

## 遅延相関を考慮した低段密植栽培トマト向け灌水制御の検討

足立量<sup>†</sup> 峰野博史<sup>††</sup>静岡大学情報学部<sup>†</sup> 静岡大学大学院情報学領域<sup>††</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。たとえば、高糖度トマト栽培などは熟練農家の培った植物に対する経験と勘に基づいた高度な栽培技術が必要のため、経験の浅い新規就農者では栽培が困難である。そこで、高度な栽培技術を ICT によって再現する研究が進められている。

高糖度トマトの栽培では意図的に水ストレスをかける栽培方法（水ストレス栽培）が行われており、生理障害（ひび割れなど）を抑え高い糖度の果実に育てる灌水管理が最も重要とされる。一般的に水ストレス栽培では、植物に与えている水ストレスを定量的に表した水ストレス指標に閾値を設定し自動的に灌水制御を行うことで糖度の向上や果実の生理障害の減少を実現している。自動灌水制御では、水ストレス指標の値が閾値を超えた時に一定量の灌水を行う。閾値は、熟練農家の経験と勘によって適切な値に決定され、高糖度で生理障害の発生が少ない果実の栽培を実現している。糖度を向上させつつ生理障害の発生を抑えるには、閾値を気象環境などで変化する植物体内水分に応じて水ストレスの過不足が少なくなるように調節する必要がある[1][2]。灌水量を減らし過ぎて水ストレスが過剰になった場合、植物の過度な萎れによる枯れの発生、尻腐れなどの生理障害が発生してしまう。逆に、灌水量が多く水ストレスが不足している場合は、果実が低糖度になってしまう。そのため、閾値は灌水のタイミングを決定し、最終的には果実の品質に大きく影響する重要な値である。

本研究では、閾値の決定の際に用いる水ストレス指標を植物体内水分の推移を考慮して推定する手法を検討する。植物に灌水を行った場合、水分は土から茎、そして葉へと流れていくため、葉に影響が現れるまではタイムラグが存在する可能性がある。そのため、データ間の遅延相関についての分析も行う。遅延相関とは、時系列データ間において、一方のデータにタイムラグを付与した際の相関である。

## 2.関連研究

従来の自動灌水制御では、水ストレス指標として、土壌水分量[3]、積算日射量[4]、茎径の変位量[5]などが用いられている。土壌水分量や積算日射量は水ストレス指標としては植物体内水分への考慮が不十分、茎径の変位量に関しては植物体内水分を把握するために茎径を計測しているため、高価なセンサが必要となり金銭的負担が大きいという課題がある。

上記の課題に対して、安価なカメラで撮影された植物の草姿画像から Optical Flow（以降 OF）を算出し植物の葉の萎れを定量化した指標 LWC（Leaf wilt condition）を植物体内水分について考慮した水分ストレス指標として用いて、低コストかつ高精度な自動灌水制御を実現する手法が存在する[6]。LWC の算出には時系列になっている 2 時点の草姿画像を用いる。2 時点の草姿画像のうち 1 時点の草姿画像は、植物体内水分が変化する前の時刻である 7:00 の草姿画像で固定する。もう一方は、7:00 以降の時刻における草姿画像とする。LWC の算出ではまず、2 枚の草姿画像を用いて OF を算出する。次に、草姿以外の OF の検出を防ぐために、RGB 画像における G 成分の比率を示す ExG（Excess green）[7]を用いて、植物領域以外をマスクした OF を生成する。その後、各 OF の角度をビン、大きさを重さでヒストグラム化した HOOF（Histogram of oriented optical flow）を算出する[8]。算出した HOOF を用いて、植物の萎れを示す下方向のビンを LWC とする。LWC によって植物に与えた水ストレス量を抽出し、灌水で回復する水ストレス量を機械学習モデルで推定する。植物に与えた水ストレス量と推定した灌水で回復する水ストレス量が等しい場合もしくは、植物に与えた水ストレス量が灌水で回復する水ストレス量を上回った場合に灌水する。

しかし、既存研究では、灌水によって変化する植物体内水分に関して、考慮が不十分であるという課題がある。灌水を行った際に水ストレス量が回復するまでにかかった時間、灌水が必要になるまでにかかった時間について考慮されていないため、灌水で回復する水ストレス量の推定が正しく行われていない可能性がある。

## 3.提案手法

本研究では、植物体内水分の推移を考慮することで、灌水で回復する水ストレス量の推定精度向上、LWC をより植物体内水分について考慮した指標にすることを目標とする。

LWC の概要を図 1、提案手法の概要を図 2 に示す。灌水で回復する水ストレス量を推定するにあたり、回復する水ストレス量は灌水後の最小 LWC（図 1①）を使用し、与えた水ストレス量は前回の灌水から現在までの最小 LWC（図 1②）を使用して求める。提案手法では、前回の灌水から回復するまでに経過した時間（図 2①）、回復してから現在までに経過した時間（図 2②）を時間情報として加えて推定を行う。この手法により、直近の灌水による植物の生理状態の変化を考慮した推定を行った。

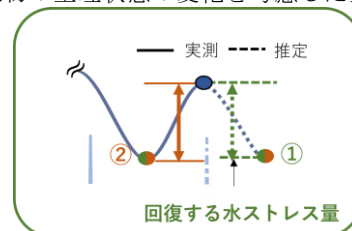


図 1 LWC 概要

## Investigation of Irrigation Control for Low-Stage Densely Planted Tomatoes Considering Delay Correlation

Ryo Adachi<sup>†</sup>, Hiroshi Mineno<sup>††</sup><sup>†</sup>Faculty of Informatics, Shizuoka University<sup>††</sup>College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University

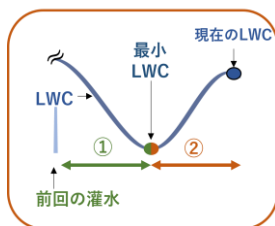


図2 提案手法

## 4. 基礎評価

### 4.1. 水ストレス推定検証

本検証では LightGBM によって、時間情報を考慮した提案手法と既存手法で灌水によって回復する水ストレス量の推定精度を比較することで、提案手法の有効性を評価する。各手法に対して決定係数( $R^2$ )、二乗平均平方根誤差 (RMSE) で精度比較を行った。表 1 に本検証の詳細を示す。

### 4.2. LWC・茎径間の遅延相関検証

LWC(葉の萎れ)と茎径の間には、LWC が茎径に対して約 2 分遅れの遅延相関が存在する[9]。茎径に対して、同時刻の LWC、2 分後の LWC それぞれに対して相関を求め比較することで、遅延相関の有無や条件について求める。この際、LWC は葉の萎れを表すため、灌水によって茎径が大きくなり葉の萎れが回復し LWC は低くなる関係であるため、LWC・茎径間に強い負の相関が表れることが有意であることを示す。

### 4.3. 検証結果

図 3 に水ストレス量推定の検証結果、図 4 に各種 LWC と茎径間の相関係数を示す。

水ストレス推定においては、時間情報を加えた提案手法がわずかながら既存手法を上回る結果となった。図 3 のデータ分布を比べると、提案手法は既存手法に比べ少量データの予測のばらつきを少し抑えているように見られる。このことから、時間情報の追加により学習段階においてデータ量が少ないデータをより正しく予測できるようになる可能性も考えられる。

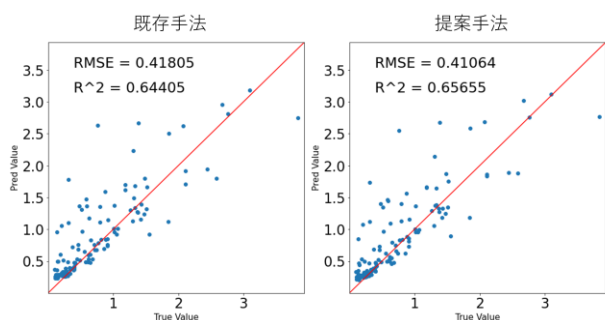


図3:水ストレス量推定



図4:遅延相関分析

表 1:水ストレス量推定詳細

項目	既存手法	提案手法
学習器	LightGBM	
説明変数	過去データ	前々回の灌水から前回の灌水までの最小LWC 前回の灌水時のLWC 前回の灌水から現在までの最小LWC
	現在データ	現在のLWC
	環境データ	温度、湿度、日射量 前回の灌水から現在までの温度、湿度、日射量の積算値・階差
	時間情報	前回の灌水から最小LWCまでの時間 最小LWCから現在までの時間
目的変数	現在灌水した場合に回復する水ストレス量	

図 4 の LWC・茎径間の相関分析より、茎径に対して 2 分後の LWC は、茎径と同時刻の LWC に比べ有意な相関は見られなかった。しかし、灌水を行ったタイミングのみで相関を取った場合、茎径に対して 2 分後の LWC は、茎径と同時刻の LWC に対しわずかに有意な相関が見られた。このことから、遅延相関は常に存在するのではなく、灌水などの植物体内水分の移動が活発な時に表れるのではないかと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、水ストレス量の推定及び葉の萎れ・茎径間の相関分析において、時間情報を加えることで、既存手法に比べ精度が向上することを確認した。

今後の方針として、時間情報が有効な条件を導出し、重点的に学習を行うことで、植物の生理状態に基づいた灌水技術を確立していく。

## 参考文献

- [1] 星川和俊, 長智男, 黒田正治: 土壌水分条件を考慮する植物生産力の推定法—農業地域における生産力評価に関する基礎的研究 (IVIV)—, 農業土木学会論文集 Vol.134, pp.19-26(1988).
- [2] 細野達夫, 細井徳夫: 施設養液栽培長段トマトの日吸水量, 農業気象, Vol.58, No.4, pp.207-216(2002).
- [3] 中野和弘, 川上卓男, 大塚雅雄, ほか: ハウス内環境の制御システムに関する研究 (第 4 報), 農業施設, Vol.31, No.3, pp.163-170(2000).
- [4] 新田益男, 澁谷和子, 玖波井邦昭, ほか: 日射比例かん水制御装置の開発および高糖度トマトの根域制限栽培への適合性, 高知農技セ研報, Vol.18, p31-38(2017).
- [5] 大石直記: トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発(2)—茎径変化を利用した給液制御—, 生物環境調節, Vol.40(1), pp.91-98(2002).
- [6] 後藤将弥, 水野涼介, 峰野 博史: 植物体内水分の変化を考慮した灌水制御手法の提案, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.10, No.3, pp.24-34 (2020).
- [7] G.E.Meyer, J.C.Neto: Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.63, No.2, pp.282-293(2008).
- [8] R.Chaudhry, A.Ravichandran, G.Hager, R.Vidal: Histograms of oriented OF and binet-cauchy kernels on nonlinear dynamical systems for the recognition of human actions," CVPR, pp.1932-1939(2009).
- [9] K.Wakamori, H.Mineno: Optical Flow-Based Analysis of the Relationships between Leaf Wilting and Stem Diameter Variations in Tomato Plants, Plant Phenomics, Vol.2019, Article ID 9136298 (2019).