

複数ドローンによる運用計画変更のための送信量解析を用いた事前故障検知方式の検討

加藤 亜慧¹ 中濱 広夢¹ 寺島 美昭¹

概要：本稿では、被災地に展開された複数の無人航空機「ドローン」のような自律移動型センサ端末間の無線アドホックネットワークを対象に、データ送信量を解析することで、通信減衰のある故障センサ端末の検知アルゴリズムを提案する。通信が完全に途絶する前に故障を検知することにより、周囲の端末が迅速に運用計画変更を行えるため、事前の故障検知は重要である。しかし、無線アドホックネットワークでは、通信が不安定で有線環境のようなパケットキャプチャによるデータの通信量やその変化の解析が難しい。そこで提案方式では、外部から観測できる通信端末のデータ送信量変化を用いたブラックボックスな事前故障検知を検討した。また、ネットワークシミュレータを使用した提案方式の有用性の評価も行う。

A Study of Predictive Failure Detection Method Using Transmission Rate Analysis for Changing Operation Planning of Multiple Drones

ASATO KATO¹ HIROMU NAKAHAMA¹ YOSHIAKI TERASHIMA¹

1. はじめに

近年、被災地における継続的な環境観測に無線通信端末を搭載した複数の自律移動可能なセンサを広域に展開するセンサネットワークシステムが注目されている [1]。その代表例として無人航空機「ドローン」の活用が挙げられる。そのようなセンサを用いた環境観測では故障端末の発生に対して周囲の端末が自律移動することにより柔軟な運用計画の変更ができる [2]。このため、故障検知に必要な情報の交換は、一般的な基地局を介した無線通信だけでなく、センサ端末間で相互通信を行い情報共有するアドホックネットワークの利用が考えられている [3]。その際、従来の故障検知では通信が完全に途絶するまで障害のある端末と通信を続け、その後障害に対して対応を行う。よって、より迅速な運用計画の変更には、将来通信が不可能となる端末の事前故障予測技術が不可欠である。しかし、無線アドホックネットワークであること、端末が常に移動することから通信が不安定であるため有線環境のようなパケットキャプチャによるデータの通信量やその変化の解析が難しい [4]。このこ

とから、本研究では、センサに搭載された通信端末のデータ送信量を解析することで、通信減衰が発生し、将来途絶するセンサ端末の故障予測方式の検討を行っている。監視システム構成を図 1 に示す。

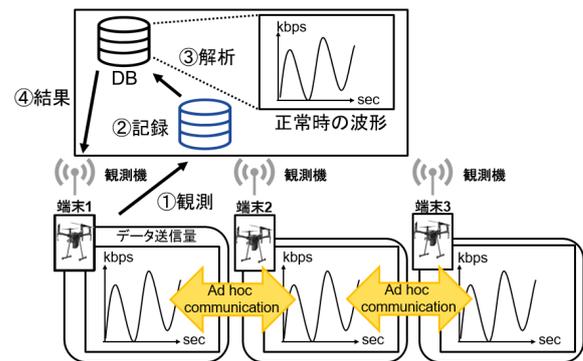


図 1 監視システム構成

これを用いて、移動に伴ってネットワーク状況が変化するセンサ端末のネットワークを対象とした、故障予測による迅速な運用計画変更実現を狙う。本稿では、その実現のために故障検知方式とそれに伴う2種類のアルゴリズムを提案する。それぞれのアルゴリズムで扱う解析項目は、事前

¹ 創価大学大学院 工学研究科 情報システム工学専攻
Graduate School of Engineering, Soka University

収集した正常時の値に基づいた値(基準値)に対する観測データの変化量と観測したデータ送信量の時間変化量である。この2項目を解析することで、通信減衰端末の検知を行う。また、本稿ではネットワークシミュレータを使用した提案手法の有用性の評価も行う。以降、2章では本稿の課題を述べる。3章では提案アルゴリズムの詳細、4章ではネットワークシミュレータを用いた実験内容と提案アルゴリズムの有用性の検証結果を述べる。最後に、5章で全体のまとめとする。

2. 課題

本稿では、自律移動型センサ端末間で用いられる無線アドホックネットワークを対象に、データ送信量解析を用いてセンサ端末の事前故障検知を実現する。センサネットワークシステムに用いられるネットワーク構成は、状況によって多数考えられる。その中でも本稿では、図2に示すようにグリッド型の観測領域を均等分割し、センサ端末を配置して、端末自身が担当領域を周回しながら領域内の他の端末と無線アドホック通信を行うモデルを使用することとした。トポロジーの詳細については、4章の実験章に記述する。使用するネットワークモデルでは、複数の端末が移動をしながら通信を行うため、非常に不安定である。この不安定さに追従して、故障検知を行うため基準値(事前収集した正常時のデータ送信量を用いる)との相対的な観測データ送信量解析と観測データ送信量を不安定さの影響を受けにくく処理した状態での解析を検討した。本稿では、故障検知方式の実現を課題とし、これに即した2種類の故障検知アルゴリズムの提案を行う。

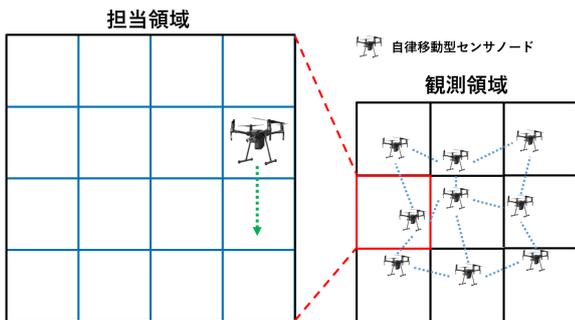


図2 ネットワークモデル

3. 故障検知アルゴリズムの提案

3.1 故障検知アルゴリズムの概要

本稿では、複数の自律移動型センサ端末間のアドホックネットワークを対象とし、通信が減衰し将来途絶するセンサの事前検知を実現するための2種類の故障検知アルゴリズムを提案する。故障検知アルゴリズムは、本研究で用いる監視システム構成によって得られた観測時と正常時の通信端末のデータ送信量を用いる。

故障端末検知の手順を示す。まず第1のアルゴリズムは、通信経路上の全端末の正常時の値を元としたデータ送信量の基準値を作成する。その基準値に対して複数秒連続で一定の送信量未滿となった端末を通信減衰端末として抽出する。以後、この検知を相対減衰端末検知と呼称する。この抽出によって単位時間当たりの正常な送信量と相違のある端末を検知することができる。次に第2のアルゴリズムは、最新の観測データ送信量とそこから一定秒さかのぼった観測データ送信量の内その中央値を逐次計算し、減衰傾向がみられる端末を抽出する。以後、この検知を中央観測値減衰端末検知と呼称する。この2つのアルゴリズムそれぞれを用いて通信が途絶する故障センサ端末の事前検知を実現する。検知のフローを図4に示す。

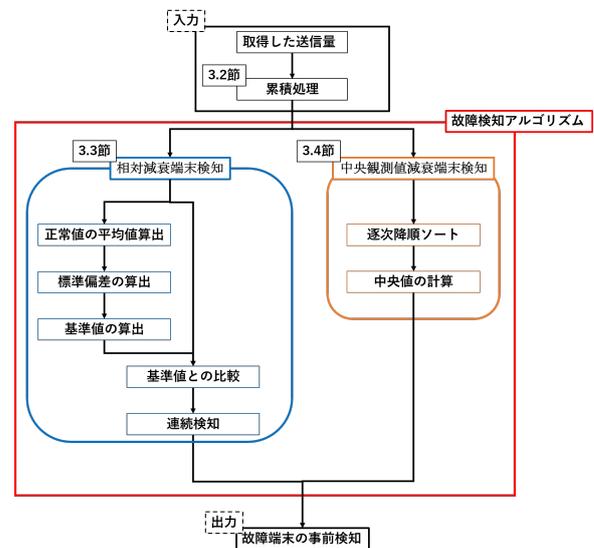


図3 故障検知フロー

3.2 観測データの前処理

提案アルゴリズムによる解析の前処理として、取得したデータ送信量を1秒毎の値に累積処理する。これにより、単位時間当たりの通信品質の劣化が顕著となる[4]。図4にアルゴリズムを示す。POINT1で単位時間当たりのデータ送信量の累積処理を行っている。

入力:取得送信量(GtN)

出力:1秒ごとの累積送信量(CtN)

N =Node 番号

t =時間(秒)

MAXTime=シミュレーション時間

```
for(N=1; N<=端末数; N++){
  for(t=0; t<= MAXTime; t++){
     $CtN = \sum_{n=t-1}^t GtN$ 
  }
}
```

POINT1:累積送信量の算出

図4 累積処理

3.3 相対減衰端末検知

本稿では、アドホックネットワークにおいてその経路上に送信量減衰端末が存在する場合の通信挙動を説明する。そして、挙動から開発したデータ送信量の正常値(事前収集した正常時の値)を用いた基準値との比較による相対的な減衰端末抽出のための検知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、端末間の中継により送信元から宛先まで通信が行われる。そのため、図5に示すように中継端末の中に故障端末が発生し、通信能力が低下・送信量が減衰した場合故障端末と宛先端末を中継する端末のデータ送信量は減衰する。結果、単方向通信では故障端末と中継端末の判別が困難である。

一方、双方向通信では故障端末と中継端末の波形に顕著な違いがみられ、故障端末不在の正常な送信量との相違も併せ持つ。正常時のデータ送信量を利用した基準値を用いることでアドホックネットワークの不安定さを故障と誤検知するリスクが軽減できると考える。

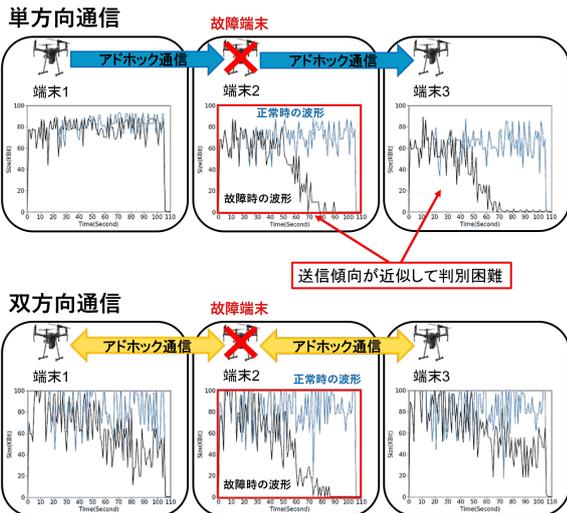


図5 単方向/双方向通信における波形の傾向

提案手法ではこの点に注目し、データ送信量の異常を検知するため、基準値として正常値の平均-2標準偏差の値を計算し、観測値の差を計測する。その差が閾値未満である場合故障の可能性がある。しかし、アドホックネットワークの特性上通信品質が不安定であることから複数回連続で検知した時、相対減衰端末と判断する。よって、連続検知回数にも閾値を規定する。

図6に本アルゴリズムを示す。Point1は正常値の平均値、標準偏差と基準値の計算を行う。単位時間ごとの計算を行っているため正常値の平均-2標準偏差の値は時刻々々変化する。Point2は単位時間ごとの観測値と基準値の差分を計算し、データ送信量の閾値を超えているか判定する。1度でも下回った場合は検知回数を初期化して初めからやり直す。POINT3では、検知回数を計測し、閾値以上検知した場合相対減衰端末として検知する。以上のアルゴリズムによ

り基準値に対して送信量が相対的に減衰している端末を抽出できる。

入力:観測時の1秒ごとの累積送信量(CtN)
出力:相対減衰端末A

N=Node番号
t=時間(秒)
MAXTime=シミュレーション時間
S=シミュレーション回数
aCtN=正常時の1秒ごとの累積送信量
B=検知回数

```

for(t=1; t<= MAXTime; t++){
  for(N=1; N<=端末数; N++){
    ACtN= $\frac{1}{S}\sum_{k=1}^S aCtN$  (ACtNは正常時の1秒ごとの平均累積送信量)
    AStN= $\sqrt{\frac{1}{S}\sum_{k=1}^S (aCtN - ACtN)^2}$  (AStNはACtNの標準偏差)
    RCtN=ACtN-2CtN (RCtNは基準値) POINT1:基準値の作成

    if(CtN-RCtN<X){ (Xは閾値)
      検知回数Bに1を追加 POINT2:観測値との差分検知

      if(B=Y){ (Yは閾値)
        NodeNは相対減衰端末
        Aに追加
      }
      POINT3:連続Y秒間検知した端末抽出
    }

    else{
      検知回数Bを初期化
    }
  }
}

```

図6 相対減衰端末検知アルゴリズム

3.4 中央観測値減衰端末検知

本項では、相対減衰端末検知とは対照的に基準値を用いず、観測時のデータ送信量に一定の減衰傾向がみられる端末を抽出する検知アルゴリズムについて述べる。図4に示した通り、故障端末とその影響を受けている正常端末では送信量の減衰に一定の相関がある。しかし、互いのデータの相関係数を比較する場合違いが出るまでに時間がかかる。また、平均値を用いる場合、常に端末同士の移動を伴うアドホックネットワークの特性上通信が不安定であり、単位時間当たりのスループットの差が激しく、故障端末と正常端末の差はあるものの顕著になるまでに時間を要する。

この傾向を利用して、提案アルゴリズムでは最新の観測値とそこから一定時間までさかのぼった観測値の中央値を逐次算出することによって故障端末を検知する。中央値は対象とするネットワークのように値の差が激しい場合であってもその影響を受けにくいという特徴がある。そのため故障端末と正常端末の傾向の違いを掴みやすい。一定時間間隔ごとの中央値であることから1度の検知で判断を行う。

図7に本アルゴリズムを示す。POINT1である時刻とそこからPi-1秒遡った観測値の合計Pi個の観測値を逐次降

順に並び替えている。POINT2 では並び替えた P_i 個の観測値の中央値を計算し、閾値を下回った場合中央観測値減衰端末として検知する。以上のアルゴリズムにより故障端末を抽出を行う。

入力:観測時の1秒ごとの累積送信量(CtN)
出力:故障傾向端末 C

N=Node 番号
t=時間(秒)
MAXTime=シミュレーション時間
Pi=時間間隔
Median[t]=Pi 秒毎の中央値
i,j,k,l(カウント用変数)

```

for(N=1; N<=端末数; N++){
  for(t=1; t<= MAXTime; t++){
    for(i=0; i < Pi - 1; i++){
      for(j=t-pi; j≦t; j++){
        data[j]=CtN
      }
    }
    for(i = 0; i < Pi - 1; i++) {
      j = i;
      for (k = i; k < n; k++) {
        if (data[k] < data[j]);
        j = k;
      }
      if (i < j) {
        l = data[i];
        data[i] = data[j];
        data[j] = l;
      }
    }
  }
}

```

POINT1:Pi秒間隔での逐次降順ソート

```

Median[t] = (data[(Pi/2)-1] + data[Pi/2])/2;
if(Median<Z){ (Zは閾値)
  故障傾向端末 C に追加
}

```

POINT2:中央値の計算と閾値未満の端末抽出

図 7 中央観測値減衰端末検知アルゴリズム

4. 検証実験

4.1 実験手順

実験では、複数の自律移動型センサ端末による観測環境として図 8 のトポロジーを設計した。パラメータは表 1 に示す通りである。それぞれの端末は担当する範囲内を移動ルートに従って巡回する。そして巡回しながら端末 1 と端末 9 が end-to-end で通信を行う。

それぞれの端末の初期配置は同一である。端末間距離である 180m は 1 ホップで通信が行える限界値として予備実験で導き出した値である。故障端末は隣接する端末との誤検知率を確認するため端末 7 とした。

表 1 パラメータ

項目	設定値
端末間距離	180m
移動速度	10m/s
端末数	9 台
故障端末	端末 7
隣接正常端末	端末 4,8

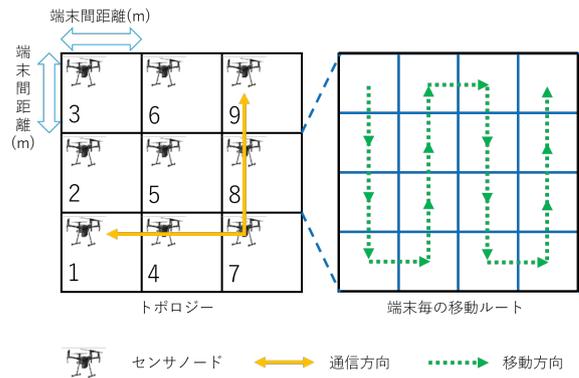


図 8 実験に用いたトポロジー

実験環境はネットワークシミュレータ QualNet[5]を使用した。シミュレーションでは観測機を設置せず、各端末から送信されたパケットを直接解析し検知を行っている。シミュレーション設定は表 2 に示す設定の通りである。

表 2 シミュレーション設定

Simulator	QualNet7.4
Simulation Time	105s
Number of trials	100seed
Radio Type	802.11b
Data Rate	2Mbps
Frewuency Band	2.4GHz
Application	Constant Bit Rate

ルーティングプロトコルの仕様は、MANET(Mobile Ad hoc NETwork)における代表的なプロアクティブ型のプロトコルである Optimized Link State Routing INRIA(以下 OLSR)を用いた。各種パラメータのチューニングは行っていない。送信元は 0.1 秒毎に 1024byte のパケットを送信している。

今回の実験では、相対減衰端末検知アルゴリズムにおける POINT2 の閾値を -3, POINT3 の閾値を 3 と置いた。中央観測値減衰端末検知アルゴリズムにおける POINT1 の閾値は 10, POINT2 の閾値を 35 と置いている。

シミュレーションにおける故障モデルは、端末 7 をシミュレーション開始後 15 秒から等速で垂直に打ち上げることで模擬している。2 秒間送信量が 1Kbyte 未満となった場合通信途絶と判断し、平均途絶時間は 75.62 秒である。この値との差がどの程度事前に故障を検知できるかの尺度となる。

4.2 実験結果 1 相対減衰端末検知

相対減衰端末検知の実験結果を示す。実験において端末毎のデータ送信量は図 9 のようになっている。電波伝搬が分かりやすいよう実際のトポロジーに即した配置となっている。縦軸が送信量 (KByte)、横軸が時間 (秒) である。

この結果に従い端末毎、単位時間毎に 100 ケースの平均値と標準偏差を計算し、基準値を生成する。基準値は毎秒ごとに変化する。そして観測値と基準値の差分をとり、相対的

にデータ送信量が減衰している端末を検知する. 図 10 は故障端末と隣接する正常端末における単位時間ごとの差分を表すグラフである.

端末 7 は時間がたつにつれ負の値が大きくなっている. しかし, 端末 4,7 も負の値をとる場合があるため連続して閾値を下回った端末を相対減衰端末として検知した. 差分の値はその絶対値が大きいほど他の端末の誤検知を防ぎ, 検知時間が伸びる. 同様に連続検知回数はその値が大きいほど他の端末の誤検知を防ぎ, 検知時間が伸びる関係にある.

実験では故障端末である端末 7 を 100 ケースを平均して 63.97 秒で検知し, 検知漏れはなかった. その他に隣接端末である端末 4,7 をそれぞれ 34 ケース,42 ケース誤検知した.

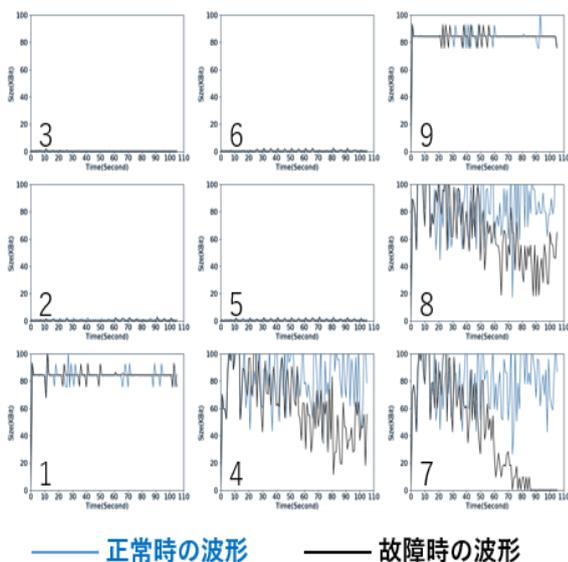


図 9 端末毎のデータ送信量

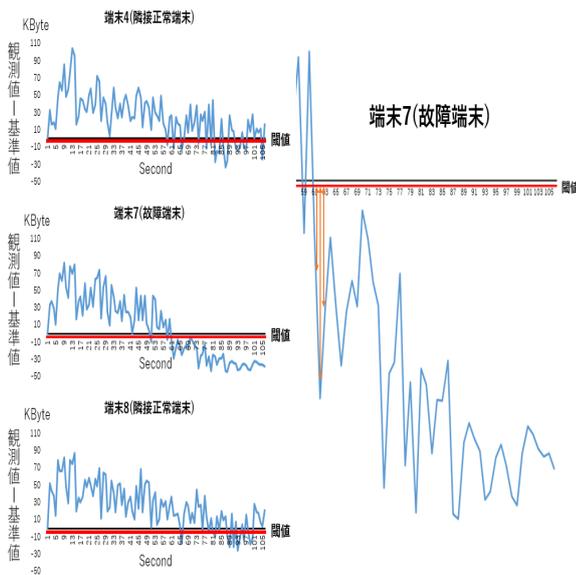


図 10 観測値と基準値の差

4.3 実験結果 2 中央観測値減衰端末検知

中央観測値減衰端末検知の実験結果を示す. 最新の観測値と過去 9 秒間の観測値を合わせた 10 秒間の中央値を 1 秒経過ごとに計算する. そして, その値が 35Kbyte 未満となった場合故障端末と判断する. 図 11 は端末 4,7,8 の中央値を表したグラフである.

グラフに示すように元の観測値グラフに比べ, 値の上下が緩やかになっており, 端末 7 が段階的に減衰していることが見て取れる. 実験では, 実験結果 1 と同様に端末 7 を 100 ケース中全てのケースで検知することができた. 平均検知時間は 64.74 秒である. 端末 4,7 はそれぞれ 4 ケース,8 ケース誤検知した. 観測値データをそのまま 35Kbyte 未満の閾値で解析した場合 100 ケース全てを誤検知した. その検知時間も減衰の影響が表れる前のケースがあり, 対照的な結果である.

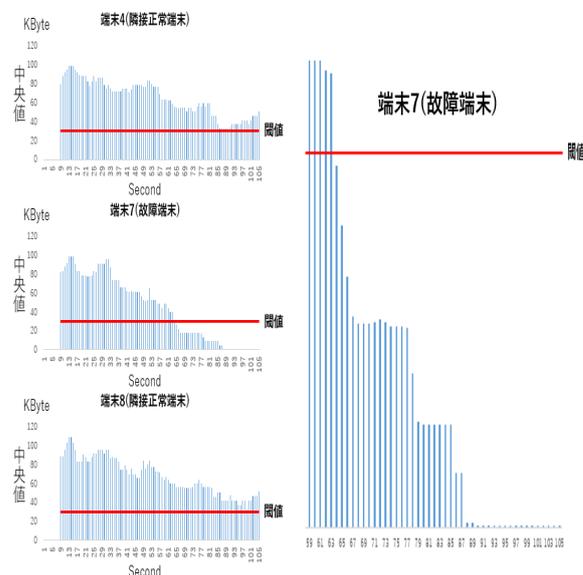


図 11 観測値の中央値

4.4 考察

以上の検証実験により, 複数の自律移動型センサ端末の観測環境を模したネットワークにおいて通信を減衰させ, 平均 75.62 秒で通信途絶する故障モデルの場合, 相対減衰端末検知では平均 11.65 秒, 中央観測値減衰端末検知では平均 10.88 秒前に端末故障を検知可能であると検証できた.

一方で, 相対減衰端末検知は 4 割程度他端末を誤検知しており, 十分な精度とは言い難い. 中央観測値減衰端末検知は 1 割程度の誤検知と精度はある程度あるものの観測データのみを用いるため, トポロジーの変化が大きい場合, 影響をより強く受けると予想される. また, これらの値はネットワークのスケールと故障モデル, 解析時の閾値に依存する. そのため, 状況によって妥当な閾値は変化すると考える. よって閾値の決定にはさらなる検討が必要である.

5. まとめ

本稿では、自律移動型センサ端末間で用いられる無線アドホックネットワークを対象に、データ送信量解析を用いて故障により将来通信が途絶するセンサ端末の事前故障検知方式を提案した。提案方式におけるアルゴリズムの特徴は、基準値に対する相対的な観測データ減衰端末の検知と一定時間間隔における観測データの中央値減衰端末の検知である。また、ネットワークシミュレータ QualNet を用いて実験を行い、提案の有用性を検証した。本検証により相対減衰端末検知では平均 11.65 秒、中央観測値減衰端末検知では平均 10.88 秒故障の事前検知が可能なが判明した。この結果は、最終目標である故障予測への発展に有効であると考えられる。実験結果はアドホックネットワークのスケールと故障モデル、閾値に対する依存度が高いため、今後さらなる検証とアルゴリズムの改良に取り組む。

参考文献

- [1] Md. Hasan Tareque, Md. Shohrab Hossain, Mohammed Atiquzzaman “On the Routing in Flying Ad hoc Networks” (2015).
- [2] 石川久嗣, 横田裕介, 大久保英嗣, “自律飛行体による無線センサネットワークのための移動スケジューリング手法,” 信学技報 (知的環境とセンサネットワーク), Vol.114, pp.55-60 (2015).
- [3] 福岡宏一 他, “データ送信量解析を用いたアドホックネットワーク動作推定方式の評価”, 情報処理学会論文誌, 5W-03, 3-157.3-158 (2019).
- [4] 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).
- [5] QualNet Network Simulator Software (<https://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator-software>)