

## 葉の動態評価を活用した植物の応答に基づく自動灌水制御の提案

大沼 理巧<sup>†1</sup> 足立 量<sup>†2</sup> 小池 誠<sup>†3</sup> 峰野 博史<sup>†4</sup>静岡大学情報学部<sup>†1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科情報学専攻<sup>†2</sup>静岡大学大学院自然科学系教育部<sup>†3</sup>静岡大学大学院情報学領域/グリーン科学技術研究所<sup>†4</sup>

## 1. はじめに

近年、農業従事者の高齢化や新規就農者の減少によって高品質な果実を栽培する技術の喪失が懸念されている。高糖度トマト栽培のような高度な栽培技術は、熟練農家が培った植物に対する経験と勘によるものが大きく、新規就農者が高糖度トマトのような高品質果実を安定して栽培することは困難である。この問題を解決するため、後藤らの研究[1] (以降、先行研究) では草姿画像にOpticalFlow[2] (以降、OF) を適用し、萎れを定量化する自動灌水制御手法が提案されている。しかし密なOFを用いた手法には輝度変化に脆弱であるという課題があった。そこで本研究では、疎なCoTracker[3]を用いて植物の萎れを定量化し、自動灌水制御を行う手法を提案する。また実証実験を行い、収穫物の品質や灌水量を評価して提案手法の有効性を確認する。

## 2. 先行研究

先行研究では、草姿画像を収集し、植物体内水分が変化する前の時刻の草姿画像と現在時刻の草姿画像の OF を計算することで植物の萎れを定量化した指標 LWC を算出する。先行研究の課題として、輝度変化への脆弱性が挙げられる。LWC を計算する際に OF を用いているが、OF には輝度不変性 (2時点の画像の輝度分布が不変であること) という前提条件があり、2時点画像間で大きな輝度変化があると LWC を適切に算出できなくなる。輝度変化の大きい日の 14:30~14:32 の画像の輝度分布を図 1 に示す。輝度分布が似ている 14:30 の画像と 14:32 の画像の LWC の値は、-7.57、-7.55 とおおよそ同じ値が算出されるが、輝度分布が異なる 14:31 の画像の LWC は-1.49 と他画像の LWC とは大きく違う値が算出される。以上のように、日射によって輝度分布が変化すると LWC を適切に算出できなくなるという課題が存在する。

## 3. 提案手法

本研究では Transformer ベースの Object Tracking 手法である CoTracker を用いて Object Tracking を行い、前景

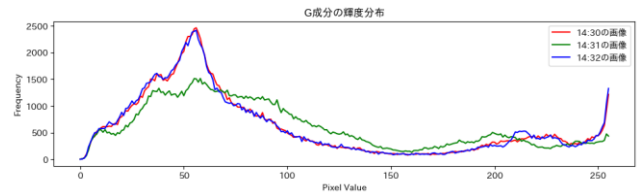


図 1 輝度変化が大きい日の画像とその輝度分布

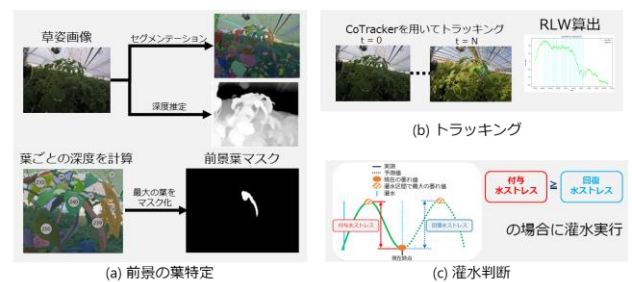


図 2 提案手法の概要

の葉の萎れの動きを、トラッキング対象である葉オブジェクトの座標の Y 軸方向の変化量として取得することで、萎れ具合に基づく水ストレス指標 RLW (Relative Leaf Wilt) を定義する。そして、LightGBM を用いて RLW の回復量を推定する機械学習モデルを学習し、推論結果に基づき灌水を実行する。提案手法は、大きく 3 つの処理ステップで構成されている。図 2 に各ステップの概要を示す。

## 3.1 提案手法概要

## 3.1.1 前景の葉特定

葉のトラッキングを行い葉の動態を評価することで RLW を算出するが、その際、葉の動きがよくわかる前景の葉のみをトラッキング対象にした。そこでセマンティックセグメンテーション技術と深度推定技術を用いて、前景の葉領域マスク画像を作成する。草姿画像に対してセマンティックセグメンテーションを行ったセグメンテーション画像と、深度推定を行った深度マップを取得し、セグメンテーション画像に対して深度マップを適用することでオブジェクトごとの平均深度を算出する。平均深度が最大である緑色のオブジェクトを前景の葉と決定し、前景の葉領域マスク画像を作成する。なお本研究ではセマンティックセグメンテーション技術として SAM[4]、深度推定技術として ZoeDepth[5]を採用した。

## 3.1.2 トラッキング

3.1.1 で特定した前景の葉領域の 50pixel に対して CoTracker を用いてトラッキングを行う。植物内水分量が

Proposal for automatic irrigation control based on plant responses using leaf dynamics quantification

<sup>†1</sup> RIKU OHNUMA, Faculty of Informatics, Shizuoka University

<sup>†2</sup> RYO ADACHI, Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University

<sup>†3</sup> MAKOTO KOIKE, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

<sup>†4</sup> HIROSHI MINENO, College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University/ Research Institute of Green Science and Technology, Shizuoka University

変化する前の座標情報を保存しておき、トラッキングした結果の座標との差分を計算することでRLWを計算する。

### 3.1.3 灌水判断

灌水判断に関する図を図2(c)に示す。現在与えている水ストレス（以降付与ストレス）をRLWから算出し、灌水した場合に回復する水ストレス（以降回復ストレス）を機械学習アルゴリズムを用いてリアルタイムに推定する。付与ストレスは前回灌水から現在にかけて、最大のRLWと最小のRLWの差分である。回復ストレスは現在灌水した場合に回復するRLWの量であり、毎分回復ストレスを算出する。両ストレスが等しい場合、もしくは付与ストレスが回復ストレスを上回る場合に灌水を行う。

## 3.2 基礎評価

### 3.2.1 輝度変化が大きい場合の動作確認

輝度変化が大きい日の茎径、LWC、RLWの動作を過去データを用いて検証した。輝度変化が大きい日の水ストレス指標の推移を図3に示す。LWCが適切に算出できない時間帯でもRLWは安定して計算可能であることを確認した。また植物内水分量と密接な関係にある茎径と0.45の相関を示し、これはLWCと比べて0.11ポイント高い結果となった。

### 3.2.2 茎径との相関分析

本研究で提案したRLWの有効性を示すため、過去データを用いて植物内水分量と密接な関係にある茎径との相関関係について確認した。また先行研究で使われた水ストレス指標であるLWCとの比較を行った。なお相関係数は一日ごとに計算し、相関係数の最大値、平均値、中央値を用いて評価する。水ストレス指標と茎径の相関値を表1に示す。茎径との相関係数はRLWがLWCよりも高い傾向にあり、高精度に水ストレスを表現している可能性が示唆された。

## 4. 実証実験

提案手法の有効性を確かめるため、熟練農家処理区、先行研究処理区、提案手法処理区の3処理区で実証実験を実施した。

### 4.1 実験方法

実証実験を行うにあたり、図4のようなクラウド型自動灌水制御システムを構築した。実験圃場にデータ収集機器

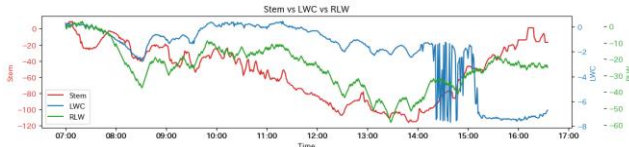


図3 輝度変化が大きい日の水ストレス指標の推移

表1 水ストレス指標と茎径の相関値

水ストレス指標	最大相関係数	平均相関係数	中央相関係数
LWC	0.958	0.434	0.562
RLW	<b>0.978</b>	<b>0.512</b>	<b>0.674</b>

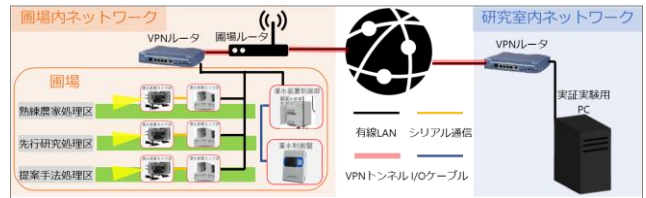


図4 実証実験システム概要図

表2 処理区ごとの糖度と灌水量

処理区	糖度(brix)				灌水量(cc/日)	
	平均	最大	最小	分散	総和	
熟練農家	6.93	9.60	<b>4.80</b>	0.37	7905	
先行研究	6.62	<b>11.80</b>	4.50	0.38	8040	
提案手法	<b>7.13</b>	10.20	4.60	<b>0.35</b>	6675	

を設置し、1分毎に環境データと画像データを取得する。これらのデータを用いて実験用PCで処理区ごとの灌水判断を行うことで自動灌水を実現した。

## 4.2 実験結果

表2に収穫物の品質を示す。平均糖度では提案手法処理区が最も高く、熟練農家処理区と比べて0.2brix、先行研究処理区と比べて0.51brix高かった。収穫物品質データに対して対応のないt検定を行った結果、提案手法処理区と熟練農家処理区は $t(1526) = 6.58, p < 0.01$ であり、提案手法処理区と先行研究処理区は $t(1471) = 15.98, p < 0.01$ であった。すなわち、提案手法処理区では糖度が有意に高くなったことが示された。処理区ごとの総灌水量に関しては、提案手法区画が熟練農家処理区や先行研究処理区よりも1000cc以上少ない結果となった。以上より、提案手法処理区では少ない灌水量で高糖度なトマトを生育したことが示され、提案手法の有効性が確認された。

## 5. おわりに

本研究では、CoTrackerを用いた自動灌水制御手法を提案した。提案手法の有効性を確認するために実証実験を行った。結果として熟練農家が栽培したトマトと同等以上の糖度となり、提案手法が有効であることが示唆された。

今後は自動灌水制御システムのオンプレミス化を目指し、実用的なシステムとしての運用を検討する。

## 謝辞

本研究はJST 創発的研究支援事業支援を受けたものである。また実証実験環境を提供して下さった株式会社Happy Qualityの皆様に感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 後藤将弥, ほか: 植物生育と栽培環境に順応する灌水制御手法の提案, DICO2019 シンポジウム, pp.629-636, 2019.
- [2] Weinzaepfel, et al.: Deepflow: Large displacement optical flow with deep matching, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1385-1392, 2013.
- [3] Nikita Karaev, et al.: Cotracker: It is better to track together. arXiv:2307.07635, 2023.
- [4] Alexander Kirillov, et al.: Segment anything. arXiv:2304.02643, 2023.
- [5] Shariq Farooq Bhat, et al.: Zoedepth: Zero-shot transfer by combining relative and metric depth. arXiv:2302.12288, 2023.