吸引型ミニトマト収穫ロボットによる実圃場における実証実験

A field test for a suction-type cherry tomato harvesting robot.

○森　裕紀（トクイテン/早稲田大学）　野々山　昭太（トクイテン）
前原　圭祐（トクイテン）　西川　隆介（トクイテン）
奥野　福実夫（トクイテン）
菅　祐樹（早稲田大学/Sugar Sweet Robotics）

Hiroki MORI, Waseda University/Tokuiten Inc., hiroki@tokuiten.jp
Shota NONOYAMA, Tokuiten Inc.
Keisuke MAEHARA, Tokuiten Inc.
Ryusuke NISHIKAWA, Tokuiten Inc.
Fumio OKUNO, Tokuiten Inc.
Yuki SUGA, Waseda University/ Sugar Sweet Robotics

Previous research and development have been limited to evaluations in controlled farm environments, and long-term verification of automated harvesting operations at a practical level has not been conducted. In this study, we developed the T7 suction-type cherry tomato harvesting robot. The robot integrates a suction-based harvesting mechanism with a mobility system that moves along rails, and we conducted field demonstrations at Chita Organic Farm, operated by Tokuiten Inc. This paper presents the results, showing a harvest of 23.35 kg during approximately three hours of continuous operation, and discusses the practical feasibility of harvesting robots in organic cherry tomato cultivation.

Key Words: Cherry tomato, Harvesting robot, Field test

1. 緒言

有機ミニトマト農業の自動化を目指し，2021 年 8 月に株式会社トクイテンを設立した．これまでに農場内での移動が可能なロボットプラットフォーム「Titan」（ティターン）の開発[1]，および低吸引力でも安定して収穫可能なミニトマト吸引収穫機構の開発[2]を進めてきた．「Titan」は不整地走行に強いスキッドステアローダー方式を採用し，AR マーカーと LiDAR を用いた自律移動アルゴリズムにより不整地路面における自律走行を実現している．また，吸引収穫機構では，捻ることでヘタから容易に剥離するプラム型ミニトマト「サンタスティ」の特性を活かし，偏心した放射形状のシリコン製オリフィスを回転させる機構により，低吸引力でも効率的に収穫できることを実験的に示した．

その後，トクイテンでは収穫ロボットの開発に力を入れているが，これまでの研究開発では限定的な農場環境での評価にとどまっており，実用レベルでの長時間稼働による収穫作業の自動化検証は行われていなかった．本研究では吸引収穫機構とレール上を移動する移動機構を統合した吸引型ミニトマト収穫ロボット T7 を開発し，株式会社トクイテンの知多有機農場における実圃場での実証実験を行った．本論文では，3 時間程度の連続稼働で 23.35kg の収穫量を達成した結果について報告し，有機ミニトマト栽培における収穫ロボットの実用可能性について考察する．

2. システム概要

2.1 ハードウェア構成

本研究では，有機ミニトマトの収穫を目的とした吸引型収穫ロボット「T7」を開発した．T7 は収穫範囲を広げるため，x,y,z 方向の直交アームとエンドエフェクタの 2 自由度（Pitch 軸，Yaw 軸）を持つ合計 5 自由度の機構を採用した．これは先行研究で用いたシリアルリンクアームでは収穫範囲が制限されるという課題があったためである．

収穫ロボットは図 1 に示すように台車上に設置され，レール上を移動する方式を採用した．本研究では収穫動作の開発に集中するため，圃場内の自由な移動ではなく，畝間通路に敷設したレール上での直線移動を前提とした．これにより，移動制御の複雑さを低減しつつ，実圃場での長時間稼働試験が可能となった．

2.2 吸引機構とエンドエフェクタ

エンドエフェクタには，前研究[5]で開発した偏心シリコン製オリフィスを回転させる機構を採用した（図 2）．このエンドエフェクタは，低吸引力でも安定した収穫が可能であり，プラム型ミニトマト「サンタスティ」の特性に適した設計となっている．エンドエフェクタの内部には赤外線センサを設置し，トマトの吸引を検知できるようにした．

吸引源には家庭用掃除機（日立製 CV-KP300K 650W）を使用し，台車上に設置した．また，シリコン製オリフィスの回転駆動には Dynamixel.

2.3 収穫対象トマトの検出

トマトの検出には YOLOv5 を用いた．学習データとして，株式会社トクイテンの知多農場で撮影したトマト画像を使用し，赤トマトと緑トマトについてアノテーションを行い追加学習を行った．実際の収穫動作では赤トマトのみを収穫対象とし，さらに完熟度の推定を行った．完熟度の推定には，検出されたトマト領域の HSV 色空間における色相値に基づく独自のアルゴリズムを開発した．完熟度は 0〜100%の連続量として推定され，必要に応じて収穫の基準となる閾値を変更することができる．これは実際の収穫でも完熟度の低い状態で収穫し，

2.4 収穫動作フロー

T7 の収穫動作は以下のフローで実行される（図 3）：

1. カメラ映像から YOLOv5[3]によりトマトを検出
2. 検出された赤トマトに対して完熟度を推定
3. 完熟度が閾値以上のトマトを収穫対象としてリスト化
4. 収穫対象のトマトの位置から効率的な収穫順序を決定
5. 吸引装置を ON にし，シリコン製オリフィスの回転を開始
6. 収穫順に従い，各トマトに対して：
    a. トマトの位置へアームを移動

b. トマトに対して正面からアプローチして吸引を試みる
c. エンドエフェクタの赤外線センサがトマト吸引を感知したら，アームを引いて収穫完了
d. 次のトマトの位置へ移動

7. 全収穫対象トマトへのアプローチが完了したら，吸引とオリフィスの回転を停止
8. ロボットを 0.5m 前方へ移動
9. 手順 1 から繰り返す
10. 設定回数の収穫動作が完了するか，レール下に設置された杭にセンサが反応したら収穫を終了し，畝の入り口へ戻る

2.4 評価方法

T7 の性能評価は以下の方法で行った．

1. 対象畝のトマトをロボットで可能な限り収穫
2. 収穫後，ロボットが取りきれなかったトマトを人間が手作業で収穫
3. ロボットと人間が収穫したトマトをそれぞれ選果し，以下に分類：
   a. A 級品：品質が良く市場価値の高いトマト
   b. B 級品：品質は劣るが出荷可能なトマト
   c. 廃棄品：傷や形状不良により出荷できないトマト
4. 各分類の重量を計測
   a. ロボットが収穫した A 級品　Ra [kg]
   b. ロボットが収穫した B 級品　Rb [kg]
   c. ロボットが収穫した廃棄品　Rc [kg]
   d. 人間が収穫したトマト　H [kg]
5. 収穫率の算出：

$$収穫率 = (Ra+Rb)/(Ra+Rb+H) \times 100 \quad (1)$$

6. 損失率の算出：

$$損失率 = Rc/(Ra+Rb+Rc) \times 100 \quad (2)$$

7. A 品率の算出：

$$A品率 = Ra/(Ra+Rb+Rc) \times 100 \quad (3)$$

ここで，収穫率は取るべきトマトがどれくらい取れたか，損失率はロボットで収穫したトマトがどのくらい廃棄されたか，A 品率はロボットが収穫したトマトのうちどのくらい A 品であるか，それぞれの割合である．この廃棄されたトマトの中には，栽培中に割れているなどして出荷に適さない場合と，ロボット収穫中に痛んで割れたり，認識ミスやターゲットのトマトの隣で巻き添えで収穫されてしまった緑色のトマトの場合が混在している．この評価方法により，実用的な観点からロボットの収穫性能を定量的に評価することが可能となった．

3. 実証実験

3.1 実験条件

2025 年 1 月 8 日 10 時頃から 15 時頃にかけて昼休みを 1 時間を挟んで実証実験を行った．畝に挟まれた幅 80cm の長さ 25m の 3 つの通路にレールを敷設し，畝の片側 25m を 1 回として，4 回の収穫試験を行った．

トマトは土に苗を植える土耕栽培であり，ハイワイヤーと呼ばれるトマトの茎を上へ誘導する栽培方式である（図 3）．

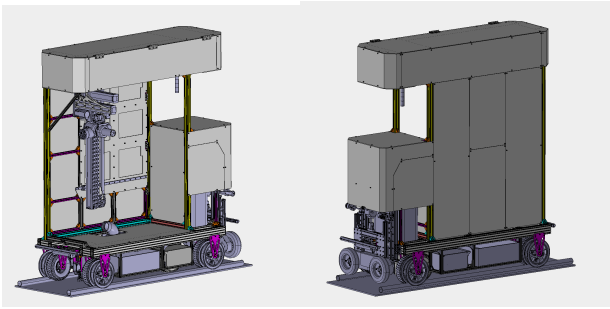


Fig. 1 Design overview of T7 System



Fig. 2 Suction-type cherry tomato harvesting robot: T7



Fig. 3 Cultivation environment with rails.

3.2 試験結果

ロボット収穫を行った後，人収穫を行った結果を以下に示す．

- 試験 1（図 4）
  - ロボット収穫：6.15kg
  - 人収穫：　2.20kg
- 試験 2
  - ロボット収穫：5.25kg
  - 人収穫：　1.65kg
- 試験 3
  - ロボット収穫：3.25kg
  - 人収穫：　2.45kg

- 試験 4
  - ロボット収穫：8.70kg
  - 人収穫：　　5.35kg



Fig.4 The result of experiment 1
Left: Robot harvesting, Central: Human harvesting,
Right: Human harvesting

- 総計
  - ○ ロボット総収穫量：　23.35kg
  - ○ ロボット収穫 A 品 Ra：13.1kg
  - ○ ロボット収穫 B 品 Rb：7.8kg
  - ○ ロボット収穫廃棄 Rc：2.45kg
  - ○ 人収穫 H：　　11.65kg
  - ○ 収穫率：　　64.2%
  - ○ 損失率：　　10.4%
  - ○ A 品率：　　56.1%

実証実験の結果，全体で 23.35kg の収穫をロボットで行い，20.9kg の出荷可能なトマトを得ることができた．この出荷可能なトマトは，当日株式会社トクイテン知多農場で収穫された全体のトマトと同様のプロセスにより，愛知県内のスーパーなどへ出荷された．

4. 結言

本研究では，有機トマト農場において実運用を見据えたロボット収穫実証実験を行った．23.45kg のトマトをロボットにより自動収穫することに成功した．人による収穫は 1 日 1 人当たり 100kg 程度であると考えると，このロボットを 1 日中稼働させれば人と同等の収穫量を達成することができる．

ただし，今回の収穫実験ではレールへの上げ降ろしや，レール間の移動は人力で行っており，全自動化が達成されているわけではない．今後は，収穫の精度を高めると同時に，複数の通路に跨った一連の収穫動作を全自動化するロボットシステムを目指す．

参考文献

[1] 森裕紀，野々山昭太，尾形邦裕，菅佑樹，"有機ミニトマト農場自 動化ロボット Titan の開発"，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演 概要集 2023，2P1-B02，2023

[2] 森裕紀，野々山昭太，今野麟太郎，水上裕太，田光太郎，菅佑樹，"低吸引力においても収穫可能なプラム型ミニトマト吸引収穫機構"，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演 概要集 2024，2P1-A02，2024

[3] Glenn Jocher, "YOLOv5 by Ultralytics,"
https://github.com/ultralytics/yolov5