

センサネットワークにおける植物成長等の影響検知方式

渡邊翔生¹ 寺島美昭² 清原良三¹

概要: IoT 技術や、IoT を構成する技術であるセンサネットワーク技術の発達により、農業分野の IT 化が進みつつある。多くの場合、フィールドの環境情報を取得するには、ZigBee などの無線センサネットワークを用いる。しかし、農地では様々な原因で通信が不安定になり、情報が適切に送受信されないことがある。センサネットワークの信頼性を確保するためには、常時異常を監視し、通信ができなくなった場合などのメンテナンスが必要である。通信悪化の原因が様々考えられる中、本論文では、植物や電池消耗等の緩やかな通信悪化についての影響に着目し、事前に障害を除去する手法を検討した。そのための基本的な影響を実際のフィールドで調査し、植物等の障害物による通信への影響を確認した。提案手法では、付加情報量を少なくすることを目的として、通信端末の Received Signal Strength Indicator (RSSI) を用いた。RSSI の減衰状況から、ブラックボックス的に異常監視を実現した。実際に実験を行い、得られたデータから、通信状況が確実に悪くなる前に障害物除去の提案が可能かどうかを確認し、提案手法の有用性を示した。

キーワード: IoT, 植物, WSN, ZigBee

Effects Detection with Plant Growth in the Sensor Network

1. はじめに

日本では現在、農業従事者の高齢化や人手不足が原因で、生産基盤の脆弱化や農村の地域コミュニティの衰退等の課題に直面している。農業従事者の高齢化や人手不足の対策として、農業 ICT の活用や農業機械の電化等を通じて、高い労働生産性と持続性を両立する生産体系への転換を、国を挙げて推進している[1]。

これまで、農業フィールドでは、農業従事者の経験や勘などの曖昧な情報から環境を設定されてきた。従来の環境設定の仕方だと、再現性が乏しく、作物の品質が時期によって変化することが原因で、収穫量や作物の単価の違いが発生する可能性があるため、利益が安定しにくいといった現状があった[2]。しかし、現在では、ICT 農業を活用して、農業フィールドの環境情報をセンシングし、得られた情報を元に、あらかじめ設定していた農業環境へ自動制御することが可能であるため、農業従事者の経験や勘を用いずに、環境を自動で設定・管理することが可能である。自動制御技術には環境情報をセンシングするセンサネットワーク技術が必要不可欠である。

フィールドに置くセンサの様々な課題が解決され、事例として、常時温度、湿度や栄養状態、場合によってはカメラで植物の画像まで取得できる。農業 ICT では、それらの情報を用いて、フィールドの状態や植物の状態を常時監視し、灌水や収穫のタイミングなどまで把握できるようになっている。農業における外部環境要因や内部環境要因等のセンシングする要素をまとめたものを図 1 に示す。センシングで得られる情報は、放射や温湿度だけではなく、地下

部の水分移動等がある。農業フィールドでは、多くの場合、ZigBee などの無線センサネットワークで環境情報の通信に利用していることが多い。無線センサネットワークは、ネットワークを柔軟に構築可能なため、センサ間の情報共有を用いた観測情報の相互補完による、高精度な観測と、迅速な広域状況の把握を継続的に実行できる[3]。

農業分野で無線センサネットワークを用いる理由は以下に分類する。

- 作物の監視
- 農業データのモニタリング

作物の監視は、農業従事者が作物を栽培している時を想定した使い方であり、フィールドの温湿度が高いことや異常検知をする機能が必要とされる。この用途では、一時的なデータの欠落にはルーズで良く、継続的に動作をしていればシステムとして機能する。対して、農業データのモニタリングは、作物の作成後にデータ分析する必要があり、データの欠落を阻止しなければ、作物の出来と環境の因果関係がわからなくなる。

外部環境要因

1. 放射
全放射
光合成有効放射
2. 水分
相対湿度
降雨
3. 空気
気温
風速, 風向き

内部環境要因

1. 放射
全放射
光合成有効放射
2. 水分 (相対湿度)
3. 空気
気温, 風速, CO2濃度

環境要因 (地下部)

1. 水分(pH)
2. 通気
3. 水分移動
4. 温度
5. 無機要素組成・濃度
6. 有機物組成・含量

植物体関連

1. 葉温
2. 光合成速度
3. 蒸散速度
4. 呼吸速度
5. 水ポテンシャル
浸透圧
植物体内水分移動速度
6. LAI(葉面積指標), 草姿
莖径, 果実サイズ, 糖度



図 1 農業における環境要素

1 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology
2 創価大学
Soka University

本論文では、無線センサネットワークを農業フィールドに用い、農業従事者自身が作物を監視する用途を想定し、障害物が原因で起こる通信障害の影響について着目した。農業フィールドにおいて、通信が途絶する前に障害を除去するために、故障や通信不可能を起こす端末を事前に推定する手法を提案する。

2. 近年の農業事情と課題

2.1 近年の農業事情

近年の日本農業の傾向として、野菜や果物類のブランド化が主流となっている。日本のブランド品は、国内だけでなく海外でも人気である。果物に限ると、日本の果実農家は小規模家族経営が多く、経済性を高めるために、良質な単価の高い品種を手間暇かけて栽培している[4]。

しかし、高齢化や後継者不足により、管理することが難しくなっている。それらの課題に対応するために、近年、センサネットワーク技術等を利用した ICT 農業が注目されてきている。

2.2 農業フィールドにおけるセンサネットワークの課題

ICT 農業では、環境情報をセンサで取得し、それらの情報をもとに灌水や温湿度等の農業環境を自動調節することまで可能である。しかし、センサネットワーク技術を取り入れ、環境情報をセンシングするためには、初期準備やメンテナンスが必要であり、IT 技術、主に通信関係に精通していない人であると、扱うことが難しく導入まで至らないことが多い。

センサネットワーク技術を農業従事者が扱う上で難しい点は、通信機器やセンサ端末の管理である。コストをかけて導入したとしても、使用する端末は電子機器であるので、何らかの影響で通信が不可能になることがある。影響とは、センサの故障や、電池の消耗もあれば、通信路上での障害物の影響などがある。それらが起こると、パケット損失が起り、肝心なデータが受信されないことがある。

データが受信できない期間が長く続くと、農作業にも影響をもたらす。通信不可能に対して正しい対処ができなければ、センサネットワークは意味をなさない状態になる。専門家が定期的に点検するならば、ある程度の問題に対応することは可能であるが、人的コストの観点からあまり好ましくないため、運用の際には、農業従事者自身で管理することが必要である。

2.3 センサネットワークにおける通信課題

本節では、農業 IoT におけるシステムや問題を明確化するため、農業フィールドにおける農業 IoT システムに存在する課題について示す。とくに通信に関しては、農業従事者自身では対応が難しい課題である。

2.3.1 通信障害要因

農業 IoT システムにおける通信障害の要因を以下に分類する。

- センサの故障
センシング機能が日照や雨あるいは露などの天候による影響によって不感になる場合がある。
- 通信路の故障
外部からの電波の影響や、植物の成長による障害、物を置くことによる通信遮断、電池消耗により電波が弱くなるなど様々な場合がある。

いずれの場合も通信ができなくなり、データを取得できなくなるため故障であることは判断できる。あるいは急に電波が弱くなるなど急激な変化はわかりやすい。一方で、植物の成長による電波遮断などは徐々に徐々に影響が出るものであり、1 回のデータを見るだけではわからず、日々のデータを取得し、継続的に監視し判断する必要がある。

2.3.2 通信悪化要因

農業フィールドでの通信悪化の要因を以下に分類する。

- 一時的・急な通信悪化
一時的・急に電波が弱くなることや、通信不可能になる場合は、圃場に設置している子機の故障か、通信路上に障害物を置いてしまっ通信が悪化してしまう場合がある。また、外部からの電波の影響が考えられる。
- 緩やかな通信悪化
緩やかな通信悪化には、植物の成長による障害や、電池消耗により電波が弱くなるのが原因の通信悪化が考えられる。

一時的や急激な変化は、1 日や数日程度のデータで判別できるので、故障しているかどうかを判断することは容易である。しかし、緩やかな通信悪化に対しては、継続的な監視が必要である。予め緩やかな通信悪化に対する対策を作成しておかなければ、気づいたら通信途絶が起こってしまうといったことが起きてしまう可能性がある。

2.4 農業におけるセンサネットワークの要求

要求は、常時通信が切れることなく環境情報を収集する機能を作成することである。通信悪化の原因として、植物成長等の障害物による影響や、外部の通信状況、電池の消費が考えられる。その機能を作成するためには、通信が完全に途絶をする前に管理者に知らせる機能を作成する必要がある。そのような機能が実現できれば、コストをかけてセンサネットワークを導入している農家にとって、非常に有用なものになる。

本論文では、ビニールハウスで使うことを前提条件とする。ビニールハウスを前提にした理由は、無線センサネットワークを使用するにあたり、暖房や冷房の使用や、灌水等の自動制御をするのに良いと考えたからである。

農業従事者は、センサネットワーク技術に対する知見がないため、使用するにあたり、設置する場所を考えたり、メンテナンスをしたりすることは、センサネットワークを農業フィールドに取り入れる際の大きな障害となってしまう。将来的にはセンサネットワークを使用する農業従事者

が、ストレスフリーなシステムを目指している。具体的には、農業従事者自身の判断で、決まった箇所にセンサ端末を置くのではなく、農作物を育てるにあたり、邪魔にならない箇所や見えない箇所などのセンサ端末を適当にばらまいて使えることが要求である。

また、本論文の実験で使用した無線センサネットワーク技術は、ZigBee である。まず、有線通信ではなく無線通信にした理由の一つとして、有線通信であると、初期設置や管理に手間がかかり、適当にばらまいて使用することが不可能であるからである。

3. 関連研究

農業の IT 化という観点において、IoT やセンサネットワークを利用した研究は多く行われている。

はじめに農業 IoT としての関連研究を示す。

秋田県立大学では、広域な農業フィールドを想定とし、LPWA と ZigBee を用いて、農業情報共有システムの提案をしている事例がある[5]。LPWA を用いて、広域に農業に関する様々な情報を送信共有することで農業改革を促そうとするアプローチである。さらに筑波大学では、農業 IoT の分野で有効とされているフィールドサーバを適用し、検証実験を行った事例もある[6]。フィールドサーバでは、無線 LAN や携帯通信を利用することで、インターネットを通じて、各種センサから様々な情報を取得することができる。筑波大学の場合、高解像度画像などのモニタリングを行っている。

静岡大学では、ICT 技術により、若手農家に技術継承することに対する要求が高まっている中でも特に、土壌状態の把握は、農業生産において重要であることに着目した[7]。

次に、センサネットワークの端末の故障や異常のための関連研究を示す。

創価大学では、ネットワークの異常検知を行うために、ネットワーク内の無線端末におけるデータ送信量を解析して、ネットワークの動作状況を推定する動作推定方式の提案がシミュレーションを用いて行われている[8]。また、同じく創価大学では、センサ端末の動作状態の監視や、故障端末を交換するための異常動作の検出などを継続的に行うネットワーク管理技術が提案されている[9]。

以上のような関連研究から農業の IT 化については、現状では、通信路上の障害物による通信悪化をする端末の推定する手法が提案されていない。

そこで、本論文では、植物等の通信路上にある障害物の影響によって、緩やかに通信悪化してしまう端末の推定アルゴリズム（以下、通信途絶前端末推定アルゴリズム）の手法を提案する。

4. 植物による通信悪化の検証

通信は電波であるので、障害物の影響を受けやすい。仮

説は、「植物」も通信に影響を及ぼす一つの要因であるのではないかと、ということである。植物が通信に影響を及ぼすのであれば、それに対応した影響検知モデルを作成しなければならない。そのために、植物が徐々に通信路に入ることが要因で、通信強度はどのような傾向を示すのか検証する必要がある。

仮説を検証するために、学校敷地内の植物を使って、実験を行った。実験で行ったツールとして、ZigBee 専用のツール「X-CTU」を用いた。「X-CTU」では Received Signal Strength Indicator (RSSI) とパケット送信のテストが可能ツールである。さらに、得られた結果を自動的にグラフにまとめる機能がある。実験は図 2、図 3 に示す場所で行った。使用したのは、XBee ZB S2C モジュールアンテナタイプを使用した。

- 背の低い植物（通信距離：約 5m）
- 背の高い植物（通信距離：約 7m）

実験では台車を使い等速でゆっくり動き、少しずつ植物にかぶさっていき、通信路上に徐々に植物を被せていくとどのような挙動を示すのか実験を行った。テストは、視界が良好で通信路上に何も障害物がない場所から開始し、ゆっくりと移動して行って、最終的には完全に植物に被ることで、植物の成長による通信障害の影響を模した。

まずは、背が高いが葉や枝の密度が小さい植物で実験を行った結果を図 4 に示す。平均値は微妙に小さくなっているが、大きな変化は見られなかった。密度が小さい植物だと、通信への影響は少ないことがわかる。RSSI 値の最小値は約 75dBm であるため、使用上問題ないと考える。

続いて、背が低い密度が大きい植物で実験を行った結果を図 5 に示す。植物が密集している場所で実験した結果、如実に RSSI 値が減少していることがわかる。距離は約 7m と比較的短い距離で実験を行ったため、パケット損失無く



図 2 背の低い植物



図 3 背の高い植物



Legend: Local RSSI Percentage

図 4 仮説検証の実験結果(背の高い植物)

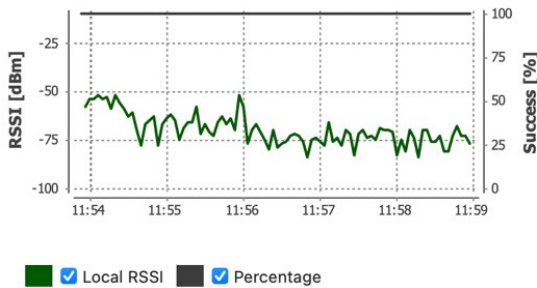


図5 仮説検証の実験結果(背の低い植物)

通信が可能であった。実際の農業フィールドでは、もう少し距離が長くなるのが考えられ、長くなるにつれて、通信路上の植物も増えていくので、パケット損失が起こる可能性は大いにある。

今回の実験で、植物は成長すると通信に影響を及ぼすことを確認した。

5. 提案手法

5.1 概要

本論文では、農業フィールドで無線センサネットワークを使用することを想定し、植物等の緩やかに通信悪化を起こす影響について、通信途絶前端末推定アルゴリズムを提案する。通信途絶前端末推定アルゴリズムは、Received Signal Strength Indicator (RSSI) のみを用いる。異常検知や監視に使用することができるパラメータとして、RSSI 以外にも、Link Quality Indicator (LQI) や Channel State Information (CSI) や送信情報量等が考えられる。本

論文では、無線センサネットワーク技術を使用することを想定しているため、多くの情報を付帯して送信すると、それだけ通信回数や通信量が増加し、無線通信の帯域を圧迫してしまう可能性がある。また、各センサ端末は電池駆動であるため、通信回数や通信量が増加すると消費電力が増加してしまい、特に中継端末は短期間で、電池を変える必要が出てきてしまう可能性がある。それらの理由から、電波強度である RSSI 値のみを使用することとした。

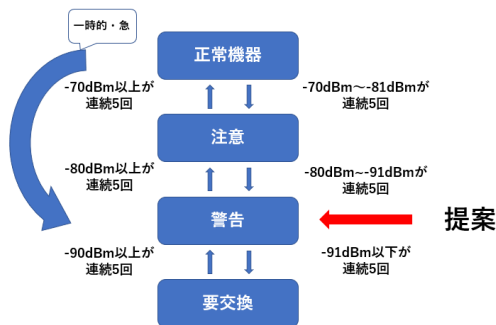


図6 仮説検証の実験結果(背の高い植物)

5.2 提案手法

緩やかに通信障害が起こる通信途絶前端末推定の方法について示す。図6に大まかなアルゴリズムを示す。提案手法には、4つの集合 A, B, C, D を用いる。

- 集合 A: 正常端末 (平均: -70dBm 以上)
- 集合 B: 注意端末 (平均: -71dBm ~ -80dBm)
- 集合 C: 警告端末 (平均: -81dBm ~ -90dBm)
- 集合 D: 通信途絶前端末 (平均: -91dBm 以下)

集合 A は通信が正常に出来ている集合で、設置した際や、通信に影響を起こすものが何もない場合、全ての端末は集合 A に属される。植物等による障害は、緩やかな通信悪化が考えられるため、集合 A から B, C, 最後に D に長期的に遷移していくと考えられる。

通信途絶前端末推定の手順について示す。集合 A から集合 B に遷移するためには、予め設定してある閾値より、規定回数を連続で RSSI 値が下回る必要がある。また、集合 B から集合 C に遷移する閾値は、集合 A から集合 B に遷移する閾値より厳しく設定する。集合 C に分類された端末は、植物等の影響による、緩やかな通信障害が起こっている端末として、管理者に知らせる。

また、一時的に RSSI 値が低くなるのが原因で、正常端末の集合である集合 A から集合 B に遷移する端末に対しては、閾値を規定の連続回数を上回することで、正常端末に分類する。

本論文では、閾値を集合 A から集合 B は、-70dBm ~ -81dBm と設定した。集合 B から集合 C は -80dBm ~ -91dBm, 集合 C から集合 D は -91dBm 以下に設定した。この数値は、表1を参考に作成した[10]。

表1 通信強度の目安(参考: NetSpot「WiFiの電波強度と、その重要性とは？」より)

電波強度	限定子	説明
-30 dBm	優良	達成可能な電波数値の最高
-50 dBm	優良	全てのネットワーク使用において優良
-65 dBm	非常に良好	スマートフォン・タブレットの使用に適切
-67 dBm	非常に良好	IP ストリーミングビデオの音声利用可能
-70 dBm	問題なし	データ使用に当たっての最低限の数値
-80 dBm	不良	最低限の動作は行えるが、安定さ無し
-90 dBm	非常に不良	ノイズが全ての機能を妨害
-100 dBm	最低	ノイズのみの状態

5.3 連続規定回数について

推定アルゴリズムでは、集合の遷移に電波強度である RSSI を元に処理をしている。RSSI はアナログ情報であり、周囲の環境によってブレが生じる場合がある。連続規定回数が 1 回や 2 回であると、一時的なブレで集合が遷移する可能性があり、集合遷移をする回数自体が多くなる。使用したデータは 1 テスト 100 パケットである。そこで、1, 2 回の判断で集合の移動を判断するのではなく、ある程度多い回数を規定とすることで、継続的に悪くなっている通信障害を見つけるために、本論文では 5 回と設定した。最適な連続規定回数は、使用する環境や、通信頻度にもよって変化するため、都度設定しなければならない。

5.4 具体的な提案手法の流れ

具体的な提案手法の流れについて、実際に得られたデータを用いて説明する。図 7 は、実際に得られたデータを平滑化係数 0.5 で指数平滑したものをグラフにまとめたものである。指数平滑を適用した理由は、RSSI 値はノイズの影響により、増減が激しいため、ある程度平滑化を行わないと、RSSI 値を用いる手法が難しいからである。

1 回目の通信では、RSSI 値が -50dBm と非常に電波強度が高く、良好な通信環境である。しかし、植物が通信路上に入っていくにつれ、徐々に悪化し、28 回目の通信で -70dBm を下回った。一時的な通信障害であるならば、すぐに回復するはずであるが、植物等の緩やかな通信悪化であると、元には戻りにくい。今回の実験でも、28 回目の通信以降、 -70dBm 未満の RSSI 値は 9 回続いている。本論文では、集合を遷移するための規定の連続回数を 5 回と設定したので、32 回目の RSSI 値が得られたところで、測定している端末を正常端末集合である集合 A から、注意端末集合である集合 B に遷移させる。このような処理をブラックボックス的に行うことで、緩やかな通信悪化に対して、完全に通信が不可能になる前に、対象の端末を検知することができる。

図 7 では、該当の端末は集合 B に留まっているが、植物が成長し、通信路上の障害物が大きくなると、徐々に電波強度は衰退すると考えられるため、集合 C、あるいは D に遷移することが考えられる。集合 C に分類された端末は、警告端末とし、何らかの処置をするように管理者に促す。



6. 実験

6.1 実験概要

本節では、実際のフィールドで得た RSSI 値の情報を保存し、まとめたデータからプログラム処理を行った。何回目の通信で端末状態が集合が遷移するのかを出力した。

その結果から、ZigBee の専用ツールである X-CTU の通信強度テストを用いて、100 パケット分の RSSI を記録し、Excel にデータを入力した。入力したデータを用いて、作成したプログラムが適切に動作するか確認した。

6.2 実験方法

X-CTU の通信強度テストは、RSSI 値を計測して、グラフを自動作成可能な機能である。1 パケット毎に RSSI 値が計測され、蓄積されたデータがグラフとして表示される。1 パケットあたり 5 秒程度の間隔で、1 回のテストで 100 パケット分の通信をするため、実験時間は約 5 分間となる。

使用する表計算ソフトは Excel であり、プログラム言語は python を使用した。開発環境として、Python などを Web ブラウザ上で記述・実行できる総合開発環境である Jupyter Notebook を使用した。

提案手法の処理をコードで作成し、実際に管理者に知らせる旨を、print 文で出力することにした。また、通信状態の集合が何回目の通信で遷移しているのかを出力し、完全に通信途絶前に通知することを示した。

さらに、一時的な通信不良により、状態が悪くなっていると認識された端末を対象に、該当する端末が正常端末集合に戻ることを print 文で出力して、確認した。

今回は、4 パターンの実験をした。

- 植物が徐々に通信路を阻害する
- 通信路に乗り物が遮る
- 見晴らしが良好で、影響を起こすものなし
- 通信路に人間が横切る

植物を 2 パターン、その他 1 パターンずつ実験し、得られた結果を平滑化係数 0.5 で指数平滑をかけてフィルタリングをしたデータのグラフを作成し、プログラム処理した。

6.3 実験結果

まず、植物が徐々に通信路を阻害するパターンを含める 4 種類のパターンを、グラフにまとめたものを図 8 から図 12 に示す。

ここから、読み取れることとして、植物が通信に影響を及ぼす特徴は、長い時間をかけて徐々に徐々に通信が悪く

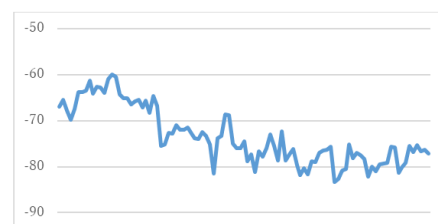


図 8 植物 1 回目の RSSI 値のグラフ

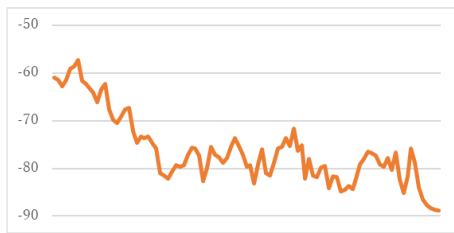


図9 植物2回目のRSSI値のグラフ

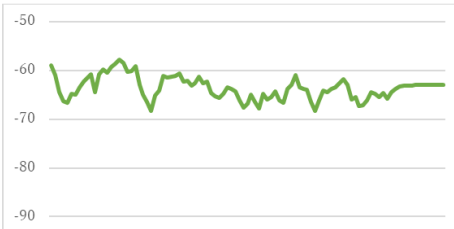


図10 障害物なしのRSSI値のグラフ

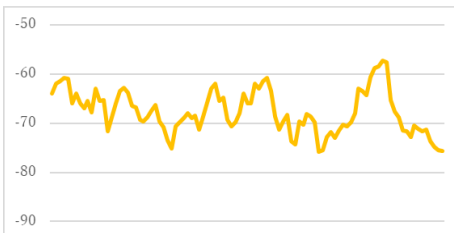


図11 障害物(車)のRSSI値のグラフ

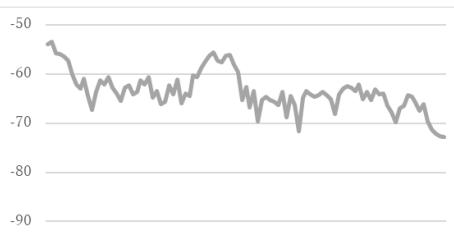


図12 障害物(歩行者)のRSSI値のグラフ

なっていくことである。全体を見ると、一目見ただけでは通信状態が悪くなっていることはわからない。従来の研究では、短期間で通信の評価をすることで、通信状態の異常検知を行うため、人がただ通っただけの影響や、障害物をおいてしまったために起きる影響に関しては、検知が可能である。しかし、植物成長等による、緩やかな通信悪化に対しては、短期的な異常検知では、通信状態が本当に悪くなっているか、確認することが難しい。結果として、通信途絶が起きてから、故障端末を発見することになる。

そこで本論文で提案した通信途絶前端末推定アルゴリズムの仕様を施したプログラム処理をした。X-CTUの通信強度テストで得られた情報を、Excelに入力し、その情報を処理し、出力した。図13から図17は、植物成長を模して、徐々に通信路上に植物が阻害する実験で得られた情報をプログラム処理した結果である。結果から、通信が完全に途絶をする前に、出力ができていたことが確認できた。

6.4 考察

本節の実験で得られた結果は、緩やかに起こる通信悪化

```
通信31回目：-72.225827383128
注意端末です。正常に通信はできませんが、注意が必要です。
warning
```

図13 処理結果(植物1回目)

```
通信25回目：-73.32190436124802
注意端末です。正常に通信はできませんが、注意が必要です。
通信9回目：-84.45125486236894
警告端末です。通信が非常に不安定な状態になっています。障害物の影響も知れません。直ちに対応してください。
error
```

図14 処理結果(植物2回目)

```
normally
```

図15 処理結果(障害物なし)

```
通信58回目：-71.34367298484308
注意端末です。正常に通信はできませんが、注意が必要です。
warning
```

図16 処理結果(障害物<車>)

```
通信99回目：-72.78756818235858
注意端末です。正常に通信はできませんが、注意が必要です。
warning
```

図17 処理結果(障害物<歩行者>)

に対して、有効な手法であることが確認できた。数回の通信状態から判別する従来手法では、一時的や急な通信悪化には対応できるが、長期的な通信悪化には対応できない。図8、図9で示した植物が通信路を阻害する実験では、RSSIが大きくブレが生じる部分が見られたが、平均的にRSSIが低くなったところで集合遷移できた。植物成長や長期的に室外に置いたことが影響で起こる通信悪化を、正常に通信ができるようにするために、知らせを受けた管理者は、該当する端末が置かれている場所に行き、通信端末の場所の移動や、通信端末にかかっている土を取り除くといった対応をするだけで、正常な通信状態に戻すことが可能となる。

無線センサネットワークはマルチホップに通信するため、一台が通信不可能になると、近くのお他端末まで影響が出る。

また、図11、図12から、提案手法は農業フィールド以外の分野でも活用できると考える。どの用途で使も、なんらかの影響で通信状態が悪化するため、通信途絶する前に管理者に知らせる本論文での提案手法の有効性を示せた。センサ端末類の管理が容易になり、異常検知が正確に可能となれば、農業従事者のセンサネットワーク技術への信頼性を上げることに繋がり、更なる普及に繋がると考える。

本節の実験では、平滑化係数を0.5で指数平滑処理を行った。次節では、指数平滑法による最適平滑化係数の評価を行う。

7. 指数平滑法による最適平滑化係数の評価

7.1 実験概要

RSSIを利用して異常検知をする際の問題点の一つに、受信するRSSIのばらつきが考えられる。屋内環境で受信されるRSSIは、植物や農機具等の障害物や、フェージングの影響で、ばらつきが大きくなる。そのため、RSSIを利用する実験では、高精度の異常検知が困難となる。

そこで、提案手法では、ノイズを除去するローパスフィルタとして、指数平滑移動平均法（以下、指数平滑）を用いる。指数平滑は、時間の経過とともに指数関数的に減少する重みを割り当てて計算する。つまり、過去の値よりも直近の値になるほど、比重を置いた平均値である。単純移動平均では、過去の観測値が均等に重み付けされるが、指数平滑では、直近の値に対する影響が出やすくなるといった特徴がある。計算式は式1の通りである。

$$S_0 = X_0$$

$$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \quad t > 0 \quad (1)$$

平滑化係数である α を大きくすると、平滑化のレベルを下げることになる。

本節の実験では、指数平滑によるフィルタリングの有無での、プログラムの処理結果の比較を行う。指数平滑を使う有用性を示し、考察する。また、RSSI で異常検知をする本論文の提案手法において、適正な平滑化係数を検討する。

7.2 実験方法

本実験では、実際に得られたデータに指数平滑処理をし、提案手法のプログラムで処理をする。指数平滑の有無でグラフがどう変わるのかを示した上で、処理結果の変化を結果としてまとめる。

また、本実験では平滑化係数を以下のパターンを実験で行った。

- $\alpha=1$ (指数平滑なし)
- $\alpha=0.7$
- $\alpha=0.5$
- $\alpha=0.3$ (本実験上、最大の減衰率)

平滑化係数は、値が1に近いほど平滑効果が少なくなり、 $\alpha=1$ の時の出力は、観測値と同等である。また、適正な平滑化係数を求める正式な手順がないため、実際に得られたデータに加え、RSSI が緩やかに上下を繰り返すデータセットを10通り作成し、それぞれの平滑化係数の平均集合回数を求め、妥当な数値を検討した。実際に指数平滑の有用性を示すとともに、適する平滑化係数の実験を行った。

7.3 実験結果

本節では実験の結果を示す。図18から図21は指数平滑処理の有無の比較を示したものである。指数平滑を行った結果、平滑化係数が減少するほど、ばらつきが抑えられていることが確認できる。また、平滑化した結果は、平滑化係数が1に近いほど、元の結果と類似しているため、処理を行うことで全く違う結果を出力してしまうリスクは少ないことがわかる。

図22から図25は前図で示したそれぞれのデータセットに、提案手法で示したプログラムの処理結果を示したものである。指数平滑をしていないデータセットでは、集合遷移をする回数が少なく、対して、指数平滑を施した方は集合遷移の回数が多かった。

また、表2はRSSI値が上下を繰り返すデータセットを

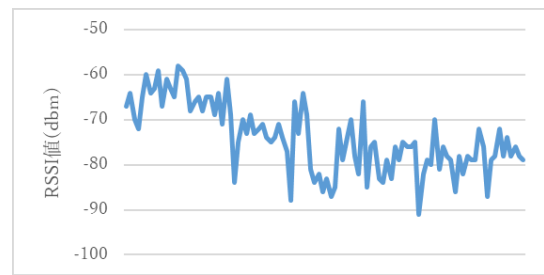


図18 平滑化係数 ($\alpha=1$) のグラフ

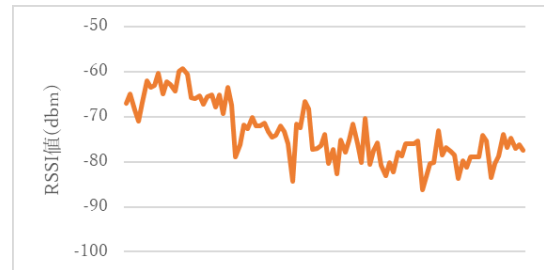


図19 平滑化係数 ($\alpha=0.7$) のグラフ

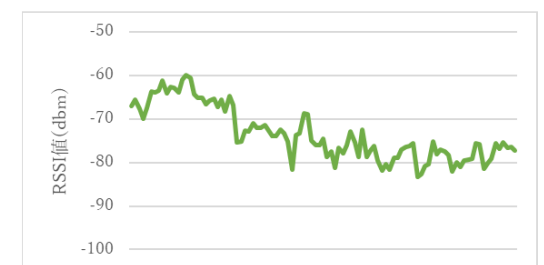


図20 平滑化係数 ($\alpha=0.5$) のグラフ



図21 平滑化係数 ($\alpha=0.3$) のグラフ

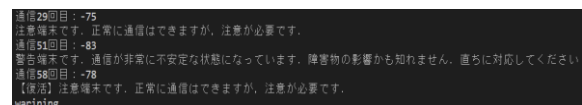


図22 処理結果 ($\alpha=1$)

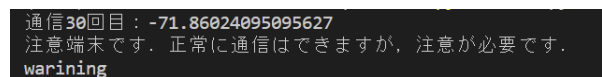


図23 処理結果 ($\alpha=0.7$)

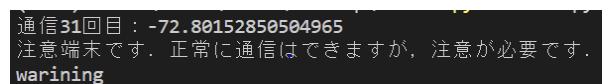


図24 処理結果 ($\alpha=0.5$)

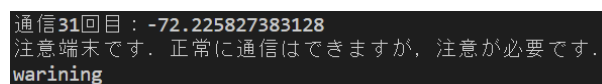


図25 処理結果 ($\alpha=0.3$)

表2 データセットの処理結果まとめ

	平均遷移回数	下降	上昇
1	3.9	2.5	1.4
0.7	4.1	2.6	1.5
0.5	4	2.6	1.4
0.3	4.4	2.6	1.8

10 個作成し、それぞれの 10 回のテストの平均集合遷移回数である。平滑化係数の数値が小さくなる、つまり、フィルタリングの重みを大きくするほど平均集合遷移回数が多くなる。

7.4 考察

提案手法では、取得されたデータが閾値を規定回数連続で下回ると、状態集合が遷移するため、指数平滑によるフィルタリングによりばらつきを抑えるほど、平均集合遷移回数が増えることが実験によって確認できた。この実験から実データのまま、プログラム処理をすると、実際は悪くなってきているのにも関わらず、短期的や瞬間的なデータのばらつきにより、カウント変数がリセットされてしまい、集合遷移の回数が少なくなる可能性があることがわかった。

適正な平滑化係数について、平滑化係数の値が 0.5 と 0.3 の時の、平均集合遷移回数を比較してみると、あまり大差はないことがわかった。平滑化係数を小さくすると、その分ばらつきは抑えられるが、その一方で、実データとかけ離れた結果となるといった課題がある。

適指数平滑の平滑化係数を低くするほど平滑化のレベルを上げ、過去の値に比重を置く処理であるので、突発的に通信が悪くなった際、対応できないといった事態になってしまう。よって、本実験から、本論文の提案手法で使う指数平滑における平滑化係数は 0.5 が適切だと考えた。尚、適切な平滑化係数は、データを計測するフィールドや時間帯、回数等によって変化すると考えられるため、各パターンにおける適切な数値に関しては、今後の課題である。

8. むすび

本論文では、ビニールハウスで農業従事者が作物監視のためにセンサネットワークを用いることを想定し、植物等が影響で起こる緩やかな通信障害に対する通信途絶前端末推定の手法の提案を行った。一時的や急な通信障害であればすぐに推定できるが、緩やかな通信障害は違ったアプローチをしなければ、通信途絶前の推定は難しい。既に通信不可能になっている端末を推定するのではなく、緩やかに時間をかけて通信悪化している影響に着目し、RSSI を用いて通信が完全に不可能になる前に管理者に知らせる手法を提案し、評価を行った。実際に取得したデータで実験を行ったところ、RSSI が悪化した部分は下位集合に、復帰している部分では上位集合に遷移しているのが確認できた。

これからの課題としては、現段階では RSSI 値のみで判断しようとしているため、果たして RSSI 値のみで判断していいのか検証する必要がある。また実際の農業フィールドで実験を行い、長期的な変化のデータをとり、本論文での提案手法より効率的で、正確性のある手法を改めて考えていきたい。また、農業フィールドの通信において、単位パケットの大きさや、情報を付与する事による情報通信量の差異はどれほどあるのか把握する必要がある。差異が大きいほど、情報通信量が増大していくため、電池消費や通信速度の低下といった影響を受ける。

また、模擬的に農業フィールドを作成し、シミュレーションする。実験方法として、初めに通信端末を視界が良好な場所に配置し、通信をさせる。次に、模擬的な植物をシミュレータ上に作成する。センサを平行に等速移動させ、通信路上に植物が徐々に被さっていくようにする。受信された情報量を計測し、データベース上に記録させる、という実験を考えている。他にも、通信障害の影響として考えられる要因をシミュレータで実験を行い、それぞれ傾向解析をし、モデル化を行う。それが可能であるならば、植物等の影響による緩やかな通信悪化だけではない異常検知システムを作成することができると考えている。

参考文献

- [1] 農林水産省, "食料・農業・農村白書令和 2 年度," 2021, <https://www.maff.go.jp/j/wpaper/<2022/12/20 参照>>
- [2] 峰野博史, "農業 ICT-IoT・ビッグデータ・AI 活用で農業を成長産業へ: 4. 施設園芸における農業 ICT 研究の最前線," 情報処理, Vol.58, No.9, pp.802-805, 2017.
- [3] 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
- [4] nippon.com, "日本の果物はなぜ高い?," 2016, <https://www.nippon.com/ja/views/b06001/<2022/12/20 参照>>
- [5] 飯田一朗, 草苺良至, 橋浦康一郎, 石井雅樹, 斎藤直樹, 吉田康徳, 上田賢悦, "IoT による農業改革に関する研究," 秋田県立大学ウェブジャーナル B, vol.6 135-142, 2019
- [6] Fukatsu T., Watanabe T., Hu H., Yoichi H., Hirafujij M., "Field monitoring support system for the occurrence of *Leptocorisa chinensis* Dallas (Hemiptera: Alydidae) using synthetic attractants, Field Servers, and image analysis," Computers and Electronics in Agriculture, vol.80, pp. 8-16, 2012
- [7] 田中和紀, 小川勝史, "農業用 IoT 用土壌センサと計測システムの開発," 情報処理学会関西支部大会, 2019
- [8] Fukuoka K., Yamamoto M., Yokotani T., Saito M., Terashima Y., "Network Behavior Estimation Method for Wireless Ad-Hoc Networks by Analyzing Data Transmission Traffic," Twelfth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU), 2019
- [9] 寺島美昭, 川島佑毅, 河東晴子, 平田和史, "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," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル 2013
- [10] NetSpot, "WiFi の電波強度と、その重要性とは?," <https://www.netspotapp.com/jp/wifi-signal-strength/wifi-signal-strength-and-its-impact.html, <2022/12/20 参照>>