

データ送信量解析を用いた移動端末を含むアドホックネットワークの 動作推定方式の提案

福岡宏一[†] 山本美幸[†] 横谷哲也^{‡1} 齋藤正史^{‡2} 寺島美昭[†]

概要: 自動車の自動制御運転（自動運転）では、自動運転のための情報の交換を車車間や路車間で直接通信を行う無線アドホック通信を用いることが想定されている。その際、無線通信に対するジャミングなどの攻撃による通信途絶や通信遅延は、自動運転の安全性を脅かすと考えられる。そのため、高信頼化に繋がる通信途絶の検知は重要となる。本研究では、将来の攻撃検知への前段階として、送信電波から抽出したデータ送信量を解析することによってネットワークの基本動作を推定する。また、時間毎にデータ送信量を区切って解析する方式を併用し、移動端末が存在する場合でも、移動に追従したネットワーク情報を推定できる方式を提案する。本方式は、送信電波のみを用いるため、無線の不安定性や帯域の細さに適した方式となる。また、本方式によりネットワークのプロトコルや各種設定に依存しないブラックボックス監視が可能となり、概要レベルではあるが安全性に関わるネットワーク動作を推定できる。本稿では、提案方式の理論検証のための実験手順の考案を行い、ネットワークシミュレータによって実験と検証を行った後、動作推定アルゴリズムを開発した。

Proposal of Motion Estimation Method of Wireless Ad Hoc Network by Data Transmission Amount Observation

KOUICHI FUKUOKA[†] MIYUKI YAMAMOTO[†] TETSUYA YOKOTANI^{‡1}
MASASHI SAITO^{‡2} YOSHIAKI TERASHIMA[†]

1. はじめに

自動車の自動制御運転（以下自動運転と呼称）では、自動での加減速やステアリング操作を行う運転のための情報の交換を、車車間や路車間で直接通信を行う無線アドホック通信を用いて行うことが想定されている[1]。その際、無線通信に対するジャミング攻撃やサイバー攻撃等による通信途絶や通信遅延のネットワーク異常は、死角に存在する車両等との接触事故や隊列走行の乱れなどの自動運転の安全性を脅かす。本研究では、将来の攻撃検知への前段階として、送信電波から抽出したデータ送信量を解析することによるネットワーク監視方式を提案する。

以前までの取り組みとして、静的なトポロジーにおいて各端末の電波からデータ送信量を抽出し、これを用いて傾向解析や他端末と比較解析することによって、ネットワークの基本動作を外部から推定する方式（以下静的推定方式と述べる）を提案した。本稿では、移動端末がネットワークに存在する際、より高精度での推定を可能とするため、データ送信量を時間毎に区切り、解析をする方式を提案する。また、ネットワークシミュレータを用いた実験によって提案方式の検証を行う。

2. 目的

静的推定方式では、データ送信量解析による動作推定のアルゴリズムの確立を第一として、移動端末を含まないシンプルなたポロジーでの挙動確認を行ってきた。将来的に

は、自動運転を行う自動車のアドホックネットワークへの対応を見据えているため、移動端末を含んだトポロジーへの対応は必要不可欠である。本稿では、移動端末が含まれる場合の推定の第一段階として、移動端末が存在する際、より高精度で推定することを目的として既存のアルゴリズムを拡張する。この技術を発展させ、通信の異常を抽出することによって、将来的には攻撃検知方式の開発を行う。

3. 静的トポロジーでの動作推定

3.1 ネットワーク監視構成

本項では、動作推定の手順を示す。対象システムでは、図1に示すように通信を行う際に発せられている各端末の送信電波を利用し、これを観測機によって観測する。観測機では、この送信電波から各端末のデータ送信量を抽出し、1秒毎にデータ送信量を累積する。観測者は、累積

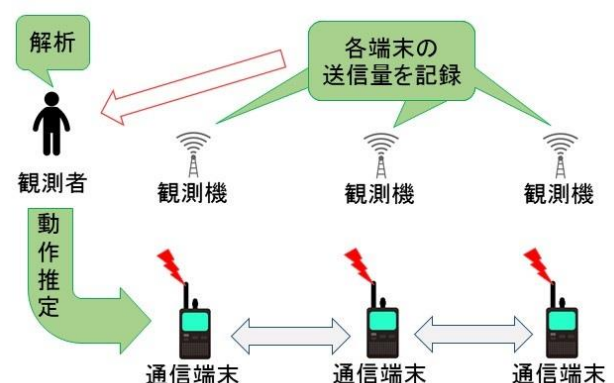


図1 想定システム図

[†] 創価大学大学院 工学研究科

^{‡1} 金沢工業大学 工学部

^{‡2} 金沢工業大学 情報フロンティア学部

したデータを各端末内での解析や、他端末との比較解析を行うことで、無線ネットワークの動作を推定し、ネットワーク監視を行う。

本監視構成では、各種情報交換のための通信を用いず動作推定を行うことや、無線通信の際に確実に発せられている電波を用いて動作推定を行うため、不安定で帯域の細い無線ネットワークの特性に適したネットワーク監視方式となる。

静的推定方式では、将来的に自動運転のネットワークにも応用できる推定項目として、以下の2項目の動作推定を行っている。

- ・ステップ1-ルーティングプロトコル推定
- ・ステップ2-通信経路推定

静的トポロジーではプロアクティブ型のプロトコルで経路推定が可能となる。(3.2項で詳述) そのため、静的トポロジーにおいては、3.2項のステップ1-ルーティングプロトコル推定、3.3項のステップ2-通信経路推定の2ステップを順次適用して動作推定を適用することで、対象ネットワークの経路を算出する。

3.2 ステップ1-ルーティングプロトコル推定

本項では、アドホックネットワークにおけるルーティングプロトコルの挙動説明と、それに基づいて開発した推定アルゴリズムと検証結果について述べる。

現在、アドホックネットワークで使用されるルーティングプロトコルは、プロアクティブ型とリアクティブ型の2種に大別される。それぞれ代表的なプロトコルとして、プロアクティブ型の Optimized Link State Routing INRIA(以下 OLSR)[3]、リアクティブ型の Ad hoc On-Demand Distance Vector(以下 AODV)[3]が存在する。これら2種のプロトコルの最大の差は、経路探索のタイミングにある。プロアクティブ型では、図2のようにネットワーク起動時にあらかじめ経路探索を行い、経路を構築する。対してリアクティブ型では、通信要求後に経路探索を行い、経路を構築する。

このプロトコル特性に起因し、ネットワーク内の通信アプリケーションが1つの場合、リアクティブ型では、経路探索を行う送信元端末と、要求毎に返答を行う宛先端末の

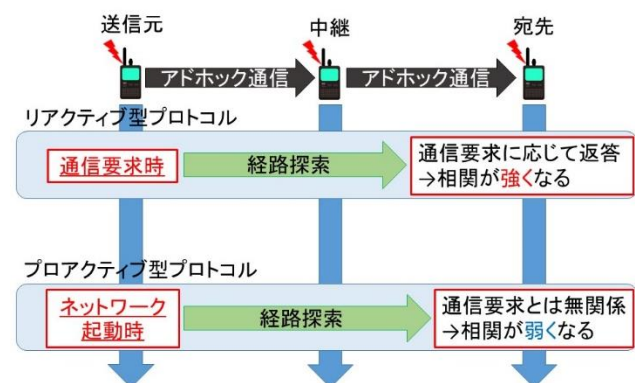


図2 プロトコルによる経路探索の差異

入力:1秒毎の送信量合計 (T_{Nt})

出力:ネットワークのルーティングプロトコル

N=宛先 Node 番号

t=秒数

S=発信元 Node 番号

x=simtime(秒)

検知部分

$$C_N = \frac{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x ((T_{St} - \bar{T}_S)(T_{Nt} - \bar{T}_N))}{\sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{St} - \bar{T}_S)^2} \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{Nt} - \bar{T}_N)^2}} \quad (C_N \text{ は相関係数})$$

if($C_N > X$) { (X は閾値)
ネットワークは AODV
}
else {
ネットワークは OLSR
}

図3 ルーティングプロトコル推定アルゴリズム

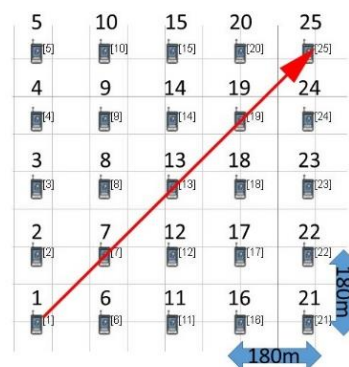


図4 静的トポロジー

相関関係が強くなる。それに対し、通信要求と関係なくあらかじめ経路探索を行うプロアクティブ型では、データ送信時に送信元端末が経路探索を行わず通信をすることが可能となっており、送信元端末と宛先端末の相関関係が弱くなる。

提案手法ではこの傾向に着目し、宛先端末の相関係数が閾値以上であればリアクティブ型、閾値未満であればプロアクティブ型であると判断する。図3にルーティングプロトコル推定のアルゴリズムを示す。

アルゴリズムの検証は、ネットワークシミュレータ QualNet[2]を用いて、図4の5*5の格子状の静的なトポロジーで検証を行った。各端末上の数字は端末番号である。検証トポロジーでは一方向に一定間隔で通信を送り続けている。結果、アルゴリズムによりAODVとOLSRのプロトコル判別が可能であった。また、ステップ1-ルーティングプロトコル推定は、移動体を含む場合にも有効である。

静的トポロジーにおいて、プロトコル特性上、AODVでは通信が拡散してしまっ経路が一つに定まらない。そのため、3.3項で示すステップ2-通信経路推定は、OLSRで有効な手法となっている。経路検知ができなかった際、プロトコル特性か、ネットワーク異常かの原因を判断するため、本アルゴリズムを使用して対象ネットワークのプロトコル

を判別する。

3.3 ステップ2-通信経路推定

本項では、アドホックネットワークにおける通信の挙動説明と、それに基づいて開発した推定アルゴリズムと検証結果について述べる。

アドホックネットワークでは、アクセスポイントが存在せず、端末間同士で通信を行う特性上、送信元から宛先までいずれかの端末を経由して情報伝達が行われる。この際、管理者側から通信経路の把握が可能であるということは、セキュリティやネットワーク保全の面からも必要不可欠であると考え、本項目を推定項目とした。

アドホックネットワークでは送信元から宛先までいずれかの端末を中継して通信を行うため、図5に示すように通信を中継する関係にある端末間において、それぞれの送信量変化を比較した際、送信量の変化傾向が一致する。提案方式では端末同士の変化傾向に着目し、それぞれの端末の一致度を比較するため、送信元と各端末の相関係数を計測する。相関係数が閾値以上であった場合、その端末は通信経路端末であると判断する。

また、相関係数のみでは検知漏れしてしまう場合が存在する。これは、通信の不安定化により、図6のようにパケットが一時的に多量に放出されてしまう現象に起因する。

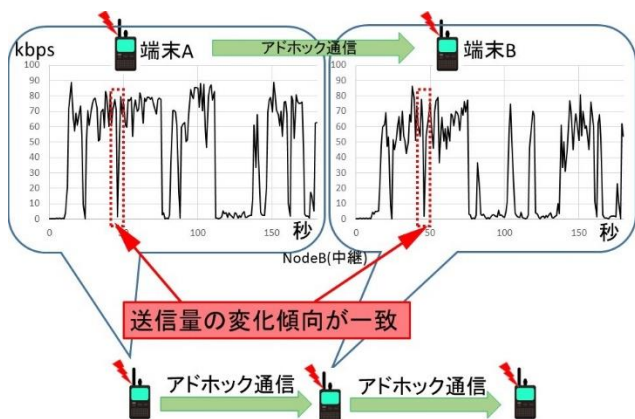


図5 隣接端末間送信グラフ比較

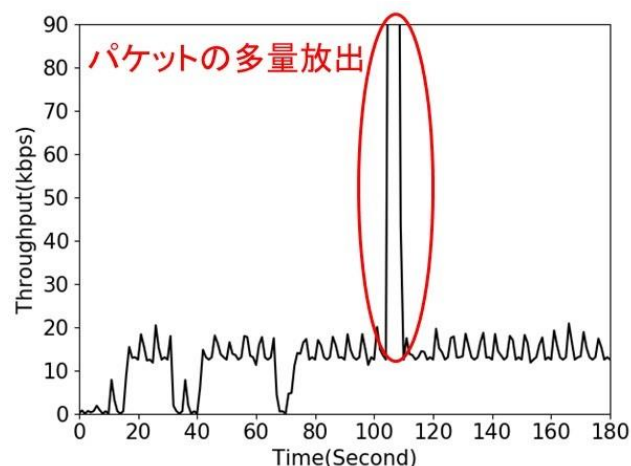


図6 パケットの多量放出

入力:1 秒毎の送信量合計 (T_{Nt})

出力:通信経路端末集合 A

N=Node 番号

t=秒数

S=発信元 Node 番号

x=simtime(秒)

A=端末集合

検知部分

```
for(N=1;N<=最大 Node 数;N++){
   $C_N = \frac{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x ((T_{St} - \bar{T}_S)(T_{Nt} - \bar{T}_N))}{\sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{St} - \bar{T}_S)^2} \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{Nt} - \bar{T}_N)^2}}$  ( $C_N$  は相関係数)
   $S_N = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{Nx} - \bar{T}_N)^2}$  ( $S_N$  は標準偏差)
  if( $C_N > X$ ){ (X は閾値)
    NodeN は通信経路
    集合 A に NodeN を追加
  }else if( $S_N > Y$ ){ (Y は閾値)
    NodeN は通信経路
    集合 A に NodeN を追加
  }
}
```

図7 通信経路推定アルゴリズム

このような場合、ほかの端末に比べて該当端末は送信スループットの振れ幅が大きくなる。この傾向に着目し、標準偏差を記録し、閾値以上であればその端末も通信経路端末であると判断する。図7に通信経路推定のアルゴリズムを示す。このアルゴリズムにより、通信経路端末集合を得られる。

このアルゴリズムは、QualNet を用いて 3.2 項と同等の条件で検証を行っている。検証の結果、OLSRを使用したネットワークで有効であることを確認している。静的トポロジの場合、前述の通り AODV では通信経路が一定に定まらないプロトコル特性によって推定が困難であった。

3.4 移動端末混在時の課題

本アルゴリズムは、各端末の送信データを全てまとめた後、解析することによって動作推定を行っている。静的トポロジでは、通信経路の切替は通信が不安定になった場合等、限られた場合での発生のため、頻度が少なく問題とはならなかった。しかし、移動端末を含むトポロジへ適用する場合、移動に伴って経路切替が発生するため、切り替わりの頻度が多い。このアルゴリズムでは通信経路に該当する端末の集合のみを得ることになり、端末の移動に伴って変化する通信経路に追従することは不可能となる。

4. 提案

既存手法の問題点は、移動に伴って変化する通信経路に追従できない点であった。本稿では、既存手法の問題点に対応するため、データ送信量を時間毎に区切って標準偏差を適用し、経路切替時間を算出する手法を提案する。時間

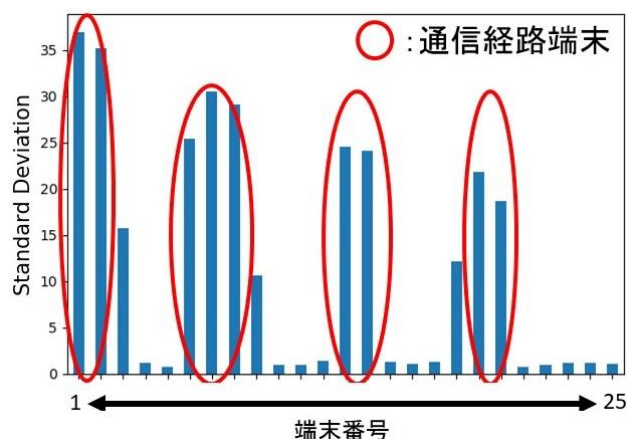


図 8 通信経路の標準偏差

入力:1 秒毎の送信量合計 (T_{Nt})

出力:NodeN の通信経路除外時刻

N=Node 番号

t=秒数

S=発信元 Node 番号

x=t+30

i=0 (i はカウント用変数)

検知部分

```
for(N=1;N<=最大 Node 数;N++){
  for(t=0;x<=最大 simtime;t+30){
     $S_{Ni} = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{t=1}^x (T_{Nx} - \bar{T}_N)^2}$ 
    if(N==通信経路端末 &&  $S_{Ni} < X$ ){ (X は閾値)
      t-30 秒から t 秒の間に NodeN は通信経路から除外された
    }
  }
}
```

図 9 通信経路切替時刻推定アルゴリズム

を分割して解析することにより、経路の変化に対応した経路推定が可能となる。監視構成は、静的推定方式と同一である。

図 8 に示すように、通信経路上にある端末は通信経路ではない端末に比べて標準偏差が高い値を示す。(図 4 のトポロジーを使用) この傾向に着目し、データ送信量を時間毎に区切って計測し、区切ったデータから標準偏差を算出する。今回の提案では、30 秒の等間隔で分割する。この手法を時分割標準偏差手法と呼称する。3.2 項の通信経路推定アルゴリズムを用いて通信経路端末集合を取得し、集合内に含まれている端末の標準偏差がその 30 秒間で閾値を下回った場合、その前の 30 秒間においてその端末は通信経路から除外されたと判断する。図 9 にこのアルゴリズムを示す。

5. 実験

5.1 実験手順

本研究では、提案手法の理論的な検証と動作推定の可否の検証を第一に考え、実機環境ではなくネットワークシミュレータ QualNet を実験環境として用いた。このネットワークシミュレータによって生成されたデータを解析することによって提案手法の検証を行う。今回の実験では、各端末から観測機までの電波の劣化は考慮しない。

今回の実験では、表 1 の設定を用いて実験を行った。ルーティングプロトコルは、リアクティブ型の AODV、プロアクティブ型の OLSR をそれぞれ用いた。

検証で用いたネットワークトポロジーは、図 10 の格子状に配置された端末の中心部分を等速に移動する端末が通り抜けるトポロジーを用いた。移動端末混在時の挙動の確認を重視し、このようなシンプルなトポロジーを用いることとした。端末間の距離は 180m で、この距離は斜め方向に 1 ホップで通信が出来ない距離を予備実験によって導き出したものである。図 10 の端末の右側に記されている番号は端末番号で、端末 1 が右方向に約 30km/h で等速移動しながら、端末 20 に向けて 0.1 秒毎に 1024byte のパケットを送信している。この移動に伴い、マルチホップの経路が時間経過とともに変化する。

今回の実験において相関係数の閾値は 0.3、標準偏差の閾値は 10 を用いている。これらの閾値は全て予備実験によ

Simulation Time	180s
Radio Type	802.11b
Data Rate	2Mbps
Frequency Band	2.4GHz
Application	Constant Bit Rate(1024byte/ms)

表 1 実験用パラメータ設定

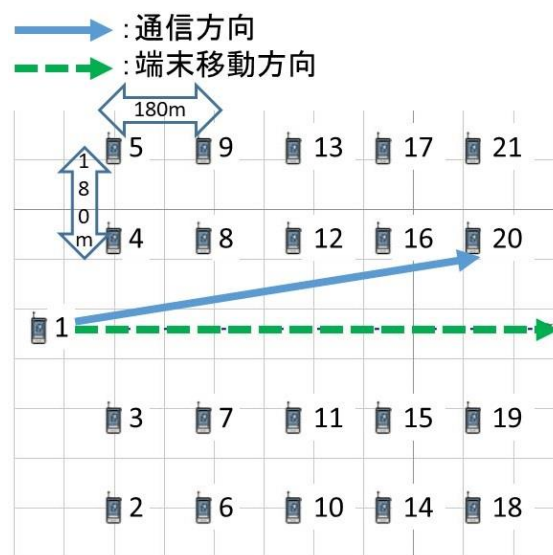


図 10 実験に用いたトポロジー

って得た値である。

5.2 実験結果

初めに AODV での実験結果を示す。AODV での実験において、経路切替が発生した時刻は 40 秒・75 秒・105 秒・140 秒の 4 回となる。図 11 は、各端末の送信量変化をトポロジー順に並べたものとなる。各グラフの右上の番号は端末番号である。送信元の端末 1 と中継している端末 2・8・12・16 に波形が発生しており、通信経路の端末であることが分かる。次に、3.2 項の通信経路推定アルゴリズムを使用し、算出された各端末の標準偏差のグラフが図 12 となる。波形が発生している端末が閾値以上の値を示しており、こちらからも通信経路の端末が判別できる。これによって得られた端末を通信経路端末集合とする。

次に時分割標準偏差を算出したグラフが図 13 となる。最初の経路切替時刻は 40 秒であり、この時点で端末 4 が経路から除外されるはずである。通信経路切替時刻推定アルゴリズムから、40 秒に除外された情報は 60 秒から 90 秒の区間の標準偏差に反映される。図 13 の 60 秒から 90 秒までの標準偏差で端末 4 が閾値を下回っており、AODV において提案アルゴリズムによって通信経路切替時刻が判別

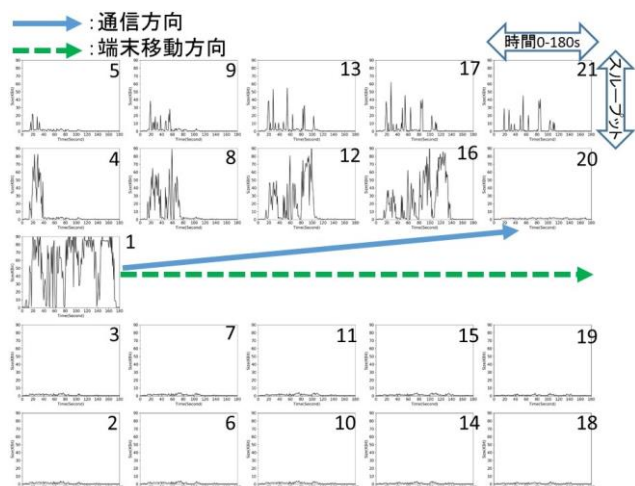


図 11 AODV 送信量グラフ

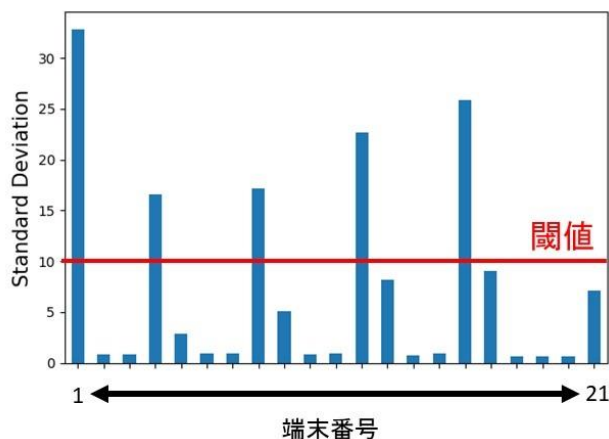


図 12 AODV における標準偏差による通信経路推定

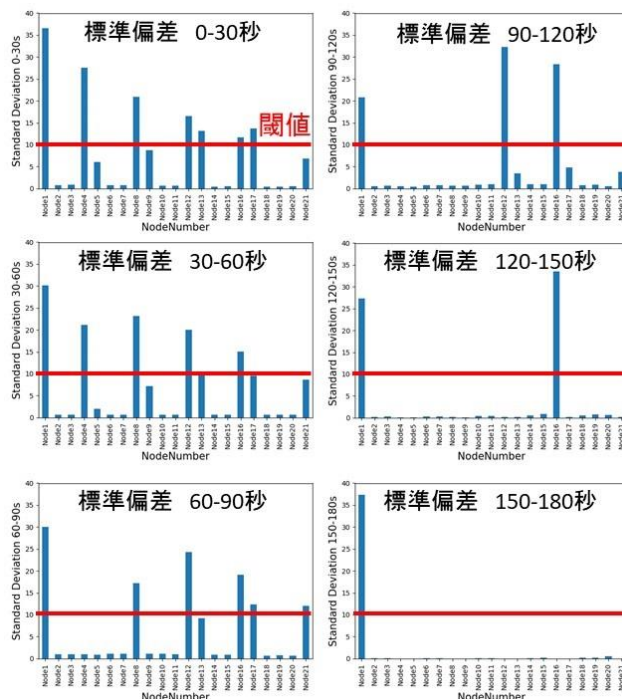


図 13 AODV での時分割標準偏差

可能であった。

次に、OLSR での実験結果を示す。OLSR での実験において、経路切替が発生した時刻は 45 秒・75 秒・105 秒・140 秒の 4 回となる。図 14 は、各端末の送信量変化をトポロジー順に並べたものとなる。各グラフの右上の番号は端末番号である。AODV と同様に送信元の端末 1 と中継している端末 2・8・12・16 に波形が発生しており、通信経路の端末であることが分かる。次に、3.2 項の通信経路推定アルゴリズムを使用し、算出された標準偏差のグラフが図 15 となる。こちらも AODV と同様に波形が発生している端末が閾値以上の値を示しており、通信経路の端末が判別できる。

次に時分割標準偏差を算出したグラフが図 16 となる。最初の経路切替時刻は 45 秒であり、この時点で端末 4 が経路から除外されるはずである。通信経路切替時刻推定ア

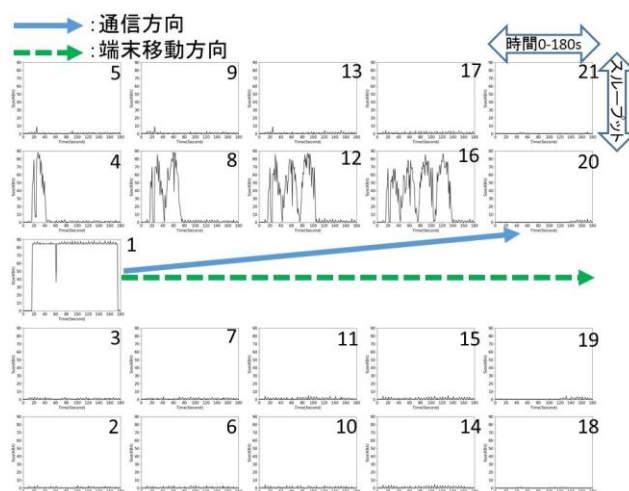


図 14 OLSR 送信量グラフ

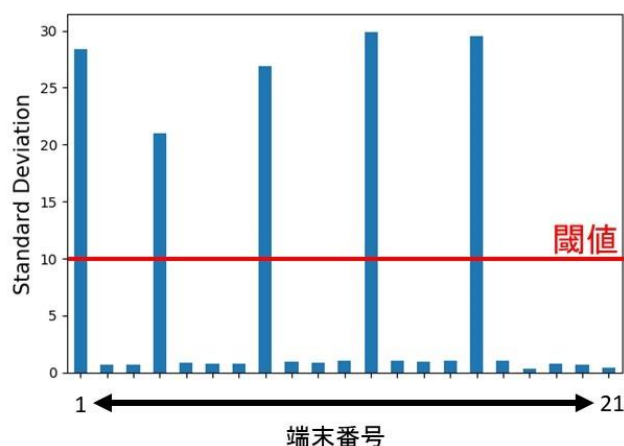


図 15 OLSR における標準偏差による通信経路推定

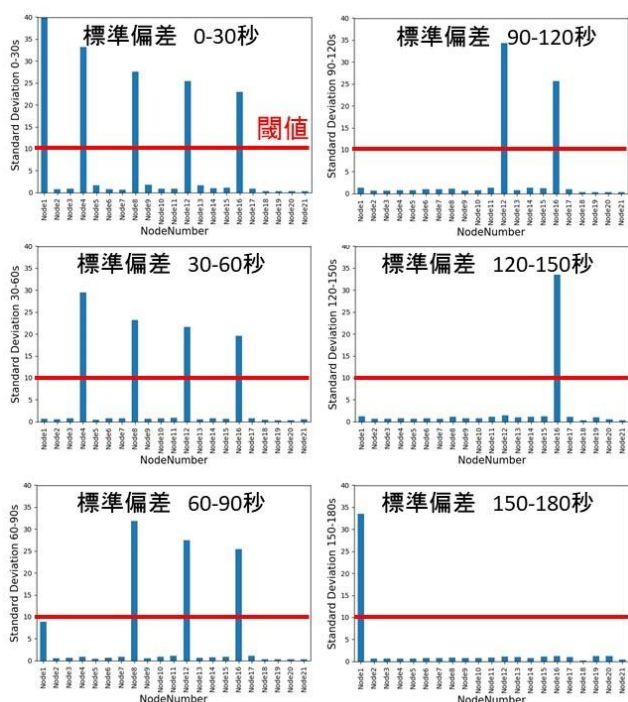


図 16 OLSR での時分割標準偏差

ルゴリズムから、45 秒に除外された情報は 60 秒から 90 秒の区間の標準偏差に反映される。図 16 の 60 秒から 90 秒までの標準偏差で端末 4 が閾値を下回っており、OLSR においても提案アルゴリズムによって通信経路切替時刻が判別可能であった。しかし、送信元の端末 1 が 30 秒から 60 秒以降の標準偏差で閾値を下回っている。

5.3 結論

今回の実験により、静的トポロジーで開発した通信経路推定アルゴリズムに、本稿で提案した通信経路切替時刻推定アルゴリズムによる時分割標準偏差を併用することで、AODV と OLSR において通信経路の切り替え時間を推定できる。

また、今回の OLSR での実験において、送信元の端末 1 が 30 秒から 60 秒以降の標準偏差で閾値を下回っている。これは、OLSR の際、AODV に比べて送信元の端末のスル

ーput が安定していることに起因していると考えられる。今回のケースの場合、送信元の端末がパケットの送出を 0 秒から 30 秒の間に中断した場合と判断がつかない。

5.4 今後の課題

今回の実験では 30 秒区切りで標準偏差の計測を行っており、ケースによっては実際の経路切替時刻から検知までのラグが大きくなってしまいう可能性がある。また、移動端末が高速で移動する場合、時間の区切りが大きすぎて検知から漏れてしまう可能性も考えられる。対象となるネットワークの端末の移動速度や、求められる精度を考慮して時間区切りの間隔や時分割の時間の長さを可変させる等、アルゴリズムの改良が必要となる。

また、今回は移動端末への対応の第一段階として、対象となる移動端末が等速で移動し、送信端末が一つのシンプルなトポロジーでの検証を行った。実際のネットワークでは、自動車の加減速も考慮する必要がある。また、複数の送信端末、複数の移動端末が存在する場合も考えられる。今後は、これらを考慮した複雑なネットワーク構成での検証をする。

そして、今回は OLSR の送信元端末で誤検知が発生した。現時点では、対象ネットワークのルーティングプロトコルを推定した後、提案アルゴリズムを適用することで、誤検知発生リスクが高いことは想定できる。しかし、根本的な解消にはならないため、今後アルゴリズムの改良を行う。今回の提案では、理論検証を目的に、実環境で発生する各端末から観測機への電波の劣化を考慮しない理想的な環境で実験を行った。今後は実環境での電波の劣化を考慮して、送信電波に劣化をかけてアルゴリズム検証を行うといった、実環境を模した形式での検証も検討する。

6. おわりに

本稿では、静的推定方式で提案した通信経路推定とルーティングプロトコル推定に対して、時分割標準偏差での解析を併用することで、移動端末混在時の経路切替に追従できる経路切替時刻の推定方式を提案した。また、これらの手法の理論検証のための実験設定の考案を行い、ネットワークシミュレータを用いた検証によって経路切替時刻が推定可能であることを確認した。今後は、実験によって生じた課題点を解消するため、アルゴリズムの改良に取り組む。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP17K00193 の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] 松井進：アドホックネットワークの実用化に向けた課題と実用化動向、日本信頼性学会誌 第 34 巻, pp.532-539, 2012.
- [2] QualNet Network Simulator Software SCALABLE Networks (<https://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator-software>)
- [3] 小菅昌克 他：アドホックネットワークが開く新しい世界(前編)、情報処理学会誌 44 巻第 10 号, pp1052-1055, 2003.