

# リンク負荷メトリックに基づく遺伝的アルゴリズムによる 負荷分散ルーティング

山口直彦<sup>†</sup> 棟朝雅晴<sup>††</sup>  
赤間清<sup>††</sup> 佐藤義治<sup>†</sup>

インターネットに代表されるパケット通信ネットワークにおいて、ネットワーク資源を有効に使用するという観点から、遺伝的アルゴリズムを用いて複数の経路を生成し、それらの代替経路間で負荷を分散するアルゴリズムが提案されている。本論文では遺伝的アルゴリズムを用いた負荷分散ルーティングに対し、評価の高速化によりネットワークの状態観測を迅速に行うため、経路の評価にリンクの負荷を考慮したメトリックを導入し、さらにそれを用いてネットワークの負荷状態を反映した代替経路生成を行う遺伝的アルゴリズムの実装を行う。ネットワークシミュレータを用いたシミュレーション実験により提案する手法の有効性を検証した。

## Load Balancing Routing with Genetic Algorithm Based on Link Load Metric

NAOHIKO YAMAGUCHI,<sup>†</sup> MASA HARU MUNETOMO,<sup>††</sup>  
KIYOSHI AKAMA<sup>††</sup> and YOSHIHARU SATO<sup>†</sup>

In packet switching networks such as the Internet, to utilize network resources effectively, routing algorithms with genetic algorithms have been proposed which generate alternative routes by genetic operators to balance loads among them and prevent congestions. This paper proposes adaptive genetic operators based on link load metric for the genetic routing algorithms in order to realize rapid evaluations of network load status and effective generations of alternative routes. Through simulation experiments performed on a network simulator, we show the effectiveness of the proposed method.

### 1. ま え が き

技術革新によるコンピュータの性能の飛躍的な向上や光ファイバ網の整備など、情報インフラ設備の充実によってインターネットに代表されるコンピュータネットワークの規模は急速に拡大している。それにともないネットワークを流れるデータの量もまた増加の一途をたどり、様々なサービス品質が求められるようになってきている。このような大規模で複雑に構成されたネットワークにおいて遠隔地に存在する多くの異なるコンピュータと通信を行う場合、通信パケットを目的地まで確実に伝達していくため、効率的なルーティ

ング機構が必要とされる。

インターネットでは、現在トポロジの変化のみを観測する RIP ( Hedrick , 1988 ) , OSPF ( Moy , 1989 ) などのルーティングプロトコルが用いられている。RIP は Bellman-Ford の距離ベクトルアルゴリズムに基づき、各ノード間で目的地ノードの ID とホップカウント距離からなる距離ベクトル情報を互いに交換しルーティングテーブルを構築する。RIP は小規模なネットワークにおいては適切に働き、広く実装もされている。しかしトポロジの収束が遅く、ルーティングテーブル全体を含んだ情報をブロードキャストするため、大規模なネットワークでは距離計算の際に大きな通信オーバーヘッドと計算遅延を発生させてしまうという問題がある。一方、OSPF に代表されるリンク状態アルゴリズムはルーティングテーブルの代わりに比較的サイズの小さいトポロジ情報の交換を行い、各ノードはトポロジデータベースに基づいた Dijkstra の最短経路アルゴリズムにより最適な経路を計算する。

<sup>†</sup> 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻  
Division of System and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

<sup>††</sup> 北海道大学情報メディア教育研究総合センター  
Center for Information and Multimedia Studies, Hokkaido University

OSPF は、指定されたサービスタイプに基づいてリンク帯域幅、遅延など複数のコストを持つことが可能であり、また同一コストの複数経路を同時に使用することにより通信パケットを分散することもできるが、現状では、代替経路間での負荷分散が行われるのはメトリックが同一の経路群に限定されている。代替経路間で負荷分散を行うことにより、通信パケットの到着順が前後するなど受信側への負担が予想されるものの、複数の経路を使用することで突発的な負荷状態の変動に対しても安定した通信を実現し、負荷の平均化を図ることによりネットワーク全体としての利用効率の向上が期待される。

ネットワークの負荷状態にあわせて、動的に経路を変更する適応型ルーティングの分野においては、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いたルーティングアルゴリズムの研究が行われている。Carse ら<sup>7)</sup>は fuzzy-classifier system により経路を確率的に決定する手法を提案しているが、ここでは経路そのものを最適化の対象とせず fuzzy set に関するルールに対して遺伝的アルゴリズムを適用している。また、棟朝ら<sup>1)</sup>は、代替経路を GA により生成し、複数の代替経路へ通信パケットを送出する始点制御に基づくルーティングアルゴリズムを提案している。この手法は定期的に評価パケットを送信することによって経路の通信遅延時間を観測し、遅延時間の逆数を用いた経路選択割合を用いることにより、代替経路間での動的な負荷の分散を実現している。しかしながら、評価に通信遅延時間を用いていることからネットワーク混雑時には評価に時間がかかり評価終了時まで古い評価情報を使い続けるため、トラフィックの変動が激しいネットワークにおいては負荷の状態を正確に反映できないという欠点があった。また、衛星回線など高帯域幅にもかかわらず相対的に遅延の大きい回線が混在した場合、そのような回線が空いているにもかかわらず、その遅延により混んでいるものと判断され、パケットが送出されずに回線の利用効率が低下するという問題点も考えられる。

そこで本論文では、遺伝的アルゴリズムを用いたルーティングアルゴリズムに対して、リンク負荷を考慮した効率的な経路の評価手法、またそれを用いた遺伝的操作の導入を行う。提案手法は、経路の評価において遅延時間の代わりにリンク負荷のメトリックを用いる。これはリンク中の(パケットバッファサイズ/帯域幅)で表現される混雑度合いをリンク負荷として計測し、評価パケットを先送りすることによって高速な経路評価を可能とする。さらに、リンク負荷メトリック

を遺伝的操作に応用することで、ネットワークの状態を反映した代替経路の生成を目指す。

以下では、最初に従来手法である遅延時間メトリックに基づく GA によるルーティングについて説明し、次にリンク負荷に基づく評価手法の導入、さらにその上で行われるリンク負荷を考慮した遺伝的操作について説明する。最後にシミュレーション実験により提案手法の有効性を検証する。

## 2. 遺伝的アルゴリズムを用いた負荷分散ルーティングアルゴリズム

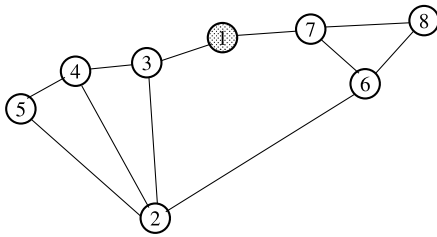
### 2.1 概 要

Genetic Adaptive Routing Algorithm (GARA)<sup>1)</sup> は GA を用いた始点制御に基づく適応型分散ルーティングアルゴリズムである。このアルゴリズムは遺伝的操作によって代替経路群を生成し、効果的なルーティングとネットワークの負荷均衡を実現する。GARA は分散アルゴリズムであり、各ノードは同一アルゴリズムをそれぞれ独立に実行することになる。また、GARA は RIP, OSPF など従来の経路制御プロトコルの拡張としてとらえることができ、アルゴリズムを実行する前提となるネットワークトポロジ情報の取得に関しては従来手法と同様、Hello プロトコルを用いて各ノードがネットワーク全体のトポロジ情報を取得する。

各ノードのルーティングテーブルは目的地ごとに代替経路、各経路ごとに送信されたパケット数、観測された遅延、適応度といった情報で構成される。ネットワークとルーティングテーブルの例を図 1 に示す。経路は始点から終点までの符号化されたノード ID のリストで表現される。

GARA は各ノードごとに、以下のアルゴリズムを実行する。

- (1) ノード起動時にルーティングテーブルの初期化を行い、ルーティングテーブルを空にする。
- (2) ある目的地に対してパケットを送る際には、以下の操作が実行される。
  - 目的地に対しての経路がルーティングテーブルに存在しない場合、ノードは Dijkstra の最短経路アルゴリズムを用いてデフォルト経路を生成する。この経路はルーティングテーブルに挿入される。
  - 目的地ノードへの代替経路がルーティングテーブルに存在する場合、その代替経路群の中から適応度に応じた確率で 1 つの経路を選択し、それをパケットの用いる経路と



目的地	経路	遅延	適応度
2	(1 3 2)	2	0.8
	(1 3 4 2)	11	0.1
	(1 3 4 5 2)	12	0.1
6	(1 7 6)	11	0.4
	(1 7 8 6)	7	0.6
8	(1 7 8)	6	0.7
	(1 7 6 8)	12	0.3

図1 ルーティングテーブルの例(ノード1)  
Fig.1 An example of routing table in node 1.

して送信する。

- (3) あるノードがパケットを受け取ると、パケットの目的地がそのノードであった場合にはそれを受信し、目的地以外であった場合にはパケットの持つ経路情報を参照し、パケットを転送する。
- (4) ある目的地ノードへ一定数のデータパケットが送信されるごとに、その経路に対して評価パケットを送出する。評価パケットは経路の通信遅延を観測する。
- (5) 評価パケットが同一経路の逆をたどり送信元へ戻ってくると、観測した通信遅延に基づきルーティングテーブルの情報を更新する。
- (6) ある経路の通信遅延を更新した後、その経路と同一目的地ノードを持つ代替経路群に関して適応度の計算を行う。
- (7) 一定数の適応度計算を行うごとに、経路群に対し遺伝的操作を適用し代替経路を生成し、ルーティングテーブルに挿入する。遺伝的操作は経路突然変異と経路交叉の2つからなる。新たな代替経路の評価値は親となる経路の評価値を継承し、適応度の再計算を行う。
- (8) 遺伝的操作を適用後、必要な場合は選択を適用して代替経路を削除し、ルーティングテーブルのサイズを制限を行う。

### 2.2 適応度の評価

各経路の適応度は、代替経路に対する選択確率として定義される。通信パケットは目的地までの代替経路を通る際に適応度に従って経路が選択され、それによ

り負荷が分散されることになる。

ある経路の適応度は、同一目的地への経路群の評価値を用いて計算される。それぞれの経路の評価値は、経路に評価パケットを送信し、ネットワークの状態を観測することによって求める。GARAでは経路の通信遅延時間をメトリックとして観測し、評価値とする。

GARAはある経路に一定のデータパケットが送信されるごとに評価パケットを送出する。これにより、頻繁に使われる経路に対しては他の経路と比べて多くの評価を行うことになる。評価パケットは評価開始時刻をヘッダ部に記録して送信され、通常のパケットと同様各リンクの待ち行列の一番後ろへと挿入され、順次処理されていく。評価パケットは目的地に到達すると送信元へと送り返され、送信元に評価パケットが戻ってくると、(現在の時刻) - (ヘッダに記録された時刻) を評価値とし、評価を終了する。

各ノードはルーティングテーブル中の評価値が更新されると、適応度を  $f_i$  を次の式によって計算する。

$$f_i = \frac{1/n_i}{\sum_{j \in S} 1/n_j}, \quad n_i = \frac{d_i}{\sum_{j \in S} 1/d_j} \quad (1)$$

このとき  $S$  は同一目的地の経路集合であり、 $d_i$  は経路  $i$  の遅延評価値である。まず遅延評価値  $d_i$  を正規化し、次に、 $n_i$  の逆数を用いて重みを持つように正規化する。この式により、遅延評価値  $d_i$  の小さな経路が大きな適応度  $f_i$  を持つことになり、通信遅延の小さな経路へ多くのパケットが送られることになる。これにより、目的地までにかかる通信遅延時間を改善するようなパケットの負荷分散が実現される。

遺伝的操作が適用された場合、新経路に対しては親となる経路の遅延評価値を受け継がれる。

### 2.3 遺伝的操作

遺伝的操作は経路突然変異と経路交叉からなり、代替経路を効果的に生成するために設計されている。GARAでは経路1本を1個体とし、経路中のノードIDを遺伝子と見なすことで経路に対し遺伝的操作を行う。

経路突然変異は元の経路の一部を乱すことにより代替経路を生成する。また、経路交叉は同一目的地への2つの経路に対し互いに部分経路を交換を行う。

図2に、経路  $r$  に突然変異を適用して  $r'$  を生成する様子を示す。

- (1) 経路  $r$  のノードから変異前ノード  $n_m$  をランダムに選択する。
- (2) 突然変異ノード  $n'_m$  を  $n_m$  に隣接するノードからランダムに選択する。
- (3) 始点から  $n'_m$  までの最短経路  $r_1$ ,  $n'_m$  から終

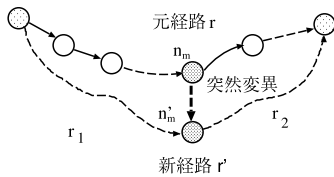


図2 経路突然変異  
Fig.2 Path mutation.

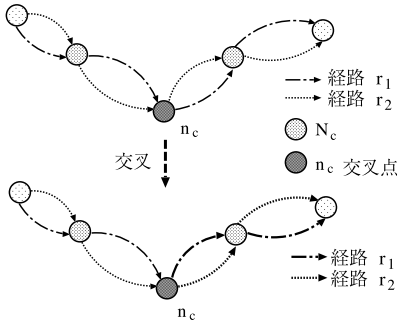


図3 経路交叉  
Fig.3 Path crossover.

点までの最短経路  $r_2$  をそれぞれ生成する。

- (4)  $r_1$  と  $r_2$  をつなぎ合わせるにより新たな突然変異経路  $r'$  を生成する。このとき、 $r_1$  と  $r_2$  に同じ部分経路が存在した場合は突然変異を行わない。

ここで一例として、 $r = (0\ 2\ 7\ 13\ 17\ 18)$  という経路に対し突然変異を適用することを考える。はじめに始点ノード 0 と終点ノード 18 を除いた中から 1 つ、13 が選択され、そこから 13 に隣接するノードとして 12 が選択されたとする。そこから Dijkstra の最短経路アルゴリズムにより始点とノード 12 を結ぶ経路  $r_1 = (0\ 2\ 7\ 12)$  と、ノード 12 から終点を結ぶ経路  $r_2 = (12\ 14\ 16\ 18)$  を求め、最後に  $r_1$  と  $r_2$  を合成して新たな経路  $r' = (0\ 2\ 7\ 12\ 14\ 16\ 18)$  が生成される。

経路交叉は同一目的地を持つ経路  $r_1, r_2$  に対し次に示す操作を適用する。図 3 にその様子を示す。

- (1)  $r_1, r_2$  に共通するノードの集合  $N_c$  を求める。このとき、始点、終点は含まない。
- (2)  $N_c$  の中からランダムに交叉点となるノード  $n_c$  を求める。
- (3)  $n_c$  より後ろの経路を互いに交換する。

共通するノードが存在しない場合には交叉を行わない。

ここで一例として、2 つの経路を

$$r_1 = (0\ 2\ 3\ 7\ 9\ 11\ 12\ 15\ 17\ 18\ 20),$$

$$r_2 = (0\ 4\ 5\ 7\ 10\ 11\ 13\ 15\ 16\ 19\ 20)$$

とする。共通のノードである 7, 11, 15 の中から、交叉点となるノード 11 が選択されたとすると、ノード 11 の後の経路を交換することで交叉が以下のように実行される。

$$r_1 = (0\ 2\ 3\ 7\ 9\ 11\ 13\ 15\ 16\ 19\ 20),$$

$$r_2 = (0\ 4\ 5\ 7\ 10\ 11\ 12\ 15\ 17\ 18\ 20)$$

遺伝的操作での代替経路の生成によるテーブルのサイズを制限するために、GARA は次の 2 種類の選択を行う。

- 同一目的地への経路数が制限を超えたとき、代替経路群より適応度の低い経路 1 本を削除する
- ルーティングテーブルのサイズが制限を超えたとき、テーブルの経路中で最も送信パケット数の少ない経路全体を削除する

この選択の操作により、記憶容量を削減するだけでなく必要最小限の経路についてのみ通信遅延の観測を行うことになり、ルーティングに要する通信負荷を少なくすることができる。

### 3. リンク負荷を考慮した遺伝的操作による負荷分散ルーティング

遺伝的アルゴリズムでは適応度の評価を行うことによって優れた解を生存させる。ネットワークトラフィックの最適化を行う場合には、可能な限り正確に、そして頻繁に評価を行うことが望ましいが、ネットワーク環境下においては適応度評価のための観測を頻繁に行うことが有害となる場合がある。これは観測処理それ自体がコストのかかるものであり、周囲の環境を変えてしまうためである。ネットワークシステムにおいては適応度評価を行うための遅延観測はネットワーク内に通信パケットを送ることによって行われるため、観測がネットワークの負荷状態に直接影響を与えることになる。

#### 3.1 リンク負荷メトリックの導入

従来は評価メトリックとして遅延時間を用いていたが、ネットワークが混雑した場合には評価パケットの到着に観測に時間がかかるため、観測終了までノードが古いルーティングテーブルを参照してしまい、負荷が変化しやすいネットワークにおいては負荷状態を経路の選択へ反映させることが難しいという欠点があった。代替経路を用いる適応型ルーティングにおいては評価が遅れた場合、代替経路間で負荷の偏りが交互に

発生し、帯域を有効に使用しない振動現象を引き起こす可能性がある。

そこで提案手法では、経路の観測を迅速化するために（待ち行列に存在する総パケットサイズ/帯域幅）で表現されるリンク評価値を用いる（図4）。この値はそのリンクの混雑の度合いを表す。ルーティングテーブル中のある経路を評価するために、評価パケットがその経路に従って送出されると、遅延時間の代わりに各リンクのリンク評価値を求め、パケット内部に順次記録していく。最終的に評価パケットがその送出元のノードへ戻り、そのルーティングテーブル中の経路に対してリンク評価値が保存される。たとえば、ある経路  $r = (0\ 2\ 7\ 13\ 17\ 18)$  に対して、そのリンク評価値を含めて  $r = (0\ 1\ 2\ 1\ 7\ 4\ 13\ 6\ 17\ 4\ 18)$ （小さい数字はノード間のリンク評価値）として保存する。経路の評価値はリンク1本ずつに対して行った評価値の合計となる。また、Type of Service (ToS) によりデータパケットと評価パケットを異なるサービス型として認識させ、評価パケットが待ち行列に存在する場合はデータパケットに優先させて処理を行う。評価パケット先送りの操作によって、ネットワークの負荷状態を迅速に反映させることで効率的な経路選択を行う。

評価パケット内には経路およびそのリンク評価値のみ保存するため、そのサイズは比較的小さい。すなわち、経路長を  $l$  とし、1つのノード ID を保存するために必要なビット数を  $N$ 、1つのリンク評価値を保存するために必要なビット数を  $M$ 、その他ヘッダ情報を表現するのに必要なビット数を  $H$  とすると、評価パケットのサイズは、 $S = H + (l + 1)N + lM$  となり、現実的にはたかだか数百ビット程度と想定され、現在の広帯域幅ネットワークにおいては、その帯域幅のごく一部を使用するのみである。よって、評価パケットを送出することによるオーバーヘッドに関しては、パケット送出に関わる定数遅延がその大部分を占めるものと考えられる。

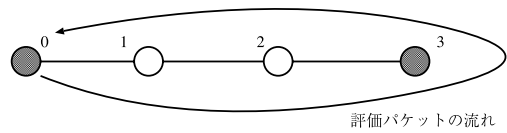
また、不正な ToS が設定されることにより評価パケットが正しく認識されない場合も考えられるが、少数の評価パケットが失われても、評価値が変動するのみであり（観測誤差と考えることができる）、アルゴリズム自体は正しく動作するものと考えられる。

### 3.2 リンク負荷を考慮した経路突然変異

突然変異では、経路中の負荷が高いリンクを避けるような操作が必要となる。そのようなリンクを避けるために、各経路のリンク評価値の高い付近のノードで突然変異を起こすことを考える。提案手法では、突然変異を起こす経路の始点と終点を除いた残りのノード

遅延時間メトリック

評価値 = 評価パケット到着時間 - 評価パケット送信時間

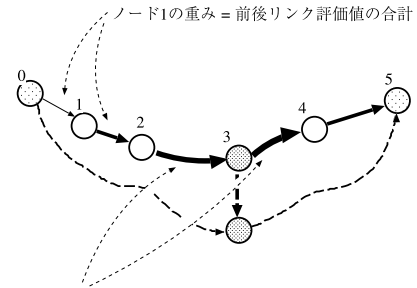


リンク負荷メトリック

評価値 = 各リンクの(待ち行列中の総パケットサイズ/帯域幅)の合計

図4 遅延時間とリンク負荷メトリックの評価値

Fig. 4 Communication latency and link load metric.



前後のリンク評価値が大きいノードを優先的に突然変異

図5 リンク負荷を考慮した突然変異

Fig. 5 Mutation with link load metric.

について、前後に接続されたリンクの評価値合計を重みとして変異前ノードを決定する。これを図示したものが図5である。

この突然変異は経路  $r = (n_0, n_1, \dots, n_h)$ 、経路中のリンク評価値  $d_0, d_1, \dots, d_{h-1}$  とおいたとき、次に示す操作が実行される。

- (1) 始点、終点を除いた  $(n_1, n_2, \dots, n_{h-1})$  において、各ノードに隣接する前後のリンク評価値合計  $e_i = d_{i-1} + d_i$  をそのノードが突然変異を起こす確率重みとする。
- (2)  $f_i = \frac{e_i}{\sum e_j}$  で求められる確率に従い変異前ノード  $n_m$  を決定する。
- (3) 突然変異ノード  $n'_m$  を  $n_m$  に隣接するノードからランダムに選択する。
- (4) 始点から  $n'_m$  までの最短経路  $r1$ 、 $n'_m$  から終点までの最短経路  $r2$  をそれぞれ生成する。
- (5)  $r1$  と  $r2$  をつなぎ合わせるにより新たな突然変異経路  $r'$  を生成する。このとき、 $r1$  と  $r2$  に経路の重複があった場合は突然変異を中断する。

たとえば、 $r = (0\ 1\ 2\ 1\ 7\ 4\ 13\ 6\ 17\ 4\ 18)$  という経路（小さい数字はノード間のリンク評価値）に対し突然変異を適用することを考える。始点ノード0と終点ノード18を除いたノードについて、前後のリンク評価値の合計は順に  $(2\ 5\ 10\ 10)$  となる。よって変異前

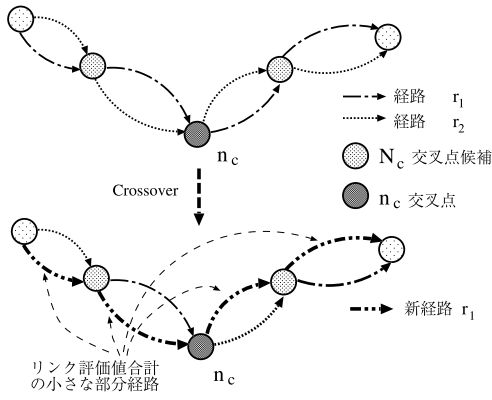


図6 リンク負荷を考慮した交叉  
Fig. 6 Crossover with link load metric.

ノードとしてノード 2, 7, 13, 17 が選択される確率はそれぞれ,  $\frac{2}{27}, \frac{5}{27}, \frac{10}{27}, \frac{10}{27}$  となる.

3.3 リンク負荷を考慮した経路交叉

新たな交叉においては, 共通するノード間のそれぞれの部分経路を互いに比較する. リンク評価値の合計がより小さい部分経路をつなぎ合わせるにより, 効果的な代替経路を生成する. これは複数点交叉に相当する. これを図示したものが図6である.

この交叉は 2 つの経路を  $r_1, r_2$  とおいたとき, 次に示す操作が実行される.

- (1) 経路  $r_1, r_2$  に共通するノードを交叉点の候補値集合  $N_c$  とする.
- (2)  $N_c$  によって  $k$  本に分割される  $r_1, r_2$  の部分経路をそれぞれ  $S^1 = \{s_1^1, s_2^1, \dots, s_k^1\}, S^2 = \{s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2\}$  とする.
- (3) 各部分経路において,  $e(s_i^j) = \sum_{l \in s_i^j} d_l$  ( $d_l$  はリンク評価値) によって部分経路の評価値を求める.
- (4) 部分経路の評価値  $e(s_i^1), e(s_i^2)$  を比較し, より小さい  $e(s_i^j)$  を持つ部分経路をつなぎ合わせるにより新経路  $r'$  が生成される.

4. シミュレーション実験

ルーティングアルゴリズムを評価するためのシミュレータを構築し, SPF, メトリックに遅延時間を用いる従来手法の GA ルーティングアルゴリズム, メトリックにリンク負荷を用いた提案手法の GA ルーティングアルゴリズムについて, 振動現象の抑制の効果, 遅延時間メトリックとリンク負荷メトリックの比較, リンク負荷を用いた遺伝的操作の効果を調べるために実験を行った.

実験で用いたネットワークは, 図7と図8である.

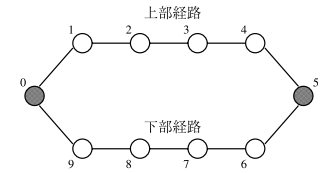


図7 シミュレーションで用いたネットワーク (10 node)  
Fig. 7 10 node network employed in the simulation.

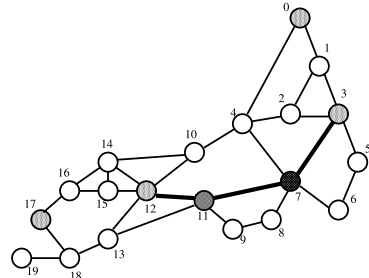


図8 シミュレーションで用いたネットワーク (20 node)  
Fig. 8 20 node network employed in the simulation.

図7はノード数10個, リンク数10本からなる. リンクの帯域幅は150Kbpsであり, ノード0, 5からのみデータパケットが発生し, 目的地としてそれぞれ5, 0へのみ送信される. パケットサイズは平均10Kbyteとした. 2つのノードにおけるルーティングテーブルには, あらかじめノード0からは(0 1 2 3 4 5)と(0 9 8 7 6 5)のように2本の経路が用意されているものとし, 遺伝的操作は行わない.

図8はノード数20個, リンク数31本からなる. リンクの帯域幅は150Kbps, もしくは450Kbpsとしている. 各ノードで発生するユーザからのデータパケット発生間隔は1600msから2400msまでを計測範囲とした. パケットサイズは平均10Kbyteであり, データパケットはすべてのノードから発生するが目的地となるノードは図の0, 3, 7, 11, 12, 17に限定させ, さらにノード3, 11は2倍, ノード7は3倍他の目的地と比べ選択されやすいものとした. 比較対象となるSPFに関しては, それぞれのリンクのメトリックを定数とし, すべてのリンクのメトリックを1として, リンクの重み付けは特に行わないこととした. また, パケットがノードを通過する際のオーバーヘッドとして10msの定数遅延を考慮した.

4.1 振動現象抑制の効果

リンク負荷メトリックを導入し, 評価にかかる時間を減少させることにより振動現象を抑制する効果を確認した.

図7のネットワークを用いて, 遅延時間メトリックを用いた従来のアルゴリズムとリンク負荷を用いた提

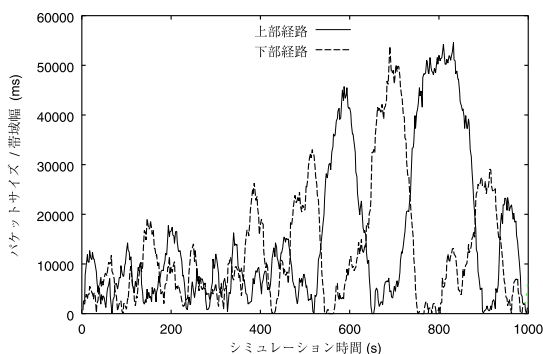


図9 遅延時間評価による振動現象の発生

Fig. 9 Oscillations caused by direct delay observations.

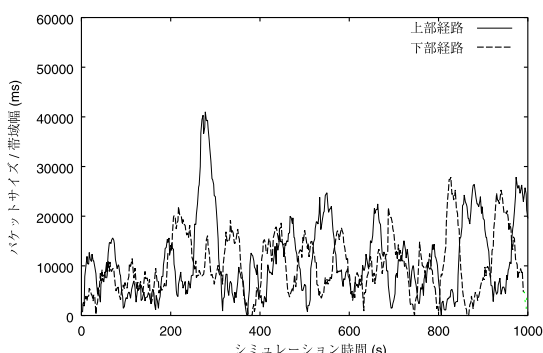


図10 リンク負荷メトリックによる振動現象の抑制効果

Fig. 10 Preventing oscillations with link load metric.

案手法について比較を行った。実験のシミュレーション時間は3000秒としている。

図9、図10に結果を示す。グラフの横軸はシミュレーション時間であり、縦軸は経路上の(データパケットサイズ/帯域幅)の合計を示しており、実線と点線はそれぞれ、上部経路(0 1 2 3 4 5)、下部経路(0 9 8 7 6 5)のものである。図9の従来手法による振動幅に比べ、図10に示される提案手法においては、振動幅、周期ともに半分程度におさえられていることが分かる。

遅延時間メトリックを用いた場合、評価パケットが経路に対して送信されると各リンクの待ち行列の一番後ろへ挿入されるため、評価を終えて送信元へ戻ってくるときにはすでにネットワークの負荷状態を正しく反映していない恐れがある。その結果実際には空いていない経路へパケットが集中し、ネットワークの振動現象を引き起こしたと考えられる。リンク負荷を用いた場合には、評価パケットは各リンクで優先して処理されるため、ネットワークの負荷状態を比較的正確に把握することができ振動現象をある程度抑制したものと考えられる。

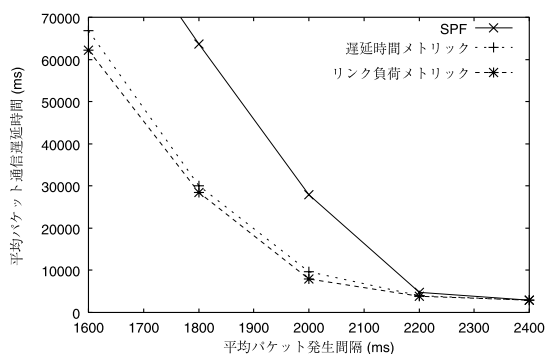


図11 データパケット平均通信遅延時間(20 node)

Fig. 11 Mean response time (20 node).

#### 4.2 平均通信遅延時間の比較

ここでは、図8を用い、ネットワーク遅延時間メトリック、リンク負荷メトリックを用いた場合のデータパケットの平均通信遅延時間について調べる。シミュレーション時間としては、事前にネットワーク状態が安定するまでの時間を計測し、それを基に3000秒とした。

図11に平均通信遅延の比較結果を示す。リンク負荷メトリックを用いた場合、ToSによるパケット先送りによってネットワークの状態を比較的正確に反映した評価を行い、混雑の少ない効率的な経路を選択したと考えられる。パケット発生間隔が短く、ネットワークが高負荷になるに従い先送りの効果が顕著になっている。パケット発生間隔1600msにおいては、リンク負荷メトリックは遅延時間メトリックと比較し約9.3%の平均遅延時間の改善がみられた。

#### 4.3 リンク負荷を考慮した遺伝的操作の効果

リンク負荷を考慮した遺伝的操作の実装による効果を確認するために、以下のアルゴリズムについて比較を行った。

- リンク負荷メトリックおよび従来手法の遺伝的操作
- リンク負荷を考慮した突然変異の実装
- リンク負荷を考慮した交叉の実装
- リンク負荷を考慮した突然変異、交叉の実装

図12は図8に示されるネットワークにおけるデータパケット平均通信遅延時間を示している。

突然変異においては従来突然変異と比較し約1.0%の改善がみられた。突然変異は経路に適用する頻度は一律としているが、始点から突然変異ノードを結ぶ部分経路、突然変異ノードから終点を結ぶ部分経路において経路の重複があった場合、生成された経路がルーティングテーブルに存在した場合には操作を中断している。

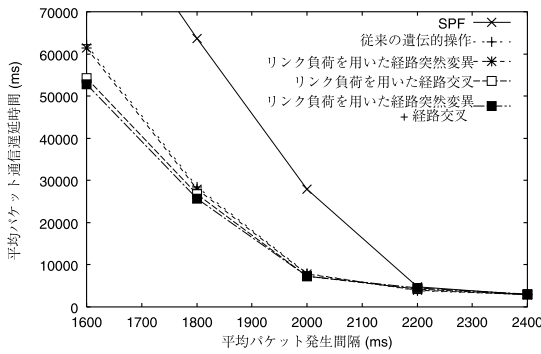


図 12 リンク負荷を用いた遺伝的演算による平均通信遅延時間  
Fig. 12 Mean response time for genetic operators with link load metric.

リンク負荷により重み付けを行った突然変異では突然変異を行うノードに偏りが生じやすいため、中断条件に適合しやすく、結果として代替経路生成数では従来手法と比較して少なくなることが予想される。代替経路数はネットワークの負荷状態の改善に影響を与えるため、平均では提案手法に改善がみられたが、提案手法の通信時間はばらつきが大きい(平均パケット発生間隔が 2400 ms, 2200 ms, 2000 ms, 1800 ms, 1600 ms の場合で、順に標準偏差が 496.9 ms, 969.4 ms, 2753.6 ms, 11099 ms, 15588 ms と増大している)。また、改善の度合いが交叉と比較し低かった一因として、図 8 が細長い形状のネットワークであるため突然変異による効果が表れにくかったことが考えられる。

交叉においては従来交叉と比較し高負荷時において最大 12.6% の改善がみられた。ネットワークが混雑するにつれ、交叉点を用いてランダムに代替経路を決定する手法よりも、リンク負荷の小さい代替経路を用意することで効果的な経路を生成し、選択することが重要になると考えられる。

突然変異、交叉の両方を適用した場合には従来手法と比較し最大 15.0%、突然変異のみと比較し最大 13.9%、交叉のみと比較し 2.8% の改善がみられた。

## 5. おわりに

本論文では、パケット交換型ネットワークにおいてリンク負荷を用いた遺伝的演算を行いネットワークの状態に適応するルーティングアルゴリズムを提案した。提案手法はメトリックとしてリンク負荷を基にした尺度を用いるとともに、評価パケットを先送りすることによってネットワークの負荷状態を素早く観測することを可能とした。その結果として振動現象を抑制し、ネットワーク全体としての通信遅延時間を改善することができた。この効果は、特に高負荷なネットワーク

において有効であることが確認された。

また、リンク負荷を用いた遺伝的演算によりネットワークの負荷状態を反映した代替経路が作成され、それらの経路間でパケットを分散することにより通信遅延時間が改善する効果があることが確認された。

今後の課題としては、提案手法のルータへの実装、インターネットにおいて一般的ではない始点制御ルーティングを使用しない負荷分散の提案があげられる。

## 参考文献

- 1) 棟朝雅晴, 高井昌彰, 佐藤義治: 遺伝的アルゴリズムによる負荷分散機構を有する適応型ルーティング, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.2, pp.219-227 (1998).
- 2) 山口直彦, 棟朝雅晴, 赤間 清, 佐藤義治: 動的負荷分散機構を有する分散型経路制御アルゴリズム, 情報処理学会第 60 回全国大会講演論文集 (3), pp.449-450 (2000).
- 3) 山口直彦, 棟朝雅晴, 赤間 清, 佐藤義治: ルーティングアルゴリズムにおける経路評価頻度の制御, 情報処理学会研究報告, 2000-DPS-100, pp.69-74 (2000).
- 4) 山口直彦, 棟朝雅晴, 佐藤義治: 進化的手法を用いた AS 間経路制御, 情報処理学会研究報告, 99-DPS-95, pp.97-102 (1999).
- 5) Munetomo, M.: Designing genetic algorithms for adaptive routing algorithms in the Internet, *Workshop on Evolutionary Telecommunications: Past, Present, and Future (invited)* (1999).
- 6) Munetomo, M., Takai, Y. and Sato, Y.: An adaptive network routing algorithm employing path genetic operators, *Proc. 7th International Conference on Genetic Algorithms*, pp.643-649, Morgan Kaufmann (1997).
- 7) Carse, B., Fogarty, T.C. and Munro, A.: Adaptive distributed routing using evolutionary fuzzy control, *Proc. 6th International Conference on Genetic Algorithms*, Eshelman, L.J. (Ed.), pp.389-396, Morgan Kaufmann Publishers (1995).
- 8) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, pp.269-271 (1959).
- 9) Shivaratri, N.G., Krueger, P. and Singhal, M.: Load Distributing for Locally Distributed Systems, *IEEE COMPUTER* (1992).
- 10) Goldberg, D.E: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989).

(平成 13 年 8 月 9 日受付)

(平成 14 年 4 月 16 日採録)





山口 直彦 (正会員)

昭和 51 年生。平成 11 年北海道大学工学部情報工学科卒業。平成 13 年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。



棟朝 雅晴 (正会員)

昭和 43 年生。平成 8 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。同年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻助手。平成 10 年～11 年イリノイ大学基礎工学科遺伝的アルゴリズム研究室客員研究員。平成 11 年北海道大学情報メディア教育研究総合センター助教授 (情報メディアシステム分野)。博士 (工学)。遺伝的アルゴリズム, ネットワークシステム, 分散処理システムに関する研究に従事。IEEE, ISGEC (International Society of Genetic and Evolutionary Computation) 各会員。



赤間 清 (正会員)

昭和 48 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。昭和 50 年同大学大学院修士課程修了。昭和 54 年同大学院博士課程単位修得退学。同年同大学助手。昭和 56 年北海道大学文学部講師。平成元年同大学工学部助教授。平成 11 年より同大学情報メディア教育研究総合センター教授として現在に至る。人工知能, 知識処理, 等価変換に基づく問題解決の研究に従事。工学博士。人工知能学会, ソフトウェア科学会各会員。



佐藤 義治 (正会員)

昭和 21 年生。昭和 50 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年同大学工学部助手, 同助教授を経て現在, 同大学工学部教授 (情報解析学分野)。工学博士。多次元データ解析, 多変量解析, ニューラルネットワーク理論, ファジィデータ解析の研究に従事。日本統計学会, 日本応用統計学会, 日本計算機統計学会, 日本行動計量学会, 日本ファジィ学会, 国際計算機統計学会, 国際分類学会, アメリカ統計学会各会員。