

データ送信量解析を用いたアドホックネットワークの 動作推定手法の提案

福岡 宏一¹ 山本 美幸¹ 横谷 哲也² 齋藤 正史³ 寺島 美昭¹

概要：本稿では，自動車の自動制御運転（自動運転）で用いられる無線アドホックネットワークを対象に，外部から観測できる通信端末の送信量変化を比較解析することによって，通信経路に使用されている端末群と移動に伴って変化する通信経路の切替発生時刻を推定するアルゴリズムを提案する．無線アドホックネットワークでは，通信の安定度の低さや強固なセキュリティ，帯域幅の狭さによって，有線で使用される管理プロトコルやパケットキャプチャによるネットワーク監視が難しい．提案手法では，ネットワークに負荷を与えることなく外部から観測できる通信端末の送信量変化を用いた，ブラックボックスな動作監視を実現できる．また，ネットワークシミュレータを用いて提案手法の理論検証と精度評価も行う．

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

KOICHI FUKUOKA¹ MIYUKI YAMAMOTO¹ TETSUYA YOKOTANI² MASASHI SAITO³
YOSHIAKI TERASHIMA¹

1. はじめに

近年，自動車の自動制御運転（以下自動運転と呼称）のための情報交換を主な目的として，自動車への無線通信の導入が進んでいる．自動運転では，車車間や路車間での通信により，自動での加減速やステアリング操作を行うために必要な情報を交換する．この無線通信では，従来型の基地局を介した無線通信だけでなく，端末間で相互通信を行って情報交換するアドホックネットワークの利用が想定されている [1]．その際，機器故障による通信異常や，外部からの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，自動運転の安全性を脅かす．そのため，信頼性の高いネットワークのための，異常を検知するネットワーク監視技術は必要不可欠である．しかし，無線ネットワークは送信電波の不安定さや，強固なセキュリティにより，有線通信に用いられるパケットキャプチャによる動作検出が難しい．また，無線通信の帯域幅

の狭いネットワーク特性により，ネットワークに負荷のかかる管理プロトコルを用いることも難しい．

これらを考慮し，本研究では，自動車や路側に設置されている通信端末の送信量変化を比較解析することにより，ネットワーク動作を推定して監視する．監視構成のイメージを図1に示す．これを用いて，本稿では攻撃検知の前段階として，移動に伴ってネットワーク状況が変化する自動車のネットワークを対象とした，変化に追従した推定ア

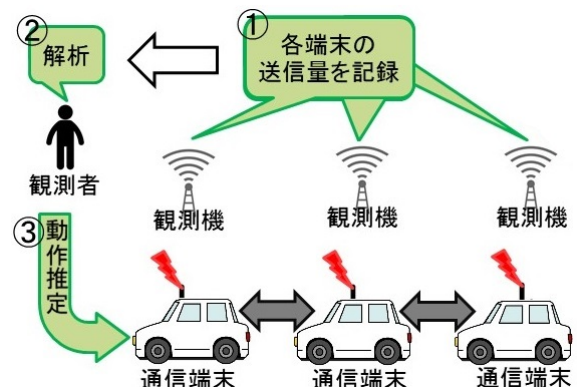


図1 ネットワーク監視構成

¹ 創価大学大学院 工学研究科

² 金沢工業大学 工学部

³ 金沢工業大学 情報フロンティア学部

ルゴリズムの提案を行う。本稿で扱う監視項目は、ネットワークで使用されている通信経路の端末の抽出と、移動に伴って変化する経路の切替時刻の検出の2項目である。また、本稿ではネットワークシミュレータを用いた推定アルゴリズムの理論検証と精度評価も行う。

以降、2章では本稿の課題を述べる。3章では推定アルゴリズムの提案を行い、4章ではネットワークシミュレータを用いて推定アルゴリズムの理論検証を行う。最後に、5章で全体のまとめとする。

2. 課題

本稿では、自動車のネットワークを対象に、データ送信量解析を用いて動作推定を行い、ネットワーク監視を実現する。自動車に用いられるネットワーク構成は、道路状況によって多数考えられる。その中でも本稿では、自動車の道路状況に即したトポロジーとして、自動車車両が道路上に2台のみ存在する、表1の3つの状況を模して設計したトポロジーを使用することとした。トポロジーの詳細については、4章の実験章で詳述する。

自動車のネットワークでは、複数の端末が移動をしながら通信を行うため、通信経路や端末配置等ネットワーク状況が盛んに変化する。この変化に追従し、リアルタイムで動作推定を行うことは難しい。本稿では、この移動に追従した動作推定手法の実現を課題とし、これに即した推定アルゴリズムの提案を行う。

表 1 トポロジー状況

車両間関係	道路状況
2 車両が並走	2 車線平行
2 車両がすれ違い	2 車線平行
2 車両が交差	1 車線同士の交差点

3. 推定アルゴリズムの提案

3.1 推定アルゴリズム概要

本稿では、複数の移動端末が存在する自動車のアドホックネットワークを対象とし、移動に追従した経路推定を実現するための推定アルゴリズムを提案する。推定アルゴリズムは、本研究で用いる監視構成によって得られた通信端末の送信量変化のみを用いる。

経路推定の手順を示す。初めに、通信経路に関与する全ての端末群を抽出する。以降、この推定を通信経路端末集合推定と呼称する。その後、移動に伴った経路情報の変化に対応するため、抽出した端末群の経路の切替時刻を推定する。以降、この推定を通信経路切替時刻推定と呼称する。これにより、移動に追従した経路端末群の抽出が可能である。

以降、通信経路端末集合推定と通信経路切替時刻推定の

2項目の推定アルゴリズムの詳細を示す。

3.2 通信経路端末集合推定

本項では、アルゴリズムの前提となる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ネットワークの通信経路に関与する端末集合を抽出する推定アルゴリズムについて述べる。

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、端末間同士で中継して通信を行う特性上、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。そのため、図2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。この変化傾向がデータパケットの送信元と一致する場合、その端末はデータパケット中継を行っている端末であると考えられる。提案手法ではこの傾向に着目し、送信元とそれぞれの端末の変化傾向の一致度を比較するため、送信元と各端末の送信スループット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し、通信経路端末集合に加える。この時、宛先端末は経路集合には加えない。

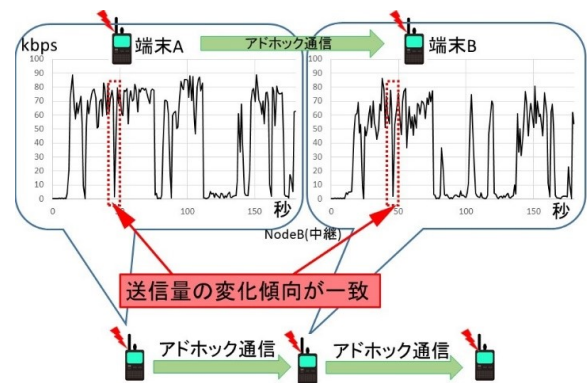


図 2 隣接端末間における送信傾向の一致

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、移動に伴った通信の不安定化や、複数端末から送信されたデータパケットが同一経路上で重なり合うことにより、データパケットの送信元との相関関係が希薄になるためである。この場合、図3に示すように、データパケットの中継経路上の端末は、非中継端末と比較してスループットの振れ幅が大きく、安定度が低い。この傾向に着目し、スループットの安定度の低い端末を抽出するため、全ての端末の送信スループットの標準偏差を計測する。標準偏差が閾値以上であった場合、その端末も通信経路端末であると判断し、通信経路端末集合に加える。

上記の相関係数と標準偏差を併用したアルゴリズムにより、自動車のネットワークにおいても通信経路端末集合を得られる。図4に通信経路推定のアルゴリズムを示す。相関係数を計測し、該当端末を経路集合に加える。その後、

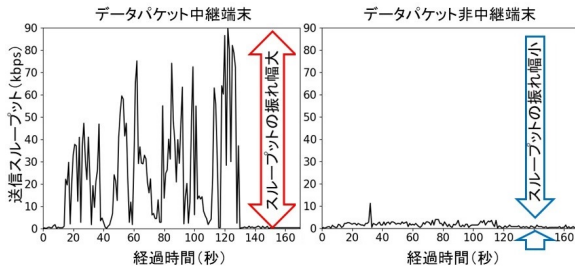


図 3 データパケット中継端末と非中継端末のスループット増減の差
相関係数のみでは推定できなかった端末を端末群に加えるため、標準偏差が閾値以上の端末を経路端末集合に加える。それぞれの閾値は、対象ネットワーク毎に変化する。

```

入力:1 秒毎の送信量合計 (TNt)
出力:通信経路端末集合 A

N=Node 番号
S=発信元 Node 番号
x=simtime(秒)
A=端末集合

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

```

図 4 通信経路端末集合推定アルゴリズム

3.3 通信経路切替時刻推定

本項では、通信経路の変化に追従した経路推定を実現するための、経路変化が発生した時刻を推定するアルゴリズムについて述べる。

通信経路端末集合推定では、通信経路に関与する端末を全て抽出するため、経路が変化した場合にそれに追従した経路端末集合を得ることが出来ない。この点に対応するため、経路切替時間を算出し、移動に追従して経路端末集合を変化させるアルゴリズムを提案する。

前述の通り、データパケットの中継経路上の端末は、非中継端末と比較してスループットの安定度が低くなる。そのため、経路上から外れ、データパケット中継を終了した端末は、終了後の送信スループットの安定度が高くなる。この傾向を利用し、提案アルゴリズムでは送信スループットの時間毎に区切った標準偏差を計測する。以降、時分割標準偏差と呼称する。時分割標準偏差を計測した際、図 5

のように通信経路に関与している間は、送信スループットの安定度が低いため、標準偏差が高い値を示す。しかし、通信経路から外れた場合には、送信スループットの安定度が高くなるため、一転して標準偏差が低い値を示す。提案アルゴリズムでは、時分割標準偏差を記録し、通信経路端末集合に含まれている端末の標準偏差が閾値を下回った場合、その一つ前の区間で端末が経路から除外されたと判断し、経路端末集合から除外する。

図 6 にアルゴリズムを示す。このアルゴリズムでは、最初に 30 秒毎に時分割標準偏差を計測し、経路切替時刻を抽出する。その後、切替が検知された該当区間で 5 秒毎の分割で再抽出を行い、より精度の高い切替時刻と端末集合の推定を行う。

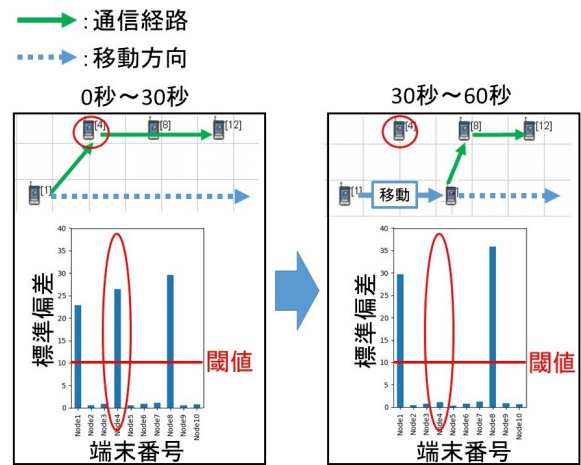


図 5 時間経過による通信経路と標準偏差の変化

```

入力:1 秒毎の送信量合計 (TNt)
出力:NodeN の通信経路除外時刻

```

```

N=Node 番号
S=発信元 Node 番号
x=t+30
t,t'(t,t' は時間カウント用変数)
i,j (i,j はカウント用変数)

for(N=1;N<=最大 Node 数;N++){
  i=0,j=0
  for(t=0;x<=最大 simtime;t+30){
    SNi =  $\sqrt{\frac{1}{30} \sum_{k=t}^x (T_{Nk} - \bar{T}_N)^2}$ 
    if(N==通信経路端末&&SNi<X){ (X は閾値)
      for(t'=t-30;t'<=t+5;t'+5){
        SNj =  $\sqrt{\frac{1}{5} \sum_{l=t'}^{t'+5} (T_{Nl} - \bar{T}_N)^2}$ 
        if(SNj<Y) (Y は閾値)
          t'-5 秒から t' 秒の間に NodeN は通信経路から除外された
        j++
      }
    }
    i++
  }
}

```

図 6 通信経路切替時刻推定アルゴリズム

4. 検証実験

4.1 実験手順

実験では、自動車環境を見据えたトポロジーとして、表1のトポロジー状況を元に設計した、図7に示す4つのトポロジーを用いた。トポロジー1とトポロジー2は片側2車線道路で自動車が進む様子模したトポロジーである。トポロジー1では2車両の速度が同速であり、トポロジー2では2車両の速度に速度差がある。トポロジー3は片側1車線の道路で自動車が進む様子模したトポロジーである。トポロジー4は自動車が進む交差点で交差する様子模したトポロジーである。

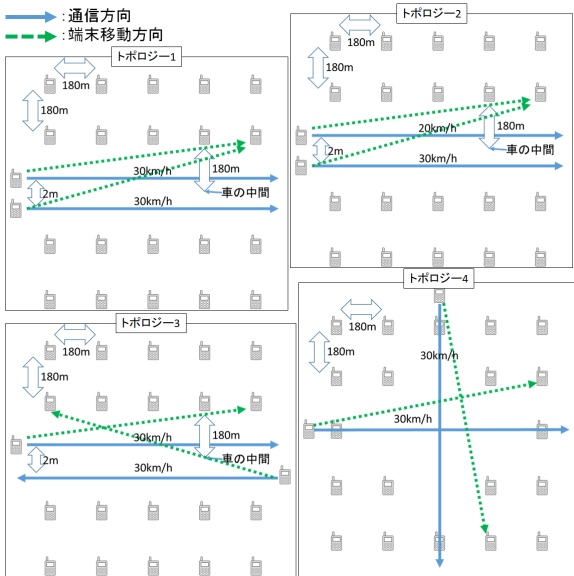


図7 実験に用いたトポロジー

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[2] を実験環境として用いた。その際、シミュレータ上に観測機を配置するのではなく、生成された送信端末の送信パケットのデータを直接解析することによって提案手法の検証を行った。そのため、今回の実験では電波の観測劣化は発生しない。

表2 シミュレーション設定

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

今回の実験では、表2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、リアクティブ型の代表的なプロトコルである Ad hoc On-Demand Distance Vector(以下 AODV)[3]、プロアクティブ型の代表的なプロトコルであ

る Optimized Link State Routing INRIA(以下 OLSR)[3] をそれぞれ用いた。

本稿では、図7のトポロジー1の実験結果について示す。トポロジー1は、格子状に配置された端末の中心部分を等速に移動する2つの端末が通り抜けるトポロジーである。端末間の距離は180mで、この距離は縦横方向には1ホップで通信が可能で、斜め方向には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。移動する2端末が約30km/hで等速移動しながら、宛先端末に向けてそれぞれ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。今回の実験では、標準偏差の閾値は10、相関係数の閾値は0.6をそれぞれ用いた。

4.2 実験結果1 通信経路端末集合推定

はじめに、通信経路端末集合推定の実験結果を示す。本稿では、AODVでの実験結果を取り上げる。

提案アルゴリズムに従い、初めに送信元と各端末の送信スループットの相関係数を計測し、送信元と変化傾向が一致する端末を探す。図8は、送信元と各端末の送信スループットの相関係数のグラフである。2つの送信元端末である端末1、端末2のどちらを基準にして相関係数を計測しても、閾値を上回る端末は送信元端末と宛先端末のみになっている。宛先端末は通信経路端末集合には加えないため、送信元端末のみが集合に加わる。

次に、相関係数では推定できなかった端末を通信経路端末集合に加えるため、各端末の送信スループットの安定度

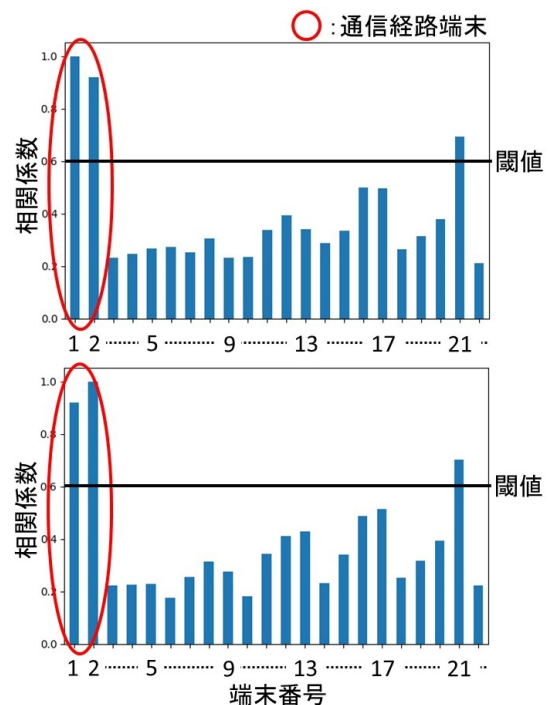


図8 送信元に対する各端末の送信スループットの相関係数

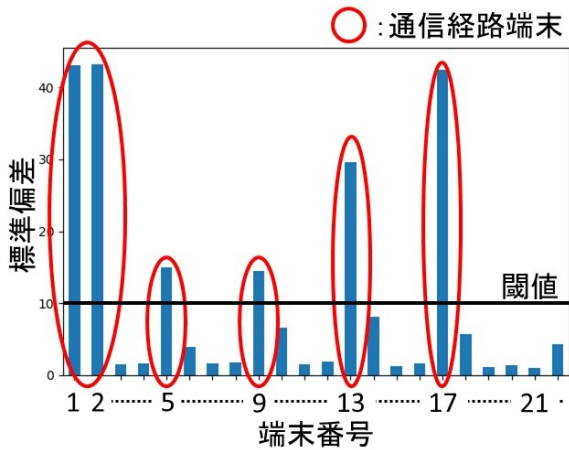


図 9 送信スループットの安定度計測のための標準偏差

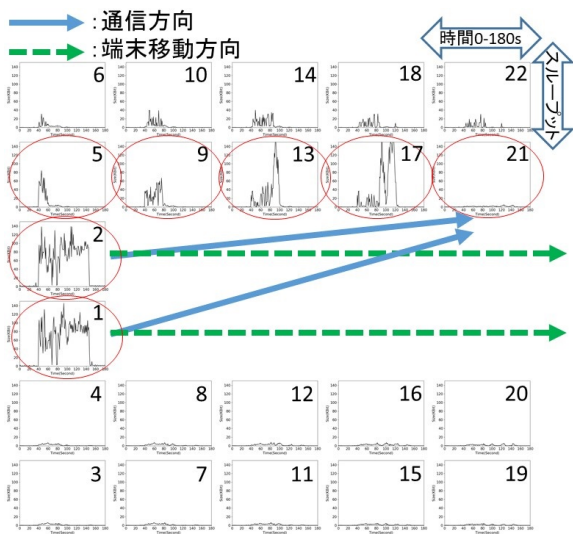


図 10 トポロジー順に配置した送信スループットグラフ

を計測する。図 9 は、安定度計測のための、各端末の送信スループットの標準偏差をグラフにしたものである。標準偏差が閾値を上回った端末は、スループットの安定度が低く、経路上の端末に該当する。相関係数の結果と合わせて、端末 1・端末 2・端末 5・端末 9・端末 13・端末 17 の 6 端末が経路端末集合に所属する端末群となる。

これらの該当端末を、送信スループットの時間変化グラフを端末配置順に並べた図 10 と比較すると、集合に属する端末が、波形が活発に発生している通信経路の端末の位置と一致している。これにより、提案アルゴリズムを用いることで、通信に関与している通信経路端末集合の抽出が可能であることを確認できた。この推定では、100 ケース試行し、5 ケース程検知漏れが発生している。

4.3 実験結果 2 通信経路切替時刻推定

次に、通信経路切替時刻推定の実験結果を示す。こちらも AODV の実験結果を取り上げる。

実験トポロジーでは経路の切り替えが 4 回発生するが、一例として最初の経路切替だけを示す。最初に経路から除

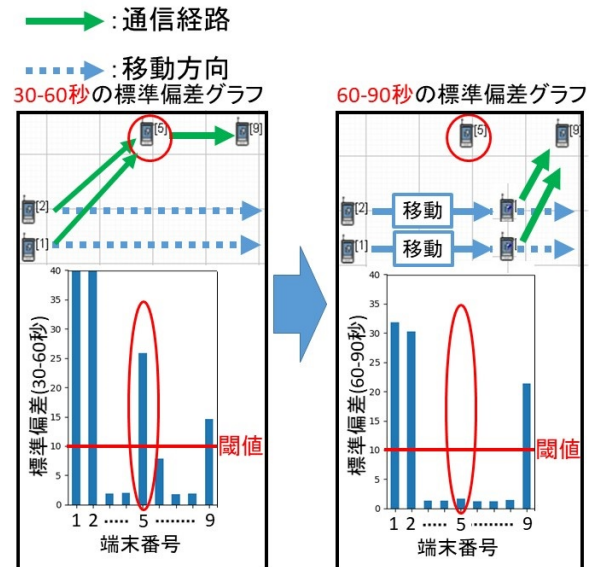


図 11 時間分割の標準偏差による切替時刻推定

外される端末 5 は、通信開始から通信経路に使用され、約 58 秒から 59 秒の間に経路から外れる。

図 11 は、30 秒毎に時分割標準偏差を記録し、経路切替が発生した際のグラフの変化を比較した物である。提案アルゴリズムより、時分割標準偏差が閾値を下回った場合、その端末は閾値を下回った区間の一つ前の区間で経路から除外されたと判断する。経路切替によって経路から除外された結果が、実際に除外された時間の次の区分である 60 秒から 90 秒の標準偏差に反映され、閾値を下回っている。これにより、30 秒から 60 秒の間に経路切替が発生していることが特定できる。

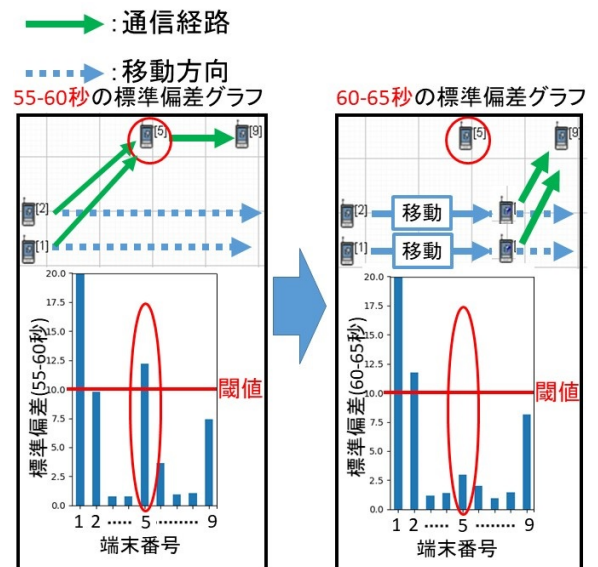


図 12 時間分割の標準偏差による切替時刻推定

次に、30 秒から 60 秒の間において、標準偏差の分割間隔を 5 秒毎に変更し、同様の手順で実験を行った結果が図 12 となる。経路切替によって経路から除外された結果が、

実際に除外された時間の次の区分である 60 秒から 65 秒の標準偏差に反映され、閾値を下回っている。これにより、55 秒から 60 秒の間に経路切替が発生していることが特定できる。これは、最初に経路切替が発生する時間の約 58 秒から 59 秒の間と一致しており、提案アルゴリズムによって、経路切替時刻の特定と移動に伴った経路端末集合の抽出が可能であることが確認できた。

他端末も同様に、経路から除外された情報の検知が可能であった。しかし、検知漏れも発生しており、全ての切り替えを漏れなく検出できる割合は、100 ケース試行して 5 割程度である。また、2 端末の速度が同一の場合と比べて、2 端末の速度が異なる場合は検知精度がさらに低下する。

4.4 実験結果まとめ

以上の検証実験により、自動運転を模したネットワークに対して提案手法を適用し、移動に追従した動作推定が可能であることが検証できた。通信経路端末集合推定は 9 割以上検知に成功しているため、現状の精度でも十分な精度を確保できていると考えている。しかし、通信経路切替時刻推定は 5 割程度の検知精度にとどまっていて、十分な精度とは言い難い。ただし、発生する切替 4 回の全ての検知に失敗するケースはなかったため、アルゴリズムの改良は必要なものの、小改良で精度の改善は見込めると考えている。また、今回用いた 2 つの推定項目では、トポロジーによって最適の閾値が異なる。そのため、既存アルゴリズムはトポロジーへの依存度が高い。実際の自動運転ネットワークでは、より多くの通信端末が存在し、それに伴ってトポロジーも大きく異なると考えられるため、機械学習による閾値の自己判断を用いる等、トポロジー依存度の低下にも取り組む必要がある。

5. おわりに

本稿では、自動車のネットワークを対象として、データ送信量解析を用いた、移動に追従したネットワーク動作推定アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムでは、使用されている通信経路の端末の抽出と、移動に伴った経路変化の発生時刻の検出の 2 項目を扱った。また、提案アルゴリズムをネットワークシミュレータ QualNet を用いて、自動車のネットワークを模したトポロジーで実験を行い、提案アルゴリズムの有効性を検証した。検証によって、検知精度に不十分な面があることや、トポロジーへの依存度が高い点が課題として見つかったため、これらを考慮してアルゴリズムの改良に取り組む。また、今回は自動車が道路上に 2 台存在するケースに限定して検証を行った。実用化のためには、より多くの自動車が道路上に存在するケースや、並走道路や交差点以外の道路構造を模したトポロジーでの精度検証実験に取り組む必要がある。これによって出た問題点を改良し、より高精度でより幅広いトポロジーに

対応したアルゴリズムの開発に取り組む。

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 (<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.