

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：37111

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20604

研究課題名（和文）トマト果実の「収穫しやすさ」の定義及び自動収穫システムへの適用

研究課題名（英文）Definition of harvestability of tomato fruit and its application to automatic harvesting system

研究代表者

藤永 拓矢（Fujinaga, Takuya）

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：40910633

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主な成果は以下4つである：（1）収穫しやすさの定義および定量化，（2）収穫しやすさに基づく収穫効率の推定，（3）農作物収穫のための切断点の検出，（4）汎用性を考慮した農業ロボットの提案．（1）では，収穫実験の結果から収穫しやすさの支配的な要因として遮蔽率を挙げ，その定量化手法を提案した．（2）では，（1）の結果を基に収穫可能な果実の個数およびその収穫に要する時間を推定した．（3）では，（1），（2）とは異なる収穫方法を採用した場合の切断点検出手法を提案した．（4）では，農業ロボットのプラットフォームを提案し，そのケーススタディとして収穫ロボットと監視ロボットを開発した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマート農業に関する研究は多様化しており様々なアプローチがなされてきた．しかし，これからは各要素技術を統合しシステム化して，実証実験からその有効性を評価することが重要である．本研究では農園のシステム化を目指して監視と収穫の自動化に焦点を当てた．先行研究では議論の少ないロボットにとっての「収穫しやすさ」を定義し定量的に評価し，それをを用いて農園内にある農作物の収穫可能な個数や総収穫時間を推定した．これにより，ロボットを農園に導入する際の効果を定量的に評価することができる．営農者はその効果を踏まえて農業をマネジメントでき，それは農業分野における社会問題（例えば，労働者不足）の解決に寄与すると考える．

研究成果の概要（英文）：The achievements of this study are four: (1) Definition and quantification of harvestability, (2) Estimation of harvest efficiency based on harvestability, (3) Detection of cutting point for crop harvesting, and (4) Proposal of agricultural robot considering versatility. In (1), the occlusion ratio was identified as a dominant factor in the harvestability from the results of the harvesting experiment, and a quantification method was proposed. In (2), the number of harvestable fruits and the time required for harvesting were estimated based on the results in (1). In (3), this study proposed a cutting point detection method when adopting a harvesting method different from (1) and (2). In (4), a platform for agricultural robot was proposed and harvesting robot and monitoring robot were developed as the case study.

研究分野：フィールドロボティクス

キーワード：スマート農業 収穫ロボット 監視ロボット 生育状態マップ 収穫しやすさ 収穫効率 切断点の検出 汎用性

## 1. 研究開始当初の背景

農業分野における農業従事者の減少、高齢化、後継者不足等の喫緊の課題に対して、ロボット技術や情報通信技術を活用したスマート農業が期待されている。スマート農業を目指した研究課題として、農業機械の自律走行、圃場環境や農作物の監視、収穫の自動化などが挙げられる。農作業の自動化が進む一方で、農作物の生産は農業従事者の経験や勘によるところが多く、圃場環境の制御だけでなく収穫時期や品質の判断もまたそうである。そのような面に着目して、熟練者のノウハウの定量化を目指した研究も行われている。スマート農業に関する研究は多様化しており様々なアプローチが提案されてきた。しかし、これからは各要素技術(例えば、自動収穫やセンシング、熟練者のノウハウの定量化)を統合しシステム化して、実環境における実証実験からその有効性を評価することが重要な研究課題であると考えられる。

本研究は、農作物の監視および収穫の自動化に着目した。特に、収穫ロボットに関する研究は1980年代から実施されている。今日までに様々な農作物を対象とした収穫ロボットが提案された。収穫機構や果実検出に関する研究も行われ、収穫率や検出率が議論されてきた。また、様々な研究機関が収穫ロボットの商用化を目指して研究開発に着手している。しかし、それらの事例の多くはロボット単体のみの開発または運用が提案されており、どのように実環境に導入し活用していくかという議論が希薄である。収穫ロボットの導入を普及させるためにはどのように運用していくかという問題があり、収穫ロボットを含めた農園のシステム化が課題であると考えられる。そこで、本研究では農園のシステム化を目指して監視と収穫の自動化に焦点を当てる。また、先行研究では議論の少ないロボットにとっての「収穫しやすさ」を定義し定量的に評価する。

## 2. 研究の目的

本研究では、図1に示すように複数台の農業ロボットによる農作物の監視と収穫を連携したシステムの実現を目指している。監視ロボットが農園内の農作物の情報を取得し(①)、サーバ上でその情報を処理して生育状態マップを生成する(②)。生育状態マップとは、農園内の農作物の位置や成熟度、収穫時期などの情報を持つマップである。そのマップをもとに収穫戦略を構築、収穫時間を算出し、収穫ロボットが農作物を収穫する(③)。

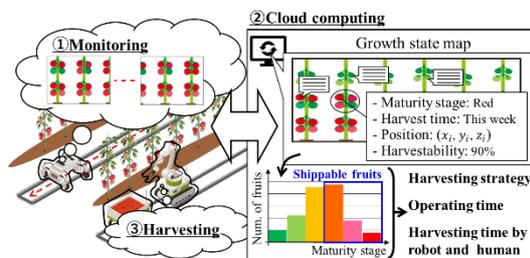


図1 監視及び収穫の自動化

それを達成すべく本研究の目的は以下4つである：(1) 収穫しやすさの定義および定量化、(2) 収穫しやすさに基づく収穫効率の推定、(3) 農作物収穫のための切断点の検出、(4) 汎用性を考慮した農業ロボットの提案。

## 3. 研究の方法

### (1) 収穫しやすさの定義および定量化

収穫ロボットにおける収穫しやすさは様々な要因から決定される。その要因として、例えば、農作物の種類、栽培環境、マニピュレータの自由度とその可操作度、収穫方法、果実と手先位置の幾何学的関係などが挙げられる。本研究では、吸引切断機構を有する中玉トマト収穫ロボットに焦点を当て、収穫実験を通して得た知見に基づき収穫しやすさを定義し定量化する。

### (2) 収穫しやすさに基づく収穫効率の推定

中玉トマトが多段栽培される植物工場に本ロボットを導入した際の収穫効率を評価する。その評価において、収穫個数と総収穫時間を推定する。農作物の情報が付加されたトマト生育状態マップに(1)で定量化した収穫しやすさを追加し、そのマップから収穫可能な果実の個数およびその収穫に要する時間を推定する。

### (3) 農作物収穫のための切断点の検出

(1)および(2)で焦点を当てた吸引切断機構を有する中玉トマト収穫ロボットは、果実を検出し、その果実を吸引して収穫する。一方、異なる収穫方法(例えば、ハサミ)の場合、果実だけでなく、果実を支える部分(果柄や茎)を検出した上で切断点を決定する必要がある。そこで、本項目ではハサミ型収穫機構を有する農業ロボットのための切断点検出手法を提案する。

### (4) 汎用性を考慮した農業ロボットの提案

農業ロボットの機能は収穫、監視、剪定、農薬散布など様々である。各機能に合わせて農業ロボットを開発した場合、膨大な時間とコストが必要となる。そこで、農業ロボットの機能をユーザの要望に応じてカスタマイズ可能な汎用性を考慮した農業ロボットを提案する。そのケーススタディとして、収穫ロボットと監視ロボットを開発する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 「収穫しやすさ」の定義および定量化

まず、吸引切断機構を有する中玉トマト収穫ロボット(図2)について説明する。本ロボットは、エンドエフェクタとして吸引切断機構を採用しており、吸引部によって収穫対象のトマトを房から離し、切断部によってそのトマトの小果梗を切断する。マニピュレータには、3軸直交型を採用している。移動機構は農園内のレール上を移動可能な機構、視覚センサは俯瞰カメラ1個となっている。ロボットは農園内のレール上を移動しながらトマトを探索し、トマトを検出すると停止する。収穫対象のトマトに吸引切断機構を近づけ、目標となるトマトを吸引し、切断可能と判断した場合は、切断動作に移る。切断不可能と判断されたが、作業空間内に他のトマトが存在する場合は、それを次の収穫対象として、再び、吸引及び切断動作を行う。作業空間内にトマトが存在しない場合は、レール上を移動して、再度、トマトを探索する。

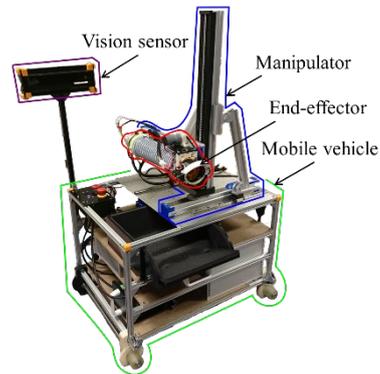


図2 中玉トマト収穫ロボット

実環境における収穫実験の結果より、収穫しやすさにおける支配的な要因を定性的に評価した。本ロボットはトマトを吸引できなければ切断動作に移らない。そのため、本ロボット構成(エンドエフェクタとして吸引切断機構、マニピュレータとして3軸直交型、視覚センサとして俯瞰カメラ1個)において、収穫対象とするトマトの前面に対する障害物の遮蔽率が、収穫しやすさに大きく影響することが明らかとなった。そこで、収穫しやすさの要因である遮蔽率を定量化した。

遮蔽率の定量化手法を図3示す。ロボットが取得した画像を入力として、Depth画像を用いて背景物体を除去し(図3(A)), 色情報に基づきトマトと障害物を抽出する(図3(B))。そして、抽出した収穫対象のトマトの画素数とそのトマト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。収穫実験にて吸引動作に試みたトマト95個に対する遮蔽率と収穫成功可否の関係を図4に示す(図中のRatioは収穫成功率を表す)。図4より遮蔽率が低いほど収穫成功率が高いことがわかる。また、遮蔽率が0.07から0.08の間で収穫成功率が大幅に低下している。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以下という基準を設定した。

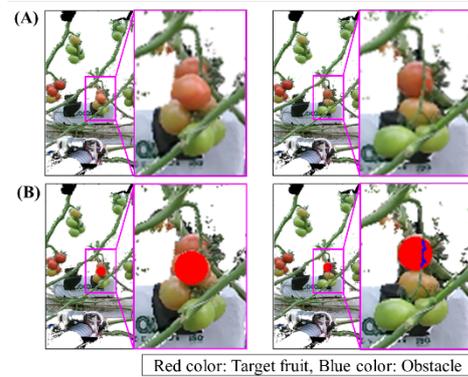
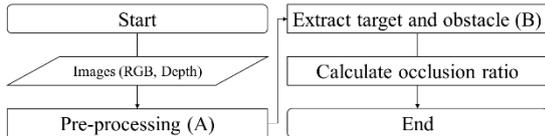


図3 遮蔽率の定量化手法

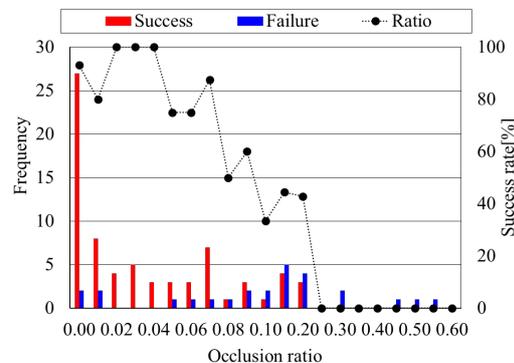


図4 遮蔽率と収穫成功可否の関係

##### (2) 収穫しやすさに基づく収穫効率の推定

トマト苗30本が並んだ栽培環境(約15[m])の生育状態マップを用いて収穫効率を推定した。そのマップ内にはトマトが104個あり、出荷可能と推定されたトマトは52個であった。なお、出荷可否は、定量化した農業従事者のノウハウに基づき判定した。52個のトマトに対する遮蔽率の分布を図5に示す。遮蔽率が0.07以下のトマトは38個であり、その38個の収穫に要する時間を推定した。本ロボットのトマト1個あたりの収穫時間は23秒であり、ロボットの総移動距離が15m、ロボットの移動速度が0.2[m/s]の場合、総収穫時間は94.9秒と推定された。

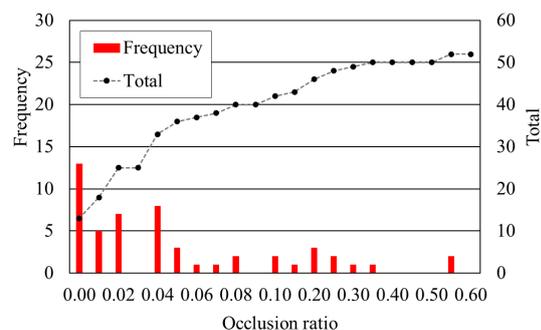


図5 出荷可能な果実の遮蔽率の分布

### (3) 農作物収穫のための切断点の検出

本項目では農作物として商品価値の高いイチゴに着目した。また、切断点を検出する際に茎を検出する必要がある。そこで、収穫のための切断点に加えて、茎剪定のための切断点も同時に検出する手法を提案した。

本手法は3段階で構成される：(A)イチゴ植物体の認識、(B)果実、へた、茎に関する情報の抽出、(C)切断点の検出。まず、処理(A)は、農業ロボットが取得した農園内の画像を入力として、深層学習を用いたセマンティックセグメンテーションによって入力画像を画素毎に5分類(果実、花、へた、茎、その他(葉や背景など))する。その結果に対して、植物体の形状的な特徴に基づいてノイズ処理を施す。次に、処理(B)は、セマンティックセグメンテーションの結果を用いて果実、へた、茎の情報(成熟度、個数、位置)を抽出する。最後に、処理(C)は、農業ロボットの作業不可領域を推定し、それと植物体の情報から果実の収穫および茎の剪定のための切断点を検出する。

果実の検出結果と切断点の検出結果の2つ観点で1000枚の画像に対して人間による視覚的な評価を行った。1000枚の画像に成熟果実、未成熟果実、茎がそれぞれ1354、2263、4878個存在した。それらに対して、それぞれ1295、2079、4044個検出された。果実の検出結果は、約9割の精度となった。切断点の検出精度に関して、収穫のための切断点は9割を超え、剪定のための切断点は約8.5割となった。

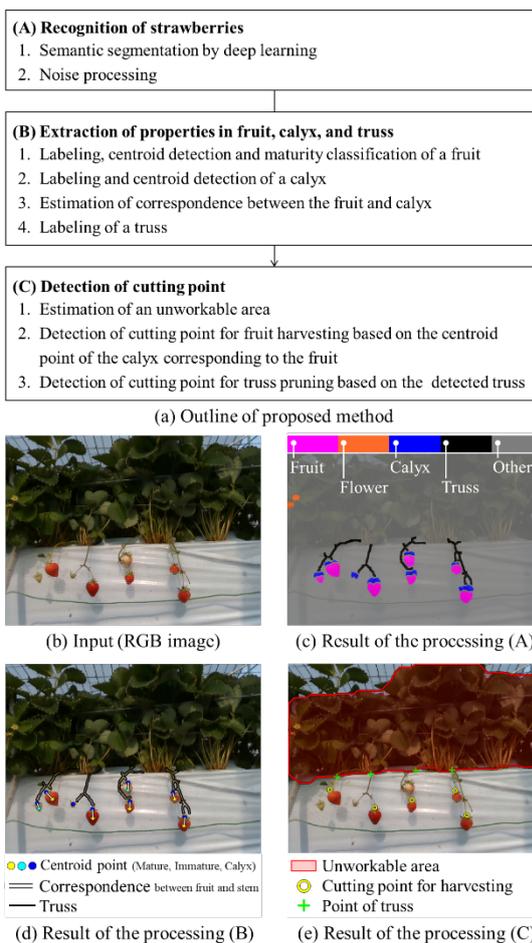


図6 切断点検出手法

### (4) 汎用性を考慮した農業ロボットの提案

本ロボットは、ベースユニットとアプリケーションユニットから構成される(図7(a))。ベースユニットは、ロボット制御用PCやバッテリー、その他の回路等が入った防水防塵ボックス(図7(a)中の(i)、図7(b))と施設内を移動するための移動機構(図7(a)中の(ii))から構成される。アプリケーションユニットは、ユーザが農作業の内容に応じてロボットの機能をカスタマイズ可能な部分である。例えば、ロボットに収穫機能を付加する場合は、農作物を収穫するための収穫機構、それを農作物に近づけるマニピュレータ、そしてカメラがアプリケーションユニットの構成要素となる。

そのケーススタディとして収穫ロボット(図8(a))及び監視ロボット(図8(b))を開発した。各図において、(i)がアプリケーションユニット、(ii)がベースユニットである。収穫ロボットはアプリケーションユニットとしてマニピュレータ、収穫機構、カメラから構成される。監視ロボットはアプリケーションユニットとしてカメラ搭載のドローンから構成される。ベースユニットにカメラを固定しないことで、ドローンの飛行範囲内まで視界の拡張が可能となる。各ロボットをそれぞれトマト農園やイチゴ農園で動作確認し、その有用性を示した。

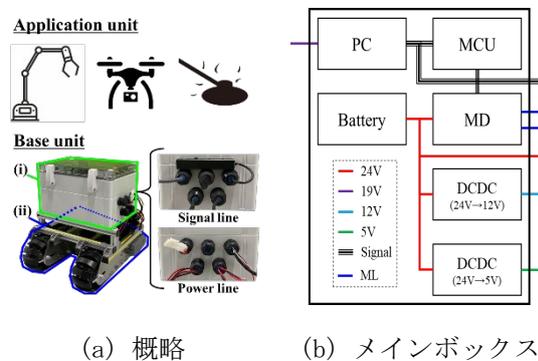


図7 汎用性を考慮した農業ロボット

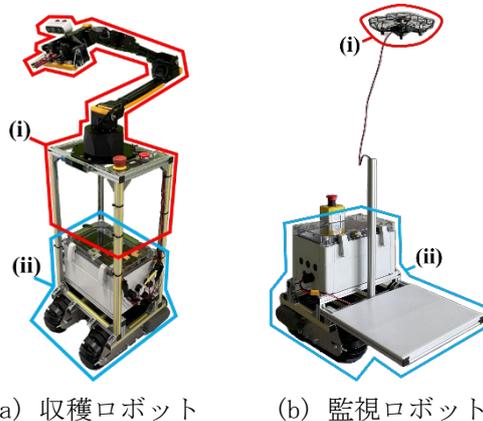


図8 ケーススタディ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤永拓矢, 安川真輔, 石井和男	4. 巻 39
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 921-925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.921	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 藤永拓矢, 石井和男
2. 発表標題 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
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤永拓矢, 中西恒夫
2. 発表標題 小規模施設園芸における農作業支援のための農業ロボットの開発 異なる環境の地図構築の検証
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Fujinaga, Tsuneo Nakanishi
2. 発表標題 Evaluation of Maps Constructed by Crawler-type Agricultural Robot in Different Farms
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤永拓矢, 増本敬太, 中西恒夫
2. 発表標題 イチゴ栽培における農作業支援ロボットのための植物体の識別
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井和男, 松尾貴之, 武村泰範, 園田隆, 西田祐也, 安川真輔, 富永萌子, 藤永拓矢
2. 発表標題 第7回トマトロボット競技会報告
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Fujinaga, Tsuneo Nakanishi
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF A GENERAL-PURPOSE SMALL AGRICULTURAL ROBOT FOR SMALL-SCALE FARMS
3. 学会等名 International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Fujinaga, Tsuneo Nakanishi
2. 発表標題 Semantic Segmentation of Strawberry Plants Using DeepLabV3+ for Small Agricultural Robot
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeru Oshige, Moeko Tominaga, Takuya Fujinaga, Yasunori Takemura, Jonghyun Ahn
2. 発表標題 Development of Harvesting Robot for Tomato Robot Competition 2022 and Its Evaluation
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuo Ishii, Takayuki Matsuo, Yasunori Takemura, Takashi Sonoda, Atsushi Sanada, Yuya Nishida, Shinsuke Yasukawa, Takuya Fujinaga, Moeko Tominaga, Daisaku Arita, Kazushi Kawajiri, Kenich Ohshima, Masayuki Okada, Kanako Shirahashi
2. 発表標題 Tomato-Harvesting Robot Competition: Developed Robots and Results of 9th Competition,
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------