

# 無線アドホック網のルーティングプロトコルOLSR における経路表作成時間の数理解析手法

川西 俊之  
神奈川大学大学院理学研究科

紀 一誠  
神奈川大学理学部

無線アドホックネットワークのルーティングプロトコルである OLSR の経路表作成時間を時間的に非斉時なマルコフ連鎖の吸収時間として求める数理解析法を示す。OLSR は端末の網内移動が比較的少ないネットワークで用いられ、データ通信を開始する前に経路情報の確立を行う点に特徴がある。OLSR は隣接ノード間の接続情報のみを知らせる Hello メッセージと、遠隔ノード間の接続情報を知らせる TC メッセージを用いて経路表を作成する。この 2 種類のメッセージは異なる周期をもつ一定時間間隔で送信される。さらに、位置情報の最新化をはかるため、一定時間を過ぎた情報を破棄する仕組みを備えている。本論では、経路表完成状態を吸収状態にもつマルコフ連鎖の吸収時間として、各端末が情報を持たない状態から経路表が完成するまでの時間を求める。2 種類のメッセージの送信時点や情報破棄時点ではシステムの状態推移構造が変わるため、時間的に非斉時なマルコフ連鎖を用いる。

## Analytical Method for Routing Table Calculation Time of Ad-hoc Network Routing Protocol, OLSR

Toshiyuki Kawanishi  
Graduate School, Kanagawa Univ.

Issei Kino  
Faculty of Science, Kanagawa Univ.

The OLSR is a routing protocol for Mobile Ad-hoc Networks. The protocol creates routing table in the network layer. We propose a Markovian stochastic model for performance evaluation of the OLSR in this paper. The routing table creation time in the network layer is used as performance measure. We limit the discussion to linear network topology for the simplification. Numeric examples are shown in some scenarios.

### 1 はじめに

近年、情報ネットワークの通信プロトコルが見直されている。それは無線ネットワーク技術の進展によるものである。無線ネットワークは、従来の有線ネットワークにはなかった特有の問題を有している。例えば、ノードが移動することによる環境の変化、無線帯域の制限、電源の制限などである。特に、無線ネットワークの中でも無線アドホックネットワーク

にはこの特徴が顕著にあらわれる。無線アドホックネットワークとは、アクセスポイントなどの特定のインフラストラクチャを持たずに、ネットワークを構成するノードが自律分散的に通信をおこなうようなネットワークの利用形態のことである。特にノードが移動するような無線アドホックネットワークのことをモバイルアドホックネットワーク (MANET) という。

Optimized Link State Protocol (OLSR) は代表的な MANET 用のプロアクティブ型ルーティング

プロトコルである。プロアクティブ型プロトコルとは、データ通信を行う前に経路情報を交換することで経路を構築するルーティングプロトコルのことである。その後、定期的に情報を交換することで経路をメンテナンスする。この OLSR の動作はインターネットの標準化文書である Request For Comments (RFC) 3626 で規定されている。

本論では、OLSR の性能を評価するための数理モデルを提案する。具体的には、OLSR が経路を確定するまでに掛かる時間を時間的に非斉時な吸収マルコフ連鎖を用いて評価する。

## 2 OLSR の機能

OLSR は、通信ネットワークのプロトコル階層のネットワーク層で動作するモジュールであり、他のルーティングプロトコルと同様、経路表を作成することを目的とする。RFC3626 には、OLSR の主要機能として以下のような項目が記述されている。

(1) **リンク感知および隣接ノード探知**: OLSR は、隣接ノードからメッセージを受信することで隣接ノードとの間の無線リンクを発見する。この機能のことを「リンク感知」と呼ぶ。さらにメッセージの交換を続けると、隣接ノードはお互いに双方向で到達可能であることを知ることができる。

(2) **トポロジ開示**: 「トポロジ開示」機能は、ネットワーク全体に関わる機能である。ノードの隣接情報をネットワーク中に転送することにより、遠隔ノードがネットワーク構造 (トポロジ) を理解することができる。

(4) **経路表作成**: 最終的に、OLSR は隣接ノード情報とトポロジ情報を用いて経路表を作成する。

OLSR は主に Hello メッセージとトポロジコントロール (TC) メッセージの 2 種類のメッセージを交換する。Hello メッセージはリンクと隣接ノードの情報を伝達する。このメッセージはリンク感知と隣接ノード探知に使用される。そのため、メッセージを生成したノードの隣接ノードのみがこのメッセージを受信する。それに対して、TC メッセージはトポロジ情報を格納し、ネットワークの全ノードに配

信される。これらのメッセージによって伝達された情報は、OLSR が動作している各ノードが個別に蓄積していく。

また、MANET の環境では、無線の状態によってリンクの通不通が変化する。そのため、OLSR には一定期間ごとにネットワークの情報をリフレッシュする機能が備わっている。Hello メッセージによって交換される情報にはすべて時刻が記録されており、Neighbor Hold Time という有効期間が過ぎるとリセットされる。

## 3 OLSR の経路表作成モデル

以下の事項に着目し OLSR の経路表作成過程をモデルを構成する。

(1) **ネットワークのトポロジ**:  $A, B, C, D$  の 4 ノードが一次的に配置されているものとする。ノード  $A$  に着目し、時刻 0 からノード  $A$  の経路表が完成するまでの時間の期待値に関する評価を行う。また、これらのノードの集合を  $\mathcal{N} = \{A, B, C, D\}$  で表わすことにする。さらに、時間単位は 1 秒とした。

(2) **各ノード間の無線通信の成功確率**: 各ノード間は無線通信を行うが、その通信が成功するか失敗するかは確率的に定まるものと考え、ノード  $i, j$  ( $i, j \in \mathcal{N}$ ) 間の無線通信成功確率を  $r_{ij} = r_{ji}$  で表す。

(3) **Hello メッセージの送信時間間隔**: Hello Interval を  $T_{\text{Hello}} = 2$  [sec] とした。

(4) **TC メッセージの送信間隔**: TC Interval を  $T_{\text{TC}} = 4$  [sec] とした。また、ノード  $C$  が送信する TC メッセージをノード  $A$  が受信できる確率を確率  $\gamma = r_{AB}r_{BC}r_{CD}^2$  で表現できるものと仮定する。

(5) **接続情報の保存期間と情報の更新方法**: Neighbor Hold Time を  $T_{\text{Neighbor}} = 6$  [sec] とした。また、更新対象となる情報は Hello メッセージの交換により更新されたものであり、リンク状態が非対称リンク (ASYM) であるものはすべてそのリンク情報を無効状態 (LOST) に変え、リンク状態が対称リンク (SYM) であるものについてはリセットを行わないものとする。

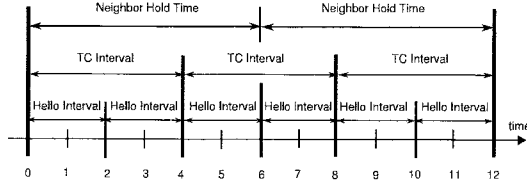


図1 OLSRのタイミングチャート

図1に示されるように、各時刻でイベントが発生するが、発生するイベントの種類により、ネットワークの状態変化は異なっている。  $0 \leq t \leq 12$  について、発生時刻  $t$  を発生するイベントの種類によって分類してみると以下のようになる。

- $t \in \{1, 3, 5, 7, 9, 11\}$ : 発生イベントなし,
- $t \in \{2, 10\}$ : Hello のメッセージ受信発生,
- $t \in \{4, 8\}$ : Hello メッセージ受信および TC メッセージの受信が共に発生,
- $t \in \{6\}$ : Hello メッセージ受信および Neighbor Hold Time 経過イベントが共に発生,
- $t \in \{12\}$ : Hello メッセージ受信, TC メッセージ受信および Neighbor Hold Time 経過イベントが共に発生.

ノード A の経路表を作成するには、ノード A で保持されている情報に加えて、各時刻でどのようなイベントが発生したのかという情報がわかればよい。また、どのようなイベントが起きるかは各時刻で確率的に定まるので、このネットワーク全体の動作はマルコフ連鎖として記述できることがわかる。ただし、時刻により発生するイベントの種類が異なるため、時間的に様なマルコフ連鎖にはならない。そのため、時刻ごとに推移確率が異なる非斉時マルコフ連鎖としてモデル化を行う。このとき、ノード A の経路表が完成をした状態をこのマルコフ連鎖の吸収状態とし、その他の状態は一時的状態としてあつかう。したがって、ノード A の経路表完成時間の期待値は、この吸収状態をもつ非斉時マルコフ連鎖において、ある初期状態から出発して吸収状態にいたるまでの平均吸収時間として得られることになる。

ここで、ネットワークの状態を以下の4つ変数 ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ) で表すことにする。ここで、 $Y_1 \in \{\text{LOST}, \text{ASYM}, \text{SYM}\}$  でありノード A とノード B の関係を表わす。同様に、 $Y_2 \in \{\text{LOST}, \text{ASYM}, \text{SYM}\}$  はノード B とノード C の関係、 $Y_3 \in \{\text{KNOWN}, \text{UNKNOWN}\}$  はノード A とノード C の関係、 $Y_4 \in \{\text{NONE}, \text{RECEIVE}\}$  はノード A とノード D の関係をそれぞれ表わす。とり得る値の可能な値な組み合わせをすべて調べると以下に示す 12通りの状態に集約されることがわかる。

- $s_1 = (\text{LOST}, \text{LOST}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_2 = (\text{LOST}, \text{ASYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_3 = (\text{LOST}, \text{SYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_4 = (\text{ASYM}, \text{LOST}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_5 = (\text{ASYM}, \text{ASYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_6 = (\text{ASYM}, \text{SYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_7 = (\text{SYM}, \text{LOST}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_8 = (\text{SYM}, \text{ASYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_9 = (\text{SYM}, \text{SYM}, \text{UNKNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_{10} = (\text{SYM}, \text{SYM}, \text{KNOWN}, \text{NONE}),$
- $s_{11} = (\text{SYM}, \text{SYM}, \text{UNKNOWN}, \text{RECEIVE}),$
- $s_{12} = (\text{SYM}, \text{SYM}, \text{KNOWN}, \text{RECEIVE}).$

時刻  $T$  におけるネットワークの状態確率  $\pi_T$  は、初期状態ベクトルを  $\pi_0$  とし、推移確率行列  $P_t$  を用いて

$$\pi_T = \pi_0 \prod_{t=1}^T P_t \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $P_t$  は、時刻  $t$  ごとに発生するイベントに着目することで、無線通信の成功確率  $r_{ij}$  を用いて記述することができる。この関係を用いて、時刻  $t$  においてノード A の経路表が完成する確率を計算することができるが、考えているマルコフ連鎖は時刻とともに推移確率行列  $P_t$  の形が変化する非斉時マルコフ連鎖なので、その計算は煩雑になる。そこで、本論では平均吸収時間にのみ着目し、以下のような手順で計算をすることにする。本マルコフ連鎖の推移確率構造が 12 秒を単位として変化することに注目し、時間単位が 12 秒であり、つ

ぎのような推移確率行列をもつ時間的に一様なマルコフ連鎖  $\{X_n^*\}_{n=0}^\infty$  を考え、その平均吸収時間を求めることにする。

$$P = \prod_{i=1}^{12} P_i. \quad (2)$$

この時間的に一様なマルコフ連鎖  $\{X_n^*\}_{n=0}^\infty$  は、マルコフ連鎖  $\{X_t\}_{t=0}^\infty$  と同じ状態空間  $S$  をもち、同じ吸収状態  $s_{12}$  と同じ一時的状態  $\{s_i\}_{i=1}^{11}$  をもつことは明らかである。マルコフ連鎖  $\{X_n^*\}_{n=0}^\infty$  において、与えられた初期状態から出発して、吸収状態  $s_{12}$  に吸収されるまでの平均吸収時間を求めるため、状態推移確率  $P$  を以下のように一時的状態と吸収状態に分割する。

$$P = \begin{matrix} & s^* & s_{12} \\ \begin{matrix} s^* \\ s_{12} \end{matrix} & \begin{pmatrix} Q & R \\ O & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

ただし、 $s^* = \{s_i\}_{i=1}^{11}$  は一時的状態の集合とする。このときこのマルコフ連鎖の基本行列  $M$  は

$$M = (I - Q)^{-1} = \sum_{m=0}^{\infty} Q^m \quad (4)$$

で与えられ、平均吸収時間ベクトル  $\tau = \{\tau(s_i)\}_{i=1}^{12}$  は

$$\tau = M\mathbf{1} \quad (5)$$

となることはよく知られている。ここで、 $\tau(s_i)$  は初期状態  $s_i$  ( $i=1,2,\dots,12$ ) から出発して吸収状態  $s_{12}$  に到達するまでの平均時間、すなわち平均吸収時間を表しており、 $\mathbf{1} = (1,1,\dots,1)^t$  である。

以上より、初期状態  $s_1$  から経路表が完成する状態  $s_{12}$  に到達するまでの平均時間は (5) 式より計算される  $\tau(1)$  を 12 倍したもの、すなわち  $T_{\text{create}} = 12 \times \tau(s_1)$  秒となる。

## 4 評価例

ここでは以下の評価シナリオについて考える。全リンクの強度を変化させる、すなわち、 $r_{ij} = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$  ( $i, j \in \mathcal{N}$ ) と均等に变化させる。このシナリオは、例えば雨が降って全体の無線状況

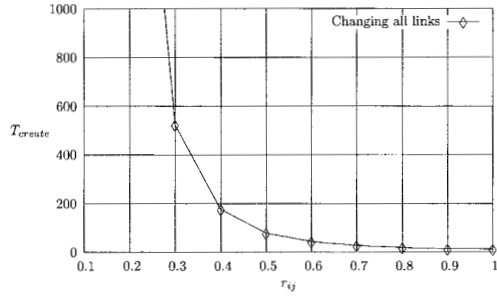


図2 経路表作成時間の推移

が悪化するような場合のように、ネットワーク全体の環境が均一に変化するような状況を想定している。この評価シナリオの経路表作成時間評価を、図2に示す。この結果を見ると、無線リンクの強度が経路表の作成時間にどの程度影響を与えるかを評価することができる。全無線リンクの送受信成功確率が50%程度であれば、平均の経路表作成時間は1分程度と見積もることができる。

## 5 結論

本論では、代表的な MANET 用のプロアクティブ型ルーティングプロトコルである OLSR の性能を評価するための数理モデルを提案した。性能評価指標として経路表作成時間を用い、時間的に非斉時なマルコフ連鎖を用いてモデル化を行った。モデルの解析過程で、非斉時なマルコフ連鎖から時間的に一様なマルコフ連鎖を構成するという工夫を施した。さらに、評価例として、無線リンクの強度（無線通信成功確率）が経路表の構築過程に与える影響を数値例を用いて示すことができた。本論の手法は従来のシミュレーションによる評価法にくらべ簡便であり、各種パラメータが結果に与える影響を解析的に調べることができる点で有効であると考えられる。

今後の課題として、今回想定した直線型のネットワークトポロジを2次元的な広がりをもつメッシュ型などに拡張する等、モデルを拡張することが挙げられる。