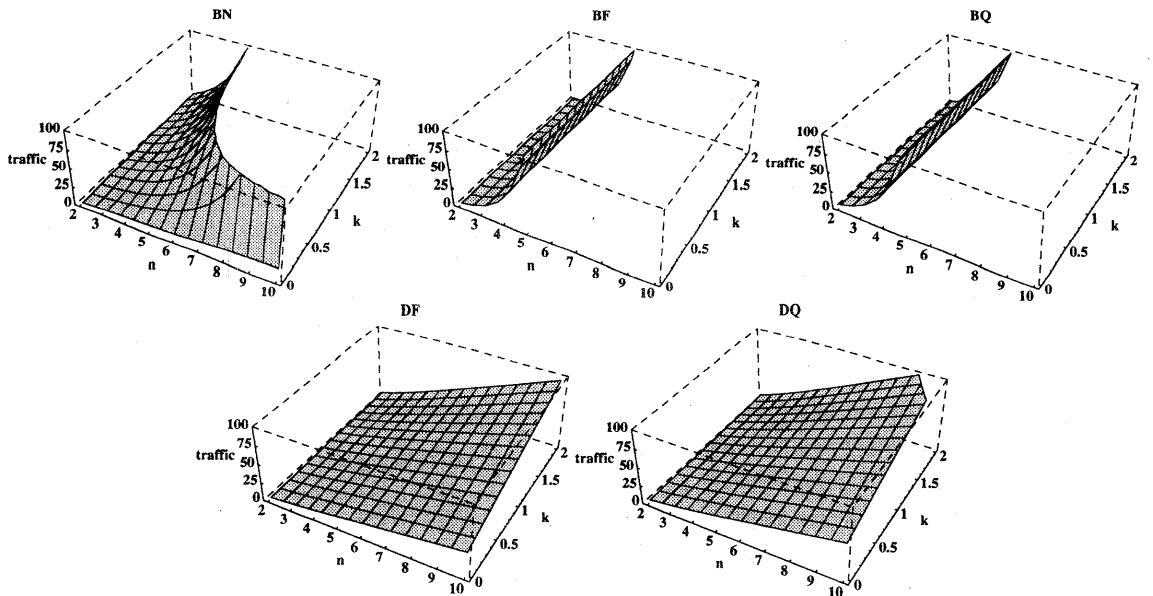


図4 二分木ネットワークにおける平均パケット量比較
 Fig. 4 Comparison of average packet volume in a binary tree topology network.

$$\text{BQ} : \frac{2(n-1)(n+1)(n^2+2)}{3n} \sim O(n^3),$$

$$\text{DF} : \frac{4(k+1)(n-1)(n+1)}{3n} \sim O(n),$$

$$\text{DQ} : \frac{2(2k+3)(n-1)(n+1)}{3n} \sim O(n)$$

となる。ただし、BF方式とBQ方式のトラヒック量のオーダに関しては、個別アドレスを用いてブロードキャストしているため $O(n^3)$ となっているが、効率的なグループアドレスとそのマルチキャスト手法が利用できる際には $O(n^2)$ まで改善できる。この式をグラフによって示したものが図3である。

次に、図2の(b)に示すような深さ n ($n \geq 1$) の二分木状のネットワークポロジジーを考える。移動体が接続可能なルータは、葉の部分のルータだけとする。このとき、ルータ数、回線数、平均ルータ間距離はそれぞれ

$$N = 2^{n-1},$$

$$C = 2^n - 2,$$

$$H = 2^{2-n} + 2(n-2)$$

となる。

したがって、各方式の平均パケット量は、

$$\text{BN} : 2^{n+1}k - 4(k+1) + 2n + 2^{2-n} \sim O(2^n),$$

$$\text{BF} : 2^n(n-2) + 2n \sim O(n \times 2^n),$$

$$\text{BQ} : 2^n(n-2) + 4n + 2^{3-n} - 6 \sim O(n \times 2^n),$$

$$\text{DF} : (k+1)(4n + 2^{3-n} - 8) \sim O(n),$$

$$\text{DQ} : (2k+3)(2n + 2^{2-n} - 4) \sim O(n)$$

である。これをグラフにすると図4のようになる。

この2つのネットワークポロジジーでの比較を通して、移動体サポート方式のそれぞれの総トラヒック量の変化の基本的な傾向がより明確になった。さらに、DF方式とDQ方式は、移動が非常に少ない場合またはルータ数が非常に少ない場合を除いて、総トラヒック量が最も少ないこと、すなわち効率が良いことが分かった。

3.3 ネットワーク特性による最適方式の変化

これまでの議論より、移動体サポート方式の総トラヒック量は、ルータ数、ネットワークポロジジー、移動頻度/通信頻度に依存することが明らかとなった。そこで、本節では、これらのパラメータにデータサイズ/パケットサイズのパラメータも考慮にいれ、あるパラメータの集合が与えられたとき、すなわちあるネットワーク特性が与えられたときに、どの方式が最も効率が良くなるかについて議論する。したがって、本節での議論は、格子状ポロジジーや二分木ポロジジーを含む様々なネットワークポロジジーにおける一般的な比較を行うものである。

まず、表2の総トラヒックの各式を $H\lambda c$ で割り、 $p = C/H$ とおくと、次式が得られる。

$$\text{BN} : 2pk + l,$$

$$\text{BF} : Nl,$$

$$\text{BQ} : l + N + 1,$$

$$\text{DF} : 2k + 2l,$$

$$\text{DQ} : 2k + l + 2.$$

BN方式のトラヒックは、 p の影響を受けるため、BN方式とDF方式またはDQ方式との境界の k の値は、 p によって変化する。 p は定義よりネットワークポロジジーによって決まるのは明らかである。そこでまず、 p の値が最小、最大となるトポロジジーを考える。直観的に、 p はルータ間の接続の密度を示しているといえる。同じ数のルータが存在するとき、ルータ間の回線数を増やすと、平均ルータ間距離が短くなり、ルータは密に結合されることになる。反対に、回線数を減らすと、平均ルータ間距離は長くなり、ルータは疎に結合されることになる。 p の値が大きくなるほど密な結合であり、小さくなるほど疎な結合である。

p の値が最大となるのは、完全グラフ(図5(b))のときで、 $C = N(N-1)/2$ 、 $H = (N-1)/N$ から、 $p = N^2/2$ である。 p の値が最小となるのは、直線連鎖型グラフ(図5(a))のときで $C = N-1$ 、 $H = (N-1)(N+1)/3N$ から、 $p = 3N/(N+1)$ である。

したがって、BN方式とDF方式またはDQ方式との境界の k の値は、 p が最大のとき最小、 p が最小のとき最大となり、それぞれ $2/(N^2-2)$ 、 $(N+1)/(2N-1)$ となる。

上記の議論に基づき、ルータ数、移動頻度と通信頻度の比、データパケットと制御パケットのサイズ比が与えられたときに、最もトラヒックが少なくなる方式を示したグラフが図6である。(a)は p が最大の場合、つまり、完全グラフのネットワークポロジジーの場合、(b)は p が最小の場合、つまり直線連鎖型のネッ

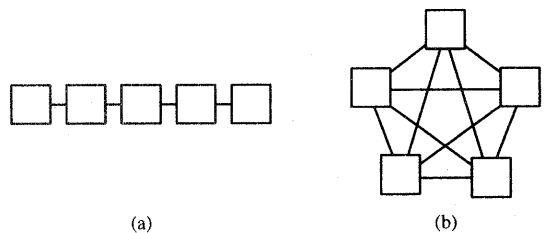


図5 H, C が最小または最大となるトポロジジー。(a) 直線連鎖型、(b) 完全グラフ

Fig. 5 Network topologies representing the cases where H and C are minimum or maximum: (a) linear; (b) complete graph.

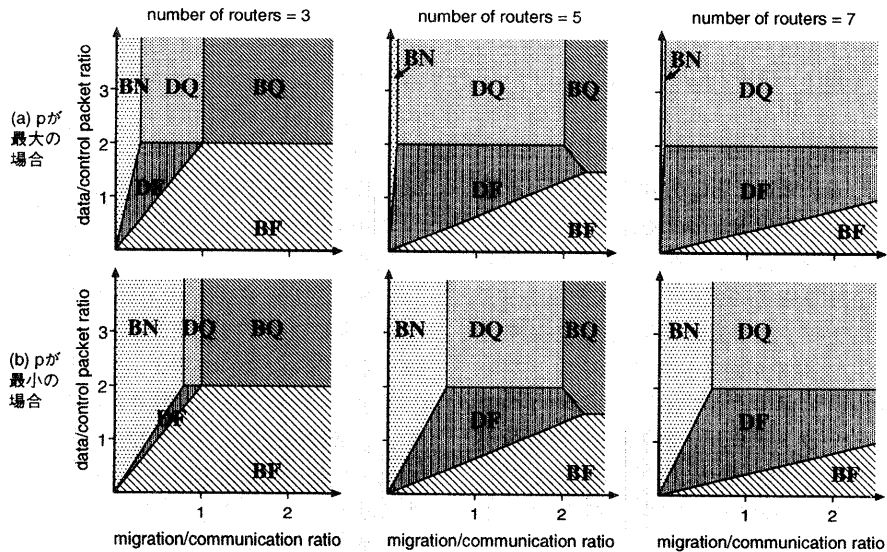


図6 ネットワーク特性によって定まる最適方式の変化

Fig. 6 Effective region determined by k , l , N .

トワークトポロジーの場合を示す。他のネットワークトポロジーの場合、BN方式とDF方式またはDQ方式との境界は、この2つのトポロジーの場合の境界の間に入る。

このグラフから、 N が大きくなるにつれ、つまりネットワークの規模が拡大するにつれ、デフォルトルータを使用したDF方式およびDQ方式の有効範囲が広がっていくことが分かる。すなわち、DF方式およびDQ方式は、BN方式、BQ方式およびBF方式よりもスケラビリティがあるということになる。同じネットワーク規模の場合、ルータの接続密度が高くなるほど、BN方式に対するDF方式およびDQ方式の優位性が高くなる。また、DF方式とDQ方式ならびにBF方式とBQ方式の比較から、データパケットサイズが制御パケットサイズの約2倍以上ある場合は、いったん現在地を問い合わせしてからデータパケットをフォワードする問合せ方式の方が効率が良いことが分かる。

以上のことより、本論文で評価した5つの移動体サポート方式は、次のように使い分けのことが有効と考えられる。ネットワーク規模が小さく、移動も稀であり、ルータの接続が密なトポロジーのネットワークでは、BN方式が良い。ネットワーク規模が小さい場合で、移動が非常に頻繁なネットワークでは、BF方式またはBQ方式が良い。この場合、大きなデータパケットが多ければBQ方式が、反対に小さなデータパケットが多ければBF方式が適している。それ以外の場合、

つまりネットワーク規模が大きく、移動が非常に稀でも頻繁でもない場合は、DF方式またはDQ方式を使用すると効率が良い。このとき、平均データパケットサイズが平均制御パケットサイズの2倍以上であればDQ方式、そうでなければDF方式を用いるのが良い。

4. おわりに

本論文では、移動体をサポートするための基本的な方式として、BN方式、BF方式、BQ方式、DF方式、DQ方式の5つの方式を考え、これらの方式の性能をトラヒックの観点から定量的に評価し、比較を行った。その結果、各方式に関するいくつかの特徴が明らかになった。

まず、データパケットや制御パケットをブロードキャストするBN方式、BF方式、BQ方式は、小規模なネットワークに向いているのに対し、デフォルトルータとカレントルータが存在するDF方式やDQ方式は、大規模なネットワークに対しても有効であり、スケラビリティがある。ネットワーク規模が同じ場合は、ネットワークトポロジーが密になるほど、BN方式に対するDF方式またはDQ方式の優位性が高まり、移動頻度が低くても有効になる。

また、移動頻度によっても最適な方式が変わり、非常に稀な場合はBN方式、非常に頻繁な場合はBF方式またはBQ方式、それ以外はDF方式かDQ方式が適している。パケットサイズに関しては、制御パケットに比べデータパケットが大きい場合は、問い合わせに

基づくBQ方式, DQ方式が有効であり, 反対に小さい場合は, フォワーディングに基づくBF方式, DF方式が有効である。

これらの結果を踏まえて, ネットワーク設計者は, ルータ数, ネットワークトポロジー, 移動体の移動頻度およびデータパケットのサイズ等のネットワークの特性をパラメータとして最適方式を決定でき, 設計時の方式選択の指針として有効に活用できるものと考えられる。

謝辞 本研究の機会を与えてくださった株式会社エイ・ティ・アール知能映像通信研究所中津良平社長ならびに日頃ご指導いただく間瀬健二第2研究室室長に深謝の意を表す。また, 有益なご助言をいただいた大阪大学工学部情報システム工学科西尾章治郎教授と株式会社エイ・ティ・アール知能映像通信研究所第2研究室室員の皆様につつしんで感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Carlberg, K.G.: A Routing Architecture That Supports Mobile End Systems, *Proc. IEEE MILCOM*, pp.159-164 (1992).
- 2) Ebling, R.M., Mummert, B.L. and Steere, C.D.: Overcoming the Network Bottleneck in Mobile Computing, *Proc. 1994 Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.34-36 (1994).
- 3) Ioannidis, J., Duchamp, D. and Maguire Jr., G.Q.: IP-based Protocols for Mobile Internetworking, *Proc. ACM-SIGCOMM*, pp.235-245 (1991).
- 4) ISO:8473, Draft, Information Processing Systems-Data Communications-Protocol for Providing the Connectionless-mode Network Service (1992).
- 5) ISO:10589, Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Intermediate System to Intermediate System Intra-Domain Routeing Information Exchange Protocol for Use in Conjunction with the Protocol for Providing the Connectionless-mode Network Service (ISO 8473) (1992).
- 6) Madhow, U., Honig, M.L. and Steigltz, K.: Optimization of Wireless Resources for Personal Communications Mobility Tracking, *Proc. IEEE INFOCOM '94*, Vol.2, pp.577-584 (1994).
- 7) Myles, A. and Skellern, D.: Comparison of Mobile Host Protocols for IP, *INTERNETWORKING: RESEARCH AND EXPERIENCE*, Vol.4, pp.175-194 (1993).
- 8) Noy, A.B., Kessler, I. and Sidi, M.: Mobile Users: To Update or not to update?, *Wireless Networks*, Vol.1, No.2, pp.175-185 (1995).
- 9) Perkins, C.E.: IP Mobility Support, Internet Draft, *draft-ietf-mobileip-protocol-11.txt*, 1995 (working draft).
- 10) Perkins, C.E. and Bhagwat, P.: A Mobile Networking System Based on Internet Protocol, *IEEE Personal Communications*, Vol.1, pp.32-41 (1994).
- 11) Postel, J.: Internet Protocol, *RFC 791* (1981).
- 12) Tanaka, R. and Tsukamoto, M.: A CLNP-based Protocol for Mobile End Systems within an Area, *Proc. IEEE International Conference on Network Protocols*, pp.64-71 (1993).
- 13) 田中理恵子, 塚本昌彦: OSI ネットワークにおける移動体対応プロトコル, 情報処理学会研究会報告 DPS 64-17, Vol.94, No.19, pp.93-98 (1994).
- 14) 田中理恵子, 塚本昌彦: OSI エリア内での移動体通信のためのデフォルトフォワーディングプロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.11, pp.2509-2520 (1994).
- 15) Teraoka, F., Yokote, Y. and Tokoro, M.: A Network Architecture Providing Host Migration Transparency, *Proc. ACM-SIGCOMM*, pp.209-220 (1991).
- 16) 塚本昌彦, 田中理恵子, 津森 靖: CLNP ネットワークにおけるエリア内での移動体サポート, 情報処理学会研究会報告 DPS 61-30, Vol.93, No.58, pp.227-234 (1993).
- 17) 塚本昌彦, 門林理恵子: CLNP ネットワークにおける広域移動体通信プロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.8, pp.2007-2018 (1995).
- 18) Wada, H., Yozawa, T., Ohnishi, T. and Tanaka, Y.: Mobile Computing Environment Based on Internet Packet Forwarding, *Proc. Winter USENIX*, pp.503-517 (1993).

(平成7年7月7日受付)

(平成7年11月2日採録)



門林理恵子 (正会員)

1963年生。1985年大阪大学文学部史学科卒業。ソフトウェア会社勤務を経て, 1990年シャープ(株)入社。1994年9月より, (株)エイ・ティ・アール通信システム研究所に出向。現在, (株)エイ・ティ・アール知能映像通信研究所第2研究室に所属し, コミュニケーション支援技術の研究に従事。電子情報通信学会会員。共訳書に「オープンシステムネットワーク」(ソフトバンク)。

**塚本 昌彦 (正会員)**

1964年生。1987年京都大学工学部数理工学科卒業。1989年同大学院工学研究科修士課程修了。同年、シャープ(株)入社。1995年3月より大阪大学工学部情報システム工学科講師。現在に至る。モバイルコンピューティングおよび知識処理応用に興味を持つ。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE 各会員。
