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

Suction Harvesting Mechanism for Plum-shaped Mini Tomatoes Viable Even at Low Suction Force

○森　裕紀（トクイテン/早大）　野々山　昭太（トクイテン）
今野　麟太郎（豊技大）　水上　裕太（豊技大）
田光　太郎（豊技大）　菅　佑樹（Suger Sweet Robotics/早大）

Hiroki MORI, Tokuiten Inc, Waseda Univ., hiroki@tokuiten.jp
Shota NONOYAMA, nono@tokuiten.jp
Rintaro Konno, konno.rintaro.be@tut.jp
Yuta Mizukami, mizukami.yuta.pe@tut.jp
Taro Tako, tako.taro.tf@tut.jp
Yuki Suga, Sugar Sweet Robotics, Waseda Univ., ysuga@ysuga.net

This paper proposes three types of suction harvesting mechanism, each aiming to meet specific requirements such as individual fruit harvesting, leaving tomato hedges, and preventing damage. Experimental results show Proposal C with an eccentric rotating mechanism to be the most effective Qualitatively. Further development aims at integrating tomato detection, harvesting, transportation, and robot mobility for a fully automated system.
***Key Words*:** Harvesting Robot, Sucking, Tomato

1. 緒言

本論文はミニトマトの収穫自動化に着目する．愛知県が示している慣行農法のミニトマト農業経営モデルでも収穫作業は全体の労働時間の25%を占めており，収穫に関わるコスト削減は経営にも大きな影響を与える[1]．ミニトマトは大玉のトマトに比べて，同じ収穫重量を確保するための収穫のための動作が必然的に多くなるため収穫のための時間も多くかかってしまうことになる．ミニトマトの収穫が自動化されれば，コスト削減とともに人手不足問題の解決にも資するものになる．

有機農業は世界的な需要の高まりとともに，化学肥料の主要な原料となり国際情勢に左右される天然ガスの供給に左右されない農法として，各国が普及計画を立てている[1]．しかし，化学肥料や化学農薬を用いた農法である慣行農法に比較して，収穫量が減ることや農作業の負担が大きくなるなど課題も多い．農業従事者の高齢化が進み労働人口が減っている中で，どのように農作業を自動化・省力化していくかが喫緊の課題である．

本論文では，ミニトマトの収穫に関して吸引を前提とした手法を提案する．2節では，これまでのミニトマト自動収穫に関する先行研究を外観して，必要な要件について議論する．3節では本論文で提案する吸引型収穫機構について3つの提案を行う．4節でそれらの実験とその結果について紹介し，5節で考察，6節でまとめ今後の開発方針について議論を行う．

2. ミニトマト収穫ロボット

2.1 ミニトマトの特徴と収穫戦略

トマトには大玉・中玉・ミニなどの大きさによる分類があるほか，ミニトマトにはヘタの上にある凹みで折れやすくなっている品種や房全体が赤くなるタイミングが近く房で収穫して出荷する品種，またヘタと実が剥がれやすくなっておりヘタなしでの出荷を想定する品種などの種類がある．

中でも，株式会社トクイテンが栽培するオランダ・ENZA ZADEN社の開発した品種であるサンタスティは長細い形状で，皮が厚く，果肉の割合の多いゼリー質の少ない品種である．サンタスティの実とヘタの接着に関しては，引っ張りには強いが，ヘタと実の相対的な角度が変化するだけで簡単に剥がれる性質がある．本論文でもサンタスティを前提とした収穫メカニズムを提案する．

最近のミニトマトはヘタの状態で販売されていることが増えている．トマトのヘタがあるとヘタの表面にしばしばカビが発生したり，ヘタの部分の気孔で呼吸をするため蒸散や成分の変性が起きることから，重量や栄養成分が減少することがある．そのため貯蔵性の観点からは，ヘタなしでの収穫にメリットがある[6]．これまで，緑色に新鮮さを感じる消費者に合わせてヘタありトマトが売られているため，消費者の理解を得る必要があるが，株式会社トクイテンでは有機ミニトマトをヘタなしで出荷し，問題なく販売できている．

トマトの性質として，一つの房の中でも根元の実から熟していくため，房の中でも熟度に差が出る．出荷に適した果実だけを収穫するためには，狙った果実一粒だけを選択的に収穫しなければならない．

2.2 トマト自動収穫の戦略と機構

トマト収穫ロボットの開発は学術研究機関や企業で活発に研究開発されているが実用化に至った製品はまだない．矢口ら2018は，大玉トマトの自動収穫に関して，ヘタの上にある果柄の切断と実の把持と捻りによるもぎ取りのための機構を設計制作して比較している[3]．荒木ら2021はミニトマトの収穫を行う自動収穫機構を提案し，ヘタの上部にある果柄部分で切断されるように，刃物を使用せずもぎり取る機構を開発した[4]．長谷川2021は鈴なりのミニトマトの房ごと収穫して出荷できる品種の自動収穫を電動バサミを使用して行うシステムを開発した[5]．以上の提案ではトマトの実にヘタがついている状態での出荷が前提であるが，森ら2023[2]では，サンタスティの捻って採れる性質を利用して市販されているトングを利用してトマトを掴んで捻って収穫する手法を提案している．

ほとんどの収穫ロボット開発は生産者が決めた品種を前提としており，生産者や卸業者，小売の要求をそのまま実現しようとした結果，ヘタを実に残した形の自動収穫となっている．しかし，実際の販売にヘタは必要ないことが株式会社トクイテンでの販売実績からもわかっているため，本提案ではヘタを実に残さない前提で提案を行う．

3. 提案するエンドエフェクタ

本研究では，二つの吸引機構を提案する．

3.1　要求仕様

以下の要求を満たすエンドエフェクタを設計する．

a. 吸引により一粒づつトマトを収穫する
b. トマト収穫時，ヘタは枝に残す
c. 衝突による損傷を防ぐため吸引力を低減する
d. トマトをヘタから剥がす瞬間だけは吸引力を増加する
e. 捻ると実が剥がれやすい品種の性質を生かす
f. 吸引口をトマトに押し付ける際に，吸引口の中心軸とトマトの中心が5-10mm程度離れていても吸引させる

3.2　提案機構

吸引は業務用掃除機（Kyocera　AVC1150，Table1）を利用する前提で，本論文では三種類の吸引機構を提案する．

3.2.1　提案A：放射形状のシリコン製オリフィスによる吸引増強と歯状構造の回転による吸引誘導機構

cとdの要求を満たすためトマトを吸引する先端部分を流路を狭めることにより圧力を増加させる「オリフィス」を設置する．またこのオリフィスをシリコン板により柔軟に製造し，放射状に切り込みを入れる（図1左）ことでトマトが通過する際に邪魔にならないようにしている．

また，eとfを満たすためシリコン製オリフィスとトマトの間に三角形の突出部（歯状構造，図2）を構成して回転させることで，オリフィス中央の穴へ誘導するとともに，トマトに捻りを加えて果実がヘタから取れやすくする構造とした．歯状構造の回転はプーリを用いて行った（図3）．

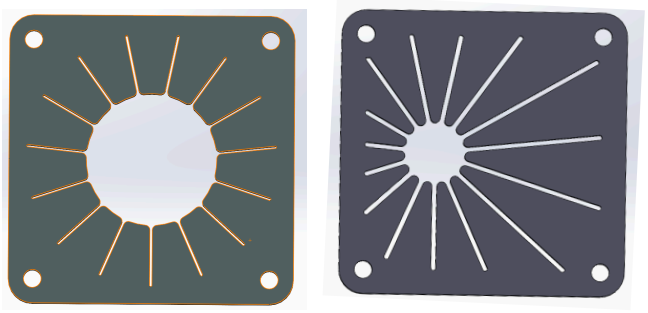


Fig. 1 Actual picture of our sucking harvesting mechanism (Proposal B)

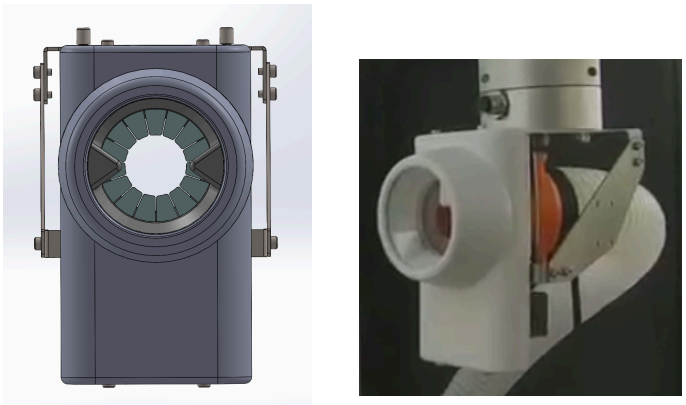


Fig. 2 A 3D CAD image and an actual picture of our sucking harvesting mechanism (Proposal A)

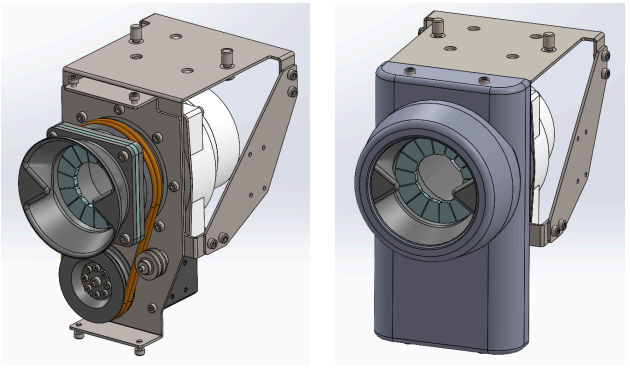


Fig. 3　Rotation mechanism for a teeth-like structure by a pulley (Proposal A)

3.2.2　提案B：放射形状のシリコン製オリフィスを回転させることによる吸引増強とトマト果実の捻りによる実離れの促進機構

提案Aと異なり外側の歯状構造を省いて，シリコン製オリフィスを直接回転させることとした（図4）．シリコン製オリフィスの放射状の切れ込みの形状は提案Aと同様とした（図1左）．これによりシリコン製オリフィスがトマトに刺激を与えることで実の角度が変わりヘタから取れやすくすることを期待している．

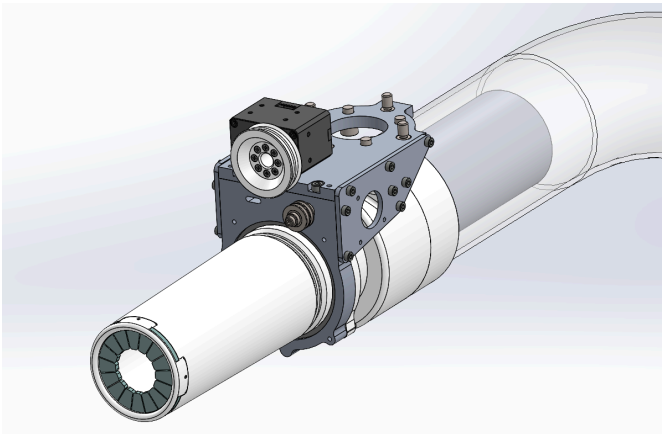


Fig. 4　3D CAD image of our sucking harvesting mechanism (Proposal B)

3.2.3　提案C：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ことによる吸引増強とトマト果実の捻りによる実離れの促進機構

機構は提案案Bと同様であるが，シリコン製オリフィスの放射状構造の中心をずらして回転させる．偏心させたシリコンオリフィスの形状を図1右に示す．これにより，中央に位置付けられたトマトを自然に回転させることができ，果実のヘタからの離脱を助けることができる．

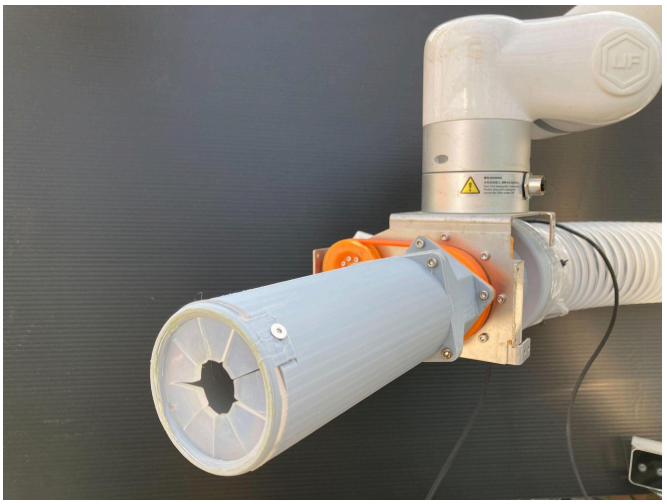


Fig. 5 Actual picture of our sucking harvesting mechanism (B)

Table 1 Specification of vacuum (Kyocera AVC1150)

風量	3.0m^2/min
真空度	25kPa
吸引仕事率	280W
電源電圧	単相100V
消費電力	1150W

4. 実験

4.1 システム概要

図6に示すように提案したエンドエフェクタをxArm7のアーム先端に設置し，アームの根本にRealsense D405を設置した．D405はステレオ視による深度センサであり，農場での強い太陽光の下で困難さがある赤外線のToFによる深度センサに比べてロバストに深度を計測することができる．農場でのトマトの位置や葉の位置などを適切に計測できることを確認している．

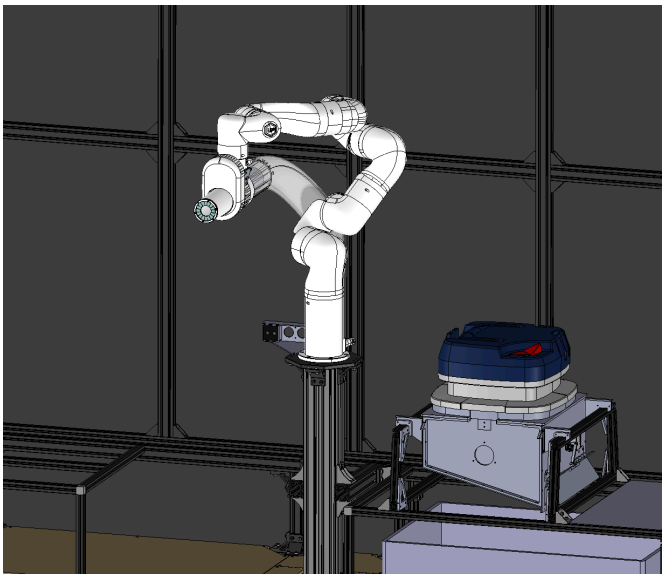


Fig.6 Suction harvesting system with Realsense D305 and the vacuum.

4.2 実験環境

株式会社トクイテンの知多農場における温室内でプランターにより栽培したプラム型ミニトマト・サンタスティ（オランダ・ENZA ZADEN社製品種）を使用して収穫実験を行った．図7に実験環境を示す．



Fig.7 Experimental environment for our suction harvesting system.

4.3 実験手順

株式会社トクイテンの知多農場における温室内でプランターにより栽培したプラム型ミニトマト・サンタスティを対象として実験を行う．アームの届く範囲にあるトマトに関して，Realsenseから得られた画像のどこに収穫にいくかを手動で設定して収穫動作を行わせる．トマト検出モデルも実装しているが検出ミスを結果に反映させないため操作者が目標を定めている．

動作は，以下のように設計した．

1. ロボットの正面方向から目標のトマトの手前で静止
2. 直線的にトマト方向へ移動
3. 吸引口の中心がトマトに触れる程度の位置で5sec間静止
4. 初期位置へ戻る

また，トマトは自然物であり実験室のように環境などを揃えることができないため，トライしたトマトの数も条件間で異なっている．

4.4 実験結果

各機構による試行を観察して定性的に記述する．

- 提案A
  - 少しずれたトマトも歯状構造の回転により中央へ移動させて吸引ことはできていた
  - 歯状構造によりオリフィスとトマトの距離ができたために，十分にトマトが吸えない状況が生じた
  - トマトが吸引口に対して横を向いていると捻りが起きやすく吸引されやすい
- 提案B
  - トマトと吸引口が密着するので吸引力が強いことが実感される
  - トマトのお尻がちょうど中央の穴に入っていき，シリコン製オリフィスの放射状のヒダに当たらない状況が起きると，吸引されない
- 提案C（図8に収穫の様子を示す）
  - トマトと吸引口が密着するので吸引力が強い
  - 放射状のヒダの中央が回転軸とずれているので，どの

ような状態でもトマトとヒダが接触するため，捻りが加えられる可能性が高く，吸引口がトマトに接触できさえすれば，ヘタが吸引口を向いている場合も含めて，どの向きのトマトでも吸引できた

○ 枝に邪魔されてトマトに接触できなかった時だけ収穫できなかった

表2に定量結果を示す．「トライ数」は目標となるトマトへ吸引口を近づけていった数，「成功」は吸引できた数，「成功率」はその割合，道連れ吸引は狙ったトマト以外が吸引されてしまった数である．

定性的には偏心オリフィスを回転させた場合が最も安定感があったが，回転オリフィスとは定量的にはほとんど差がない．ただし，トマトはそれぞれ全て異なっているため，意義のある定量結果を得るためにはさらに多くの試行を重ねなければならない．

Table 2 Result of the experiments

提案機構	トライ	成功	成功率	道連れ吸引
提案A（回転歯状構造＋オリフィス）	15	10	66%	0
提案B（回転オリフィス）	19	15	79%	6
提案C（回転偏心オリフィス）	10	8	80%	1

5. 結言

吸引型のトマト収穫機構を提案し，比較を行った．今後は，トマト検出，吸引収穫，収穫物の運搬，収穫ロボットの移動などを全て統合した全自動型のトマト収穫ロボットを開発してく．また，収穫スピードに関しても定量化し改善していく予定である．

参考文献

[1] 愛知県農業総合試験場 園芸研究部 野菜研究室 愛知県農業総合試験場 東三河農業研究所 野菜研究室 愛知県経済農業協同組合連合会 営農総合室 営農支援センター, "トマト・ミニトマトにおける環境制御ガイドライン", https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/412057.pdf

[2] 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

[3] 矢口裕明，長谷川貴臣，長濱虎太郎，稲葉雅幸, "収穫装置と視覚認識に着目した自動収穫ロボットの構成法", 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 10, pp. 693-702, 2018

[4] 荒木秀和，戸島亮, "トマト収穫ロボット", 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 10, pp.911-916, 2021

[5] 長谷川高臣, "トマト自動収穫ロボット「FARO」の開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 10, pp.907-910, 2021

[6] 高橋賢人，相原悟，元木悟, "ミニトマトのへたの有無が貯蔵性に及ぼす影響", 園芸学研究, 18巻3号, pp. 295-303, 2019

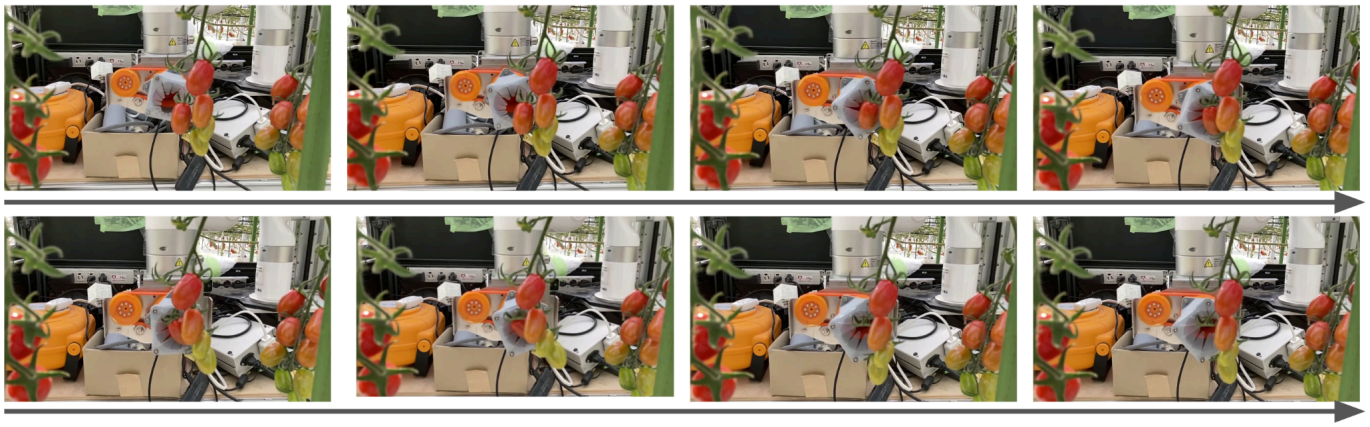


fig. 8 Sequential images of suction harvesting system