

## 動的ネットワークにおける最短経路木更新問題を解く分散アルゴリズム\*

3T-6

細谷好志 若林真一 小出哲士 吉田典可  
広島大学工学部

## 1 はじめに

ネットワーク管理における重要な問題の1つに最短経路木更新問題がある。特に各通信リンクの負荷情報をコストと考えた場合に最短経路木更新問題を解くことは、メッセージを送る経路を決定する際に混雑した経路を避けるという意味で有用である。オンラインシステムではネットワークのトポロジが頻繁に変化するため、その都度最短経路を更新する必要がある。動的ネットワークにおける最短経路木更新問題はこれまでも多くの研究がなされてきた。特に、アルゴリズムの実行中でもトポロジの変化を許す場合、いつかはネットワークのトポロジ変化が安定するという仮定のもとでいくつかのアルゴリズムが提案されている。一般にメッセージ複雑度と空間計算量はトレードオフの関係にあり、さらにメッセージに持たせる情報を少なくすれば、一時的に経路木中にサイクルが生じるなどして各プロセスが正しい情報を保持するまでに時間がかかったり、ネットワークが非連結になった場合に正しい更新が保証されない[2]。文献[1]では、静的ネットワークのアルゴリズムを動的ネットワークに適用する手法として、トポロジの変化ごとにアルゴリズムをリセットして再起動させているが、その手法だとそれまでに集められた情報が無駄になってしまう。本稿では、少ない局所情報及びメッセージ情報によって、分散最短経路木更新問題を効率良く解くイベントドリブンアルゴリズムを提案する。

## 2 準備

## 2.1 最短経路木更新問題

[定義1] ネットワークを無向グラフ  $G(V, E)$  で表し、ネットワーク中の各プロセスをノード  $V$  に、通信リンクをリンク  $E$  に割り当てる。各ノード  $v_i \in V$  には  $1 \sim n$  の異なる識別子が付けられる。また各リンク  $(v_i, v_j) \in E$  にはそれぞれコスト  $c_{ij}$  が割り当てられる。このグラフ  $G(V, E)$  をネットワークグラフと呼ぶ。ネットワークグラフ中では任意の時刻にリンクの *UP* (故障回復)、*DOWN* (故障)、コスト変化及び、ノードの

*UP*, *DOWN*が発生する。

[定義2] ネットワークグラフ中の任意の2つのノード  $v_x, v_y$  を考えたとき、 $v_x, v_y$  を結ぶパスのうち、パスを構成するリンクのコストの合計値が最小のものを最短経路と呼ぶ。

[定義3] 最短経路木更新問題を以下のように定義する。初期状態として、各ノードはネットワークに属する自分以外の任意のノードへの現時点での最短経路とその距離を保持している。任意の時刻にネットワークのトポロジが変化した場合、その都度各ノードはその変化情報だけを用いて、それぞれが保持する最短経路情報を更新していく。この時、ある時刻に注目した場合、ネットワーク全体のトポロジと各ノードが保持している現時点での情報が必ずしも一致しているとは限らない。しかし、ネットワークのトポロジ変化が安定した場合、有限時間後ネットワーク中の各ノードは、必ず正しい経路情報を保持しなければならない。

## 2.2 データリンクプロトコル

本稿で提案するアルゴリズムにおいて、下位のデータリンクプロトコルでは以下の仮定が成り立つものとする。

- 各ノードは隣接しているリンクの状態変化を任意の時刻に知ることができる。
- あるリンクの2つの端点ノードについて、1端のノードがリンクの *DOWN* を検知すると有限時間内にもう1端のノードも *DOWN* を検知する。また1端のノードがリンクの *UP* を検知すると、有限時間内にもう1端のノードも *UP* を検知するか、最初に *UP* を検知したノードが引き続いて *DOWN* を検知する。
- リンク上でのメッセージの順序は保たれる。
- ノードの *DOWN* は隣接リンク全ての *DOWN* とみなし、隣接ノードはそれを検知できる。

\*"A distributed algorithm for updating a shortest path tree in a dynamic network", Takashi HOSOTANI, Shin'ichi WAKABAYASHI, Tetsushi KOIDE and Noriyoshi YOSHIDA, Faculty of Engineering, Hiroshima University

### 3 提案アルゴリズム

#### 3.1 データ構造

各プロセスは自らの情報をメインテーブルに保持すると共に、隣接ノードの持つ情報のコピーを隣接テーブルとして保持する。

各ノード  $P$  が保持する情報

[メインテーブル  $MT$ ]

$D_j$   $j \in V$ : ノード  $P$  からノード  $j$  への最短距離

$N_j$ : ノード  $P$  からノード  $j$  への最短経路においてノード  $P$  に隣接するノード

[隣接テーブル  $NT^i$ ]

隣接ノード  $i$  のメインテーブルのコピー  $D_j^i, N_j^i$

更新メッセージ

[ $CHANGE(d_{xy}, w, x, y, S)$ ] 経路  $xy$  の最短経路が  $x, w, \dots, y$  に、最短距離が  $d_{xy}$  にそれぞれ変化。また  $S$  は  $n$  ビットのシーケンスで  $x \sim y$  の経路上に存在するノードの識別子に対応するビットに 1 がたっている。

[ $UP(d_{xy}, w, x, y)$ ] 隣接ノード  $x$  のメインテーブルの情報 (コピー)。  $d_{xy} = D_j, w = N_j, y = j$  に対応する。

サイクル回避メッセージ

[ $EXIST(x, y, P)$ ] ノード  $x$  からノード  $y$  への最短経路上にノード  $P$  が存在することを示す。

#### 3.2 アルゴリズムの概要

アルゴリズムにおける基本的なルールを以下に示す。

[検知プロトコル]

リンクの  $UP$  を検知した場合、リンクの両端点ノードは互いのメインテーブルを転送する。リンク  $(P, i)$  の  $DOWN$  を検知した場合、 $NT^i$  をすべてリセットする。リンクコストの増加及び減少を検知した場合、メインテーブルを以下に示す更新プロトコルによって更新する。

[更新プロトコル]

メッセージ  $CHANGE(d_{xy}, w, x, y, S)$  をプロセス  $P$  が隣接ノード  $x$  より受信した場合、以下の要領でメインテーブルを更新する。

1.  $S$  の  $P$  ビット目が 1 の場合何もしない。0 の場合以下を実行する。
2.  $NT_x$  の  $D_y^x$  を  $d_{xy}$  に、 $N_y^x$  を  $w$  にそれぞれ更新する。
3. 隣接テーブル  $NT^i$  の中の情報のうち、 $N_j^i \neq P$  のものの中から  $P$  から  $y$  への新しい最短距離  $\min\{D_y^1 + D_1, D_y^2 + D_2, \dots, D_y^i + D_i\}$  を計算しメインテーブルを更新する。 $N_j^i = P$  の場合はその値をバージ

する。

4.  $D_y, N_y$  が更新されればそれぞれを書換え、シーケンス  $S$  の  $P$  ビット目のビットをたてて隣接ノードに  $CHANGE(d_{py}, w, p, y, S)$  を送信する。 $D_y$  が更新されなければそのまま何もしない。またこの時、 $S$  において隣接ノード  $x$  にビットがたっていれば  $EXIST(P, y, x)$  を送信する。

プロセス  $P$  が  $UP(d_{xy}, w, x, y)$  を  $UP$  リンクより受信した場合、上記と同様の手続きを行う。

[サイクル回避プロトコル]

プロセス  $P$  がノード  $x$  より  $EXIST(x, y, P)$  を受信した場合、 $NT_y^x$  の値をバージしてメインテーブルを計算し直す。メインテーブルが更新されれば変化情報をブロードキャストする。

### 4 アルゴリズムの正当性

定理 1 ネットワークのトポロジ変化が時刻  $T_{stable}$  に安定した後、有限時間後に各ノードは正しく最短経路情報を保持する。

略証 ネットワークが安定してから有限時間後、ノード  $i$  から距離  $n (\geq 1)$  以下の各ノードに対してはノード  $i$  は正しい最短経路情報を持つことを、ノード  $i$  からの距離についての帰納法によって証明する。

□

### 5 あとがき

$O(V^2)$  の局所情報とリンクと経路の変化情報のみのメッセージによるイベントドリブンな最短経路木更新問題を解く分散アルゴリズムを示した。今後の課題としてはメッセージ複雑度、時間計算量の詳細な解析や、最速経路更新問題への適用がある。

本研究の成果の一部は文部省科学研究費補助金一般研究 (B) (課題番号 04452195) による。

### 文献

- [1] Y. Afek, B. Awerbuch, and E. Gafni: "Applying static network protocols to dynamic networks," Proc. 28<sup>th</sup> Annual Symposium on Foundations of Computer Science. pp.358-370(1987).
- [2] P.A. Humblet: "Another adaptive distributed shortest path algorithm," IEEE Trans. on Commun., vol.39, No.6, pp.995-1003(1991).