

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

高田 拓^{*1}・上田久生我^{*2}・木村竜士^{*1}・中山 信^{*1}・上田真也^{*3}

Investigation of extraction method for plant growth using visible and thermal images

Taku TAKADA^{*1}, Kuuga UETA^{*2}, Ryushi KIMURA^{*1},
Shin NAKAYAMA^{*1}, and Shinya UETA^{*3}

Summary

An integrated fixed-point environment measuring device for small greenhouses, is being developed. The device is equipped with a visible and thermal image camera, along with a temperature/humidity sensor and a pyranometer. In this study, a method was investigated for extracting features related to plant growth using visible and thermal image data. Using the visible and thermal image data acquired in a greenhouse in which green peppers were being cultivated, the surface temperature of the leaves was calculated from the thermal image, and the fluctuation pattern with the surface temperature of the leaves was compared with the time-series data, such as the temperature inside the house. It is believed that these methods for extracting the surface temperature of green peppers can be used to obtain accurately the conditions for dew condensation in winter. In addition, it was found that an appropriate extraction area can be determined by edge detection and/or the superpixel method of visible images to extract the surface temperature and features of green peppers. As a result, it was possible to compare the visible and thermal images of plants obtained by the fixed-point environment measuring device with the environmental data in the time series, and it should be possible to extract the features related to plant growth in the future.

1. はじめに

近年、農業分野では、ICT（Information and Communication Technology）やIoT（Internet of Things）技術を駆使したスマート農業が広がりつつある¹⁾。その中で、植物の環境情報や生育情報の計測は基盤技術であり、特に温度や湿度などの環境計測に関しては、様々な装置などが開発・利用されており、比較的普及が進んでいる分野である^{2,3)}。環境情報を監視することで、適切な栽培条件に合うように、温度や湿度管理を行うことが可能であり、収穫物の収量増加につながっている例が多い。一方の生育情報に関する計測は、計測装置が高価であったり、画像データから適切な情報として抽出することが難しかったりするため、一般的に普及しているとは言い難い。しかしながら、生育情報を的確に把握することは、農作物の収穫予測や病気判断などにつながり、農作業の効率化に大きく貢献できる可能性があり、研究開発が積極的に進められている^{4,5)}。

*1 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
*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 5年生
*3 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員

熱画像（サーモグラフィー）カメラは、物体から放射される赤外線を用いて、物体の熱分布を撮像する。近年は、熱画像カメラが比較的安価に入手できるようになり、様々な分野で利用されている。非接触で植物の表面温度分布の時間変化を計測することができれば、植物の生育情報を間接的に推定できる可能性がある。一方で、施設園芸で利用するビニールハウス内などは、高温・高湿度の環境であり、計測装置自体が熱を持った状態となりやすく、熱画像カメラへのノイズ源となりうる。ビニールハウス内で撮像した植物の熱画像データを適切に処理し、植物の生育情報の取得につなげることが求められている。従来、植物の植生や生育状況を見るために、NDVI（正規化植生指数：Normalized Difference Vegetation Index）が用いられてきた。光合成が活発な植物では、赤色可視光を吸収し、近赤外域の電磁波を反射するため、それらの比を利用した指数である。近赤外域の波長を利用する点で共通ではあるが、熱画像カメラでは温度という物理量が得られるため、他のパラメータとの物理的な関係性について踏み込んだ議論が可能となる。

また、最近の安価な高精度カメラにより、高精度な植物の画像取得が容易になっている。一方で、植物画像が含んでいる様々な植物生長に関わる情報を抜き出すためには、植物の花、実、葉、茎などを認識する必要があり、栽培中の植物の場合、処理が複雑になっている^{6,7)}。花や実に関しては、深層学習による検出の例があり、有望視されている⁸⁾。一方で、葉や茎に関しては、撮像した画像上では様々な形状となるため、深層学習による領域特定は難しい。ただし、栽培中の植物の場合、時間的な変化が非常にゆっくりであることと、葉や茎の生長する範囲が限られているため、一度正確に葉や茎の領域検出がなされた後は、それらの領域を維持し続けることが比較的容易であると考えられる。

本研究では、高解像度の可視カメラと熱画像カメラを用いて、植物の生育状況を撮像し、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することを目的とする。解析には、開発中の統合型の環境計測装置を利用した。

2. 環境計測装置と撮像データ

2.1 環境計測装置の概要

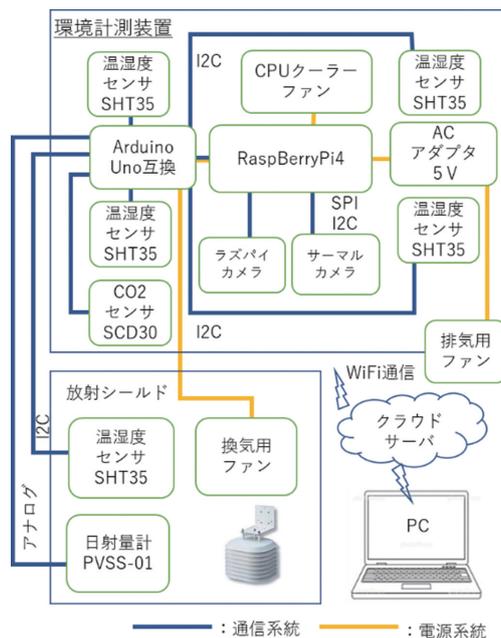


図1 環境計測装置の構成図

現在、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開発中である⁹⁾。図1に環境計測装置の構成図を示すが、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、環境計測装置の外観と装置ボックス内部の様子を示す。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、下部に設置したファンで内部へ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。

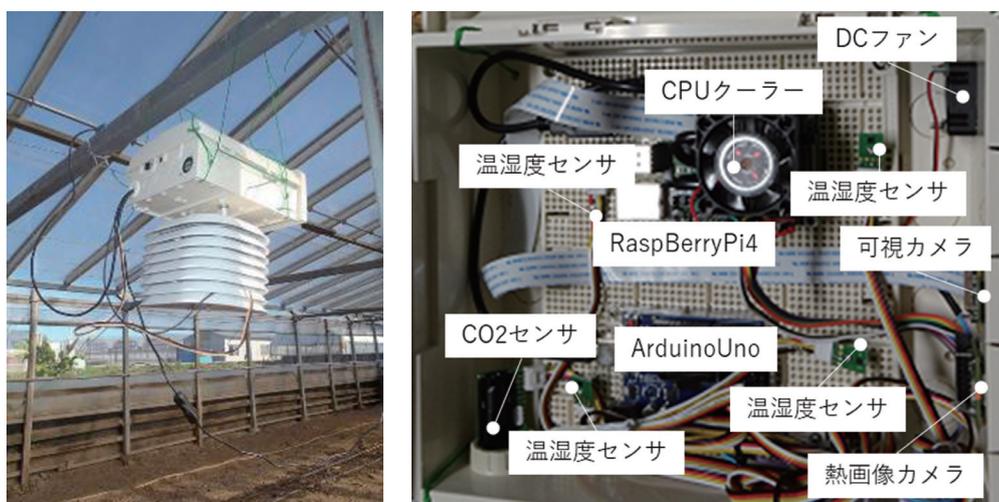


図2 環境計測装置の外観(左)と装置ボックス内部(右)

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。

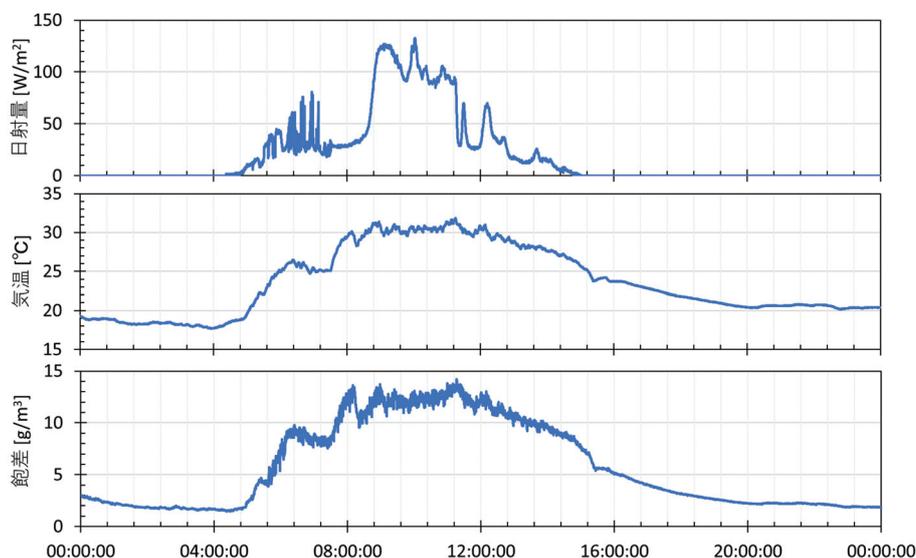


図3 環境計測装置のデータ例(2020年10月14日)

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、 $3 \sim 6 \text{ g/m}^3$ 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。

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。

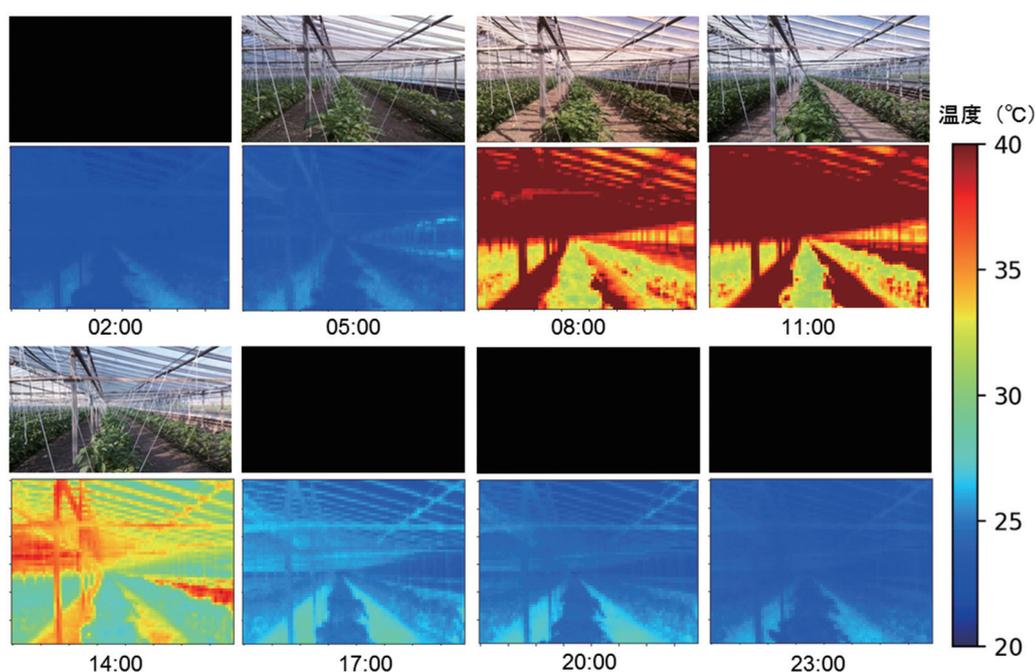


図4 可視・熱画像カメラによる1日の変化の様子（2020年10月14日）

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。

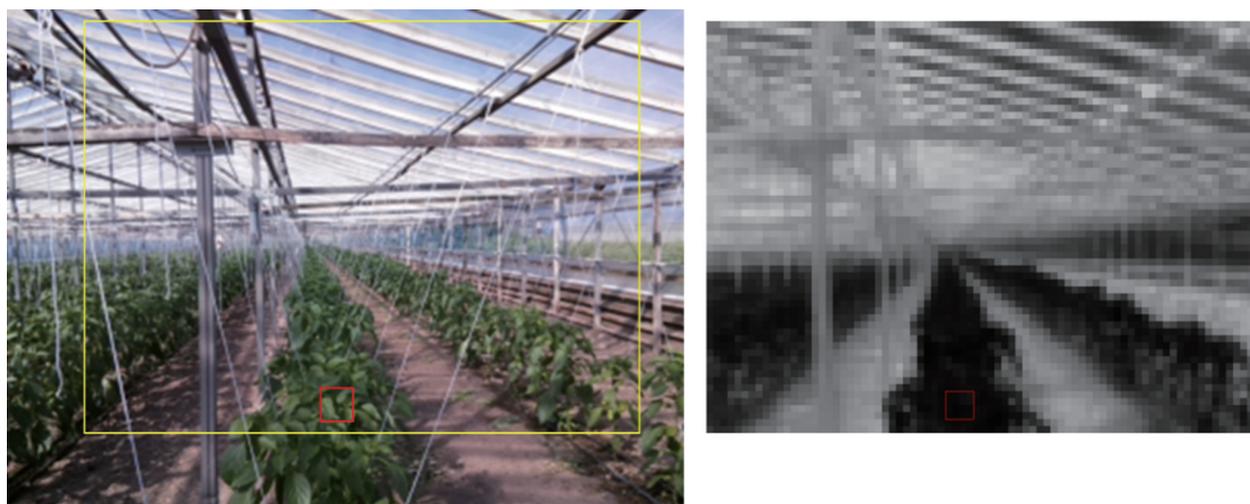


図5 可視画像と熱画像でのピーマンの葉の領域選択の例（2020年10月14日12時00分頃）

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いため、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、その影響は小さくなく、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、十分利用できると思われる。一方で、葉の表面温度の絶対値に関しては、今後、厳密な較正実験などで確認する必要がある。

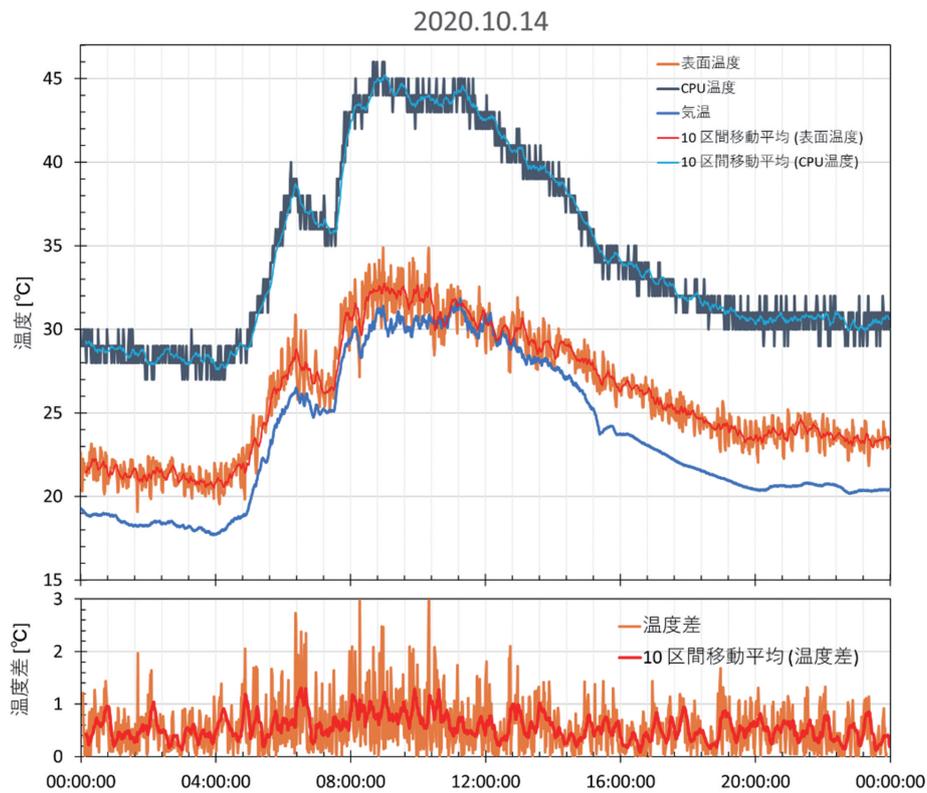


図6 温度の時系列データの例 (2020年10月14日、上段はハウス内気温、オンボードコンピュータのCPU温度、葉の表面温度、下段は葉の表面温度の移動平均からの変動)

3.2 可視画像からの実領域の抽出

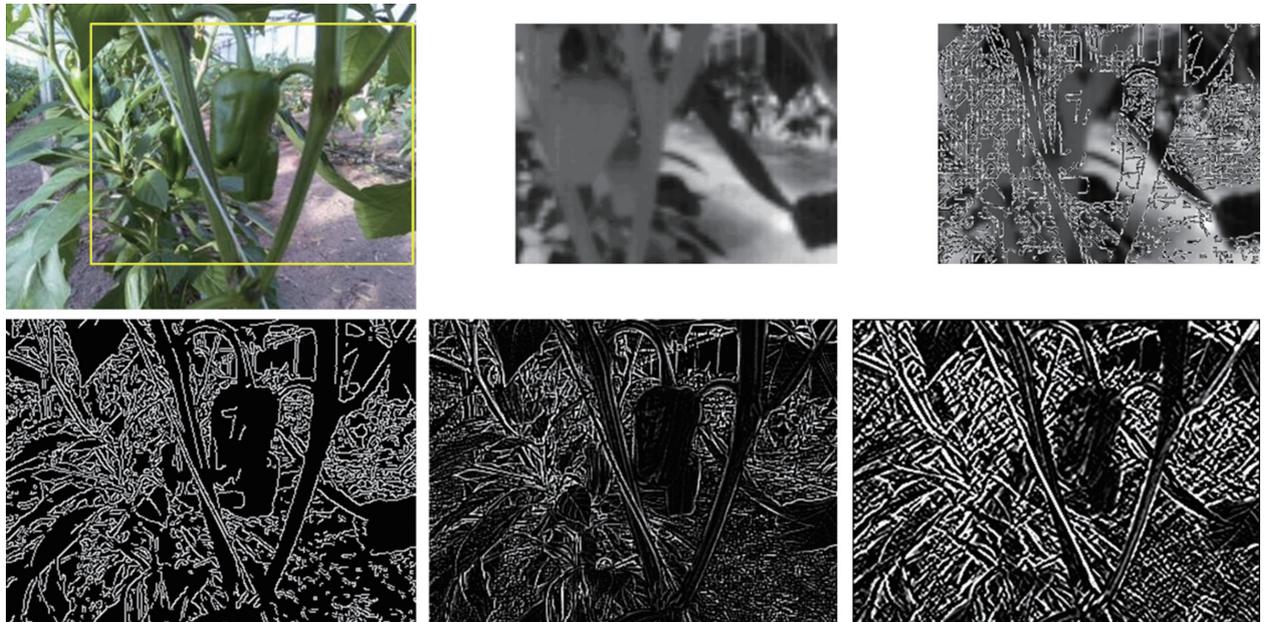


図7 ピーマン可視画像に対するエッジ検出の例 (2020年10月21日15時45分撮像、上段：左は可視画像と黄色枠の熱画像視野、中は熱画像、右は熱画像に可視画像のエッジ検出 (Cannyフィルタ¹⁰⁾) 結果を重ねたもの、下段：左は可視画像に対するCannyフィルタによるエッジ検出、中はLaplacianフィルタによるエッジ検出、右はSobelフィルタによるエッジ検出)

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。現在、2つの手法を検討している。1つ目は、ピーマンの可視画像に対して、エッジ検出をする手法である。図7にエッジ検出した例を示す。3種のフィルタ例を示しているが、いずれもピーマンの実や茎についてはエッジを的確に検出できている。右上の図は、熱画像にエッジ検出の結果を重ねたものであるが、熱画像の視野がやや狭いため、可視画像より小さい範囲となっている。また、画像取得後に2つの画像の視野合わせをしたが、比較的近接した物体を撮像しているため、エッジ検出と熱画像の形状が合っていない部分が多い。今後、2つのカメラの視野合わせをした上で測定を行うことで、ピーマンの実などの領域が明確となり、抽出領域の妥当性を担保するのに有用であると考えている。

2つ目は、画像の色情報などが類似なピクセル同士をクラスタリングするスーパーピクセル化の利用である。今回は、アルゴリズムが単純で計算時間の速いSLIC (Simple Linear Iterative Clustering) と呼ばれる手法を用いた¹¹⁾。図7左上のピーマン画像全体に対して、スーパーピクセル化したものが図8左である。ピーマンの実、茎、葉の領域を、類似色毎の大きなピクセルに分離できている。スーパーピクセル化では、解像度の高い画像に対して非常に小さなスーパーピクセルに分類する場合に、計算時間がかかる。そのため、ピーマンの実などのように対象が決まっている場合は、図8中に示すように、切り抜いたピーマンの実周辺の画像領域に対してスーパーピクセル化する方法が考えられる。スーパーピクセル化した場合、各ピクセルに対してスーパーピクセルの通し番号が付けられるため、スーパーピクセル毎に、熱画像や可視画像のピクセル値を平均化して特徴量としやすい。図8右は、各スーパーピクセル内の平均色を表示したものであるが、ピーマンの実の内部に関しては部分的な平均色を取り出せている。一方で、領域判定があいまいな部分では、灰色などの実際には存在しない平均色となっている。可視画像を扱う際は、対象物に当たる光によって色味が変化するが、スーパーピクセルのサイズが対象物に対して十分小さければ、ピクセル領域の形状に与える影響は小さいと考えている。

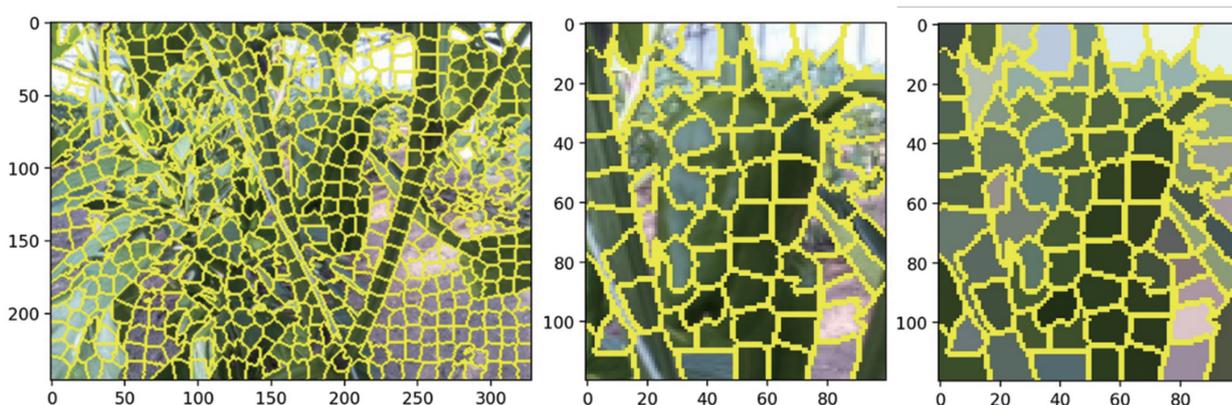


図8 ピーマンの可視画像に対するSLICによるスーパーピクセル化の例（左：図7の可視画像に対して700個のスーパーピクセル化、中：ピーマンの実周辺の切り抜き画像領域に対して80個のスーパーピクセル化、右：スーパーピクセル内の平均色を表示）

4. 解析結果の検討と今後の課題

今回は、ピーマンの葉について、熱画像の温度情報を抽出することで、葉の表面温度を見積もった。定性的な解釈として、葉からの蒸散量の多寡を考えると、ハウス内気温と葉の表面温度との差

の時間変化を説明できた。今後は定量的に葉の蒸散量などの植物の特徴量を見積もることができる可能性がある。

また、ピーマンの実について、同様の手法で、実の表面温度を抽出することを考えている。ピーマンの実は、収穫物であり、実の生体情報の把握は重要である。例えば、ピーマンの実は、特に冬場などの日の出後の気温上昇時に、実が結露しやすいことが知られている。結露した状態が長引くと、カビや病気の原因となるため、避ける必要がある。一方で、結露を避けるために、夜間から暖房などでハウス内を十分温めるなどの対策が可能であるが、暖房のための燃料費が高くつくなどの問題が生じる。実の表面温度の変動パターンを正確に知ることができれば、燃料費などをできるだけ抑えた気温・飽差管理が可能となる。

現状では、植物の特徴量として、熱画像データの温度抽出のみを扱ったが、可視画像からは明るさや色味などの情報が得られるため、植物の葉・茎・実毎に、適切な選択領域で情報を抽出することで、植物の生態に関わる特徴量を得られる可能性がある。また、長期計測により、植物の生長と得られた特徴量との関係を探っていきたい。今後は、深層学習を用いた手法を積極的に組み合わせることを考えている。具体的には、形状や色に特徴がある実や花などに関しては、深層学習を用いた物体検出手法を利用する。また、物体検出や領域選択をした後に、領域内の特徴量と他の環境パラメータとの関係性を探る際には、深層学習を利用するのが有効と考えている。

5. まとめ

本研究では、統合型の固定環境計測装置で取得したピーマン栽培のビニールハウス内で取得した可視・熱画像を用いて、特徴量抽出手法の検討を行った。熱画像データから抽出したピーマンの葉の表面温度は、ハウス内気温と共に上がり、ハウス内気温よりも緩やかに下がることから、妥当な結果であることが分かった。今後は、可視画像から、植物各部の形状を認識し、表面温度測定精度を上げること、また、葉や実の特徴量変化をより定量的に抽出する手法の開発を目指す。

謝 辞

ビニールハウス施設の利用に関して、高知県安芸郡芸西村の松本政治氏に感謝いたします。本研究は高橋産業経済研究財団の研究助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 農林水産省、スマート農業、<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>、閲覧2020年10月31日
- 2) 戸板裕康、小林一晴、教育用汎用基板Raspberry Piによる自律分散環境計測制御システム用オープンプラットフォーム (UECS-Pi) の構築、農業情報研究、25(1)、1-11、2016
- 3) 中野明正、安東赫、栗原弘樹、ICT農業の環境制御システム製作、誠文堂新光社、東京、2018
- 4) 高山弘太郎、「植物工学の研究展望」(第六回) 光合成診断技術、植物環境工学、31(3)、134-142、2019
- 5) 伊藤博通、「植物工学の研究展望」(第九回) Speaking Plant Approachと非破壊計測、植物環境工学、31(3)、134-142、2019

- 6) 川口達也、川上玲、池内克史、ブドウ摘みロボットのための RGBD 画像認識手法の基礎検討、情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)、16、1-8、2014
- 7) 八幡壮、小澤誠一、吉田武史、大川剛直、村上則幸、辻博之、大豆の生育情報を自動取得する画像センシング手法の開発、人工知能学会全国大会論文集2017年度人工知能学会全国大会（第31回）論文集、2E3-OS-36a-5、2017
- 8) 大村和暉、八幡壮、小澤誠一、大川剛直、村上則幸、辻博之、豆の生育情報を自動取得する画像センシング手法の開発：Single Shot MultiBox Detectorの導入、人工知能学会全国大会論文集2018年度人工知能学会全国大会（第32回）、2G3-OS-10c-02、2018
- 9) 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
- 10) Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:679-714, 1986
- 11) Achanta, R., A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, and S. Ssstrunk, Slic superpixels, EPFL Technical report, 149300, 1-15, 2010

受理日：2020年11月2日

