

進化的手法を用いた AS 間経路制御

山口直彦¹, 棟朝雅晴², 佐藤義治³

1,3:北海道大学大学院 工学研究科 数理情報工学講座 情報解析学分野

2:北海道大学 情報メディア教育研究総合センター 情報メディアシステム分野

本稿では、自律システム (Autonomous System) 間の通信において、進化的手法を用いて代替経路のリストを生成し、それらの中で通信パケットを分配することによって負荷の分散を図る適応型ルーティングアルゴリズムを提案する。AS 間ルーティングとして広く知られる BGP (Border Gateway Protocol) で用いられているルーティングアルゴリズムでは、等しい距離をもつ代替経路間ではパケットを分散できるが、現在の負荷状態に応じた動的な経路決定は行っていない。本稿で提案する GIAR (Genetic Inter AS Routing) アルゴリズムは、リンクの負荷状態を観測し、代替経路間で確率的にパケットを分配することで負荷の分散を実現する。AS 間ルーティングで安定した観測を達成するために、threshold policy を用いて、待ち行列に基づくリンクの負荷状態を分類を行う。

Inter-AS Routing with Evolutionary methods

Naohiko Yamaguchi¹, Masaharu Munetomo², and Yoshiharu Sato³

1,3:Information and Data Analysis, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

2:Center for Information and Multimedia Studies, Hokkaido University.

In this paper, we propose an adaptive inter-AS routing algorithm that has a load balancing mechanism that distributes communication packets among alternative routes generated by genetic operators. The Border Gateway Protocol (BGP) widely employed for inter AS routing does not take an adaptive approach: it cannot determine routes based on current load status of the network although it distributes packets among alternative routes with the same distance measure. Our algorithm called GIAR (Genetic Inter AS Routing) observes load status of links along the alternative routes adaptively to realize load balancing among them by distributing packets probabilistically among them. To realize robust observation of routes in inter-AS routing, we introduce a threshold policy that classifies load status of links based on its queue length.

1 はじめに

インターネットに代表されるネットワークの規模拡大に伴い、通信パケットのルーティングが重要な課題となっている。自律システム (Autonomous System) 内でのルーティングでは、ベクトル距離ルーティングやリンク状態ルーティングが一般に使用されている。また、自律システム間でのルーティングでは、パスベクトルルーティングが使用されている。これらはいずれも通信パケットを送出するときには最適な経路を一つだけ指定し、その経路のみを用いて通信を行っている。そのため、他に代替経路が存在する場合でも一つの経路を集中して使用してしまうおそれがある。あるメトリックの値が同一の場合には、それらの経路でパケットを分散させるという機構も存在するが、代替経路間で動的に負荷分散を行うという観点は、既存のプロトコルには存在しない。

本稿では、AS 間ルーティングにおいて、進化的手法として遺伝的アルゴリズムを用いて代替経路を生成し、それらの経路間で動的に負荷分散をすることにより効果的なルーティングを実現する GIAR (Genetic Inter AS Routing) を提案する。AS 内のルーティングでは、棟朝ら [1] によって GLBR アルゴリズムが提案されているが、GIAR アルゴリズムはこれを AS 間ルーティングへ適用するためのルーティングアルゴリズムである。GIAR アルゴリズムでは、パケットの送出元で目的ノードまでのすべての経路を決定する始点制御ルーティングを用い、遺伝的アルゴリズムを適用して代替経路を生成する。

2 AS 間ルーティング

自律システムを一つのノードとみなすと、ネットワークはノードと、ノードを繋ぐリンクで表すことができる。あるノードから別なノードへの経路を決定するとき、AS 間経路制御 (ルーティング) が必要となる。インターネットにおいて、自律システム間で情報を交

換するためのプロトコルは、外部ゲートウェイプロトコル (Exterior Gateway Protocols) とよばれる。良く知られたプロトコルとして、BGP (Border Gateway Protocol) が存在する。BGP は AS 内に BGP を処理する機構をもった BGP スピーカーを設置し、隣接 AS の BGP スピーカーとの間で TCP を使って接続を確保する。各 AS は AS 番号を持っており、インターネットは AS 番号によって識別された AS のグラフとみなすことができる。

BGP はルーティング情報として AS 番号のリストを交換し、AS 間経路情報を獲得することから、パスベクトルプロトコルとよばれる。

効果的な AS 間ルーティングを行うためには、経路の冗長性、対称性、負荷分散といった問題を考える必要がある。BGP はルーティング情報ベース (RIB: Routing Information Base) を作成し、パスベクトルなどの経路情報を保持する。BGP スピーカーは情報ベースに従い経路を選択するが、この時に選択される経路は基本的に一つである。BGP では、冗長性をもった経路の存在は、主要な経路が障害の発生によって切断された場合のバックアップという意味合いが強く、また、負荷分散を行う場合でも、現在のトラフィックに適応するという動的なアプローチはとられておらず、効果的なルーティングとはいえない。

3 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) は、生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、交叉、突然変異、選択という生存競争に基づく確率的探索原理により、組合せ問題のような計算量の多い問題の解を比較的容易に見つけられるという特徴をもつ。

GA は組合せ問題において、比較的良好な解を短時間に求める事が可能である。このことは、種々の応用問題で発生する組合せ問題において、最適解が必ずしも必要でない場合においては、GA を用いて近似解を容易に求めることが可能であることを示している。

GA の処理手順は以下のようになる。

1. 初期集団の生成
2. 適応度の評価
3. 選択
4. 交叉
5. 突然変異
6. 終了条件を満たすまでステップ 2 に戻る。

ネットワークルーティングに GA を実装するために、個体を目的ノードまでの経路、遺伝子を経路中の各ノードとする。初期集団として、各目的ノードへの最短距離を表す個体を生成する。この場合、ルーティングにおいては最適な個体が求められても、パケットの集中がその個体の評価値を低下させるため、遺伝的操作によって最適解に近似した個体を複数用意し、適度にパケットを分散させる必要がある。

また、代替経路は最短経路と比べ劣っている個体とみなされるが、GA はある程度適応度の低い個体に対しても生存の余地を残しているため、リンク切断などの環境の急激な変化でも柔軟に対応ができる安定したルーティングが可能となる。

4 GIAR アルゴリズム

ここでは、本稿で提案する GIAR アルゴリズムについて述べる。GIAR アルゴリズムは棟朝ら [1] によって提案された GLBR アルゴリズムを AS 間ルーティングで効果的に使用するために改良したものである。GIAR は始点制御ルーティングに基づく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目的地までの経路を決定する。そこで、通信パケットは、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を経路情報として持つ。始点制御ルーティングにより、対称性の実現が容易となる。また、GIAR アルゴリズムでは進

化的手法により代替経路を生成する。これにより、経路の冗長性が確保される。さらに、この代替経路間で確率的な経路選択をすることにより、動的な負荷の分散を行う。

4.1 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図 1 に示す。ルーティングテーブルは、各 AS ごとに存在する。それぞれ目的地 AS(dest) ごとに AS パスの経路(route)があり、それぞれの経路について、AS 間遅延(delay)、通信パケット送信時に選択する確率(weight)が与えられる。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地へパケットを送る必要が生じた場合、トポロジー情報に基づき Dijkstra のアルゴリズムにより最短経路を求める。このとき、他に選択する経路がないため、weight の値は 1.0 となる。ある経路に対して一定数の通信パケットを送るごとに、通信遅延評価パケットを発生させる。また、一定数の通信遅延評価パケットの発生ごとに、進化的手法を用いて代替経路を生成する。

dest	route(AS_PATH)	delay	weight
2	(1 3 2)	50	0.7
	(1 3 4 2)	60	0.2
	(1 3 4 5 2)	70	0.1
6	(1 8 6)	100	0.4
	(1 10 11 6)	105	0.6
8	(1 8)	40	0.5
	(1 7 8)	40	0.5

図 1: ルーティングテーブル

4.2 代替経路の生成

代替経路の生成には、二つの手法を用いる。この手法は遺伝的アルゴリズムにおける、突然変異 (mutation)、交叉 (crossover) にあたる。

突然変異

進化的手法を適用する経路の中から、始点、終点以外の一つのノードをランダムに選び、そこから隣接するノードを再びランダムで選んで、これを mutation node とする。この mutation node から始点、終点への最短経路を求め、二つの経路を繋げることにより mutation node を通るという条件を満たす、最短経路が生成される。これを代替経路とする。

図 2 は突然変異を図示したものである。たとえば、突然変異を行う経路として $r = (0\ 1\ 3\ 5\ 7\ 9\ 11\ 13)$ が選択され、変異するノードとして 7 が選ばれたとする。ノード 7 に隣接するノード 6 を mutation node とし、始点 0 からノード 6 までの経路 $r_1 = (0\ 2\ 4\ 6)$ 、ノード 6 から終点 13 までの経路 $r_2 = (6\ 8\ 10\ 13)$ が得られると、新たな代替経路は $r' = (0\ 2\ 4\ 6\ 8\ 10\ 13)$ が生成される。求めた代替経路中に重複するノードがある場合、すなわち重複したリンクを通るような経路が生成された場合は、冗長な経路であるとして破棄し、突然変異を行わない。これは、 $r_1 = (0\ 2\ 4\ 6)$ 、 $r_2 = (6\ 4\ 9\ 11\ 13)$ となるような場合を指す。

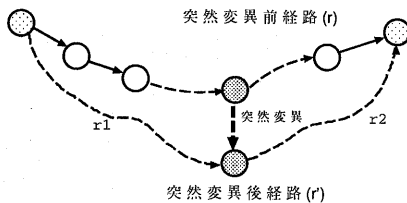


図 2: 経路に関する mutation

交叉

交叉は進化的手法を行う経路と、同一の目的ノードを持つ、ランダムに選ばれたもう一つの経路との間で行う。この二つの経路に共通するノードの中からランダムに交叉するノードを選択し、そこから後ろの経路を互いに交換する。二つの経路に共通するノードが存在しない場合は、交叉を行わない。

図 3 は交叉を図示したものである。たとえば、交叉を行う経路を

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

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

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 がランダムに選ばれたとすると、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。

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

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

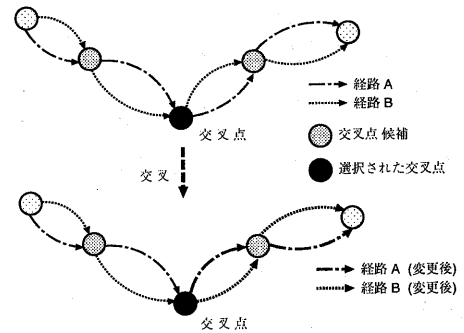


図 3: 経路に関する crossover

4.3 代替経路数の制限

代替経路を生成によるルーティングテーブルの肥大化を防ぐために、代替経路数に制限を設ける。これは、遺伝的アルゴリズムにおける選択 (selection) に相当する。

選択

代替経路数の制限には大きく分けて二つの手法を用いる。一つはルーティングテーブルの全体サイズによる制限であり、これはルーティングテーブルにおける代替経路の総数がある一定数を越えたとき、使用頻度の低い目的地 AS への経路群を除去する。もう一つは目的ノードごとの制限であり、ある目的ノードへ

の代替経路数が一定数を越えたとき、weightの低い経路を除去する。

4.4 経路の評価

経路の評価は、一定数の通信パケットを送るごとに送出される遅延評価パケットによって行う。使用頻度が高い経路に対しては評価パケットを比較的多く送ることになるため、遅延の変化に対応しやすい。GLBR アルゴリズムでは送信した遅延評価パケットが目的地へ着くまでの通信遅延時間をそのまま経路の遅延としていた。しかし、AS 間通信においてはわずかな遅延時間の変化を計測することになってしまうため、良い手段とはいえない。そこで、GIAR アルゴリズムでは経路の評価方法にリンクの負荷状態を用いる。リンクの負荷は、待ち行列中のパケットサイズ/帯域幅となる。一般に、リンクの負荷と応答時間の関係は図 4 のようになる。

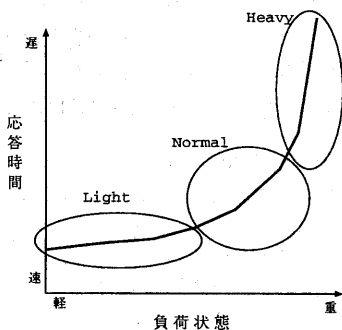


図 4: リンク負荷と応答時間の関係

動的負荷分散アルゴリズムによく用いられる threshold policy[6]に従い、経路の評価を低負荷で応答時間がさほど変わらない状態(light)、過負荷で応答時間が極端に悪くなる状態(heavy)、その中間の状態(normal)の三段階に分け、それぞれに相対的な遅延の評価値を割り当てる。遅延評価パケットは、目的ノードまでの往路中に各リンクの負荷を調べ、予想応答時間を計算し、その値を累積する。遅延評価パケットが送信元へ戻ってくると、累積

された値を基に経路を light、normal、heavy のいずれかに分類し、決められた遅延評価値をその経路の評価値とする。経路の評価値が求まると、同一目的ノードへの重みは次の式により求める。

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i \in S} d_i} \quad (1)$$

このとき、 d_i は i 番目の経路に設定された遅延評価値、 S は同一目的ノードを持つ経路の集合を表している。この重み w の値は遺伝的操作における適応度 (fitness) の値として用いる。再計算された重み確率 w に従った通信パケットの分散をすることによって、ネットワークの負荷状態に適応するような経路選択が可能となる。

例として、遅延の評価値を light に 8、normal に 3、heavy に 1 と割り当て、ある目的ノードへの代替経路の遅延が light、light、normal、heavy と分類される 4 つの経路が存在した場合、重みはそれぞれ、0.4、0.4、0.15、0.05 となる。

また、GIAR では遅延評価パケットを通常の通信パケットよりも優先的に処理する。これにより、リンクの負荷が大きい場合でも、遅延評価を迅速に行うことが可能となる。

4.5 実行手順

GIAR ルーティングアルゴリズムは以下の手順で実行される。

1. 初期化

起動時にルーティングテーブルを空にする。

2. パケットの送信

通信パケットをある目的ノードに送信する必要が生じた場合に、ルーティングテーブルに存在する目的ノードに対する経路の中から確率重みに従って一つ選択し、その経路を用いて通信パケットが送信される。ルーティングテーブルに経路が存

在しなかった場合は、Dijkstra のアルゴリズムによる最短経路を生成し、その経路を用いる。このとき経路はルーティングテーブルに追加される。

3. 通信遅延評価パケットの送信

ある目的ノードへの一つの経路に対して、一定数の通信パケットが送信されるごとに、その経路の遅延を調べるための通信遅延評価パケットが送信される。通信遅延評価パケットは、目的ノードへ到着するまでに通るリンクへの待ち行列中のパケットサイズ/帯域幅の値を遅延時間として累積し、その結果が送信元に送り返される。評価パケットが戻ってくると、遅延結果から遅延評価値を決定し、式 (1) に従って重みを計算する。

4. 遺伝的操作

ある目的ノードへの一つの経路に対して、一定数の通信遅延評価パケットが送信されるごとに、その経路に対して突然変異、交叉が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遅延評価値は、元の経路の値をそのまま用いる。交叉の場合には、その経路の生成元である 2 つの経路の遅延評価値の平均を新たな評価値とする。突然変異、交叉が起こった場合、適応値の再計算を行う。

新たな目的ノード追加や遺伝的操作による代替経路の生成によって、ルーティングテーブルがある一定のサイズを超えた場合、また、目的ノードへの代替経路数がある一定以上になった場合、選択が適用される。ルーティングテーブルに対しては、使用頻度の少ない目的ノードへの経路全体を削除し、代替経路に対しては適応値の最も低い経路を削除する。選択が起こった場合、適応値の再計算を行う。

5 おわりに

本稿では、AS 間ルーティングにおいて代替経路間で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た。提案手法では、進化的手法により代替経路を生成し、AS 間でパケットを動的に分散することにより、ネットワーク資源の効率的な使用が可能となる。

今後の課題としては、シミュレータによるシミュレーション実験を行うことがあげられる。他のアルゴリズムと比較し、GIAR アルゴリズムの有効性を検証する予定である。ネットワーク全体が低負荷の場合は、代替経路を生成する分、従来の最短経路を利用するアルゴリズムよりも効率が落ちるが、過負荷な状態においては、GIAR アルゴリズムが効果的な手法であることが推測される。

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] Bassam Halabi: *Internet Routing Architectures*, New Riders Publishing(1997)
- [3] Douglas Comer 著/村井純・楠本博之訳: 第2版 TCP/IP によるネットワーク構築 Vol.1, 共立出版 (1991)
- [4] Y.Rekhter, T.Li: A Border Gateway Protocol 4(BGP-4), RFC 1771(1995)
- [5] Philip Miller 著 荻田幸雄 監訳, マスタリング TCP/IP 応用編, オーム社 (1998)
- [6] Niranjana G.Shivaratri, Phillip Krueger, and Mukesh Singhal: “Load Distributing for Locally Distributed Systems”, *IEEE COMPUTER*(1992)
- [7] Goldberg, D.E: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989)