# 画像処理技術を用いたトマトの体内水分量制御手法の検討

A Study on Controlling Body Water Content of Tomato Using Image Processing Technology

難波 脩人 辻 順平 能登 正人 Shuto Namba Junpei Tsuji Masato Noto

神奈川大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻

Graduate School of Electrical, Electronics and Information Engineering, Kanagawa University

Water stress cultivation is a method that raises the sugar content of fruits by deliberately decreasing the amount of water supply from experience and intuition of skilled farmers. It is difficult for new farmers lacking experience and intuition to cultivate. Under such circumstances, we considered a water supply control method that automates the water supply work. In this study, we design a model representing plant body water content and response to irrigation using Hidden Markov Model. We investigated whether it is possible to control irrigation by using it. As a result of the experiment conducted through actual cultivation of tomatoes, It was revealed that the value obtained from the plant model designed using the Hidden Markov Model under specific conditions reflects the change in the body water content of the plant.

# 1. はじめに

日本の農業は、農業従業者の高齢化の進行により離農率が上 昇している.農林水産省のデータによると、平成22年の261 万人から平成27年の210万人と約20%減少していることが わかる.一方で、新たに農業を開始した新規就農者人口の推移 を調べると平成22年の5万5千人から平成27年の6万5千 人と約15%増加していることがわかる\*1.このことから、熟 練農家が持つ高度な栽培技術が新規就農者への継承を行う前に 失われることが懸念されている.

一方で,農作物に対して高付加価値を与えることで農作物の 品質を向上させる高度な栽培技術は広く行われている.その中 でも水ストレス栽培は,高糖度な果実を生産し,果実の市場価 値を向上させる栽培技術として知られている.しかしながら, 水ストレス栽培に代表される高度な栽培技術は熟練農家の経験 と勘によって行われるため,新規就農者がこれらの栽培技術を 再現するには困難がともなう.新規就農者でも簡単に水ストレ ス栽培などの高度な栽培技術を再現するためには人工知能を用 いて支援する必要がある.

そのような背景のもと、水ストレス栽培においては新規就 農者への技術継承を目的とした水ストレスの程度の推定を行う 研究が報告されてきた.一方で,推定された水ストレスに対し て熟練農家がどのように水を与えるかの潅水制御方法は明確に されていない.そのため,熟練農家が経験と勘によって行う潅 水作業を再現するための潅水制御方法を考える必要がある.

本研究の目的は水ストレス栽培に用いることが可能な自動 潅水制御の仕組みを実現させることである.植物は体内水分量 という内部状態をもち,体内水分量の変化に伴い水ストレスが 生じる.水ストレス栽培の潅水制御を行うにあたり,体内水分 量が潅水によってどの程度変化するかを明らかにしなければ潅 水制御方法の確立は困難である.そのため,植物の体内水分量 と潅水に対する反応を表すモデルを設計する必要があると考え

連絡先:難波脩人,神奈川大学大学院工学研究科電気電子情報 工学専攻 能登研究室,〒221-8686 神奈川県横浜市神奈 川区六角橋 3-27-1,電話:045-481-5661 \*1 農林水産省:平成 28 年新規就農者調查,

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sinki/index.html

られる. 潅水に対する植物の反応は新規就農者への技術継承を 考慮し,画像処理技術を用いて測定する.しかしながら,画像 データから正確な体内水分量を測定する手法は確立されておら ず,画像データから植物の内部状態を適切に設計することは潅 水制御を実現させるためにも必要である.

本研究では,植物の体内水分量の変化を画像処理技術を基 に制御するにあたり,植物の体内水分量と潅水に対する反応を 表すモデルを設計し,潅水制御システムに用いることが可能で あるかの検討を行う.

# 2. 水ストレスの程度の推定手法

## 2.1 茎径変化量を用いた推定手法

植物の体内水分量を直接推定する手法 [Araki 87] は植物の 葉を採取するため,継続して測定することは難しい.間接的に 測定する手法としては茎径を用いて水ストレスの程度の推定 を行う手法 [大石 02] が提案されている.茎径は水ストレスに よって太さが変化するため,水ストレスと密接な関係があるこ とから推定手法に用いられている.

しかしながら,茎径の測定に使用しているレーザ式変位センサは非破壊的で連続的な測定が可能であるが,センサ自体が 高価なため,新規就農者にとっては導入することが困難である と考えられている.

## 2.2 植物の葉のしおれ具合を用いた推定手法

高価なセンサを使用せずに新規就農者でも導入が簡易なカ メラを用いて水ストレスの程度の推定を行う手法として,画像 処理技術の分野でも動体検出に用いられる Optical Flow を応 用した研究 [Kaneda 17] が報告されている.

Optical Flow とは、追跡する対象の動きが微小変化でも検 出することが可能であり、映像におけるフレーム間で画像中の 輝度が変化する際の見かけの動きである.この研究では畳み込 みニューラルネットワーク (CNN)を用いて水ストレスの程 度の推定手法を提案している.Optical Flow によって植物の 葉のしおれに関した部分を抽出し、入力画像として用いること で水ストレスの程度の推定制度を向上させている.

# 潅水制御システムの実現に向けた植物モデ ルの作成

推定された水ストレスを基に潅水制御を行う技術は水スト レス栽培を新規就農者が行うための技術として必要不可欠で ある.さらに,新規就農者への技術継承を考慮した際,潅水 制御方法を確立するためには低コストであることが望まれる. 本研究では水ストレス栽培に関連した研究の中でも高価なセ ンサを使用せずに測定することが可能である画像処理技術を 用いる.画像処理技術の中でも Optical Flow は柴田らの研究 [柴田 17] において複雑背景下でも葉のしおれの変化を検出す ることが可能であると報告されているため,葉の動きの検出が 可能である.一方で,潅水制御を行うためには潅水量を決定す るために植物の内部状態と潅水に対する植物の反応をモデル化 する必要がある.

植物内部の体内水分量は植物外部の状態を決定する要因として考えられる.植物内部の体内水分量は時間変化し,現在の体内水分量は過去の体内水分量と潅水量によって決定されると考えられる.以上のことから植物のモデルは時刻 t における体内水分量 X<sub>t</sub> とする隠れマルコフモデルとしてモデル化することが妥当であると考えられる.時刻 t における潅水量を U<sub>t</sub> とし,植物外部に現れる植物の葉のしおれを Y<sub>t</sub> とすると以下のように定式化できる.

$$X_t = f(X_{t-1}, U_{t-1}, w_{t-1}) \tag{1}$$

$$Y_t = g(X_t, \epsilon_t) \tag{2}$$

 $w_{t-1}$ ,  $\epsilon_t$  は確率的な要因を定める確率変数である. 農業分野 において画像データを用いる場合は植物の葉に着目することが 多いため、植物の葉のしおれ  $Y_t$  と  $Y_t$  を観測する画像データ  $I_t$  の関係を考える. 画像データ  $I_t$  から植物の葉のしおれ  $Y_t$  の 情報を直接得ることは困難であり、 $I_t$  は  $Y_t$  の部分的な情報し か反映されていないことが考えられる.

$$I_t = Proj(Y_t) \tag{3}$$

さらに、Optical Flow は各時刻の画像データ  $I_{t-1}$  と  $I_t$  の差 分を用いるため、

$$r_t = Opt(I_{t-1}, I_t) \tag{4}$$

となる.  $r_t$ の定義については次節で述べる. したがって,各時刻における  $X_t$ の情報は g, Prog, Opt によるフィルタを通して  $r_t$  に表されており,  $r_t$  を設計することによって  $X_t$  を推定することができると考えられる.

#### 3.1 回復傾向指標

本研究では植物の葉が潅水によってどの程度回復するかの 指標として  $r_t$  を設計する. この場合の  $r_t$  を回復傾向指標と呼 び,回復傾向指標は時刻 t,時刻  $t + \Delta$  において Optical Flow を行い算出した変位ベクトルを用いて算出する. 植物の葉が回 復している状態は葉のしおれが上向きに動いている場合であ ると考えられる. そのため,回復傾向指標は以下のように求め る. 全体の変位ベクトルの集合を  $V_{t,t+\Delta}$  と定義する.  $V_{t,t+\Delta}$ の内,変位ベクトルの向きが上向きのものの個数,すなわち  $v \in V_{t,t+\Delta}$  として v の偏角が  $[0,\pi)$  であるものの個数の比を 回復傾向指標  $r_{t,t+\Delta}$  と定義する. 式で表すと以下のとおりと なる.

$$r_{t,t+\Delta} = \frac{\#\{v \in V_{t,t+\Delta} \mid 0 \le \arg v < \pi\}}{\#V_{t,t+\Delta}} \tag{5}$$

 $r_{t,t+\Delta}$  が植物の体内水分量の変化を表す指標として有効であると示すことで、潅水制御は $r_{t,t+\Delta}$ を用いて行うことが可能であり、熟練農家の経験と勘による作業を継承することにもつながると考えられる.

## 3.2 観察環境

本研究の観察環境を図1に示す.栽培環境は植物育成用LED ライトと植物栽培用ハウスキットを用いた.実際,トマトの栽 培にはLED ライトを用いた環境においても生育が可能である ことが明らかにされているため,太陽光の代わりとして使用す ることに問題はないと考えられる [渡邉 16].撮影は web カメ ラ (Logicool 製 C270)を対象物との距離が 60cm になるよう に設置して行う.web カメラの撮影は図 2 に示すように植物 の全体を写すように撮影した.栽培用ハウスキットの内部では LED ライトを使用したことで,Optical Flow は LED による ノイズ影響を受けることが実際の栽培から確認された.そのた め,ノイズ被害を軽減することを目的とし,図1(a) に示すよ うに背景に黒のスクリーンを設置して撮影を行った.



図 1: 植物栽培用ハウスキット 内部



図 2: 栽培キット内の撮影例

## 3.3 Optical Flow を用いた指標の算出方法

本研究における指標の算出までの流れを図3に示す.時刻 *t* に撮影した画像を *I*<sub>t</sub>,時刻 *t* +  $\Delta$  に撮影した画像を *I*<sub>t+ $\Delta$ </sub> とす る.画像 *I*<sub>t</sub> と画像 *I*<sub>t+ $\Delta$ </sub> を用いた Optical Flow の処理結果を 3.1節で定義した *V*<sub>t,t+ $\Delta$ </sub> で表し,回復傾向指標 *r*<sub>t,t+ $\Delta$ </sub> を求め る.本研究では Optical Flow は1日の中で8時から24時ま で  $\Delta$  = 0.5 [時間] として処理を繰り返す.最後に回復傾向指 標の値をグラフに表した.

# 4. 実験および結果

回復傾向指標が植物の体内水分量の変化を表す指標として 有効であるかを評価するための実験を行う.まず,植物自体が 持つ自然な葉の動き,すなわち潅水による影響がない場合の



植物の葉の変化を確認する.そのため、潅水を行わない日を設 け、その日の回復傾向指標の値を算出した.上述した条件を参 考に潅水1回の場合、潅水複数回の場合のパターンを用意し、 実験を行った.最後に潅水量を変化させた場合でも回復傾向指 標が有効であるか評価するための実験を行った.

#### 4.1 回復傾向指標の変化(潅水なしの場合)

潅水を行うことで植物の葉のしおれの変化を確認するにあ たり、どのタイミングで潅水を行うかは重要な問題である. 潅 水を行わない日のデータは web カメラで撮影している 8 時か ら 24 時に潅水を行わない場合のことを指し、図 4 に示したグ ラフは潅水を行わない日の回復傾向指標の値の結果である.



図 4: 回復傾向指標の値(潅水なし)

グラフから植物の葉は1日の中で12時に向けて回復傾向指 標の値が小さくなっていることがわかる.この結果から植物の 葉は1日の中で12時をピークとして葉のしおれが強くなって いることが確認できた.

#### 4.2 回復傾向指標の変化(潅水1回の場合)

実験 4.1 を踏まえ,12 時に潅水を行う場合と潅水を行わな い場合の回復傾向指標の値を比較することで潅水による植物の 体内水分量の変化をとらえることができているかを明らかにす る.12 時に 200mℓの潅水を行った場合の回復傾向指標の値と 潅水なしの回復傾向指標の値をグラフに示す(図 5).



図 5: 潅水1回と潅水なしの回復傾向指標の値

グラフから 12 時に潅水を行った場合と行わなかった場合を 比較すると潅水を行った場合は 12 時を境に回復傾向指標の値 が上昇していることが確認できる. Optical Flow によって算 出した変位ベクトルを基に植物内部の体内水分量の変化をとら えることは可能であることが示唆された. しかしながら, 潅水 は植物の葉のしおれが強いときに行ったため, 植物の体内水分 量が減少している状態であったことが考えられる. そのため, 実験 4.2 では植物の体内水分量の変化が表れやすい状態であっ たことが考えられる.

#### 4.3 回復傾向指標の変化(潅水複数回の場合)

実験 4.2 の結果を踏まえ,植物の葉のしおれが強いときに潅 水を行うだけでなく,1日の中で潅水回数を増やしたパターン においても植物の体内水分量の変化をとらえることが可能であ るかを調べる実験を行った.今回は1日の中で潅水を2回行 い,その日の結果を図6に示す.



図 6: 潅水 2 回の回復傾向指標の値

潅水1回の場合で確認できたように11時と12時での潅水 は潅水なしと比較すると植物の体内水分量の変化が回復傾向指 標から確認することができる.一方で,11時から3時間後の 14時と12時から6時間後の18時に行った潅水は潅水なしと 比較すると回復傾向指標の値に差異が生じていることは確認で きるが,2回目の潅水を14時に行った場合と18時に行った場 合で比較すると回復傾向指標の値に差が生じていないことから 2回目の潅水による植物の体内水分量の変化をとらえていない ことが確認できた.このことから植物内部の体内水分量が減少 している段階での潅水はその後の葉のしおれの変化に顕著に表

ı 1 ———

The 32nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018

れることがグラフから明らかになった.一方で植物の体内水分 量が1回目の潅水により増加していると考えられる状態にお いては回復傾向指標の値を算出するだけでは体内水分量の変化 をとらえることは難しいと考えられる.

#### 4.4 回復傾向指標の変化(潅水量を変化させた場合)

これまでの結果より,1日の潅水回数を増やしたパターンに ついての植物の回復反応を確かめるのではなく,1回の潅水に 対して潅水量を複数設けた場合の植物の回復傾向指標の値を 比較する.比較した結果より,潅水量の違いがその後の植物の 体内水分量の変化に差が生じるかを明らかにする.実験では 潅水量を200mℓ,300mℓ,400mℓ,500mℓと4パターン用意 し,日を分けて潅水を行った結果をグラフ(図7)に示す.



図 7: 潅水時間の違いによる回復傾向指標の値

潅水量を4パターン用意した結果,植物の回復傾向指標の 値は潅水量が多くなるほど増加していることがわかる.このこ とから潅水量の変化の機微まで回復傾向指標はとらえることが 可能であることが明らかになった.

#### 4.5 考察

実験 4.1 では植物の葉のしおれは 1 日の中でどの程度の変 化を示すかを明らかにするために潅水を行わない場合の回復 傾向指標の値を算出した.その結果,本研究では植物の葉は 1 日の中で 12 時に葉のしおれが強くなることが確認できた.

実験 4.2 では実験 4.1 を踏まえ, 12 時に潅水を行うことで その後の回復傾向指標の値が潅水なしの場合と比較し,変化が あるかを確認した.その結果,潅水なしの場合と比べ,回復傾 向指標の値に差が生じていることが明らかになった.このこと から,回復傾向指標を求めることで植物の体内水分量の変化を 明らかにする可能性を示唆できた.しかしながら,植物の葉の しおれが強い状態で潅水を行うことは植物内部の体内水分量が 減少していると考えられる場合であり,潅水による体内水分量 の変化が確認しやすい状態であったと考えられる.そのため, 実験 4.3 では植物の体内水分量が増加していると考えられる潅 水後にさらに潅水を行い,植物の葉の変化が回復傾向指標から 確認できるかを明らかにした.結果として,2回目の潅水によ る変化は回復傾向指標を算出するだけではとらえることが困難 であることが明らかになった.

複数回の給水による植物の体内水分量の変化を回復傾向指 標から算出することは困難であると判断し,実験4.4 では12 時に4通りの潅水量を設け,各潅水量がその後の葉のしおれ の変化に違いが生じるかを回復傾向指標を比較することから明 らかにした.その結果,回復傾向指標の値は潅水量が多くなる ほど植物の葉の回復傾向が早くなることが明らかになった. 実験結果をまとめると,回復傾向指標を用いて植物内部の体 内水分量の変化を確認することは体内水分量が減少していると 考えられる状態においては有効であることが示せた.一方で, 植物の体内水分量が増加していると考えられる状態では回復傾 向指標を算出するだけでは植物内部の変化を確認することは困 難であることが明らかになった.しかしながら,潅水量を複数 設けた場合においては潅水量ごとに回復傾向指標の現れ方に違 いが生じることが確認できた.このことから,回復傾向指標は 植物内部の体内水分量が減少していると考えられる状態におい ては詳細な葉の変化をとらえることが可能であり,体内水分量 の制御を行う指標として有効であることが明らかになった.

# 5. おわりに

本研究では水ストレス栽培において熟練農家が行う潅水作 業を自動化するために,植物の体内水分量と潅水に対する反応 をモデル化し,モデルを基に潅水制御は行えるかを検討した.

実験結果より,植物の体内水分量が減少していると考えられ る状態においては潅水による植物内部の体内水分量の変化を回 復傾向指標から判断することができた.また,潅水量を変更す ることにより回復傾向指標の現れ方にばらつきがあることか ら潅水制御を行う際に,潅水量のパターンを設けることが可能 であることが示唆された.しかしながら,回復傾向指標は植物 の体内水分量が増加していると考えられる状態では機能せず, 複数回の潅水を行うことは課題としてあげられる.また,水ス トレスの程度の推定値をもとに潅水制御を行う場合,基となる 水ストレスの程度を取り入れた指標の評価を行っていない.

今後は水ストレスと関わりのある茎径などを測定すること から水ストレスと回復傾向指標の関連性を調べる.その結果を 踏まえ,回復傾向指標の有用性を示していくことが必要である と考える.

# 参考文献

- [Araki 87] Araki, Y. and Gotoo, Y.: Application of the Pressure Chamber Method to Tomato Leaflets for Determination of Water Potential, *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, Vol. 56, No. 3, pp. 328– 333 (1987)
- [Kaneda 17] Kaneda, Y., Shibata, S., and Mineno, H.: Multi-modal Sliding Window-based Support Vector Regression for Predicting Plant Water Stress, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 134, pp. 135–148 (2017)
- [大石 02] 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 (1) 茎径変化による水分 ストレスの非破壊評価, 生物環境調節, Vol. 40, No. 1, pp. 81-89 (2002)
- [柴田 17] 柴田 瞬, 峰野 博史: Optical Flow を用いた複雑背 景画像における草姿の変化検出, 情報処理学会論文誌コン シューマ・デバイス&システム, Vol. 7, No. 2, pp. 97–105 (2017)
- [渡邉 16] 渡邉 恭成, 安田 剛規, 米田 正, 中野 明正: トマト育 苗のための LED 光照射条件の検討, 野菜茶業研究所報告, Vol. 15, pp. 57–66 (2016)