

施設園芸を対象としたトマト果実自動収穫ロボットの開発

Development of automatic tomato fruit harvesting robot for facility horticulture

藤永拓矢*1, 安川真輔*2, 石井和男*2

*1 福岡大学 *2 九州工業大学

Takuya Fujinaga*1, Shinsuke Yasukawa and Kazuo Ishii*2

*1 Fukuoka University *2 Kyushu Institute of Technology

1. はじめに

2050年には世界人口が86億人に達し、食料需要量は2010年の1.7倍(58億トン)になると推計されており[1],多くの食料を輸入に頼る日本は深刻な食糧不足になることが予想される。日本の農業において、労働者数の減少や高齢化、後継者不足等への問題解決が喫緊の課題となっている。農林水産省の調査結果[2]によると、基幹的農業従事者(農業を主として生計を立てている者)及びその65歳以上の割合は、1995年からの20年間で、256万人(40%)から175万人(65%)となり減少かつ高齢化傾向にある。労働者の負担軽減や作業効率化、単位面積当たりの収穫量増加のために、ロボットや人工知能、情報通信技術(ICT)、モノのインターネット(IoT)に関する技術等を活用し、農作業の自動化、熟練農業者のノウハウの情報化を目指したスマート農業、農業のデジタルトランスフォーメーション(農業DX)の実現が不可欠である[3]。自動化を目指した取り組みとして、トマトの果実、または房を収穫するロボット[4][5]やアスパラガスを収穫するロボット[6]の開発、また、衛星画像やドローン、圃場に設置したセンサを活用して農作業を支援するシステム[7][8]が導入され始めている。スマート農業や農業DX推進のための技術は多種多様であり、農業従事者と研究開発者の密な連携が重要である。

トマト果実の自動収穫を目指した研究として、Montaら[9]は吸引パッドと2本のフィンガーで構成される収穫機構を開発した。Kondoら[4]は収穫効率の向上を目的として、トマト果実単体ではなく、トマト房を収穫可能な収穫機構を開発した。トマト果実単体を対象とし、Yaguchiら[5]は6自由度の垂直多関節型のロボットアームを搭載し、グripperで果実を把持し離層からもぎ取る収穫機構を組み合わせ

たロボットを開発しており、Yoshidaら[10]はポイントクラウド情報から切断点を推定する手法、Liuら[11]は照明の変化やトマト果実の重なり等の複雑な環境条件に対処するための果実検出手法を提案している。これらの研究事例では、収穫機構や果実検出精度、収穫率や収穫速度が議論されており、収穫ロボットの製品化を目指した研究開発も進められている[12][13]。

筆者らも農業分野へのロボット導入を目指し、農業先進国であるオランダの栽培技術を導入してトマトの長期多段栽培を実現している響灘菜園株式会社(以下、響灘菜園)の協力のもと、2014年からトマトロボット競技会[14]を開催し、競技会を通じてトマト果実自動収穫ロボットの研究開発に取り組んでいる[15]~[18]。本研究では、図1に示すようなトマトの監視から果実の収穫までを自動化するシステムを目指している。観察ロボットは施設内のトマト植物体の画像を取得し、その画像をクラウドサーバーに送信する。トマト植物体の生育状態がその画像から推定され、クラウド上で処理された結果をもとに、収穫ロボットは収穫戦略を構築しトマト果実を収穫する。このシステムの実現により、収穫ロボットを稼働させる前に、収穫ロボットの導入結果を予測することができる。

本稿では、我々が開発している中玉トマト果実の自動収穫ロボット、及び、トマトの情報を数値化したトマト生育状態マップを用いて本ロボットを導入した場合の収穫可能な果実の個数の推定結果を示し、収穫ロボットの運用方法を紹介する。

原稿受付 2021年 月 日

キーワード: Smart agriculture, Agriculture robot, Tomato harvesting robot, Tomato growth state map

*1 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1

*2 〒803-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの2-4

*1 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

*2 2-4 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka

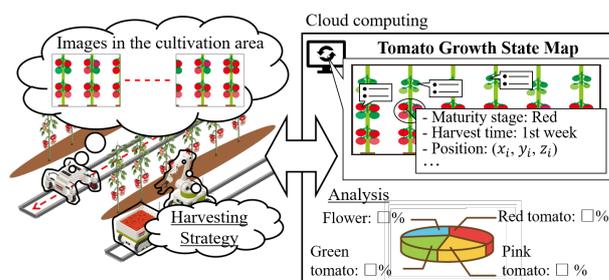


図1 監視から収穫までを自動化するシステムの概略[15]

2. トマト収穫ロボットと収穫用吸引切断機構

2.1 開発方針

スマート農業へ向けた研究開発の第1段階として、響灘菜園のような生産設備の整った大規模施設園芸場を検証フィールドとして進めている。温室内の温度調整のために温水が流れるパイプが床面に敷設されており、そのパイプは収穫作業者が使用する専用台車のレールとしても活用されている。そこで、本研究では響灘菜園内のレールを移動し、中玉トマト果実（果実1個あたりの重量は60-120[g]、直径は50-60[mm]）を収穫対象としたロボットを開発した。以下に、本ロボットのハードウェア構成、ソフトウェア構成、収穫戦略及び響灘菜園で行った収穫実験の結果に基づく収穫性能を述べる。

2.2 ロボット本体のハードウェア構成

本ロボットの外観を図2に示す。下部の移動機構は、幅600[mm]の対になった円形パイプ上を移動するように設計されている。上部には収穫機構として、当初は6自由度の垂直多関節型マニピュレータを搭載していたが、現在は3軸の直角座標型マニピュレータを用いており、水平面は200 x 200[mm]、上下方向には500[mm]の可動域、可搬重量は4[kg]としている。視覚センサとして、RGB-DカメラのMicrosoft Kinect V2を使用している。

収穫用のエンドエフェクタとして、果実を吸引し茎の部分を切断する吸引切断機構を開発した(図3及び4を参照)。吸引部によって収穫対象果実を房から離し、切断部によって果実の果梗を切断する。吸引部は果実を吸引するためのファンと空気が流れるためのホース、切断部は果梗を切断するためのフィンガー（上側と下側）、果実の吸引状況を判定するためのレーザーと光センサ、果実ストッパーで構成されている。縦600、横150、高さ150[mm]、重量は1.5[kg]であり、吸引部のホースの直径は中玉トマトが1個入るように70[mm]としている。

収穫動作を図5に示す。トマトは房の上部にある果実から赤くなるため、下からトマト房にアプローチした場合は下部にある果実が障害物となる可能性が高い。そのため上部の果実から収穫できるようにトマト房に対して横からアプローチする経路計画を採用した。最初に、収穫対象果実を吸引する(図4の動作(i))。そして、光センサへ向けられたレーザーが吸引された果実によって遮られ(動作(ii))、果実の把持状況を判定する。把持に成功した場合は、切断行動へ移る。下側フィンガーが回転し(動作(iii))、上側フィンガーに取り付けられたリミットスイッチが反応すると停止する(動作(iv))。動作(i)から動作(iv)まで吸引は続け、収穫対象果実を房から離して把持し、収穫箱に果実を入れた後に吸引を止める。

2.3 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成を図6に示す。MATLAB/SimulinkとRobot Operating System (ROS)を用いて、要素技術毎に機

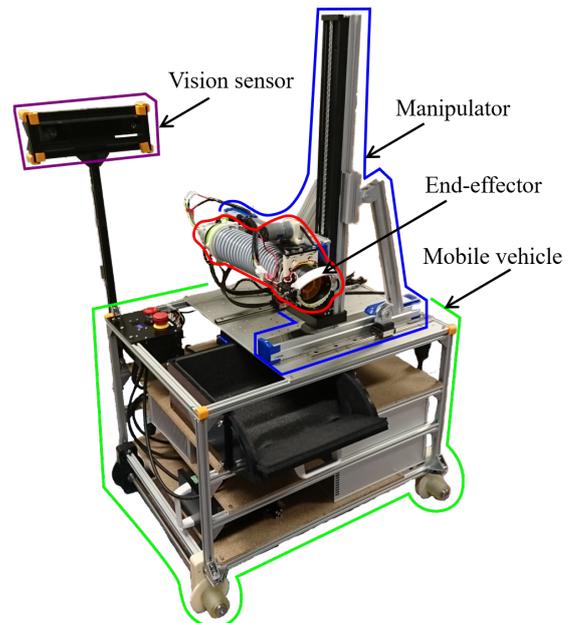


図2 レールを走行するトマト収穫ロボット[16]

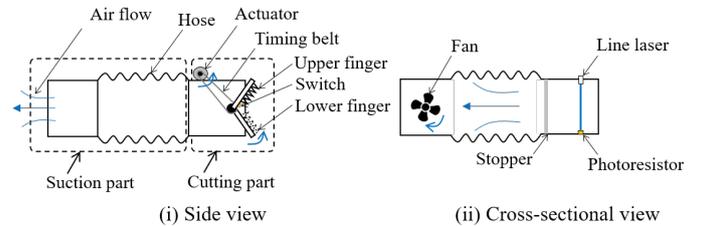


図3 吸引切断機構の構造[17]

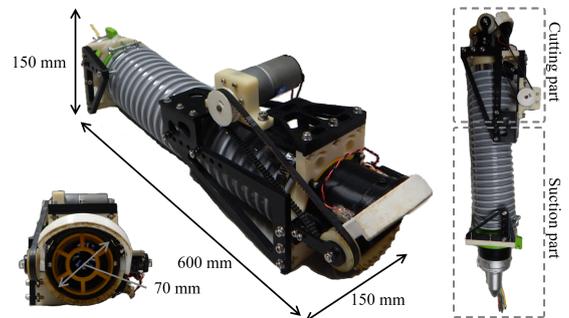


図4 吸引切断機構の外観[17]

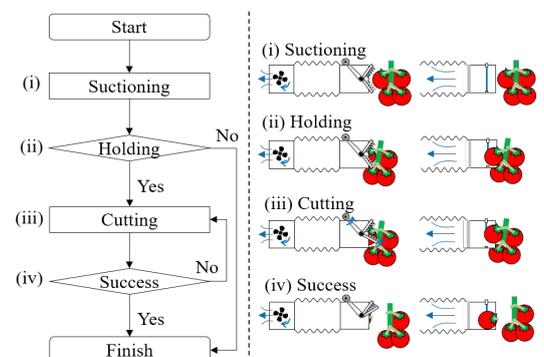


図5 吸引切断機構を用いた収穫動作[17]

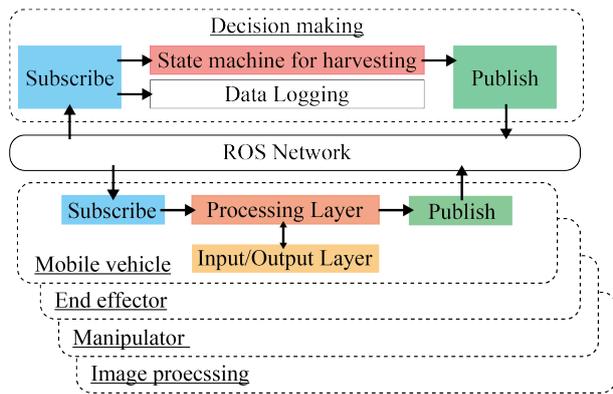


図6 ソフトウェア構成

能をモジュール化して処理する分散型システムをロボットに実装した。本システムは、移動機構、収穫機構、マニピュレータの制御及び画像処理を担うモジュールと、収穫戦略を状態遷移図で記述した Decision making の5つで構成されている。各モジュールは ROS Network を介して情報を共有している。各要素を制御するためのモジュールにはそれぞれの制御用マイコンとデータをやり取りする Input/Output Layer とそのデータを処理するための Processing Layer から構成されている。

2.4 収穫戦略

収穫戦略を図7に示す。ロボットはレール上を移動しながら、視覚センサを用いて果実を探索する(図7の動作(i))。成熟果実を検出すると(動作(ii))、ロボットの作業空間内の成熟果実を数える(動作(iii))。次に、検出した各果実に対して収穫優先度を付け、収穫優先度が高い果実から収穫する(動作(iv))。収穫優先度は、検出した果実までの距離と周囲の他の果実の有無から決定している。検出した果実までの距離が最も小さく周囲に他の果実がない場合、最も収穫優先度が高くなる。検出した果実とロボット間の距離が小さくても、周囲に他の果実がある場合は収穫動作時に他の果実を傷つけてしまう可能性があるため収穫優先度を下げている。収穫対象果実を決定し、その収穫対象果実に収穫機構を近づけて(動作(v)-1 から(v)-3)、収穫動作を行う(動作(v)-4 から(v)-6)。収穫可能と判断した場合は切断動作に移る。切断に成功した場合(動作(vi))、果実を収穫箱へ入れる(動作(viii))。収穫に成功して、その近傍に収穫可能な果実がある場合は動作(iii)から動作(ix)を繰り返す。収穫に失敗したが、作業空間内に他の果実が存在する場合(動作(ix))、2番目に収穫優先度の高い果実を次の収穫対象果実として、再び収穫動作を行う。ただし、ロボットが停止した位置で収穫動作を2回失敗した場合(動作(vii))や作業空間に果実が存在しない場合(動作(ix))は、レール上を移動して、再度果実を探索する(動作(i))。また、ロボットが停止した位置に収穫可能な果実が1個で、その果実の収穫に失敗した場合は動作(i)に遷移する。

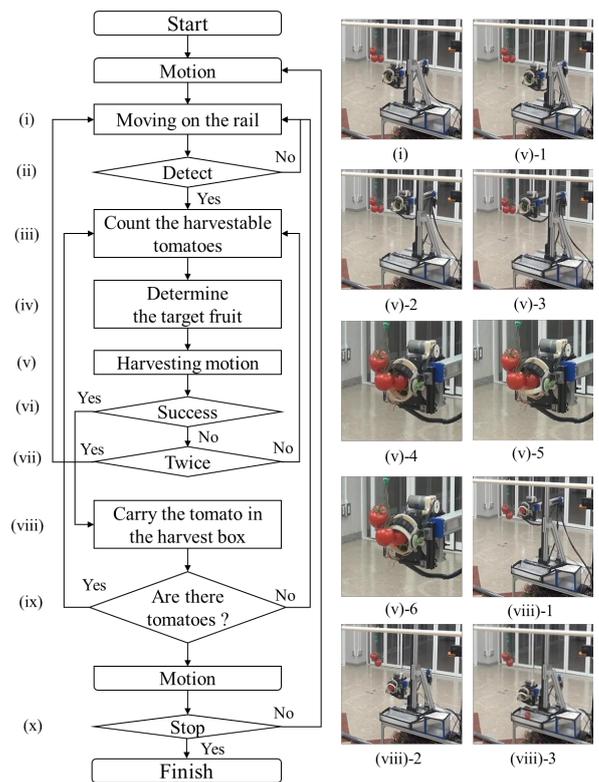


図7 収穫戦略のフローチャート[16]

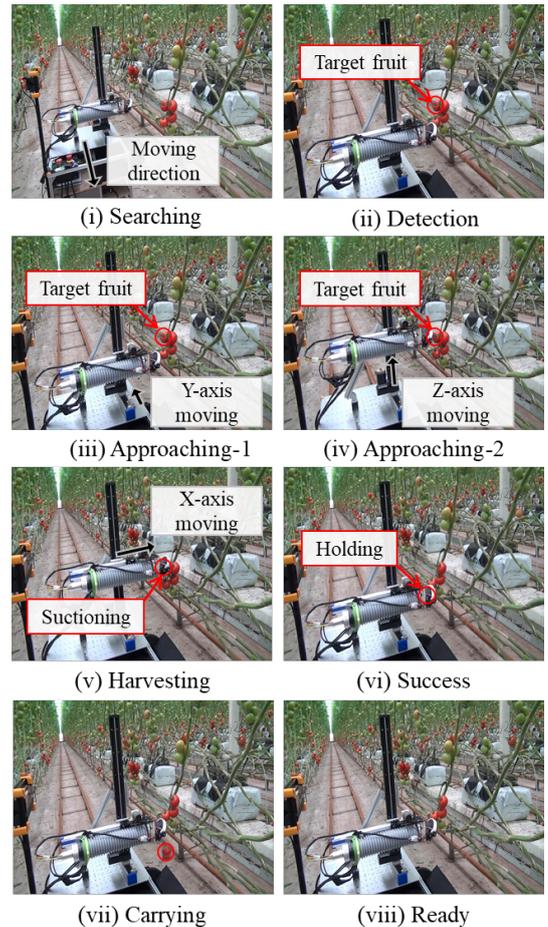


図8 収穫実験の様子[17]

2.5 収穫性能

2020年1月から2月にかけて響灘菜園において収穫実験を行った。図8に収穫実験の様子、表1に実験結果を示す。トマト植物体が並んだ一列50房、計203個(未成熟果実も含む)の果実を対象とした。成熟かつロボットの作業空間内に存在する果実は114個、その内、収穫対象としてロボットが認識した果実は105個であった。搭載するマニピュレータによりトマト房へのアプローチ方法は異なり、切断可能の判断は変わるが、直角座標型マニピュレータを用いた場合、ロボットが切断可能と判定した果実は65個(65/105=62%)であった。その内、収穫に成功した果実は55個であった(収穫成功率は55/65=85%)。収穫時間(収穫対象果実を決定して、収穫した果実を収穫箱に入れるまでの1サイクルの時間)は果実1個あたり約23秒であった。

3. 収穫ロボットの運用方法

3.1 トマト生育状態マップ

大規模施設園芸場では、果房が複数個付いているトマト植物体を一定間隔で一列に配置した棚(以下、トマト棚)でトマトが生育されている。ここでは、そのトマト棚の状況を数値化したマップをトマト生育状態マップと呼ぶこととし、以下にその作成法について述べる。

トマト棚を撮影した画像群からトマト棚全体を表すモザイク画像を生成する。そのモザイク画像内のトマトを検出し、検出された果実に対して位置を算出、成熟段階と収穫時期を推定し、それら情報をモザイク画像に付加することでトマト生育状態マップ(図9)としている。将来的には、そのマップを活用して、収穫基準となる成熟段階を指定し生産者が出荷可能なトマトの個数を推定することを目標としている。加えて、出荷可能なトマトに対して収穫しやすさを評価し、収穫ロボットが収穫可能なトマトの個数と収穫に要する総収穫時間を推定する。

表1 収穫実験の結果

トマト房の数	50	トマト果実の個数	203
成熟果実	120 / 203	可動範囲内	114 / 120
認識した果実	105 / 114	収穫可能と判定	65 / 105
収穫成功した個数	55/65=85%	収穫時間/個	23秒

3.2 収穫しやすさ

収穫しやすさは、収穫ロボットのマニピュレータ及び収穫機構の構造やトマト果実へのアプローチ方法、トマト果実の重なり具合により決まる。本ロボットは直角座標型マニピュレータ、吸引切断機構を搭載しており、前述のアルゴリズムを用いて収穫実験を行なったところ、収穫対象とする果実の前面に対する障害物の遮蔽率が収穫しやすさに支配的な要因であることを確認した。そこで、本ロボットにおける収穫しやすさとしてトマト果実の遮蔽率を用いた。

遮蔽率の評価手法を図10示す。ロボットが取得した画像(RGB, Depth画像)を入力として(図10の処理(i)), Depth画像を用いて背景物体を除去し(処理(ii)), 色情報(HSV色空間)に基づき果実と障害物を抽出する(処理(iii))。抽出した収穫対象果実の画素数とその果実の前面にある障害物の画素数の比によって遮蔽率を算出する(処理(iv))。

上述した収穫実験のログデータに基づき、吸引動作に試みた果実105個の内、95個に対する遮蔽率を評価した。その分布と吸引成功率を図11に示す。この結果から、遮蔽率が0.07から0.08の間で吸引成功率が特に低下している。そこで、本ロボットにおける収穫可能なトマトとして、遮蔽率が0.07以下とした。

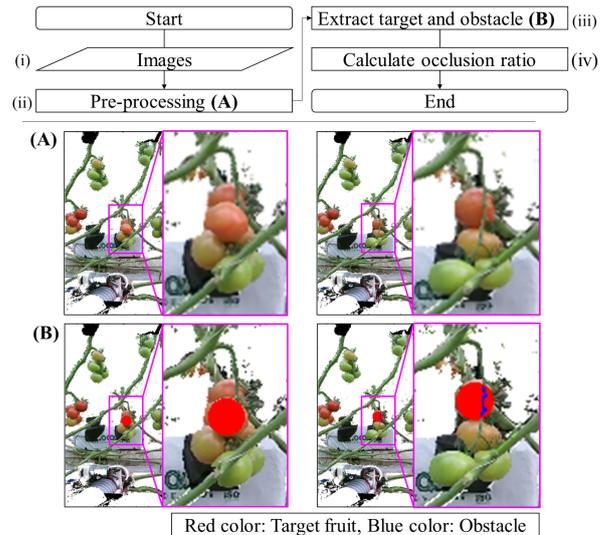


図10 遮蔽率の評価方法

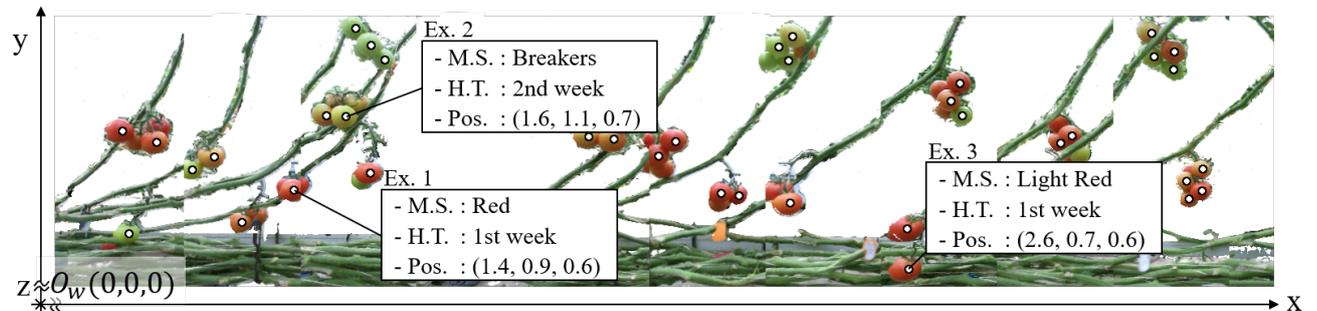


図9 トマト生育状態マップ (M.S.: 成熟段階 (Maturity Stage), H.T.: 収穫時期 (Harvest time), Pos.: 位置 (Position)) [15]

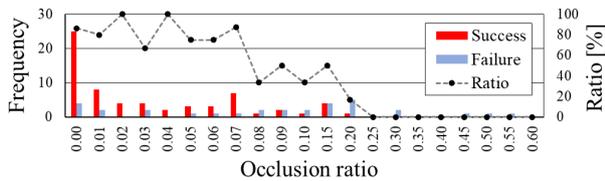


図 11 遮蔽率と収穫実験結果の関係[18]

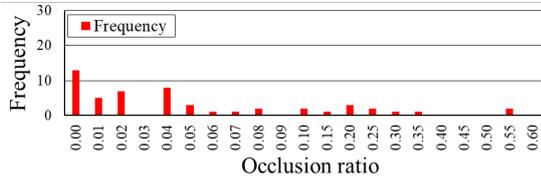


図 12 出荷可能な果実の遮蔽率の分布[18]

3.3 収穫可能な果実の個数の推定

前述とは別のトマト植物体 30 本が並んだトマト棚 (約 15m) のトマト生育状態マップを用いて収穫可能な果実の個数を推定した。そのマップ内の果実は全部で 104 個であり、出荷可能と推定された果実は 52 個であった。その 52 個の果実に対する遮蔽率の分布を図 12 に示す。遮蔽率が 0.07 以下の収穫可能果実の予測数は 38 個であった。

4. おわりに

図 1 に示した監視から収穫までを自動化するシステムの実現を目指し、収穫ロボットとトマト生育状態マップの研究開発を進めている。収穫可能と判定したトマト果実に対する収穫成功率は 85%と良好であったが、果実 1 個あたりの収穫時間は 23 秒であり、収穫作業者と比較して約 6 倍の時間を要している。一度に複数の果実が収穫できるエンドエフェクタの開発や最適な経路計画、照明環境の急激な変化への対応や夜間運用等が今後の課題である。

謝辞 本実験では、響灘菜園株式会社 猪狩英之氏、川尻一志氏、木本啓介氏をはじめ、多くの協力を得た。ここに謝意を表す。本研究は JSPS 特別研究員奨励費 19J10900 の助成を一部受けたものである。

参考文献

- [1] 農林水産省, 2050年における世界の食料需給見通し, https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/attach/pdf/index-12.pdf (2021/8/26).
- [2] 農林水産省, 農業センサス, <https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/> (2021/8/26).
- [3] 農林水産省, 農林水産業ひとロメモ, https://www.maff.go.jp/j/kanbo/hitokuchi_memo/attach/pdf/index-52.pdf (2021/8/26).
- [4] N. Kondo, K. Yata, M. Iida, T. Shiigi, M. Monta, M. Kurita and H. Omori: "Development of an End-effector for a Tomato Cluster Harvesting Robot," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 3(1), pp. 20-24, 2010.
- [5] H. Yaguchi, K. Nagahama, T. Hasegawa and M. Inaba: "Development of An Autonomous Tomato Harvesting Robot with Rotational Plucking Gripper," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and

Systems, pp. 652-657, 2016.

- [6] inaho 株式会社, <https://inaho.co/> (2021/8/26).
- [7] アグリノート, <https://www.agri-note.jp/> (2021/8/26).
- [8] ベジタリア株式会社, <http://www.vegetalia.co.jp/> (2021/8/26).
- [9] M. Monta, N. Kondo and K. C. Ting: "End Effectors for Tomato Harvesting Robot," *Artificial Intelligence Review*, 12, pp. 11-25, 1998.
- [10] T. Yoshida, T. Fukao, T. Hasegawa, "Fast Detection of Tomato Peduncle Using Point Cloud with a Harvesting Robot," *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30(2), pp. 180-186, 2018.
- [11] G. Liu, J. C. Nouaze, P. L. T. Mbouembe and J. H. Kim: "YOLO-Tomato: A Robust Algorithm for Tomato Detection based on YOLOv3," *Sensors*, 20(7), 2145, 2020.
- [12] 株式会社デンソーアグリテックソリューションズ, <https://www.denso-agri.com/about/> (2021/8/26).
- [13] MetoMotion, <https://metomotion.com/> (2021/8/26).
- [14] トマトロボット競技会, <https://www.lsse.kyutech.ac.jp/~socio-robo/tomato-robot2020/> (2021/8/26).
- [15] T. Fujinaga, S. Yasukawa and K. Ishii: "Tomato Growth State Map for the Automation of Monitoring and Harvesting," *Journal of Robotics and Mechatronics*, 32(6), pp. 1279-1291, 2020.
- [16] T. Fujinaga, S. Yasukawa and K. Ishii: "Evaluation of Tomato Fruit Harvestability for Robotic Harvesting," 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 35-39, 2021.
- [17] T. Fujinaga, S. Yasukawa and K. Ishii: "Development and Evaluation of a Tomato Fruit Suction Cutting Device," 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 628-633, 2021.
- [18] 藤永, 石井: "視覚情報に基づくトマト果実収穫ロボットの行動戦略 (第五報) — トマト生育状態マップを活用した総収穫時間の推定 —", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 1P2-A04, 2021.



藤永拓矢 (Takuya Fujinaga)

2021 年九州工業大学大学院生命体工学研究科生命体工学専攻にて博士 (工学) を取得。2021 年より福岡大学工学部電子情報工学科助教。農業ロボットに関する研究に従事。JSME, JSAMFE 等の会員。



安川真輔 (Shinsuke Yasukawa)

2017 年大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻にて博士 (工学) を取得。九州工業大学研究員を経て、2018 年より九州工業大学大学院生命体工学研究科准教授。神経模倣システム、ロボットビジョンに関する研究に従事。JSAI, IEEE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)



石井和男 (Kazuo Ishii)

1996 年東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻にて博士 (工学) を取得。同年九州工業大学情報工学部講師、同助教授を経て、現在九州工業大学大学院生命体工学研究科教授。フィールドロボットに関する研究に従事。JSME, IEEE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)