

[研究助成 (A)]

最適なトマト生育の知見獲得に向けた、ロボット×AIによる 生育・収穫・選別の全自動化

Automation of cultivation, harvesting, and classification of tomato
by the combination of Robot technology and AI

2191010



研究代表者

長岡工業高等専門学校
電子制御工学科

助教 酒井 一 樹

[研究の目的]

トマトは世界で最大の生産額を誇る野菜であるが、土壌の状態や気候条件によって品質が変動しやすく、安定した生育が難しい。近年では農業へのICT活用も進んでいるが、高価かつ大規模栽培を前提としたものがほとんどである。生育過程において、安価なセンサで取得できる土壌や気候のパラメータに関する最適な範囲を可視化することができれば、プランター菜園などに取り組む個人農家なども活用することができる。一方で、こういった分析を行うためには、多くのサンプルについて、生育過程における土壌のパラメータ等と収穫後の実の品質を関連付けて取得する必要がある、多大なる労力が必要になるという課題がある。

本研究では、この課題を解決すべく、ロボット技術とAI技術を組み合わせることで、トマトの生育や収穫、選別を自動で行うシステムを構築することを目的とする。このシステムはそれ単体で機械による作業負担の軽減という側面を持ち、それに加えて、生育過程におけるデータの取得も自動化できるようになるため、トマト生育に関する知見を得るための土台を構築できるといった価値も有している。

[研究の内容, 成果]

本研究の全体像を示した図を図1に示す。本研究は以下の4つの要素から成り立っている。

- (1) ICT活用によるトマト生育の自動化
 - (2) ロボットとAIによるトマト収穫の自動化
 - (3) トマトの選別の自動化
 - (4) 最適な生育条件を可視化する方法検討
- 本節ではそれぞれについて成果を報告する。

まず(1) ICT活用によるトマト生育の自動化について、本研究では学内にビニールハウスを建設し、電磁弁と電動バルブをRaspberry

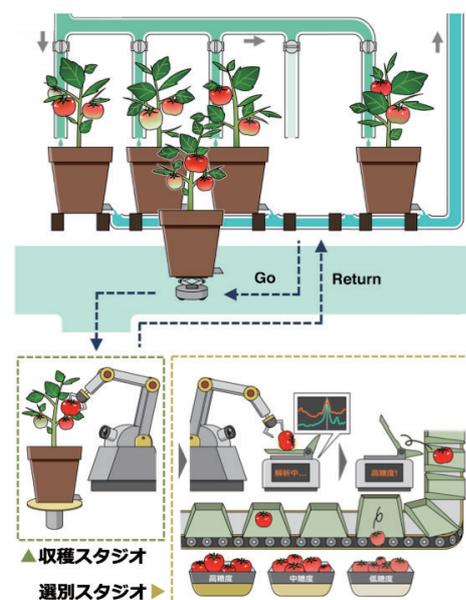


図1 構築するシステムの全体像

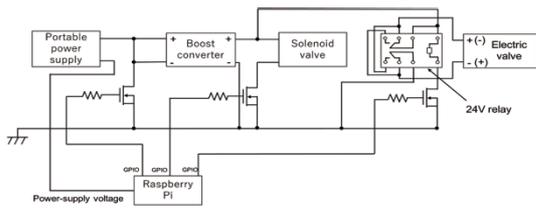


図2 自動灌水システムの概要図

Piによって制御する自動灌水システムを構築した。自動灌水システムの概要図を図2に示す。電源およびインターネット環境が無かったため、電磁弁や電動バルブはポータブル電源の12Vの直流電圧出力を24Vに昇圧して駆動し、Raspberry Piの時刻同期はGPSモジュールを用いた。実際にトマト生育にて運用し、安定して稼働させることができた。

続いて(2)ロボットとAIによるトマト収穫の自動化についてはさらに3つの要素に分解してそれぞれの検討を進めた。3つの要素は

- (2-a) ポットの収穫スタジオへの移動
- (2-b) カメラ画像による実の位置の推定
- (2-c) ロボットアームによる実の収穫

である。ポットの移動については自律移動ロボットを設計・製作し、実際のポットの重さや高さと同様の対象を移動させるテストを行った。運搬は可能であることがわかったが、安定性や生育フィールドからポットを取り外したり、生育フィールドにポットを戻す過程の現実性を高めることが難しいということがわかった。そこで、詳細は後述するが、そうした本研究での知見をもとに、ポットの移動をロボットではなく、水路を用いる方向性を検討する新しいプロジェクトが立ち上がった。ポットを最初から水に浮かばせておき、水流を発生させることでポットを移動させるというものである。水路の設計および実現可能性の検証を行っている段階である。

(2-b) カメラ画像による実の位置推定についてはTensorflow Object Detection APIを用いた実現を検討し、高い精度で実現可能であることが明らかとなった。ネットワークはMobileNet v1を用い、COCO datasetで学習さ

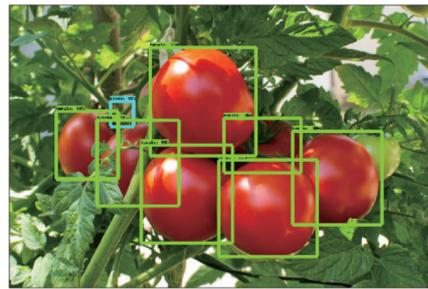


図3 カメラ画像による実の位置推定の実行結果

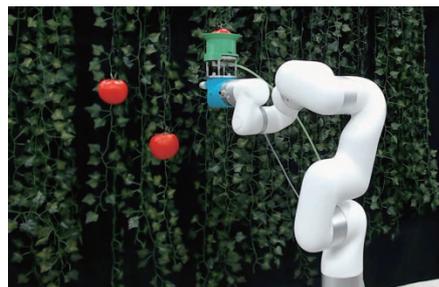


図4 ロボットアームによる収穫のデモの様子

せたものに対して、独自に用意したトマトの画像にラベル付けしたものでファインチューニングを行った。あるトマトの画像に対する位置推定の結果を表示した図を図3に示す。

(2-c) ロボットアームによる実の収穫には、5軸ロボットアーム xArm-5-Liteを用いたシステムを構築した。トマトを収穫するためには実を掴んで茎が折れるように引っ張ったり捻ったりする必要がある。まず実を傷つけずに掴むために吸着グリッパを用いたエンドエフェクタを作製し、推定した実の位置に対して下から垂直に向かう軌跡で動いて、吸着後は垂直に下がって引っ張り取るためのプログラムを作成した。それを用いたデモを行った様子を図4に示す。トマトを的確に掴み、収穫することができている。

一方で、吸着グリッパでは房状になっているトマトや小さいトマトをうまく保持することができないという課題も明らかとなった。そこで、エンドエフェクタを機械式と吸引式のハイブリッド型に改良し、小さいトマトも確実に収穫できるようにシステムを改良した。手の形のエンドエフェクタであり、図5に示すように指の

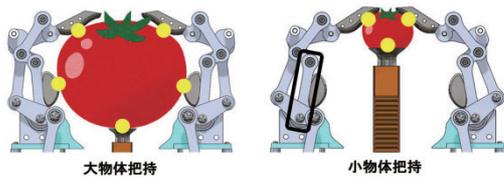


図5 エンドエフェクタによる把持機構

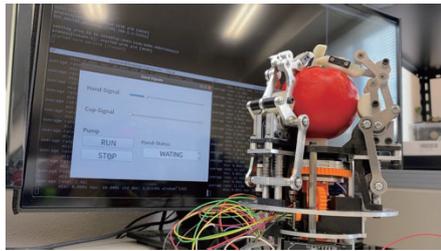


図6 作製したエンドエフェクタのデモの様子

部分は複合四節リンク機構とすることで物体に巻き付くような把持を可能とした。大きいトマトと小さいトマトの両方に対応できるように、2段階の把持機構が可能である。材料としては金属部品にはアルミを用い、果実との接触部にはウレタン樹脂を用いた。また、モータやポンプの制御には Arduino を用い、ロボット制御用のオープンソースソフトウェア ROS による制御システムを構築した。磁気式のロータリーエンコーダによってモータの回転角を計測できるようにしてあり、PID 制御などのフィードバック制御が可能である。作製したエンドエフェクタでの物体把持のデモの様子を図6に示す。物体を安全に把持できていることがわかる。画像を用いたトマトの位置推定に加えて、トマトの実の大きさ推定もできるようにすれば、各機構の自動制御が可能となる。

(3) トマトの選別の自動化については、画像による非破壊な評価を目標とした。その基礎検討として、生育過程における実の色を記録してカラーチャートの作成に取り組んだ。画像補正用の CASMATCH とトマトの実を同じ写真に収め、ホワイトバランスを補正することで色票を完成させた。また、選別や収穫の基準値とするために平均色の抽出も行った。作成したカラーチャートと各色票における平均色の



図7 作成したカラーチャート

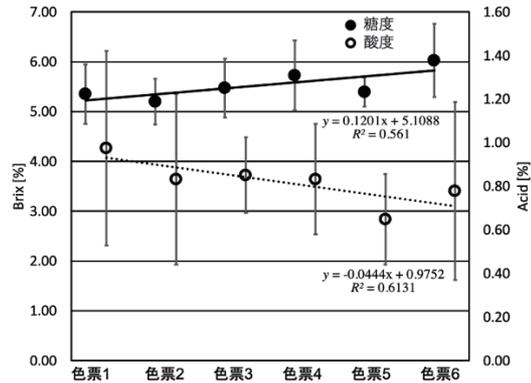


図8 カラーチャートと糖度・酸度の関係

RGB 値をまとめたものを図7に示す。また、ATAGO 社の糖酸度計 PAL-BX | ACID を用いてトマトの糖度と酸度を計測し、カラーチャートとの関係性を評価した。カラーチャートの各色票に属するトマトの糖度と酸度の計測値を示したものが図8である。カラーチャートを用いることで、糖度や酸度のある程度把握することができ、選別に活用できることが明らかとなった。分光解析等の非破壊検査を追加していくことでより高度な選別が可能になると考えている。

(4) 最適な生育条件を可視化する方法として、生育過程における土壌の pH と電気伝導度の値と収穫後の実の糖度との関係性を機械学習を用いた解析をする方法を検討した。本研究のシステムが実現すれば、自動でデータを取得できるようになるが、今回は手動で計測したデータを用いた解析の有効性の検証となった。

収穫3週間前の時点にてハンナインスツルメンツの土壌 pH テスターと土壌 EC/℃ テスターを用いてデータを取得し、収穫後の実の糖度と酸度を ATAGO 社の糖酸度計 PAL-BX|ACID を用いて計測した。相対的に糖度の高い実と低

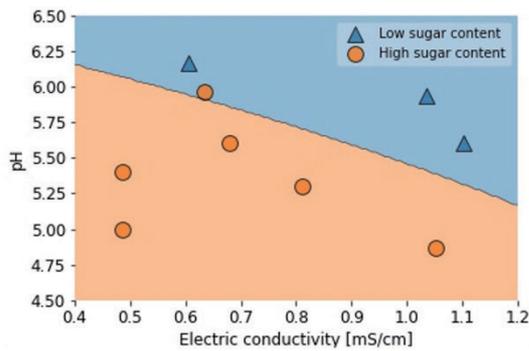


図9 土壌データ空間における高糖度の決定境界

い実という2つのグループに分けて、土壌のpHと電気伝導度の値をもとにサポートベクターマシンによる決定境界を求めた。その結果が図9である。pHはあまり高くない方が良いという従来からの知見に加え、電気伝導度と総合してどの範囲にあればよいかという、より具体的な知見を可視化することに成功した。データ点数が多くないため、より信頼性の高い知見を得るためには追実験が必要であるが、可視化手法の有効性を確認することができた。

[今後の研究の方向, 課題]

今回、研究目標の全ての部分要素を検討・開発することができた。今後の方向性としては、これらの技術の統合および実装が第一にあげられる。その中でも、先述したようにポットの自動輸送システムの改良が求められており、水路を用いた新しいシステムの考案が進められている。図10にその実験の様子を示す。また、水を土台とするシステムであるため、さらなる発展の可能性として、アクアポニックスによるエ



図10 水路でのポット輸送の実験

コシステムの検討も進めている。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 村上祐貴: ロボット×AIによるアクアポニックスの全自動化構想, 長岡水イノベーション・ハブキックオフ・ミーティング, NaDeCBASE (長岡), (2020. 2).
- [2] 風間鼓太郎, 酒井一樹, 村上裕貴, 竹内麻希子, 上村健二, 赤澤真一, 陽田 修, 池田富士雄, 市村勝己, 外山茂浩: 機械学習を用いたトマトの生育条件評価, 2020年電子情報通信学会総合大会 ISS学生ポスターセッション, (2020. 3)
- [3] Yuki Murakami: Case introduction of NUT's education collaborative activities, STI-Gigaku WORKSHOP, NaDeCBAS (NAGAOKA), (2020. 10).
- [4] Kazuya Oguma, Shota Higuchi, Fujio Ikeda, Yuki Murakami and Shigehiro Toyama: Development of automatic tomato-harvesting system using universal vacuum gripper and RGB-D camera, The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020), 10050, (2020. 12).
- [5] 小熊一矢, 池田富士雄, 村上祐貴, 外山茂浩: 果実の大きさへの柔軟性を持つエンドエフェクタの開発, 第26回高専シンポジウムオンライン, JPMAC-0, (2021. 1). 国立大学法人長岡技術科学大学学長賞
- [6] 小熊一矢, 池田富士雄, 村上祐貴, 外山茂浩: トマト果実の自動収穫に向けたエンドエフェクタの開発, 令和2年度国立高専第2ブロック研究発表会, (2021. 3).