

負荷分散機構を有する適応型ルーティングの一手法

棟朝 雅晴*, 高井 昌彰**, 佐藤 義治*

*北海道大学工学部

**北海道大学大型計算機センター

本論文では、代替経路間の負荷分散機構を有する適応型ルーティング手法を提案し、その有効性をシミュレーション実験により示す。従来用いられてきたルーティング手法はルーティングテーブルやリンクの状態をブロードキャストするため、ネットワークが大規模化した場合に多くの通信コストを要することが予想される。本論文で提案するルーティングアルゴリズムは、実際に多数のパケットが使用している経路に関してのみ代替経路の生成およびその通信遅延時間の評価を行うため、ルーティングのための情報交換に必要な通信コストを大きく削減することが可能となる。本手法においては、遺伝的アルゴリズムを使用することで代替経路のリストを生成するとともに、それらの間で通信パケットを分配することで負荷分散を実現する。ネットワーク通信をシミュレーションするシミュレータを用いた評価実験を行い、従来手法と比較して、少ない通信コストにより効果的なルーティングが実現されていることを示した。

A Load Sharing Mechanism of Adaptive Routing Algorithms

Masaharu Munetomo*, Yoshiaki Takai**, and Yoshiharu Sato*

*Faculty of Engineering, Hokkaido University

**Computing Center, Hokkaido University

This paper presents an adaptive routing algorithm which has a load balancing mechanism among alternative paths, and shows the effectiveness of the algorithm through simulation experiments. Conventional routing algorithms broadcast information on routing tables or link status in a network, which leads to consume much communication cost when the network becomes large. A routing algorithm we propose generates alternative paths and perform evaluation of communication delay only for paths frequently used. This mechanism greatly reduces communication cost for information exchanging of the routing. In the algorithm, we employ genetic algorithms in generating alternative paths among which we distribute communication packets to ensure load balancing. We perform simulation experiments using a simulator of network communications and the result of the experiments says that an effective routing is achieved by less communication cost.

1 はじめに

計算機ネットワークが大規模なものとなるにつれて、通信パケットの経路制御(ルーティング)が重要な課題となりつつある。インターネットではホップカウント距離に基づくベクトル距離ルーティングが一般に使用されている。ベクトル距離ルー

ティングでは、ルーティングテーブルをブロードキャストするために多くの通信コストを要する。この問題を解決するため、サブネット内ではデフォルト経路などを使用することでゲートウェイ外のノードへの経路をまとめてルーティングすることは可能であるが、ゲートウェイ間でのルーティングでは根本的な解決策とはならない。

また、従来の手法においては、あるパケットを送出する場合に、最適な一つの経路を選択し、それに従って通信を行うため、代替経路が複数ある場合でも、OSPFの場合に同一のホップカウントを有するときには負荷分散を行っているものの、負荷分散を動的に行うという観点は基本的には存在しない。

以上のような背景により、ルーティングを行う時にその必要に応じて通信リンクに関する情報を間接的に集め、少ない通信コストで効果的なルーティングを実現するとともに、代替経路間で通信パケットを配分し、通信回線に関する負荷分散を行う必要があると考えられる。本論文では、パケットの送出元ですべての経路を決定する始点制御ルーティングにおいて、ルーティングテーブルを構成する経路の集合に対して遺伝的アルゴリズム [3] における遺伝的操作を適用し代替経路を生成するとともに、それらの代替経路間での負荷分散を実現するルーティングアルゴリズムを提案する。

本論文の構成は以下の通りとなる。まず従来用いられてきたルーティングアルゴリズムについて述べた後、提案するアルゴリズムの基本となる代替経路間の負荷分散について考察する。次いで、提案するルーティングアルゴリズムについて解説し、最後にシミュレータを用いた評価実験の結果を示す。

2 ルーティングアルゴリズム

互いに自律したノード（ゲートウェイ）およびリンク（通信回線）からネットワークは構成される。それぞれのノード間でパケットの交換により通信が実現される。あるノードから別のノードへパケットを送出するとき、その経路制御（ルーティング）が必要となる。ベクトル距離ルーティングは、経路制御テーブルを直接ブロードキャストすることで、距離情報を互いに交換する方式である。距離の基準として RIP(Route Information Protocol)[2] など用いられているのはネットワークのホップカウント 距離 (hop count metric)[1] である。ベクトル距離制御ルーティングは、経路制御テーブルの内容をすべてブロードキャストするため、分散システムの規模が大きくなった場合に、多くの通信

量が必要になり、全体としてシステムの性能を低下させるという問題点が存在する。

また、リンク状態ルーティングでは、各ノードが完全なネットワークポロジ情報を持っていると仮定し、そのリンクの状態をブロードキャストすることで他のノードへ伝える。通信経路は Dijkstra のアルゴリズムを用いて最短経路を計算することで求められる。OSPF(Open Shortest Path First) プロトコル [4] はリンク状態ルーティングの代表例である。リンク状態ルーティングでは、それぞれのリンク状態の情報のみがブロードキャストされるため、ベクトル距離ルーティングと比較した場合、互いに転送すべき情報量を削減することができる。しかしながら、実際には使用されないリンクについてもその状態がブロードキャストされるなど、システムが大規模化した場合には無駄な情報が通信量を増大させるおそれがある。

本論文で提案するルーティングでは、実際に通信が行われている経路についてのみ、その経路の通信遅延時間の評価を行うための評価パケットを送出する。これにより、あまり使用されていない通信リンクに関する情報は交換されず、全体としてルーティングの情報収集のために使用される通信コストを大きく削減できることが期待できる。

3 負荷分散機構を有するルーティングアルゴリズム

ここでは、本論文で提案するルーティングアルゴリズムについて述べる。

3.1 概要

本論文で提案するのは始点制御ルーティング (source routing) によるルーティングアルゴリズムである。始点制御ルーティングでは、通信パケットの送出元ですべての経路情報を管理する。すなわち、あるパケットを送信する場合に、目的ノードへ到達するまでに経由するすべてのノードのリストが経路情報として与えられる。インターネットプロトコル (IP) においても、始点制御オプションが存在し、これを指定することで始点制御によるルーティングを行なうことができる。実際の運用では始点制御オプションを用いず、隣接する次

の送り先ノードのみを管理する方式が一般的であるが、この場合には最短経路などの得られた適切な経路集合からルーティングテーブルを生成するため、提案する手法で得られた始点経路集合から隣接する送り先ノードに関するルーティングテーブルを構築することは、自明ではないが困難な課題にはならないものと予想される。

以下の議論では、ネットワーク全体のトポロジー情報を、すべてのノードが保有しているものと仮定する。トポロジー情報の交換のためのプロトコルについては、従来から存在するプロトコルを使用するものとする。また、リンクの負荷状態に関する情報を直接集めることはしない。

3.2 ルーティングテーブル

本手法で用いられるルーティングテーブルを表1に示す。それぞれの目的ノード (Dest) 毎にパケットの送出頻度 (Frequency)、経路リストがあり、それぞれの経路 (Route) について、それを選択する確率重み (Weight)、その経路を選択したパケットの通信遅延 (Delay) が与えられる。表で、*のついた経路は、Default route と呼ばれ、ホップカウント距離の観点から見た最短経路である。

表 1: ルーティングテーブル

Dest	Freq.	Route	Weight	Delay(ms)
B	10232	ACB*	0.7	50
		ACDB	0.2	60
		ACDEB	0.1	70
F	50983	AHF*	0.4	100
		AJKF	0.6	105
H	33452	AH*	0.9	40
		AGH	0.1	40

初期状態では、ルーティングテーブルは空である。ルーティングテーブルに存在しない目的ノードへのルーティングを行う必要が生じた場合、トポロジー情報にもとづき、Dijkstra のアルゴリズムにより Default route を求める。一定数のパケットを処理するごとに遺伝的操作を用い、代替経路を生成する。

代替経路の生成により、ルーティングテーブルのサイズが拡大するが、メモリ量の制限および検索速度を維持するため、テーブルのサイズを制限する。そのために、天野らによる手法 [6] を採用する。これは第一に、テーブル全体のサイズに関して制限を設け、それを越えた場合には使用頻度の低い目的ノードに関するルーティングテーブルを除去する。第二に、一つの目的ノードに関して代替経路数に制限を設け、それを越えた場合には重みの値 (適応度値) が小さい経路をルーティングテーブルから除去する。

3.3 代替経路の生成

代替経路の生成法として、天野らによる手法 [6] では、始点となるノードに隣接するノードの中から一つのノードをランダムに選び (これを mutation node と呼ぶ)、そのノードからの最短経路を生成することで、代替経路を求める。この場合、生成される代替経路が始点の隣接ノードに関するものに限られる。また、村井らによる手法 [5] では、経路を構成するノードリストの中から、一つのノードをランダムに選び、そのノードを別のものに変化させるとともに、経路の整合性を確保するために、その前後に新たな経路を強制的に補う。この場合には、mutation により元の経路と大きく異なる経路が生成されるおそれがあり、その場合には長く無駄な経路が生成されることが予想される。

本論文では、元の経路と大きく異ならず、かつ多様な代替経路生成する mutation の手法を提案する。本手法では、経路リストに存在するノードの中から始点と終点を除くノードからランダムに一つのノードを選び、それに隣接するノードをランダムに一つ選択する。その選択されたノードを通過するという条件を満たす最短経路を求めることにより代替経路を生成する。

また、crossover に関して、村井らの手法 [5] では、すべてのノードからランダムに交差点となるノードを決定し、それと同じノードが crossover の相手となる経路に存在する場合に crossover を行うが、本手法では、crossover を行う 2 つの経路で共通に存在するノードの中からランダムに一つのノードを選択する点が異なる。選択された交差点に関して、その後の経路を互いに交換する。

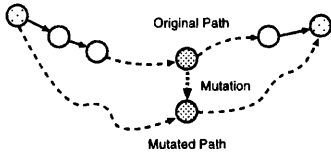


図 1: 経路に関する mutation

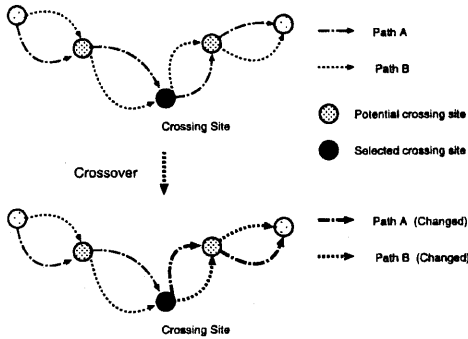


図 2: 経路に関する crossover

経路間で共通のノードが存在しない場合には crossover を行わない。

3.4 負荷分散

代替経路が複数存在する場合に、OSPF プロトコルにおいては、ホップカウント距離が等しい経路間では負荷分散を行うが、それ以外の場合には負荷分散を行わない。

本手法では、ルーティングテーブルにおいて、 i 番目の経路を用いて通信パケットを送信する確率重み w_i の値を以下の式により求め、その重みに応じた確率でパケットを分配することで、代替経路間での負荷分散を実現する。

$$w_i = \frac{1/t_i}{\sum_{j=1}^n 1/t_j} \quad (1)$$

この重み w_i の値を遺伝的操作における適応度値 (fitness value) として用いる。

3.5 実行手順

ルーティングアルゴリズムは以下の手順で実行される。

初期化

起動時にルーティングテーブルを空にする。

パケットの送信

通信パケットをある目的ノードへ送信する必要がある場合に、ルーティングテーブルから、その目的ノードに対する経路群より確率重みにしたがって一つの経路を選択し、それに基づいてパケットを送出する。ルーティングテーブルに、その目的ノードに関する経路が存在しない場合には、Default route を生成し、その経路をルーティングテーブルに登録する。この場合、Frequency エントリは 0 にセットされる。パケットの送信が完了した時点で、ルーティングテーブルにおける Frequency エントリの値をインクリメントする。

遅延評価パケットの送信

ある目的ノードに対して一定数のパケットを送出するごとに、通信遅延評価のためのパケットをそれぞれの代替経路を介して送出的。遅延評価パケットが目的ノードに到着すると、通信遅延時間を評価し、その結果が送信元へ送り返される。すべての評価パケットを受け取った後、式 (1) によりそれぞれの経路に関する適応度値 (確率重み) が計算される。リンクの過負荷などにより評価パケットがある一定時間以上経過しても戻って来ない場合には、その経路は使用しないものとしてルーティングテーブルから除去される。

3.5.1 遺伝的操作による代替経路の生成

ある目的ノードに関して適応度の評価が一定回数行われる毎に、遺伝的操作である mutation と crossover がその目的ノードに関する経路群に対して適用され、新たな代替経路が生成される。新たに生成された経路に対する予想通信遅延時間はそれを生成した元の経路から継承される。crossover の場合には、その経路の生成元である 2 つの経路

に関する値の平均値を継承する。継承後、適応度値 w_i の再計算を行う。

新たな目的ノードの登録や代替経路の生成により、ルーティングテーブルのサイズがあらかじめ定めたある閾値を越えた場合に、使用頻度の少ない目的ノードに関するルーティングテーブルを削除する。また、ある目的ノードにおいて代替経路数がある一定数を越えた場合には、適応度値の最も小さな経路を削除する。この場合にも、適応度値 w_i の再計算を行う。

4 評価実験

離散事象シミュレーション (Discrete Event Simulation) の考え方を基本としたシミュレータを構築し、それを使用して評価実験を行った。

以下のアルゴリズムについて、比較実験を行った。

- RIP (Route Information Protocol)
- SPF (Shortest Path First protocol)
- LBR (Load Balancing Routing, 本論文での提案手法)

4.1 実験条件

実験には図3に示すネットワーク例を使用した。図において、太い線は4.5Mbpsの通信リンクを示し、細い線は1.5Mbpsの通信リンクを示す。また、それぞれの丸印はノードを示し、ノード1, 3, 7, 11, 12, 17においてランダムにパケットが発生する。それぞれのパケットの目的地はすべてのノードからランダムに選択される。

4.2 平均待ち時間の比較

全体としてのルーティングの効果を比較するため、図4にパケットが発生してからそれが目的地に到着するまでの待ち時間の平均値に関する比較実験の結果を示す。図の横軸は、パケットの平均発生間隔(指数分布に従う)の平均値を示し、縦軸は平均待ち時間(対数表示)を示している。

この結果によると、パケットの発生間隔が長く負荷が軽い場合にはどの手法でも短い待ち時間で

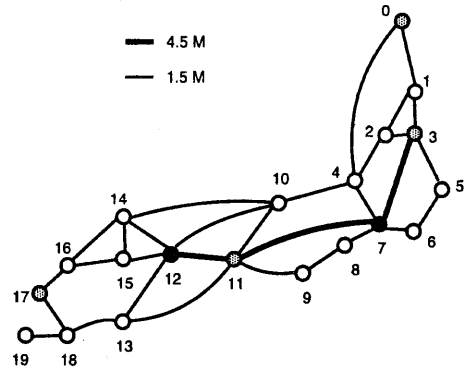


図3: 実験に使用したネットワーク例

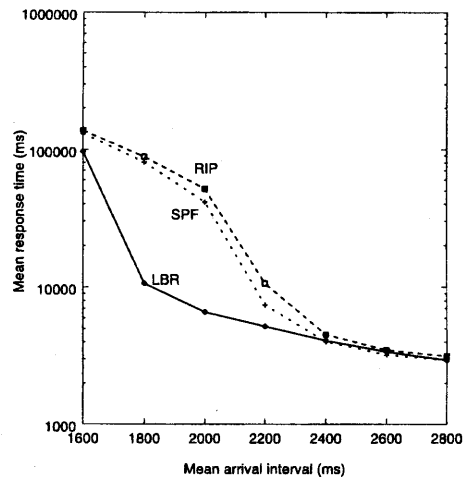


図4: 平均待ち時間の比較

パケットが目的地に到着している。また、発生間隔が短く負荷が非常に重い場合には、どの手法によっても待ち時間が急激に増加している。それ以外の場合には、提案手法であるLBRが他の手法に比べて待ち時間が大きく改善され、例えば発生間隔が1800(ms)の場合には待ち時間が1/10にまで改善されている。これは、提案手法であるLBRにおいて代替経路を生成し、通信遅延を観測して負荷を分散することで、負荷の極端に重い通信リンクが生じるのを防いでいるためと考えられる。

4.3 負荷分散の効果について

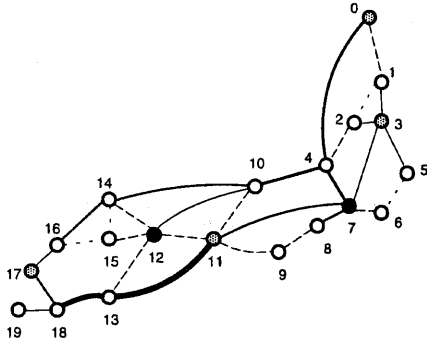


図 5: ネットワークの負荷状態 (RIP)

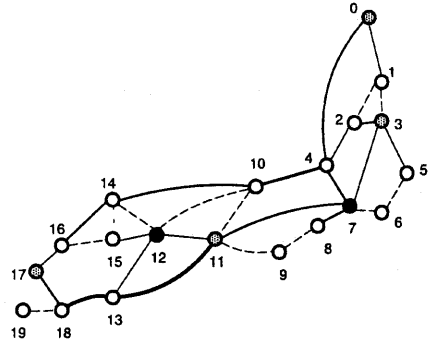


図 7: ネットワークの負荷状態 (LBR)

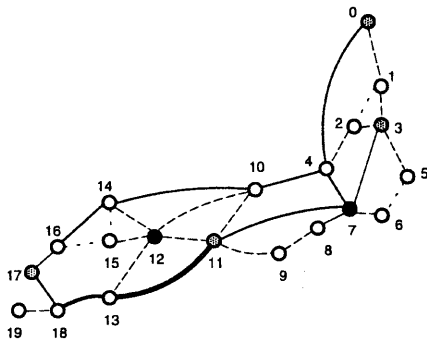


図 6: ネットワークの負荷状態 (SPF)

上で述べた負荷分散の効果について、それを裏付ける実験結果を示す。パケットの平均発生間隔が 2000(ms) の場合において、それぞれの通信リンクの混み具合（平均待ち行列長）を図 5, 6, 7 に示す。ここで、リンクの太さは平均待ち行列長に対数をとったものに比例している。従って、リンクが太くなるにつれ、急激に待ち行列長が増加していることとなる。

ここで、得られた結果を見ると、RIP においては、ノード $11 \Rightarrow 13 \Rightarrow 18$ への経路が著しく混雑している一方、 $11 \Rightarrow 18$ の代替経路となる $11 \Rightarrow 12 \Rightarrow 15 \Rightarrow 16 \Rightarrow 17 \Rightarrow 18$ はほとんど使用されていない。SPF ではある程度の改善がみられるが、本質的には RIP と同じ結果となっている。以上の 2 つとは対照的に、提案手法である LBR では負荷の著しい偏りが生じておらず、どのリンクも平均的に使用されていることが分かる。その結果、全体としての平均待ち時間が大きく改善されている。

5 結論

本論文では、代替経路間での負荷分散を実現するルーティングアルゴリズムを提案し、シミュレーションによる評価を行い、提案手法により負荷分散がはかられ、パケットの待ち時間が大きく改善されることを示した。

参考文献

- [1] Comer, D. E.: *Internetworking With TCP/IP Vol. I — Second Edition*, Prentice Hall (1991).
- [2] Hedrick, C.: *RFC-1058: Routing Information Protocol*, Network Working Group (1988).
- [3] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press (1975).
- [4] Moy, J.: *RFC-1131: The OSPF Specification*, Network Working Group (1989).
- [5] 村井康紀, 棟朝雅晴, 高井昌彰, 佐藤義治: 遺伝的アルゴリズムによる分散・適応型ルーティング, 情報処理学会第 52 回全国大会講演論文集 (2), pp. 121-122 (1996).
- [6] 天野美樹, 棟朝雅晴, 高井昌彰, 佐藤義治: 遺伝的操作を用いた適応型ルーティングの一手法, 平成 5 年電気関係学会北海道支部連合大会, p. 336 (1993).