

## 遺伝的操作による分散協調型ルーティングとその評価

天野美樹      高井昌彰      佐藤義治  
北海道大学 工学部

### Abstract

本稿では環境が変化する問題に対して適応力があるとされる遺伝的アルゴリズムの考えを導入した分散協調型ルーティングを提案する。本手法では分散型ルーティングで問題となる負荷情報交換による負荷の影響を少なくするために、遺伝的操作を用いた経路学習を行ない負荷変化に対応可能な経路を生成する。シミュレーションにより従来手法の1つであるSPFとの比較実験を行なう。

## Cooperative Distributed Routing with Genetic Operators and Its Evaluation

Miki Amano, Yoshiaki Takai and Yoshiharu Sato  
Faculty of Engineering, Hokkaido University

### Abstract

In this paper, we propose an adaptive, cooperative and distributed routing method which employs a genetic algorithm. This method generates a proper set of routes through learning by genetic operators in order to realize effective routing. We also propose packet protocol for robust and fast information exchanging among nodes. We perform simulation experiments to compare the proposed algorithm with SPF, a conventional adaptive method.

## 1 はじめに

ネットワーク管理の分野において高速な通信を実現するために必要な条件の1つとして、ルーティングが適切であることがあげられる。ルーティングを工夫することにより、ネットワークの負荷状態に即した経路制御を行い、低コストかつ高速な通信を実現することができる。

ネットワークにおけるリンクの負荷は動的に変化している。その変化がある程度予想可能なものであれば、あらかじめ与えられた経路テーブルにしたがって通信を行えばよい。しかし負荷変化の予測が困難である場合には、負荷変化に対応可能な経路制御を行なう適応型ルーティングが必要である。

適応型ルーティング法には負荷情報を中央のルーティングノードに集め、計算した最適経路を他のノードに送り返す集中方式と、各ノードがルーティングを行なう分散方式とがある。集中方式は1つのノードが完全な情報を収集し計算を行なうために正確な最適経路を計算可能であるが、中央のノードに障害が発生した場合の影響やルーティングノードへのリンクが混雑するなどの問題点がある。また、分散方式は各ノードでルーティングを行なうためにノードの故障の影響は小さいが、最適経路計算のための負荷情報を集める方法が問題となってくる [2]。

本論文では分散方式に着目し、環境が変化する問題に対して高い追従性を持つといわれる遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms)[1] をベースとした遺伝的操作を導入した適応型ルーティング法を紹介する。

遺伝的アルゴリズムは (1) 遺伝子を集団で保持しているため多様性が確保できる、(2) 生物が進化し環境に適応する過程をアルゴリズム化している、(3) 確率的な状態遷移規則を用いる、という特徴を持つ。

我々は既にこの遺伝的アルゴリズムをベースとした適応型ルーティング法を提案している [5][6]。

分散方式で問題となるネットワークの負荷情報収集のための通信もネットワークの負荷に影響を与えるため、少ない情報交換でより有益な情報を得ることが重要である。我々の手法では経路候補を遺伝子として表現し、経路候補に遺伝的操作を施すことにより負荷変化に即した経路の学習を行なう点に特徴がある。

## 2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms: GA) は1960年代に John Holland 氏により提案された、生物の進化現象をモデルとした最適化手法である。GA では問題に対する複数の解候補を文字列 (遺伝子) にコーディングして遺伝子集団 (Population) として保持し、遺伝子に対して遺伝的操作を施すことにより最適解を探索する。

遺伝子集団に対して各個体の環境への適合度評価 (Evaluation)、評価値に基づいた遺伝子の複製 (Reproduction)、交叉 (Crossover)、突然変異 (Mutation) という操作を1世代とし、世代を繰り返すことにより環境により適した解を生成することができる。

以下に各遺伝的操作を述べる。

- Evaluation** 遺伝子の環境への適合度 (fitness value) を適合度関数 (fitness function) を用いて評価する。適合度値が高いほど環境へ適しているといえる。
- Selection** 各遺伝子の持つ適合度に応じて複製・淘汰を行ない、遺伝子集団を再構成する。適合度が高い遺伝子ほど次世代に残りやすい。
- Crossover** 2つの親遺伝子の部分列を交換し、親遺伝子の情報を受け継いだ新たな遺伝子を生成する。親遺伝子は適合度の割合で選ばれるので適合度の高い遺伝子ほど子孫を残しやすい。

Mutation 集団の中から選んだ遺伝子の任意の文字を変化させる。集団内に新たな情報を持ち込む働きがある。

### 3 対象とするネットワーク

本論文で取り扱うネットワークは特定のネットワークを想定しているのではなく、いくつかのホスト(ノード)が回線(リンク)によって接続された任意のグラフ構造で表されるものとする。

本論文で取り扱うネットワークに対して以下の条件を与える。

- ネットワーク内の各ノードでパケット伝送要求が発生する。
- 伝送要求発生頻度は時間と共に変化し、ノードによって異なる。
- リンクの容量以上のパケット伝送要求を割り当てた場合、あふれたパケットは待ち行列に入る。
- 各ノードは自分自身に連結したリンクの待ち行列長しか観測できない。
- ネットワーク全体におけるパケットの平均伝送遅延の最小化を全体の目標とする。

## 4 分散協調型ルーティング法

### 4.1 概要

本手法の特徴としては次の3点があげられる。

1. 伝送要求が発生したノードで目的ノードまでの経路を決定
2. 遺伝的操作による経路学習
3. 評価パケットを用いた負荷情報交換

ノード内では大きく分けてルーティングと負荷情報交換の2つの処理を行なう。負荷情報交換については4.2.3節で述べる。

各ノードはルーティングを行なうルーティングエージェントを持ち、各エージェントは目的ノード別に複数の経路候補が登録可能な経路リスト(図1)を持つ。各経路候補には通信により得られた負

Destination	Delay	Frequency	Route
0	2.0	10	540
	3.5	7	5460
	7.0	1	54210
	6.0	3	5760
1	4.0	4	5401
2	2.0	5	52
	3.0	3	542
3	1.5	3	53
4	1.0	8	54
6	2.0	4	546
	3.0	1	576

図1: 経路リストの例(ノード5の場合)

荷情報から計算された予想遅延時間(評価値)が割り当てられ、エージェントは伝送要求に対して経路リストから適当な経路候補を1つ選択する。経路リストには始めは最短経路のみが登録されているが、遺伝的操作により新たな経路が生成・淘汰される。

## 4.2 遺伝的操作による経路学習

経路候補は遺伝子として符合化され、エージェント間の情報交換により得られた遅延情報に基づく遺伝的操作による経路の学習を行なう。遺伝子は通過するノードIDの並びとして表現される。Crossoverについては、部分経路交換可能な場合が限定され、その構成が困難であることにより導入していない。

### 4.2.1 Mutation

新しい経路生成の手段としてMutationを用いる。Mutationの対象となる経路候補から始点と終点をランダムに選択し、始点に隣接するノードから

迂回ノードを1つ選ぶ(図2)。次に、迂回ノードから終点までの最短経路をDijkstraのアルゴリズムより決定し、新たな部分経路とする[3]。Mutationを行なうことにより、伝送要求発生頻度の高いノードへの経路候補数が多くなり、特定リンクへの負荷集中を回避することができる。

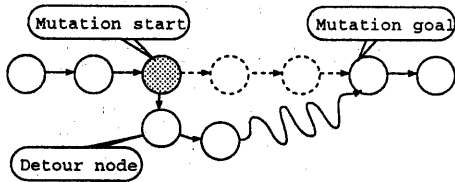


図2: Mutationによる新しい経路の生成

#### 4.2.2 Selection

Mutationを繰り返し行なうと、経路候補の増加によるメモリの圧迫を招く。そこで、2種類のSelectionを行なうことにより経路リストの増大を防ぐ。

**Selection I** あるノードへの経路候補数が上限に達した場合、評価値の最も悪い経路を削除する。

**Selection II** 経路リスト全体で経路候補数が上限に達した場合、前回のSelection II実施以降の送信パケット数が最も少ない目的ノードへの経路候補群を削除する。

#### 4.2.3 Evaluation

ネットワークの負荷状態を知るためにはエージェント間での情報交換が不可欠である。その頻度が高いほど正確な情報収集が可能となり、より正確な経路選択を行なうことができる。しかし、情報交換のための通信もネットワークの負荷に影響を与えるため、少ない通信で多くの負荷情報を得る方法が重要となる。

本手法では評価パケットという負荷情報専用のパケットを用いて負荷情報交換を実現する。評価

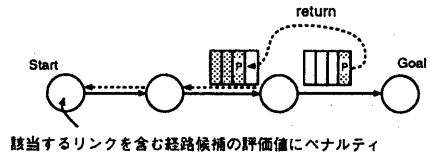
パケット以外のデータパケットのヘッダには、リンク内生存時間の上限と、予想伝送遅延の値を載せる。評価パケットは次の2つの場合のみを送る。

##### 評価パケット [A]

1つのリンク待ち行列内での生存時間が閾値を越えた場合、リンクが過負荷状態であると判断し、その情報を発信元へ送り返す。

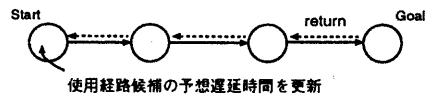
##### 評価パケット [B]

実際のパケット伝送遅延と利用経路の予想伝送遅延の差が閾値を越えた場合、その経路の予想遅延時間が実際の値と大きく異なるという情報を発信元へ送り返す。



該当するリンクを含む経路候補の評価値にペナルティ

図3: 評価パケット [A]



使用経路候補の予想遅延時間を更新

図4: 評価パケット [B]

エージェントは評価パケット [A] を受けとった場合、該当リンクを含む経路候補の評価値にペナルティを付加し、評価パケット [B] を受けとった場合はその経路候補の予想伝送遅延を更新する。

## 5 実験結果

実験には2種類のネットワークを用い、適応型ルーティング法の一つである最短経路ルーティング (Shortest Path First: SPF)[4] と提案手法 (Genetic Routing: GR) との比較を行なった。

SPFでは各ノードが定期的に近隣ノードからコストや待ち行列長などの情報を集める。各ノード

は他の全てのノードに知らせるために、各リンクのそれぞれの情報を載せたバケットを定期的にブロードキャストする。バケットが届き、自分の持っている情報と異なる場合には Dijkstra のアルゴリズムにより最短経路を再計算する。

### 5.1 実験 1

ノード 8 個、リンク 12 本のネットワーク (図 5) を用いてネットワークトポロジーの変化に対する適応性を観測した。具体的にはノード 6 とノード 7 を連結させているリンクの故障を想定し、シミュレーション時間 100~300 の間、リンクのバンド幅を 0 に変化させた場合の経路生成の様子を調べた。



図 5: ネットワーク

表 1: ノード 7 からノード 0 への経路候補の変化

Route	Delay	→	Route	Delay
7 6 0	2.0		7 6 4 0	P
			7 6 0	P
→			Route	Delay
7 5 4 0	3.0	→	7 5 4 0	3.0
7 6 0	P		7 6 0	3.0

表 1 はシミュレーション時間 0、110、120、490 において、ノード 7 の持つ経路リストに登録されたノード 0 への経路候補とその予想伝送遅延を示している。P は評価バケット [A] によりペナルティが与えられたことを表す。リンクの故障が発生してから、故障リンクを含まない経路候補 [7 5 4 0] が生成され、もう一方の経路候補はほとんど選ばれていない。これによりスムーズなバケット配送の継続が可能となっている。また予想伝送遅延の大きい経路候補 [7 6 0] はリンク復帰後、予想伝

送遅延が更新されるまでにかなりの時間を要している。

### 5.2 実験 2

この実験ではノード 30 個、リンク 50 本の比較的ノード数の多いネットワークにおいて、リンクの負荷変化に対する追従性を観測した。負荷変化を実現するためにシミュレーション時間 100~300 の間ノード 9 とノード 23 のバケット伝送要求発生数を多くしている。

平均遅延時間の推移を図 6 に示す。2 ノード間の静的な最短経路は高速な (バンド幅の広い) リンク 2 本が連結して出来ているために、バケット数の増加に伴い、そのリンクを通過しようとするバケット数も増加する。そのためリンクの容量を越えたバケットが集まってくると高速なはずのリンクの待ち行列長が長くなり、結果として伝送遅延が大きくなる。この実験では SPF、GR とともに過負荷リンクを回避し、平均伝送遅延の増加をある程度おさえることができた。

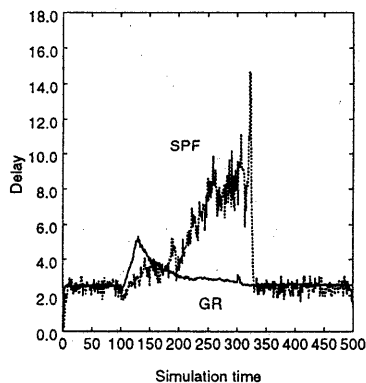


図 6: 平均遅延時間の推移

### 5.3 実験 3

実験 3 では評価バケットの影響を調べるために各評価バケットの発生条件を変えてシミュレーションを行なった。ネットワークの条件は実験 2 と同じく設定し、評価バケットの発生条件は表 2 とした。

表 2: 評価パケット発生条件

	リンク内生存時間	予想伝送遅延との誤差上限
(a)	10 simulation time	+100%
(b)	5 simulation time	+50%
(c)	10 simulation time	+50%
(d)	5 simulation time	+100%

ネットワーク内のパケット総数が多い時、評価パケットの発生数は最小限に抑えられるべきだがルーティングに必要な負荷情報を削ることは望ましくない。

評価パケット発生数(図7)はどの条件でもほぼ同様である。ただし、平均伝送遅延の推移(図8)も合わせて考えると、実験(d)の場合に最も速く環境変化に追従しており、適切なルーティングが実現されているものと考えられる。

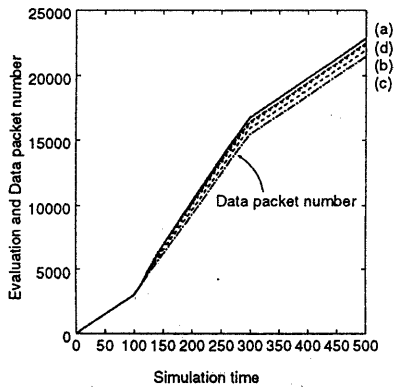


図 7: 評価パケット発生数の推移

## 6 おわりに

本論文では遺伝的操作を導入した適応型ルーティング手法を紹介した。シミュレーションにより、過負荷リンクの回避、リンクが故障した際の迂回経路の生成を確認することができた。評価パケットがネットワークに与える影響をさらに小さくする

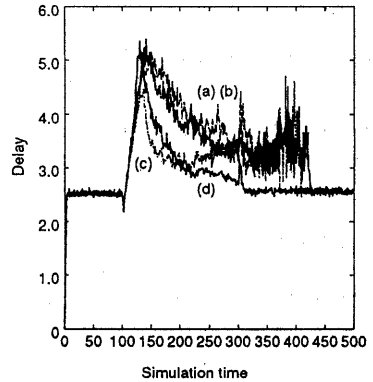


図 8: 平均伝送遅延の推移

こと、また大規模ネットワークへの適用が今後の課題としてあげられる。

## 参考文献

- [1] David E. Goldberg : *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [2] Vijay Ahuja 著, 池田信一 訳 : コンピュータ通信ネットワーク, 近代科学社, 1982.
- [3] E. Minieka : "On Computing Sets of Shortest Paths in a Graph", *Communications of the ACM*, vol. 17, no. 6, June 1974.
- [4] Douglas Comer 著, 村井純・楠本博之 訳 : bit 別冊 第 2 版 TCP/IP によるネットワーク構築 Vol.I 共立出版, 1991.
- [5] 天野美樹、日高東潮、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、情報処理学会第 48 回全国大会講演論文集 (2)、pp.229-230, 1994.
- [6] 天野美樹、高井昌彰、佐藤義治 : 遺伝的操作を用いた経路選択問題の解法、情報処理学会第 49 回全国大会講演論文集 (2)、pp.227-228, 1994.