

植物生長に関わる視覚的特徴の指標化と LPWA による多地点圃場共有システムの開発

代表研究者	中山 信	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学科	准教授
共同研究者	高田 拓	東京都立産業技術高等専門学校	ものづくり工学科	准教授
共同研究者	木村 竜士	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学科	准教授
共同研究者	秦 隆志	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学科	教授

1 はじめに

近年の農業において、植物を取り巻く環境情報を圃場毎に収集し、AIに学習させることによって、各圃場で栽培する作物の高収穫・高品質化に繋げようとする取組が多く見られるようになった¹⁾。しかし、農家は実際には環境情報だけではなく、果実や葉の数や色艶など視覚から得られる情報に基づき、栄養生長と生殖生長のバランスや病気の予防などを考えながら適切に摘果や摘葉などを行う必要がある為、多地点で所有する圃場に対して適宜目視巡回を行っているのが実情である。今後の農業のAI開発において、複数存在する圃場における視覚情報の収集と共有が要求課題の1つとなることが予想される。一方、視覚情報としてカメラ画像をそのまま収集しようとした場合、データ容量が大きくなるため、その通信やストレージに掛かるコストだけでなく、AIの学習コストも大きくなるという問題が発生する。また、近年、低速であるが低コストで長距離通信が可能なLPWA(Low Power Wide Area)が発展してきており、高知県などの山間の圃場が多いエリアでは、このLPWA 伝送システムが他の大容量システムに比べて安価に構築しやすく、利用しやすい通信手段として注目されている²⁾。

LPWA を利用したビニールハウスの環境計測は既に商用化され始めており、研究としては仙台高専の股村・千葉の取り組みなどが挙げられる³⁾。現状では、温度や湿度など環境データをLPWA 通信によってやり取りするのが一般的である。ビニールハウスへ監視カメラを設置する取り組みもあるが、その画像情報を加工して植物生長の指標として農家に提供するようなシステムはまだ見られない。植物の生長に関しては、茎や葉が肥大する栄養生長と、果実が肥大する生殖生長の2種類があり、農家は適切に摘葉や摘果を行うことで、この2つのバランスを取っている。「植物生長に関わる視覚的特徴」として、葉や茎の面積や色艶、果実の面積や色艶などが挙げられる。また、摘葉や摘果する量による植物生長への影響はよく知られている⁴⁾⁵⁾。一方で、植物生長や生殖成長に関連する特徴量は、画像を中心とした膨大なデータであり、数値データ化や特徴量の指標化などは進んでいない。

本研究では、環境情報と視覚情報を取得できる統合型の環境計測装置を開発し、高解像度の可視カメラと熱画像カメラを用いて得られた画像データから、生育情報となる植物の特徴量を画像解析により抽出した⁶⁾⁷⁾⁸⁾。そして、2地点の圃場においてLPWA 通信実験を行うことで、本環境計測装置を利用したLPWA による多地点圃場共有システムの検討を行った。

2 観測装置と撮像データ

2-1 観測装置の概要

図1・2に、ビニールハウス内での利用を目的とした、可視カメラと熱画像カメラを搭載した統合型の環境計測装置を示す。図1は観測装置の構成図であるが、一般的なビニールハウス用の環境計測装置に搭載されている温湿度センサ、日射計に加えて、CO₂濃度センサを搭載している。さらに、植物画像を取得するため、可視カメラとして800万画素のPi カメラモジュールを、熱画像カメラとして4,800画素(60×80)の近赤外線による放射温度カメラ(FLIR製Lepton2.5)を使用している。図2には観測装置の外観と装置ボックス内部の様子が示されている。オンボードコンピュータとセンサ類、カメラ類は上部の装置ボックス内に入っている。装置ボックスの下部に放射シールドを付けており、内部に温湿度センサを設置し、下方に設置したファンで強制的に通風している。データ取得に関しては、センサデータは10秒毎に、画像データは1分毎に、オンボードコンピュータ内のSDカードに記録している。可視画像は、保存容量を圧縮するため、8万画素としている。

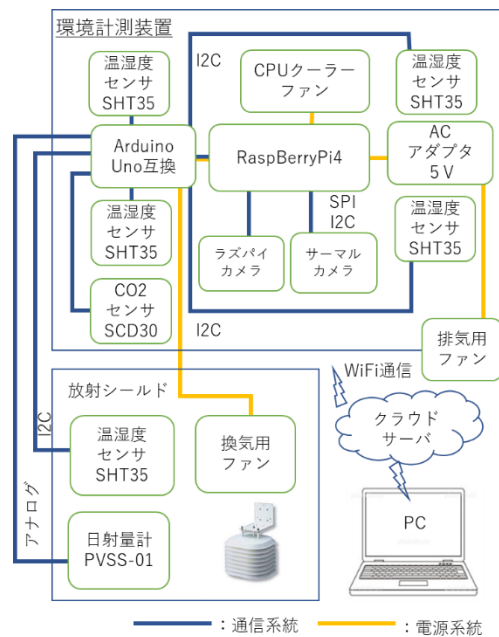


図1 観測装置の構成図

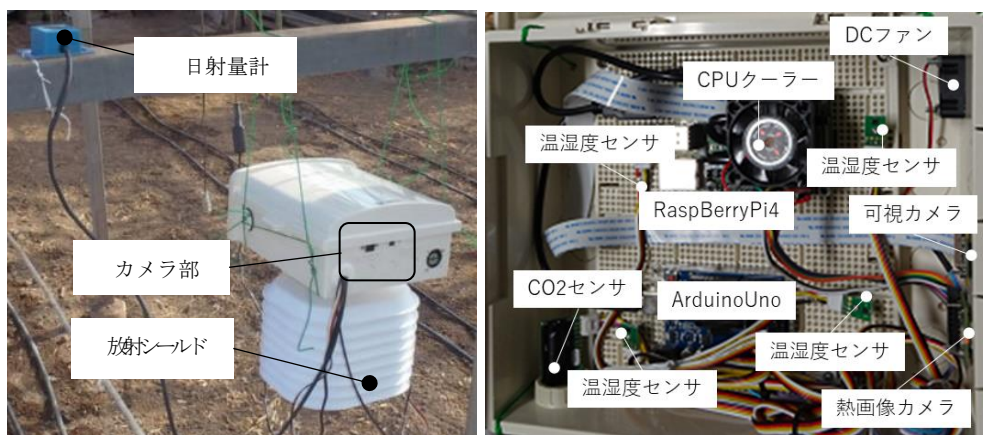


図2 観測装置の外観（左）と装置ボックス内部（右）

2-2 撮像データの例

高知県での施設園芸によるピーマン栽培は、9月頃に定植した後、10月下旬以降、翌年の6月頃まで、収穫し続けるのが一般的である。環境計測装置はビニールハウス内に設置し、2020年10月中に複数回動作確認を兼ねた測定を行った。今回は2020年10月に取得したデータを使用する。

環境データであるハウス内の日射量、気温、飽差の例を図3に示す。日が昇り始め、日射量が大きくなると気温は高くなり、9時頃から12時頃に日射量と気温共にピークとなり、その後気温は緩やかに下がっていく。日射量の変動については妥当と考えているが、絶対値に関しては較正作業を検討している。ハウスは南北棟の屋根型ハウスであり、環境計測装置を設置した場所がハウスの東側であるため、午前中に日射量や気温のピークがある。飽差は、ある温度と湿度の空気にあとどれだけ水蒸気の入る余地があるかを示す指標であり、農作物の効率的な生長には、3~6 g/m³程度が良いとされている。10月は日中のハウス内温度が高くなり、天窓開放するため、日中の飽差は大きい値となっている。

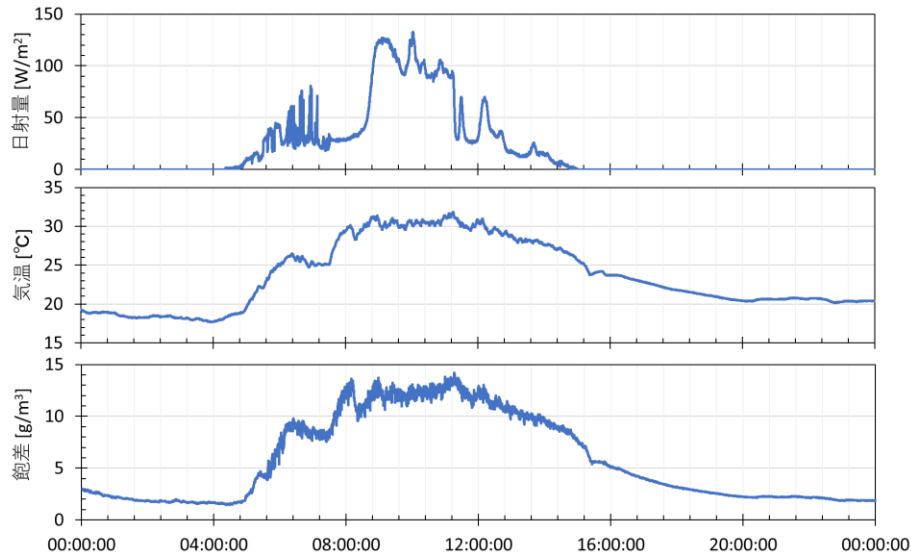


図3 環境計測装置のデータ例 (2020年10月14日)

可視および熱画像カメラによる撮像例を図4に示す。10分毎に取得した10月14日の24時間分のデータから、3時間毎の画像のみを示している。可視画像では6時頃の日の出前からハウス内の様子が撮像されており、日中は日の当たり方の変化が見られ、17時頃の日没前頃からは暗くなっている。一方で、熱画像カメラでは、夜間であってもハウス内の様子を撮像できており、日の出前はハウス内全体に気温が低く、日中はハウス内全体が熱くなり、日没後は徐々に温度が下がっている様子を撮像できている。可視カメラと熱画像カメラは共に正常に動作しており、圃場の様子を確認するのに十分であることが確認できた。

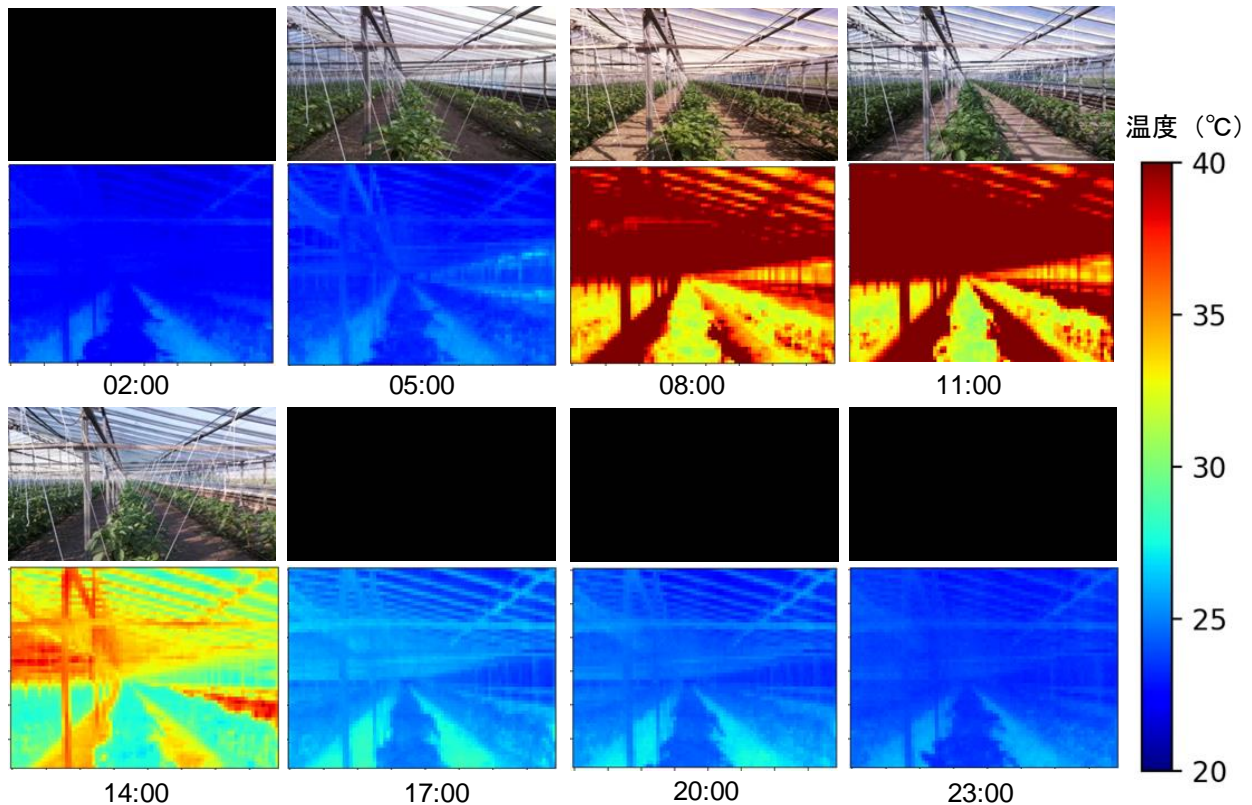


図4 可視・熱画像カメラによる1日の変化の様子 (2020年10月14日)

3 画像処理と特徴量抽出

3-1 熱画像からの表面温度抽出

得られた熱画像データの妥当性を確認するため、ピーマンの葉の表面温度を抽出する。可視画像と熱画像の視野が異なるため、厳密な視野合わせは画像取得後に手動で調整した。図5左に示す黄色い枠が熱画像の視野に相当する。図5に赤い四角の枠として示すように、可視画像からピーマンの葉に該当する領域を選び、熱画像の同じ領域の温度を平均値として抽出した。熱画像上でピクセル数を2×2ピクセル、4×4ピクセル、6×6ピクセルの場合に、24時間分の表面温度を算出したが、差は極めて小さかったため、今回は4×4ピクセルの領域を使用した。

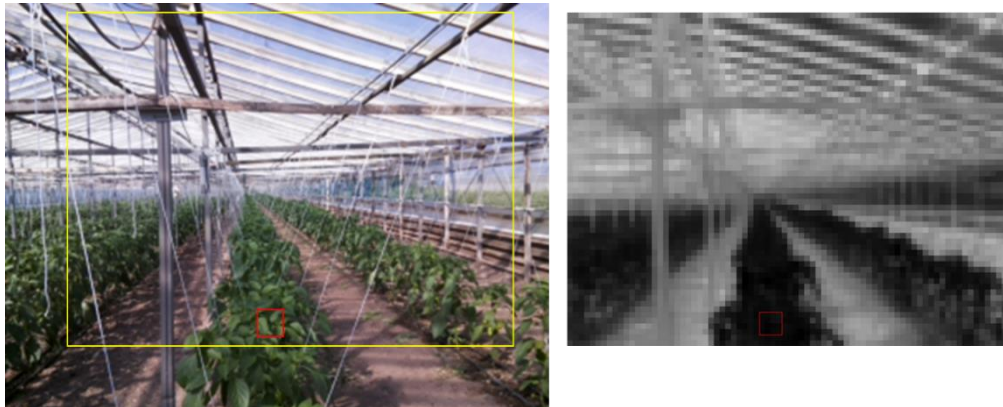


図5 可視画像と熱画像でのピーマンの葉の領域選択の例（2020年10月14日12時00分頃）

図6で、抽出した葉の表面温度を、他の温度データと比較する。葉の表面温度とオンボードコンピュータのCPU温度は変動率が大きいので、10分間の移動平均値を重ねて表示させている。明け方以降、ハウス内気温の上昇と同時に葉の表面温度は上昇しており、午前中にピークに達している。夜間に3℃程度あった、ハウス内気温と葉の表面温度との差は、午前中の気温上昇時に温度差が小さくなり、11時頃には温度差がほぼない状態となった。これは、日射量が大きくなった時間帯に、植物の葉などからの蒸散が活発となり、葉の表面温度が下がったことによると考えられる。その後、ハウス内気温が下降する間は、より緩やかに葉の表面温度が下降し、夜間の最低気温時には、ハウス内気温に比べて3℃程度高い状態を維持している。オンボードコンピュータのCPU温度はハウス内気温と比較して、夜間で10℃程度、日中で15℃程度高い状態で推移している。観測装置内では、可視画像カメラからCPUまでの距離が少しあるが、CPU周辺の熱源などは、可視画像カメラへのノイズ源となっている可能性がある。そこで、葉の表面温度に関して、10分間の移動平均値からの差を算出し、図6の下段に示す。夜間は、葉の表面温度の温度変動が0.5℃程度であるのに対し、CPU温度の上昇時あるいはCPU温度が高い状態の時は、温度変動が1.0℃程度と大きくなっていることを確認できる。CPUなどによる装置ボックス内の熱源が、熱画像の温度変動に対して、影響を及ぼしてはいるが、その影響は小さく、葉の表面温度の時間変化の傾向を十分確認できる。

今回利用しているハウス内の環境情報を考慮すると、ハウス内温度と葉の表面温度との関係性は妥当であり、熱画像からの温度抽出データは相対的な変化においては、十分利用できると考えられる。一方で、葉の表面温度の絶対値に関しては、今後、厳密な校正実験などで確認する必要がある。

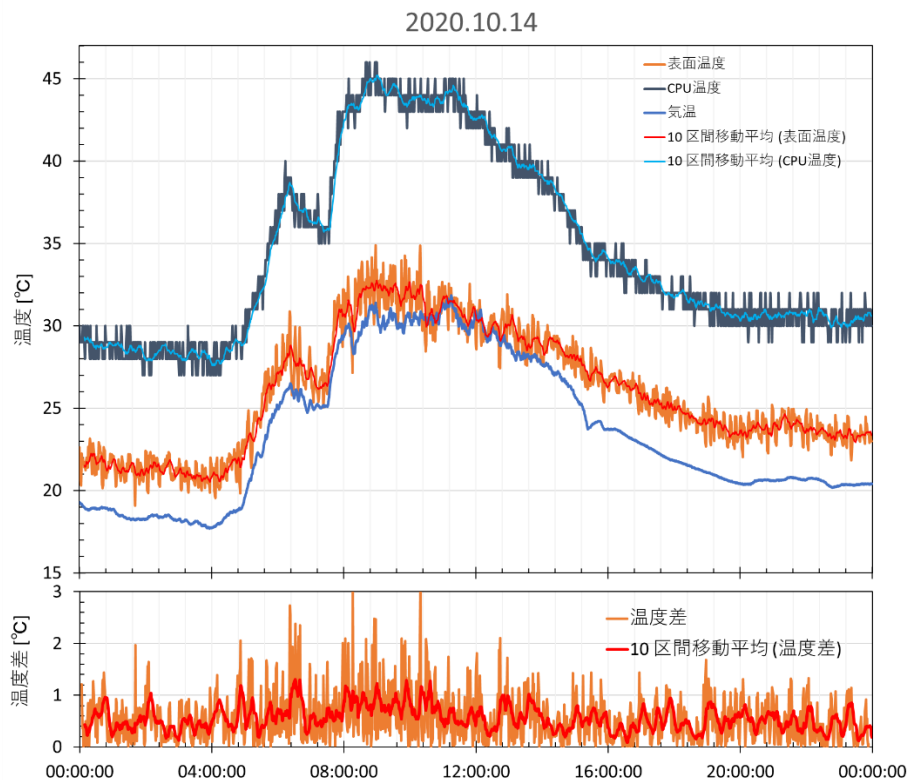


図6 温度の時系列データの例（2020年10月14日、上段はハウス内気温、オンボードコンピュータのCPU温度、葉の表面温度、下段は葉の表面温度の移動平均からの変動）

3-2 可視画像からの実領域の抽出

前節では、ピーマンの葉を目で見て領域を選択したが、可視画像を画像処理することで、妥当な領域として選択することが可能である。今回、深層学習を用いた物体検出により、可視画像からピーマン果実の領域を抽出することを試みた。緑色果実は、人間でも葉や茎と見分けが付きにくい、この手法により的確に果実領域の特定が可能となる。事前に画像を学習させた検出モデルを環境計測装置のオンボードコンピュータに搭載させれば、特徴抽出に特化した利用が可能である。しかし、このような果実の物体検出を基礎とした応用技術においては、誤検出や未検出は避けなければならない問題となる。検出精度の向上には、学習画像を多く用意し、画像内の全ての果実の座標を記録していく「アノテーション」という作業が必要となる。しかし、人間がこの作業を行うことは人的コストが掛かるうえ、緑色果実の場合は葉との見間違いや見落としなどの人的ミスが発生しやすい。このような問題を解決するため、緑色果実であるピーマンを検出対象として、数枚の畝のアノテーション画像をデータオーグメンテーション（データ拡張）の手法により水増しを行い、学習させることで検出精度の向上を試みた。

まず、ピーマンの畝から距離1m高さ1m角度15°で畝と平行に約70cm間隔で同じピーマンが写らないように撮像した8枚の画像に対し、ピーマン位置のアノテーションを行った。次に、その8枚のアノテーション画像に対して、1枚の水増し画像作成法を図7のような「左右反転、拡大縮小、回転、ぼかし、ノイズの追加、明暗」の6種類の組み合わせとし、8枚の画像を40倍に拡張した。物体検出手法YOLOv3を用いて、元の画像8枚+拡張画像320枚を学習8:評価2で100回学習させたモデルと、元の画像8枚のみを学習8:評価2で約10000回学習させたモデルで別の畝の画像からピーマンを検出させた結果を図8に示す。拡張なしでは葉の誤検出が2枠あるが、拡張ありでは葉の誤検出がなく、ピーマンの未検出も少なくなったことが分かる。

本検出モデルを環境計測装置に搭載し、可視画像から果実や葉などの実領域を検出させて、その領域内で前節の熱画像による解析を行う事で、果実や葉の表面温度の抽出が容易になると考えられる。本手法による実領域の抽出は、可視画像に限らず、熱画像で検出モデルを作成すれば、熱画像から直接実領域を抽出することも可能である。

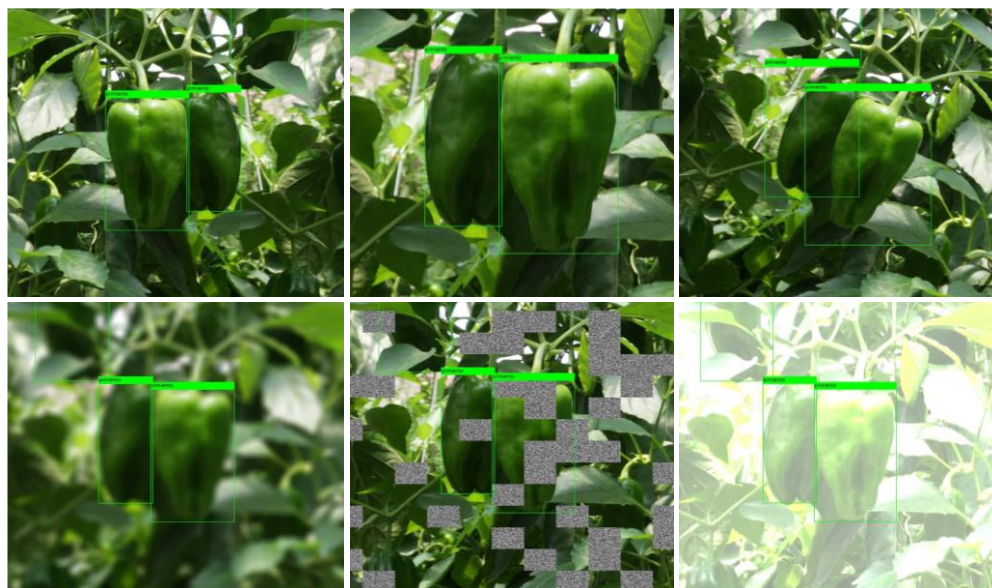


図7 データ拡張例
 (左上：左右反転・拡大縮小・回転)
 (左下：ぼかし・ノイズ追加・明暗)

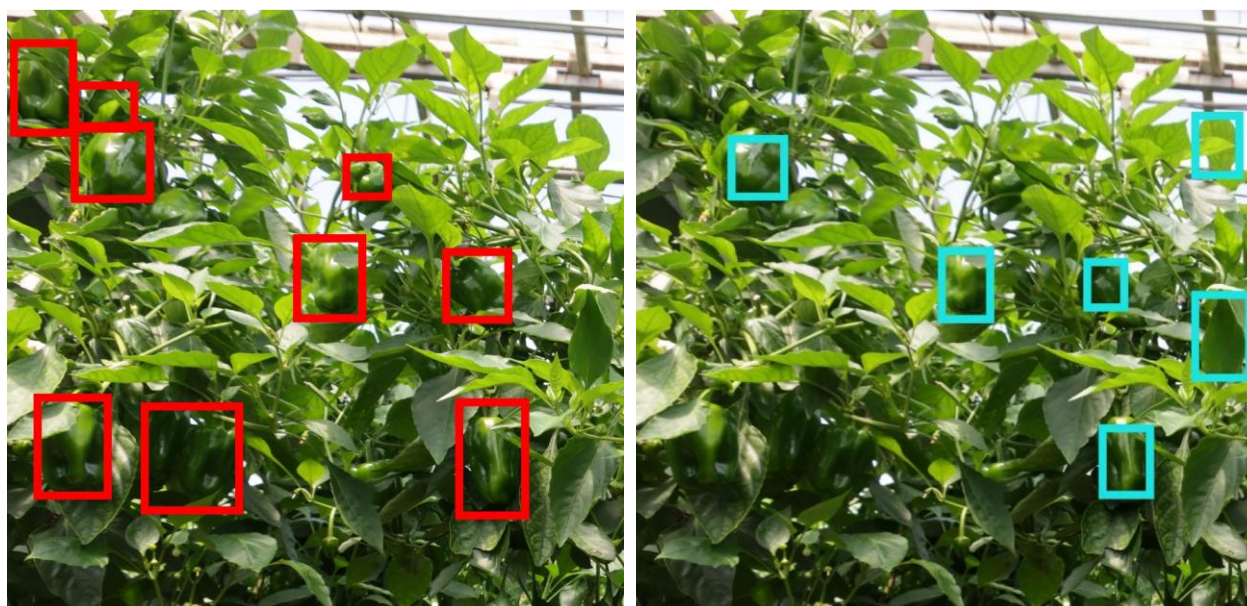


図8 ピーマン果実の検出結果 (左：データ拡張による検出モデル 右：通常の検出モデル)

4 LPWA による多地点圃場共有システム

本章では、LPWA による多地点圃場共有システムの検討を行う。開発した環境計測装置にはオンボードコンピュータ (RaspberryPi) が搭載されているため、これに LPWA 通信端末を接続することにより、前章までの手法で指標化した植物の視覚的特徴量を、他の圃場に設置した同様の境計測装置に送信することができる。受信側の圃場にはインターネット環境があることが望ましく、インターネット環境の無い送信側の圃場の情報を受信側の圃場の環境計測装置が受け取り、2 地点の圃場の情報をそのままクラウドにアップできることになる。本環境計測装置と LPWA 通信端末を利用すれば、インターネットの拠点を 1 箇所作ることで、多地点の圃場の情報を安価に共有するシステムが実現できる。

前章までの実験を行った圃場ではインターネット環境が整備されていたため、この圃場を LPWA 受信側とし、図9のように約1km離れたインターネット環境の無い別の圃場^{9) 10)}をLPWA送信側と設定した。具体的には、今回、高知県安芸郡芸西村の2地点のビニールハウス間(940m)でのLoRa通信実験を実施した。受信側の圃場は標高約5mの場所にあり、LPWA受信機をハウス内に設置、送信側の圃場は標高約21mの場所にあり、LPWA送信機をハウス外に設置した。標高差はあったものの、互いのハウスの見通しは無い場所であった。LPWA通信には、920MHz帯のLoRaモジュールES920LRと、マイコンはRaspberryPi Zero Wを用いて、送信機と受信機の組み合わせとして利用した。LoRa変調においては、信号の拡散具合を決める拡散率(Spreading Factor, SF)と、帯域幅(BandWidth, BW)を選択できる。拡散率を上げるか、帯域幅を小さくするほど、雑音耐性が高くなり、通信距離が伸びるが、伝送速度が遅くなる。ただし、送信機、受信機ともに、同一の設定にしておく必要があり、基本的には運用期間中は一定の拡散率と帯域幅となる。また、受信強度(Received Signal Strength Indicator, RSSI)は、受信した電波の強度を電力で示す指標であり、1mWの電力を基準値とするデシベル(dB)で表した単位dBmを使用している。2020年12月16日にSF(拡散率:7~12)とBW(帯域幅:62.5, 125, 250, 500kHz)を定期的に変更することで受信強度RSSI(dBm)を計測したグラフを図10に示す。13時25分に送信機を送信側ハウスに設置した後、13時30分に受信機を受信側ハウスに設置して、13時50分までの約20分間の計測を行った。時折、BWが小さい時にRSSIが小さくなる傾向が見られたが、それ以外でBWとSF値に対する受信強度RSSIに特段大きな傾向は見られず、-120dBmを平均とした概ね良好な値を示した。2地点ハウス間の通信時間帯は、ほぼ全てのモードで安定した通信を確認することができた。



図9 高知県安芸郡芸西村における2地点ハウス間(940m)のLPWA通信実験

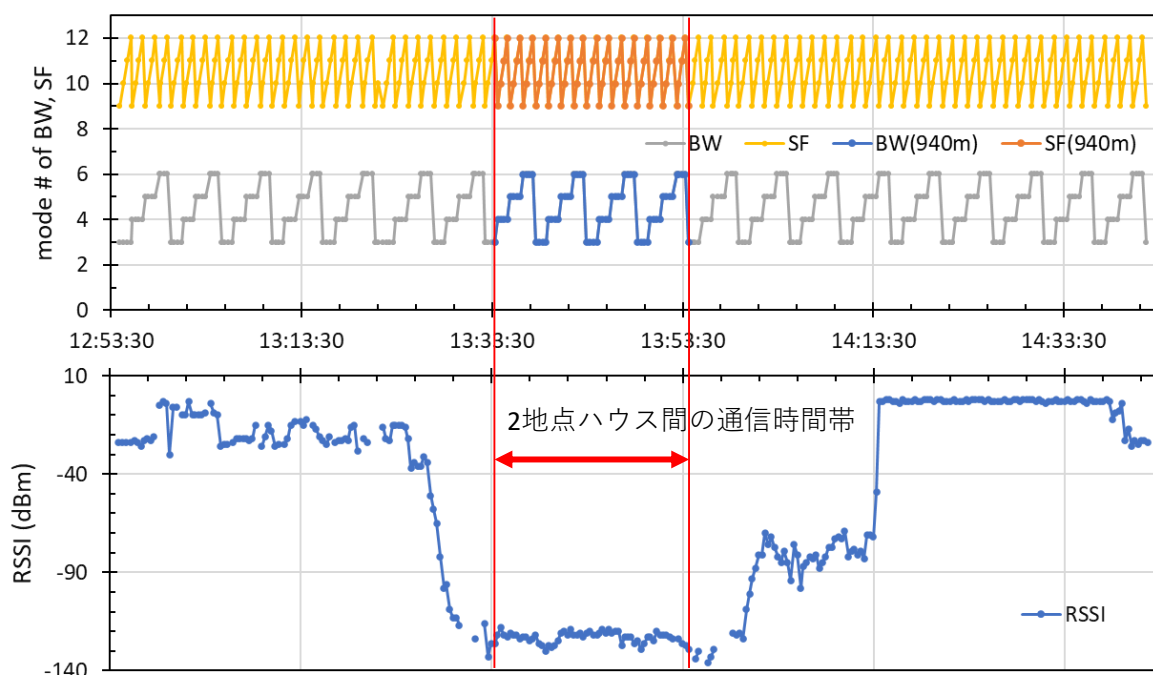


図 1 0 2020 年 12 月 16 日における SF (拡散率 : 7~12) と BW (帯域幅 : 62.5, 125, 250, 500kHz) を定期的に変更した 2 地点ハウス間の受信強度 RSSI (dBm) 計測

5 まとめ

本研究では、環境情報と視覚情報を取得できる統合型の環境計測装置を開発し、高解像度の可視カメラと熱画像カメラを用いて得られた画像データから、葉の表面温度などの植物の特徴量を画像解析により抽出した。また、これらの画像データから植物の特定部位の領域を抽出するには、深層学習による物体検出モデルを本環境計測装置に搭載することが有効であることを示した。さらに、本環境計測装置を利用した LPWA 通信による多地点圃場共有システムの検討を行い、高知県安芸郡芸西村の約 1km 離れた見通しのない 2 地点圃場間の LPWA 通信実験において受信強度の平均値が -120dBm で得られることを示した。これらの結果から、地域集落に点在する圃場において、植物生長に関わる視覚的特徴量を抽出して指標化した数値データを、LPWA 通信を利用することで 1 つのインターネット拠点に集約し、クラウドにアップロードすることで、多地点圃場での植物視覚情報を安価に共有できるシステムの実現が可能であることを示した。

【参考文献】

- 1) 亀岡孝治、農業 ICT-IoT・ビッグデータ・AI 活用で農業を成長産業へ: 5. 高品質果樹生産のための IoT 利用技術、情報処理、58(9)、806-809、2017
- 2) 笹岡由唯、上園波輝、上田真也、高田拓、大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発 : LoRa 通信実験と気球観測計画、高知高専学術紀要、64、19-27、2019
- 3) 股村祐希、千葉慎二、LPWA による複数圃場環境の計測制御システムの開発、情報処理学会第 81 回全国大会、2019
- 4) 安東赫、原田正志、岩崎泰永、東出忠桐、未熟葉の摘葉処理がトマトの生育および乾物分配に及ぼす影響、農研機構研究報告 野菜花き研究部門 = BULLETIN OF THE NARO、CROP SCIENCE (3)、9-18、2019

- 5) 梶田正治、野村眞史、トマトの摘心および果実除去が根の養分吸収と酸素消費に及ぼす影響、園芸学会雑誌、64(1)、73-78、1995
- 6) 木村竜士、金村匡将、中山信、高田拓、園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討、高知工業高等専門学校学術紀要、66、37-44、2021
- 7) 高田拓、上田久生我、木村竜士、中山信、可視・熱画像データ解析による植物生長に関する特徴量抽出手法の検討、高知工業高等専門学校学術紀要、66、57-65、2021
- 8) 島田海大、中山信、高田拓、木村竜士、松浦史法、山崎容次郎、データオーグメンテーションを利用した深層学習による圃場でのピーマン物体検出、第26回高専シンポジウム、PELE-06、2021
- 9) 中山信、高田拓、木村竜士、岡宏一、2変数入力システム同定法によるビニールハウス内の気温・飽差モデル—春秋期におけるモデルの短期間構築と評価—、農業情報研究、30(1)、1-12、2021
- 10) 坂口稿成、中山信、木村竜士、高田拓、松浦史法、山崎容次郎、通信型環境計測装置を用いたビニールハウス窓開閉飽差制御システムの開発、第26回高専シンポジウム、PELE-15、2021

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討	高知高専学術紀要	2021年4月1日
可視・熱画像データ解析による植物生長に関する特徴量抽出手法の検討	高知高専学術紀要	2021年4月1日
データオーグメンテーションを利用した深層学習による圃場でのピーマン物体検出	第26回 高専シンポジウム	2021年1月23日
可視および熱画像を用いた植物生長の特徴量抽出方法の開発と初期解析	令和2年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集	2020年9月26日
ハウス圃場で利用できる可視・熱画像カメラ付き環境計測装置の開発	令和2年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集	2020年9月26日
YOLOv3 によるピーマン検出の空間的関連付け	令和2年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集	2020年9月26日