

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。そのために、通信途絶が推定される端末の正確な場所や何が原因で通信障害を起しているかを判別できれば、農業従事者自身で簡単な処置をすることが可能となる。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冗長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する。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する。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 RSSI 値を用いる。RSSI 値の減衰状況から、ブラックボックス的に異常監視を実現する。また、具体例として、植物の影響を模した実験で得られた RSSI 値から、どのような手順で故障前推定をするのかを示す。

Effects Detection with Plant Growth in the Sensor Network

SHOKI WATANABE¹ YOSHIAKI TERASHIMA² RYOZO KIYOHARA¹

1. はじめに

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。そのため、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]。具体的には、無人のロボットトラクタを GPS を用いて管理する実験や、水田の水管理を遠隔・自動制御できる水管理システム、ドローンによる農薬散布などの実験が行われており、農業 ICT のイノベーションが期待されている。さらに、ハウス内の環境を最適化する制御盤の実験も行われている。

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、自動制御することは、これまで、農業従事者の経験と勘から設定してきた農業環境を、自動で設定することが可能なため、農業 ICT の有効な一つの手段として期待されている。本論文では、センサネットワーク技術を用いて、環境情報をセンシングすることについて着目する。

IoT 技術やセンサネットワーク技術の発達により、農業分野の IT 化が進んでいる。フィールドに置くセンサの様々な課題が解決され、常時温度、湿度や栄養状態、場合によってはカメラ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、水をやるタイミングや、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 [2]。図 1 は、農業における環境要素として考えられるものをまとめたものである。

農業フィールドでは、多くの場合、ZigBee などの無線セ

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、茎径、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

² 創価大学

ンサネットワークで環境情報を収集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 [3]。

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。それは、センサネットワークの信頼性を下げることにつながりかねない。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 [5]。将来的には、故障した端末や通信が不安定になっている端末を、農業従事者自身で管理することが期待されているが、多くの農業従事者は IT 関係には詳しくないため、現状では難しい問題となっている。メンテナンスをする必要があるのは、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も考えられる。

本論文では、障害物が原因で起こる通信の影響について着目し、事前に障害を除去するために、故障や通信不可能を起こしてしまう端末を、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、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。センサネットワークでは、農業フィールドの温湿度・照度・二酸化酸素濃度等を常時計測し、異常を検知することが可能である。こうした機能を駆使することで、農業従事者には、それぞれの野菜や果物に適した環境に調整する助けとなっている。

しかし、導入障壁として、初期準備が大変なこと、メンテナンスが必要であり、コストにあったパフォーマンスが期待できないということがある。ZigBee 等の無線センサネットワークの導入コストは、フィールドサーバ [4] を設置するよりも比較的安価だが、導入して有効活用するためには、故障等のリスクマネジメントが必要不可欠である。

また、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、否応なく見た目も味も良質な単価の高い品種を手間暇かけて栽培している [6]。例えば、ブランド物のいちご等は、ビニールハウスで厳格に大切に育てられている。

それらを作るためには、温度や湿度、照度といった自然環境情報を徹底的に管理して生育することが必要である。これまで、農業従事者自身の経験とノウハウから環境情報を設定してきたが、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。そのために、センサネットワーク技術等を用いた ICT 農業が使用される例がある。

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水やりや温度等の農業環境を自動調節することまで可能となっている。しかし、センサネットワークを取り入れ、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、通信関係に詳しくない人であると、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ってしまうことがある。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、パケット損失が起こり、肝心のデータが受信されないことが考えられる。

データが受信されないことが長期間続くと、農作業にも影響をもたらす。つまり、何らかの影響によって起こる通信不可能に対して対処できなければ、センサネットワークは意味をなさない状態になってしまい、センサネットワーク技術自体の信頼性の低下につながりかねない。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、農業従事者自身で管理することが求められる。

2.3 要求条件

要求条件は、通信ができなくなった際、何の影響であるのかを検知し、どのように対処すればいいのかを提案する機能を作成することである。そのような機能が実現できれば、故障した際、何が原因か推測することができ、農業従事者自身で対応が可能となる。影響要因を自動で検知するためには、考えられる影響がどのような挙動を表すのかモデル化する必要がある。

3. 研究課題と関連研究

3.1 研究課題

はじめに、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。農業 IoT システムにおける障害を以下に分類する。

- センサの故障
センシング機能が日照や雨あるいは露の影響により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

くなり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。

また、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て通信が悪化してしまうこと、また、外部からの電波の影響が考えられる。
- 冗長的な通信悪化
冗長的な通信悪化には、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はわかりやすい。しかし、冗長的な通信悪化に対しては、継続的な監視が必要で、予めモデル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。

3.2 関連研究

はじめに、農業IoTとしての関連研究を示す。広域な農業フィールドを想定とし、LPWAとZigBeeを用いて、遠隔ネットワークの提案をしている例もある[7]。LPWAを用いて、広域に環境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た事例もある[4]。フィールドサーバでは、無線LANや携帯通信を利用し、インターネットを通じて、高解像度画像などのモニタリングが可能である。

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。ネットワークの異常検知のために、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、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]。

センサ端末自体の故障モデルは既に研究されており、故障の予知も可能となっている。しかし、通信路上の障害物等の影響によって、センサ端末は劣化していないのにもかかわらず、通信が不安定になってしまうといった、冗長的な通信悪化に対してモデル化はされていない。

本論文では、広域ではない農業フィールドを想定し、通信路上の障害物の影響での通信悪化に対し、予兆を分析、また、異常を検知し、通信が悪くなっている機器の場所を特定する方式を提案する。

現在の農業フィールドにおける課題の一つとして、継続的な監視によって通信悪化をもたらしている影響の判別と、通信途絶が起こる可能性のあるセンサ端末の正確な箇所を、通信途絶する前に検知する推定アルゴリズムの実現である、本論文では、植物等の通信路上の障害物の影響により、冗長的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)の提案を行う。

4. 通信途絶前端末推定アルゴリズム

4.1 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、植物等の冗長的に通信悪化を起こす影響について、通信途絶前の端末推定を行うアルゴリズムを提案する。推定アルゴリズムは、RSSI値のみを用いる。アルゴリズムの大まかな手順を示す。はじめに、図2に示すように各子機端末のRSSI値を毎日定刻に親機に集約する。

次に親機に集約された各センサのRSSI値をデータベース上に記録する。正常に通信ができていれば、観測値はほぼ一定で変わらないはずだが、植物の影響が出てくると少しずつ観測値が下がってくる。表1に示すように通信の状況を考える。

植物の影響でのRSSI値を傾向解析し、同じような傾向が数日間・数十日間ペースで継続していた場合、該当するセンサを通信途絶前端末とする。データベース上でセンサごとに分けて記録することで、図3に示す正確な箇所の通信途絶前端末推定アルゴリズムが実現できる。

4.2 提案手法

冗長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。提案手法には、4つの集合A, B, C, Dを用

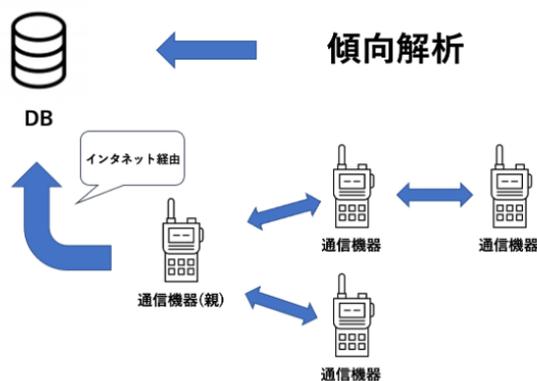


図2 ネットワーク監視構成

表 1 通信強度の目安

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

N=Node 番号 集約ノードから見た各端末の番号
S=発信元 Node 番号

i=カウンタ用変数 (i=0)
rssi=RSSI 値を入れる変数
a=-70,b=-80,c=-90;

```
for (N=1;N<=最大 Node 数;N++){
  if (rssi<a && rssi>=b){
    if (i==5){
      NodeN を集合 A から集合 B に遷移 or 集合 C→B に遷移
      i=0;
    }
    else{
      i++; カウンタ変数 i の値を 1 増やす
    }
  }
}
```

集合 B→C,集合 C→D も同様

図 3 通信途絶前端末分類アルゴリズム

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、冗長的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。集合 A から集合 B を介さずに、集合 C または集合 D に遷移した場合、それは一時的、あるいは急な通信障害であると考えられる。尚、本論文では、一時的・急な通信障害については言及しない。

通信途絶前端末推定の手順について示す。まず、フィールドに最初に設置した時は、どの端末も正常に通信可能なため、全ての端末は集合 A に分類される。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、冗長的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 値が低くなってしまっていたのが原因で、正常端末の集合である集合 A から集合 B に遷移してしまった端末に対しては、閾値を規定の連続回数を上回ることで、正常端末に分類されるようにする。

本論文では、閾値を集合 A から集合 B は、-70dBm?-80dBm と設定した。集合 B から集合 C は-81dBm?-90dBm, 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。また、規定連続回数は 5 回と設定した。閾値や数値は、今後の実験を通して、最適な数値を設定していきたいと考えている。

図 4 に示した提案手法により、冗長的に悪化する通信障害に対して、完全に通信途絶をしてしまう前に管理者に報告することが可能となる。

5. 仮説検証

5.1 仮説

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はないか、ということである。植物が通信に影響を及ぼすのならば、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表すのかを検証する必要がある。

5.2 仮説検証

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」では電波強度とパケット送信のテストが可能である。さらに、得られた結果を自動的にグラフにまとめるツールである。実験は図 5,6,7 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。

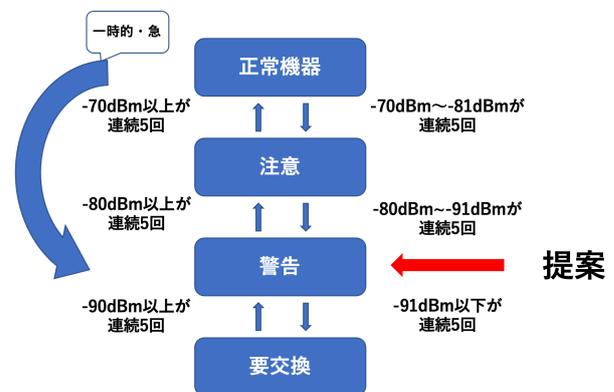


図 4 提案手法の流れ

- 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 9 に示す。



図 5 背の低い植物



図 6 背の高い植物



図 7 背の高い植物（横）

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 8 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ことが考えられ、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、植物は通信の障害となる原因として大いに考えられることが判明した。

6. 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 10 は、実際に得られたデータを減衰率 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。実験の手順を示す。はじめに通信する機器を視界が良好な場所に設

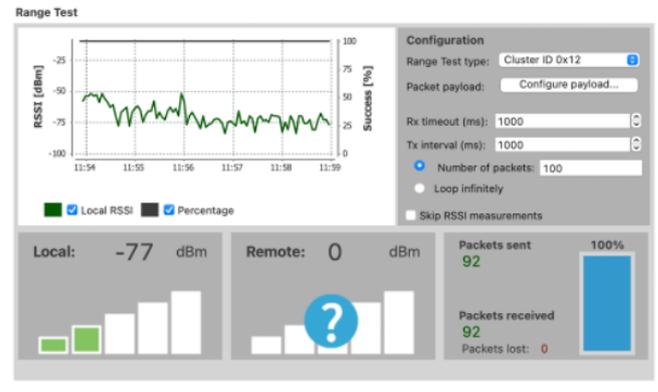


図 8 背の低い植物の通信強度変化

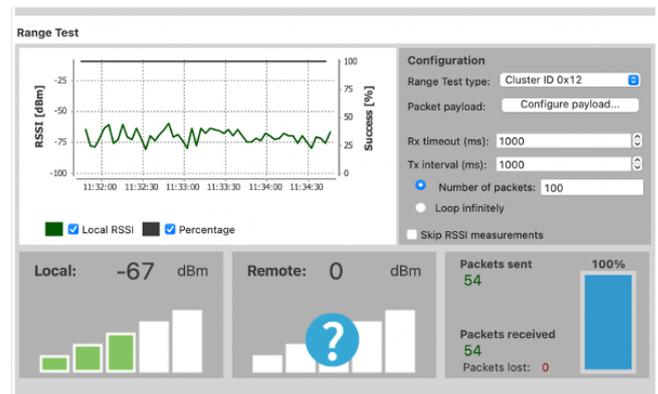


図 9 背の高い植物の通信強度変化

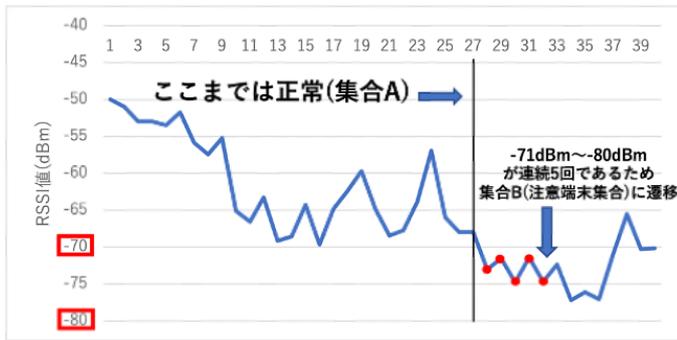


図 10 提案手法の流れ

置した。親機の端末は固定しておき、子機の端末を通信路上に植物が入るように徐々に等速移動をした。最終的には完全に植物が被るようにした。実験で行った距離は約 8m 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、植物等の冗長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、冗長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 10 では、該当の端末は集合 B に留まっているが、植物が成長していき、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していくと考えられるため、集合 C、あるいは D に遷移していくことが考えられる。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。

7. おわりに

本論文では、植物等が影響で起こる冗長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、冗長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。

これからの展望としては、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る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、電池消耗や通信速度の低下といった影響を受けてしまう。

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、植物等の冗長な通信悪化だけではなく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] <https://www.maff.go.jp/j/wpaper/>, "食料・農業・農村白書令和 2 年度", 農林水産省, 2021
- [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] Tokihiro Fukatsu, Tomonari Watanabe, Haoming, Hu, Hideo Yoichi, Masayuki Hirafuji, "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
- [5] 中濱広夢, 加藤亜慧, 寺島 美昭, "農業 IoT 無線センサネットワークを対象とする故障検知アルゴリズムの検討", 第 19 回情報科学技術フォーラム, M-012, 2020
- [6] <https://www.nippon.com/ja/views/b06001/>, "日本の果物はなぜ高い?", nippon.com, 2016
- [7] 飯田一郎, 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
- [8] K. Fukuoka, M. Yamamoto, T. Yokotani, M. Saito and Y. Terashima, "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 (DICOMO2013) シンポジウム」, 2013