

データ送信量解析を用いた 農業 IoT センサネットワーク異常検出手法の提案

中濱広夢¹ 清原良三² 斎藤正史³ 寺島美昭¹

概要: 本稿では、広域な農地に複数のセンサ端末を配置して相互に水位や温度等の観測情報を交換する事により、迅速な広域状況の把握を行うセンサアドホックネットワークを対象に、外部から観測できるセンサ端末のデータ送信量の変化を比較解析することによって、異常箇所を早期かつ高精度に検出するセンサネットワーク異常検出手法を提案する。提案手法では、通常通信時のデータ送信量から動作傾向を解析し基準データを作成し、この基準値データと異常通信時のデータ送信量の差分誤差から異常箇所を検出する。無線センサネットワークでは、無線特有である通信の不安定性による外れ値や、通信の環境に応じた通信路の変化によって正確な異常箇所の判断が難しい。そのため、異常検出手法では、正常な箇所を異常と見なす誤検出の割合を計算し精度を確認し、この誤検出を低減することで高精度化する必要がある。提案手法の理論的な検証のために、ネットワークシミュレータ評価により、送信量解析による異常検出を行う実現性と検出精度についての考察を述べる。

Proposal of agricultural IoT sensor network anomaly detection method using data transmission amount analysis

HIROMU NAKAHAMA¹ RYOZO KIYOHARA² MASASHI SAITO³
YOSHIAKI TERASHIMA¹

1. はじめに

近年、農業従事者の高齢化や減少に伴って情報通信技術や自動化ロボットを用いたスマート農業の導入が進んでいる。農地に無線通信機能を搭載したセンサ端末を配置し、地形や温度等の変化に関する情報を交換するセンサアドホックネットワークの利用は、ネットワークを柔軟に構築可能なため、センサ間情報共有を用いた観測情報の相互補完により、高精度の観測と、迅速な広域状況の把握を継続的に実行できる[1]。システム構成のイメージを図1に示す。しかし、農地では、生産性の向上と高品質な栽培が求められるため、図2に示すようなネットワーク内の異常発生は、センサ間情報共有に悪影響を与え、生産効率の低下だけでなく、信頼性を下げることにつながりかねない。そのため信頼性を確保したセンサネットワーク運用では、センサ端末の動作状態の継続的な監視、通信が途絶する前の早期かつ正確な異常発生箇所の検出が重要となる。さらに異常発生箇所の検出には、動作傾向の把握と、適した検出方式が必要である。

農地における長期運用や広域な圃場のセンサネットワ

ークにおいて、農地に配置されたセンサ端末間の通信異常を正確に検出することは、安定した運用やセンサ端末保守の省力化に有効である。しかし、ここではプロトコルチューニングやタイムアウト時間などのパラメータ設定を調整することにより、農地の環境や規模に応じた接続性を実現しているため、個々のネットワーク仕様に応じた解析方法が必要となり、手法の汎用性が確保できない問題がある。

本稿では、農地に配置されたセンサ端末間の情報共有通信を継続的に行うセンサネットワークと異常検出の課題を分析し、ネットワーク内に配置されたセンサ端末の動作状態を継続的に監視することで、ネットワーク異常を通信途絶する前に検知するネットワーク異常検出手法を提案する。また、本稿では、ネットワークシミュレータを用いた異常検出手法の理論検証と精度評価も行う。2章では、本研究の目的について述べる。3章では、対象とする農地における異常検出の課題を述べ、4章では、異常検出手法を提案する。5章では、ネットワークシミュレータを用いてセンサ端末を配置したトポロジーで生成した各端末の観測データから異常検出の実験を行い、考察から実現性を検証する。最後に6章で全体のまとめとする。

¹ 創価大学大学院 理工学研究科

² 神奈川工科大学 情報学部

³ 金沢工業大学 情報フロンティア学部



図 1 農業 IoT センサネットワークのシステム構成

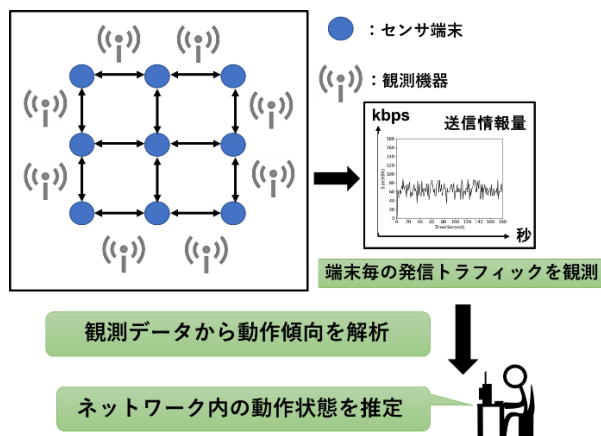


図 3 センサネットワーク監視構成

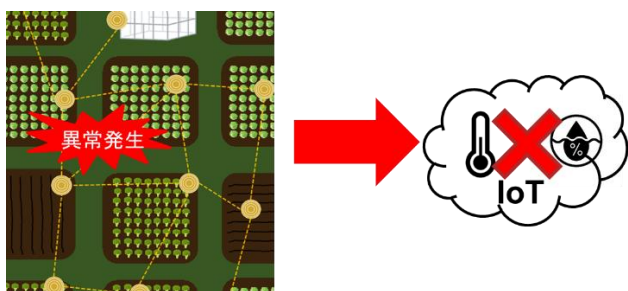


図 2 農業センサネットワーク内の異常発生

2. 研究目的

本研究では、長期運用かつ広域な農地において正確かつ早期に異常箇所を検出する方法の実現を目的とする。提案手法では、ネットワーク内の各センサ端末を外部から観測して、継続的に監視することで、データ送信量変化を解析し、異常箇所の範囲を検出するセンサネットワーク異常検出手法を提案する。また本提案手法によって、特定の範囲が検出されることで、管理者は広域な農地において、異常箇所付近の端末の交換や遮蔽物の除去を実施でき、農地で運用されるセンサネットワークの異常発生という悪影響を抑えることが可能となる。

3. 課題

図 3 は、継続的な監視のために、センサ端末毎の発信トラフィックを観測する機器を配置し、これらが記録する各端末の送信情報量、時間変化からセンサ端末の動作傾向の解析を行う監視構成のイメージである。監視項目としては、異常箇所の検出であり、長期的な運用において観測者が推定を行い、ネットワーク内の異常を判断する。本監視構成は、図に示すように、センサネットワーク内の各端末のデータ送信量を端末の近くに設置してある観測機器が取得し、その観測データから観測者が解析し、動作状態の推定から異常箇所を検出する構成である。

監視構成によって得られたセンサ端末のデータ送信量のみを用い、傾向解析することによって正常なセンサ端末の基準値を定め、その基準値のデータ送信量と異常通信時のデータ送信量を比較し、差分誤差を明確にすることでブラックボックス的に事前の異常検出を行う。その際、入力値として用いる端末毎に観測したデータ送信量は、送信量の変化が不明瞭であるため、区間毎の累積値を算出することで送信量変化による揺れを明瞭化する。

基準値のデータ送信量と異常通信時のデータ送信量の差分誤差から異常を検出するため、基準値データの作成を行う。通常通信時のデータ送信量から基準となる動作傾向を解析し、平均値-2 標準偏差から平均値+2 標準偏差の間に約 95% のデータが含まれるという統計上データを基にして基準値を式(1)によって作成した。

図 4 に示すように基準値データの作成では、正常なネットワークにおける通常通信時のデータ送信量を端末毎に平均値化し、各端末のデータ送信量の平均値を計算した。さらに観測時間を秒区間毎に区切り、データ送信量の標準偏差を計算し、各端末で基準となるデータを作成するための基準値を求めた。この基準値データと異常通信時のデータを比較し、端末毎に異常検出を行う。

$$C.I. = \mu - 2\sigma \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C.I. &= \text{基準値} \\ \mu &= \text{平均値} \\ \sigma &= \text{標準偏差} \end{aligned}$$

一方、無線ネットワークでは、図 5 に示すようなパーストトラフィックや一時的な通信の落ち込み等が起こる。これによって、正常に動作している通信であっても異常と検出される誤検出の可能性があるため、これらの外れ値を除去する必要がある。

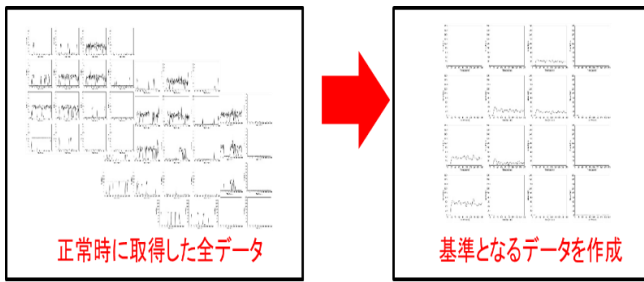


図 4 基準値データの作成

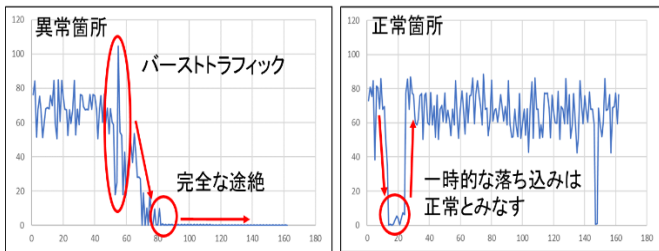


図 5 通信の不安定化による影響

図 6 に示すように、外れ値を除去するため、基準値のデータ送信量と異常時のデータ送信量は、外れ値を中央値に変えて平滑化を行う。しかし、平滑化では、区間毎に中央値を計算し、その区間をすべて中央値に変える平滑化を実施すると、生データの消失が大きく出てしまい、検出結果に影響を与えてしまう。そのため、平滑化する箇所を秒区間毎に標準偏差を取り、標準偏差の閾値によって外れ値の度合いを指定し、ある閾値を越えた時のみ平滑化を実施する中央値閾値を設定した。これによって、異常検出に影響を及ぼす大きな外れ値を除去できる。また、このように平滑化したデータを異常検出の際に比較する基準値データとして用いる。

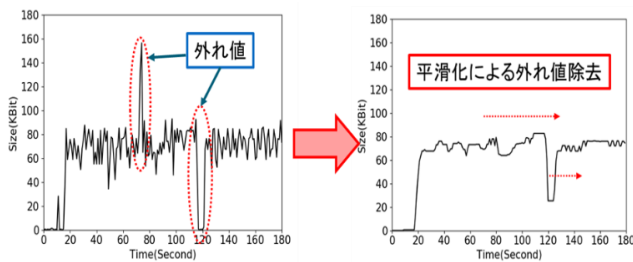


図 6 中央値計算による外れ値除去

異常検出では、基準値データと観測データを端末毎に比較し、データ送信量の差分誤差が閾値を超えた場合、その端末を異常箇所に抽出する。しかし、多数のセンサ端末が圃場に配置された広域なセンサネットワーク内において端末間に遮蔽物や故障等の異常が発生した場合、端末間同士の相互通信の伝搬特性上、通信の不安定化の影響が周囲のセンサ端末に及ぶ可能性が高く、異常検出では、図 7 に示

すような異常発生箇所から離れた箇所で異常と誤って検出される誤検出が起こるため異常箇所の範囲の特定が難しい。検出範囲に関しては、誤検出を低減させることで範囲を狭めることができる。一方で、本手法の検出では、差分誤差の閾値を設けており、この閾値はネットワークに依存している。本稿では、異常箇所の範囲を特定する検出手法の実現を課題とし、差分閾値等の設定によって異常箇所の検出範囲を求め、故障端末の付近に範囲を狭める手法の提案を行う。

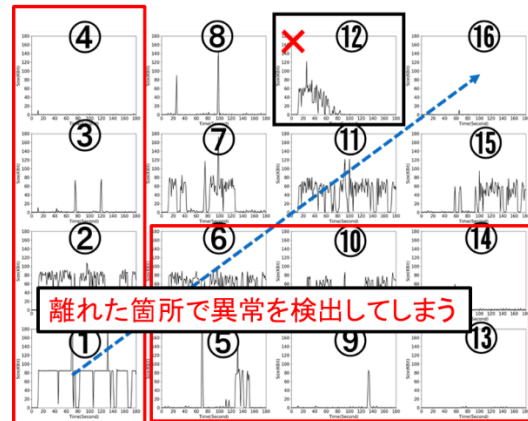


図 7 離れた箇所の異常検出

4. 提案

提案するセンサネットワーク異常検出手法のフロー図を図 9 に示す。フロー図に示す通り、センサネットワーク内において、各センサ端末の通常通信時に取得したデータ送信量を入力値として、初めに、送信量変化の揺れを明瞭化するための累積手順を行い、続いて外れ値を中央値に置き換えることで平滑化する中央値計算手順を実施する。

データ送信量変化を傾向解析し、正常なセンサ端末から基準値データを定める。この基準値データと端末 N の観測データ送信量との差分を 1 秒毎に計算し、ある閾値を超えた場合に連続回数を計算し、連続回数が既定の回数に到達した場合、端末 N を故障端末として異常箇所に加える。既定の回数到達しなければ正常動作と判断する。以降、異常箇所抽出手順と異常箇所の検出範囲の 2 項目の詳細を示す。また、本研究では、完全な通信途絶を起こす通信の挙動として、図 8 に示すような一方向的にデータ送信量が減衰して通信途絶するセンサ端末のデータ送信量波形を対象とする。

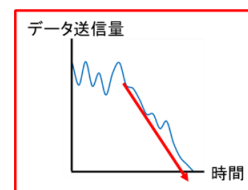


図 8 対象にしている減衰型の通信途絶

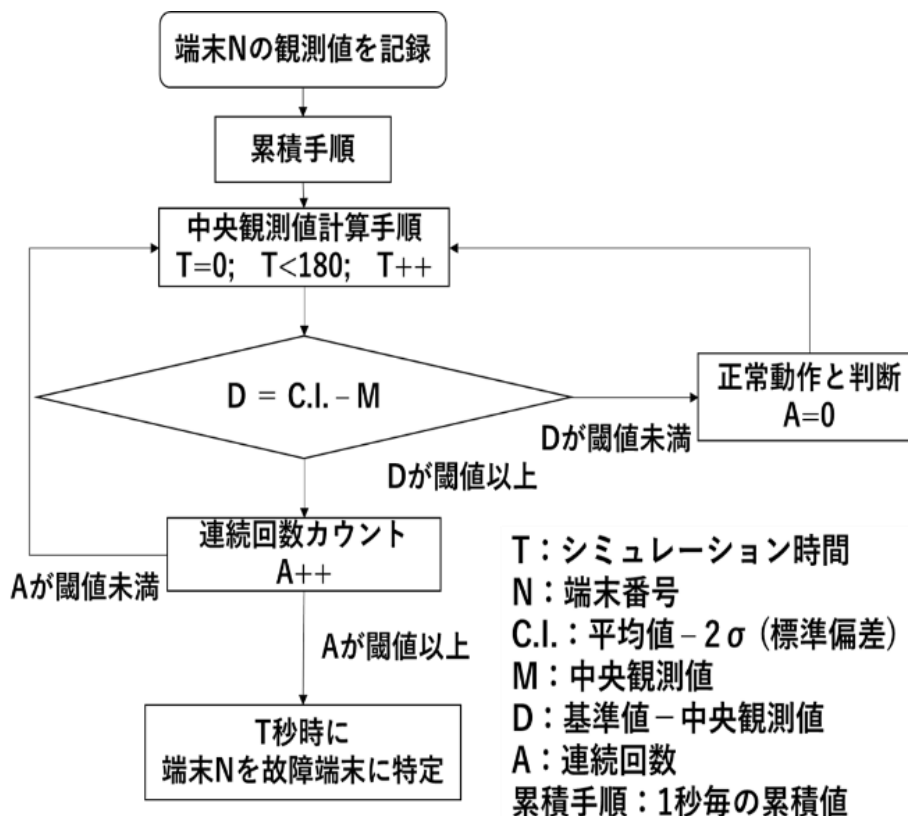


図 9 ネットワーク異常検出手法のフロー図

4.1 異常箇所抽出手順

バーストトラフィック等の通信の不安定化によって、故障端末とは関係ない箇所を異常として抽出してしまう誤検出が発生する。誤検出を低減させるために、本抽出手順では、基準値のデータ送信量と観測時のデータ送信量との差分の閾値を設定し、ある閾値以上となった連続回数を数え、既定の回数を超えた場合に、その端末を異常箇所として加える。説明のために図 10 に抽出手順のイメージを示した。青線で示した部分が基準値のデータ送信量であり、橙色で示した線が異常通信時のデータ送信量である。この 2 つのデータ送信量を比較し差分閾値によって異常箇所の抽出を行う。異常箇所の検出時間は、既定の連続回数に達し、故障端末として異常箇所に抽出された時点からその端末が完全な通信途絶するまでにかかる時間とする。これによって通信途絶する前に検出可能であるかを検証する。また、図のように中央値計算手順による外れ値除去によっても除去しきれない通信の一時的な落ち込み等があった場合でも、差分閾値が既定の連続回数未満では、異常箇所には加えずに、その端末を通常通信時の正常動作と判断するため、通信の不安定化による誤検出を抑えることができる。

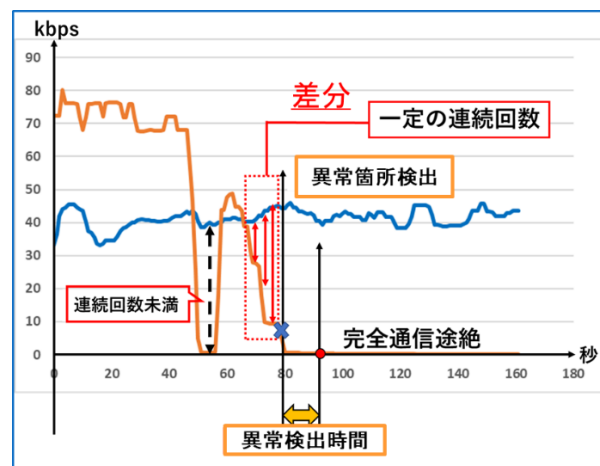


図 10 異常箇所抽出手順

4.2 異常箇所の検出範囲

異常箇所の検出では、差分閾値の取り方によって誤検出が変動する。異常箇所に検出される範囲を故障端末の付近のみに絞り込むために、比較した際の差分の閾値を調節する。端末 12 が故障した端末であるとき、図 12 の左側に示すように誤検出が多くなると異常箇所の範囲が広くなり、故障端末から離れた故障とは関係ない箇所でも多くの誤検出をしてしまう。異常箇所抽出手順で述べているように、基

準値データと観測時のデータの差分の幅によって、異常箇所を検出するか決めていたため、誤検出は、差分閾値が大きく影響する。図 11 に示すような差分閾値を適切に取ることで異常箇所を検出される範囲を故障端末の付近のみに絞り込むことができる。しかし、閾値の設定は通信が不安定であることや通信経路の切り替えによる通信劣化の影響が生じるため、ネットワーク毎に適切な閾値は異なり、影響を考慮した閾値に調節する必要がある。

差分の閾値を広くするほど、異常箇所の検出範囲は狭くなり検出精度は高くなる。一方で、差分閾値(Kbps)の幅を広くしていくことで異常箇所の検出時間は遅くなり、検出の性能は低くなる。そのため検出精度と検出時間(性能)のバランスが取れた値を求める必要がある。

前述のとおり、検出精度と検出時間(性能)は、差分閾値の設定によって変化する。そのため、パラメータを調節することで得られる精度と性能を検証実験によって求める。

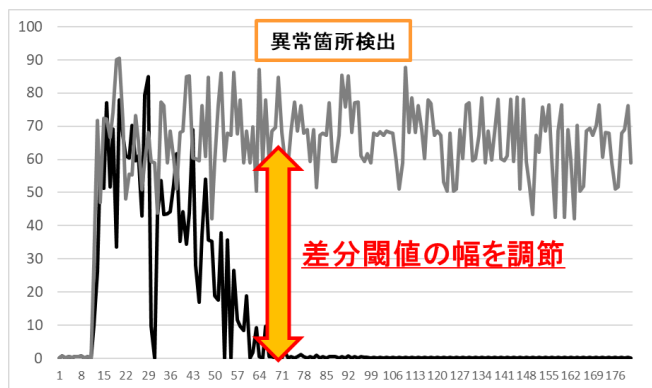


図 11 差分閾値による誤検出低減

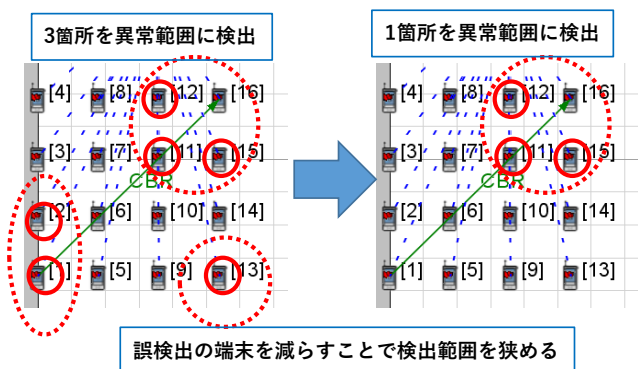


図 9 異常箇所の検出範囲

5. 提案手法の検証実験

5.1 実験手順

本研究では、提案手法の理論的な検証を第一に考え、実験環境ではなくネットワークシミュレータ QuaNet[7]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器

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を直接解析することによって異常検出手法を検証する。

表 1 ネットワーク設定

設定項目	設定値
シミュレーション時間	180s
通信規格	802.11b
データレート	2Mbps
周波数帯	2.4GHz
ルーティングプロトコル	OLSR INRIA
アプリケーション	CBR (1024byte/ds)

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、プロアクティブ型の代表的なプロトコルである OLSR INRIA を用いた。検証で用いたネットワークトポロジーは、故障を模擬した端末 12 を配置したトポロジーで行い、提案する本手法の有効性を検証した。設定したトポロジーは図 10 に示すように 4×4 のグリッド型トポロジーで、端末間の距離は 180m となっており、この距離は、縦横方向には 1 ホップで通信が可能であり、斜め方向には 1 ホップで通信ができない距離とした。本実験では、図 10 に示すように単方向に通信しており、無線ネットワークの伝搬の関係上、異常発生時に隣接端末もデータ送信量の影響を受け波形が減衰する。端末 1 は、宛先端末に向けて 0.1 秒毎に 1024byte のパケットを送信している。

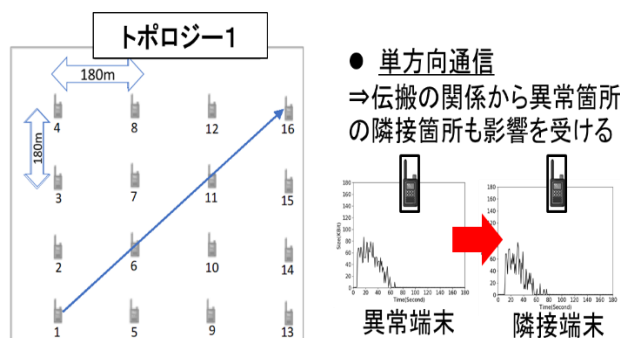


図 10 検証に用いたトポロジー1 と通信設定

今回の実験では、差分閾値は、-1kbps, 0kbps, 1kbps, 2kbps, 連続回数は 3~6 回とした。図 11 に示すように本実験のネットワーク内で故障端末に設定した端末 12 は、データ送信量の波形グラフを見てわかるように、約 87 秒あたりで完全な通信途絶をしている。

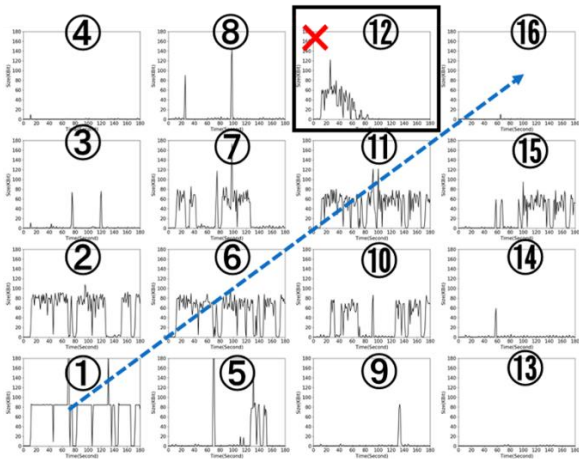


図 11 本実験のネットワークの動作状況

本実験では、通常通信時の基準値のデータ送信量と異常通信時のデータ送信量との差分閾値と連続回数を調節し、異常検出手法を用いた今回の実験では、シミュレータの試行回数は 100 回とした。

5.2 実験結果

ネットワーク内の異常箇所の検出範囲と異常検出時間の実験結果を取り上げる。提案手法に従い、通信途絶前に異常を検出し、差分閾値-1kbps~2kbps それぞれの誤検出を計算し、異常箇所の範囲を求めた。今回の実験により、表 2 に示すように、差分閾値を上げていくことで異常箇所の範囲を狭めることができた。図 13 に示すように、差分閾値 2Kbps の時が最も高精度に検出している。しかし、図 14 の検出性能で示すように、差分閾値が 2Kbps を超えた所から通信途絶前の異常検出が出来なくなった。図 12 の①から④はそれぞれ差分閾値毎の検出範囲を示している。差分閾値 0Kbps, 1Kbps を比較すると検出範囲 (誤検出) は、同じであるため精度に違いは出なかった。しかし、異常検出時間は、0Kbps の時に 2.7 秒で、1Kbps の時に 0.5 秒となった。その結果、このネットワークにおいては、性能差から差分閾値 0Kbps が適していると言える。

差分閾値を 0Kbps に固定し、連続回数 3~6 回それぞれの異常箇所の検出率計算し、異常検出の範囲を求めた。図 16 に示すように連続回数を上げて行くにつれて、誤検出は低減している。

実験結果から、本手法において、表 3 に示すように、連続回数 6 回の時、異常箇所の検出範囲を 13%まで狭めることができた。しかし、異常検出時間は、-3.8 秒であり、完全な通信途絶から 3.8 秒経過しているため、性能が低い。連続回数 3 回~5 回までは図 15 に示すように、検出範囲 (精度) が同じであるため、性能で比較すると、連続回数 3 回の時 27.8 秒となり最も高性能であった。

これらの結果から、このネットワークにおける最も適したパラメータは、差分閾値 0Kbps, 連続回数 3 回である。

差分閾値だけでなく、連続回数を上げることによって、誤検出が減少していくことが確認できた。一方で、検出範囲が狭まり精度が高くなるほど、異常検出時間が遅くなっていくことが課題として見つかった。

表 2 差分閾値に対する検出範囲と検出時間

差分閾値(Kbps)	-1	0	1	2
検出範囲 (誤検出)	100%	27%	27%	20%
異常検出時間 (秒)	8.8	2.7	0.5	0

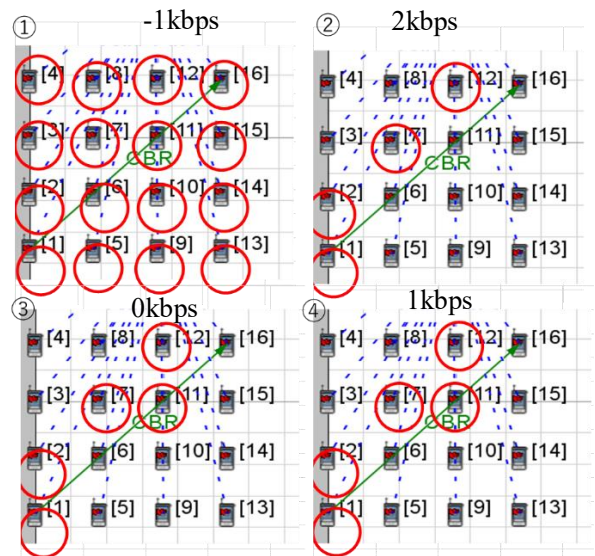


図 12 差分閾値による異常検出範囲の絞りこみ

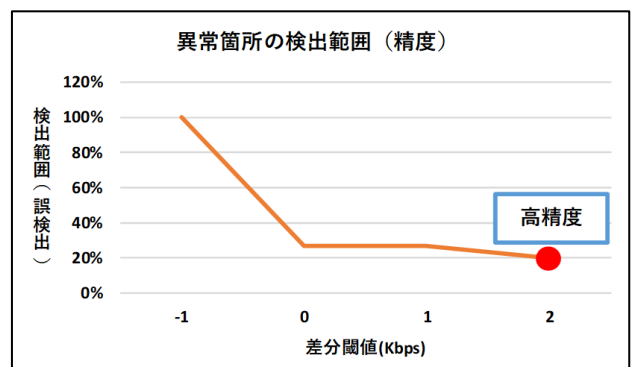


図 13 異常箇所の検出範囲のグラフ

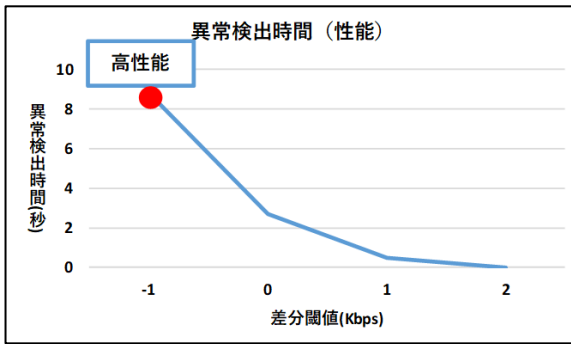


図 14 異常検出時間のグラフ

表 3 連続回数に対する検出範囲と検出時間

連続回数(回)	3	4	5	6
検出範囲 (誤検出)	20%	20%	20%	13%
異常検出時間 (秒)	27.8	16.6	2.7	-3.8



図 15 連続回数による異常検出範囲の絞り込み

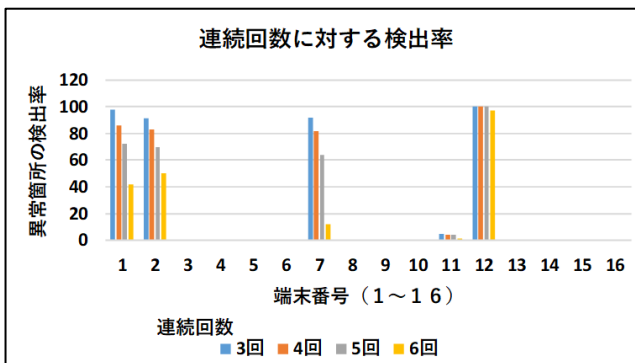


図 16 連続回数に対する検出率のグラフ

6. おわりに

本稿では、農地のセンサネットワークを対象として、ネットワーク内の通信動作を監視することによって、ネットワーク内の異常を検出する異常検出手法を提案した。提案手法では、ネットワークシミュレータ QualNet を用いて、農業センサネットワークを模したトポロジーで実験を行い、異常検出手法の有効性を確認した。異常箇所の検出の範囲では、故障端末付近を検出し、高精度な異常検出を実現するために検出範囲を狭め、データ送信量の差分閾値と連続回数を変えていくことで、異常検出の範囲と検出時間の変化を検証した。その結果、差分閾値の幅を適切な値に変えることによって、誤検出を低減し、検出範囲を絞り込むことが可能であることが確認できた。また、同様に連続回数を変えた場合と比較した結果、差分閾値を固定した状態でも、異常検出時間に大きな変化が見られた。

今後、検証実験により端末数を増やしていったときに検出精度が下がるか、範囲の絞り込みが可能であるかの確認が必要である。

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] 寺島 美昭, 他, “センサアドホックネットワーク管理のための動作推定方式の検討”, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013)シンポジウム論文集, 2013.
- [3] 加藤亜慧, 他, “送信量解析を用いた無線センサネットワーク異常予測手法に関する研究”, 情報処理学会コンシューマ・デバイス&システム(CDS-29-4), (2020).
- [4] 竹下恵: パケットキャプチャ無線 LAN 編, リックテレコム, 2016
- [5] ダグラス・R.マウロ: 入門 SNMP, O’ Reilly Japan, 2002
- [6] 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の動作推定手法の提案”, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO), 8B-2, pp.1610-1615, (2019).
- [7] QualNet Network Simulation Software (<https://www.scalable-networks.com/products/qualnet-network-simulation-software-tool/>)
- [8] 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, Vo44, No10, pp.1052-1055, (2003).