有機ミニトマト農場自動化ロボットTitanの開発

Titan: A Robot for Automation of Farm of Organic Mini Tomato

○森　裕紀（トクイテン/早大）　野々山　昭太（トクイテン）
尾形　邦裕（産総研）　菅　佑樹（Suger Sweet Robotics）

Hiroki MORI, Tokuiten Inc, Waseda Univ., hiroki@tokuiten.jp
Shota NONOYAMA, nono@tokuiten.jp
Kunihiro OGATA, AIST, ogata.kunihiro@aist.go.jp
Yuki SUGA, Sugar Sweet Robotics, ysuga@ysuga.net

Tokuiten Co., Ltd. is a startup company established in August 2021 with the aim of automating organic cultivation using robots. The company aims to achieve sustainable agriculture without relying on resources such as oil and natural gas, based on the premise of a declining and aging population. We operate their own farm while developing smart IT/AI agriculture, automated farms, robots and other technologies. This article introduces the mobile robot "Titan" and its extension attachment developed to automate organic farming, discussing its purpose, specifications, and composition, as well as future development plans.
***Key Words*:** Mobile Robot, Auto driving, Tomato, Harvesting, Farming

1. 緒言

人類史上，食物の確保は常に課題であり続けている．農業生産では有史以来，鍬（くわ）や鋤（すき）の材料が木製から，鋳鉄，鋼鉄になるにしたがって飛躍的に向上し，人口を支えた．とりわけトラクターの発明は農業革命とも呼ばれ，20 世紀の政治経済を大きく変え，飛躍的な人口増加の一因ともなっている[1]．日本国内でも 1955 年から 2000 年にかけて乗用型トラクター数は 1000 台から約 200 万台と 2000 倍となるにしたがって，総農家数は 600 万戸から 300 万戸と約半数となっている．食糧輸入増加による自給率減少の影響はありつつも，農業生産の仕組みそのものが変化してきたことが現れている．

21 世紀の日本の農業は機械化で減少した以上に労働人口の減少による人手不足が深刻である[2]．基幹労働従事者（「ふだん仕事として主に自営農業に従事している者」[2]）は 2015 年の 175 万人から 2020 年の 136 万人と 22%減少している．同時に高齢化しており，2022 年現在で平均年齢が 68.4 歳となっている．基幹労働従事者の年齢構成としても 65 歳以上が 70%，49 歳以下の割合は 11%と今後の農業従事者の減少は確定的である．円安や物価の高騰，技能実習生の人権問題も広く知られたことで，海外からの農業労働者受け入れも限界となっていることもあり，人手不足には対応が急務となっている．

労働人口減少の対応としては，食品の輸入に頼るという政策も考えられる．しかし，食料安全保障の観点から食糧自給率の向上も求められることもあり，スマート農業と呼ばれる情報技術を活用した高効率化や収量向上，自動運転トラクタなどによるさらなる自動化・自律化による人手不足解消が官民での大きな取り組みとなっている[3]．

また，食料安全保障という観点からは収穫物が国内で生産されるというだけでなく，化学肥料や化学農薬の海外依存を減らすことは食糧供給の安定に重要である．化学肥料に必要となるアンモニア製造には，原料としても熱源としても天然ガスが求められているが，2022 年 2 月から始まったウクライナ戦争が影響して，前年比で輸入尿素で+94%，国産尿素で+73%の価格上昇となっており，他の成分も含めて史上最高値水準となっている[4]．

このような海外依存はウクライナ戦争以前から問題とされており，問題解消のため農林水産省は「みどりの食料システム戦略」を策定している[5]．ここでは，2050 年までに化学農薬使用料を 50%低減（2030 年で 10%低減），化学肥料使用料を 30%低減（2030 年で 20%低減）との目標を掲げており，そのための方策として，化学肥料や化学農薬を用いた慣行農法に替わる有機栽培の拡大が挙げられている．しかし，肥料などの地産地消を目指した有機農業では化学肥料や化学農薬を使えないため，人手がかかるという問題を抱えている．

有機栽培は有機 JAS（Japanese Agricultural Standard）により法的に認証され，未認証の作物は有機作物として販売することができない．有機 JAS では，作物は土で育てなければならず，水耕栽培など自動化に有利な方法で育てることができない．そのため，土の上にシートを敷いた通路でロボットを動作させなければならないなど，倉庫自動化等における移動ロボットの開発とは異なる難しさがある．

株式会社トクイテンは 2021 年 8 月に有機栽培をロボットにより自動化するスタートアップ企業として設立された．設立理念として，人口減少・高齢化社会を前提として石油や天然ガスなどの資源に依存しない持続可能な農業を掲げ，自社農場を設立・運営しながら，スマート IT/AI 農業，自動化農場，ロボットをはじめとした技術開発を行っている．

本稿では，有機農業を自動化するため開発した移動ロボット Titan とその拡張機能アタッチメントについて，その目的や仕様，構成について紹介し，今後の開発方針について議論を行う．

2. 有機農業と自動化戦略

2.1 有機農業

有機 JAS では有機農産物について以下のように定めている．[6]

○有機農産物の生産の原則
農業の自然循環機能の維持増進を図るため，化学的に合成された肥料及び農薬の使用を避けることを基本として，土壌の性質に由来する農地の生産力（きのこ類の生産にあっては農

林産物に由来する生産力，スプラウト類の生産にあっては種子に由来する生産力を含む．）を発揮させるとともに，農業生産に由来する環境への負荷をできる限り低減した栽培管理方法を採用したほ場において生産されること．

○有機農産物の生産方法の基準（ポイント）

1. 堆肥等による土作りを行い，播種・植付け前２年以上及び栽培中に（多年生作物の場合は収穫前３年以上），原則として化学的肥料及び農薬は使用しないこと
2. 遺伝子組換え種苗は使用しないこと

我々は有機 JAS 認証を取得できる形でトマト栽培を行うため，愛知県知多市の農地に 20a の高い軒高を持つビニールハウスを設けて有機栽培に着手している．このハウス内で，土耕栽培かつ化学農薬を使用しない形の農作業を代替するロボットの開発を行う．

2.2 自動化戦略

我々は，有機農業を自動化するにあたって，既存の大規模農家からのヒアリングなどを踏まえて結果以下のような自動化戦略を立てた．

- ロボット単体でなく農業全体を自動化し最適化する（全体最適）
- ハサミを使わずに捻って取れる品種を選定して栽培する（栽培のロボットへの適応）
- 移動ロボットを基本として，異なる機能を持つ「アタッチメント」を搭載することで様々な機能を発揮できるようにする（複数タスクへのロボット適用）
- 農業の現場でロボットを動作させながら開発・改善する（ロボットの栽培への適応）

農業の全体最適に関しては，ロボット単体では中々既存の農家に売れないであろうという推測と，たとえ一旦何らかの農作業が小タスクとして切り出され自動化されたとしても，その小タスク間の連携をどのようにするのかは現場での作業が必要で全体の最適化の中で行われなければならない．農場の自社での設立も農業の全体最適を目指す上で欠かせない判断である．

3. 移動ロボット：Titan

我々は 2.2 の自動化戦略に則って，移動ロボット Titan を開発した．市販の多くの移動ロボットは平らなコンクリートやアスファルトを前提としている．そこで不整地となる農場の通路を通行できる仕様の市販の研究開発用移動ロボットを調査したところ，非常に高価であり農場で複数台運用することを考えるとコストが見合わないと考えたため，新規に自社開発した（図 1，表 1）．

駆動方式は土耕での栽培と畝間 0.8m の圃場を想定して不整地走行に強く，その場で旋回の出来るスキッドステアローダを採用した．



Fig. 1 3D CAD image of our mobile robot: Titan.

Table 1 Specifications of Titan

質量	40 kg（内バッテリー 5kg）
旋回方式	スキッドステアローダ
モータ容量	200W
バッテリー	定格 24V 容量 25Ah （満充電 8 時間稼働）
タイヤ径	225 mm
最低地上高	50 mm
ホイールベース	420 mm
高さ	245 mm
全幅	495 mm
全長	785 mm
最高速度	4.2 km/h

3.1 自律移動アルゴリズムの開発

収穫ロボットを大きな労力をかけずに農場で動作させるためには，農場内でトマトを収穫できる場所へ自動的に移動する必要がある．我々は以下の二つのアルゴリズムを組み合わせることで農場内での自律走行を実現した．

3.1.1 マーカーに基づく位置認識と自律移動

一般的な自律走行ではマップの構築と自己位置の同定が必要となる．マップ構築と自己位置同定を同時に行う SLAM は自律走行では重要な技術である．しかし，トマトが日々成長したり，葉かきと呼ばれる余分な葉を切り取る作業などがあるため，自律走行のためのマップを LiDAR などのセンサ情報を使ってロボット自身で構築する手法は難易度が高い．また，自己位置同定に関しても，センサに基づく手法ではマップと実際のセンサデータとの齟齬が大きくなる．以上の理由により，SLAM を農場内で適用することは難易度が高いためしなかった．そこで，マップは天下りに定義して，自己位置はマーカに基づいて決定することとした．

ロボットの走行できる通路を定義するためのマップの作成は，トマトを栽培する畝を作る際に使用した設計図をそのまま用いた．ロボットの自己位置決定には AR マーカー（ArUco Marker）を用いた．マーカーの位置をマップ上で定義し RGB カメラによりマーカーを検出してカメラ座標系での位置と姿勢を推定し，そこから逆算して世界座標系でのロボットの位置を推定するシステムを構築した．これにより予め作成しておいたハウス内の畝と通路のマップから適切な経路を生成して，自律走行を行うことができる（図 2）．



Fig.2 Titan and the green house field with AR markers.



Fig.3 The mobile robot Titan runs in a furrow.

3.1.2 LiDAR による畝検出による道なり走行

長い通路をマーカーに基づいて走行する場合，マーカーを密に配置しなければマーカーが観測できない区間に誤差が蓄積して自律走行ができなくなってしまうことが分かった．そこで，通路の中だけはマーカーに頼らずに通路の両側の盛り上がった畝を LiDAR（二次元距離センサ）を使って検出し，その間を走行するアルゴリズムを開発した（図 3）．

4. 機能拡張アタッチメント

4.1 収穫アタッチメント

我々は自社農場で活用するトマト収穫ロボットの開発のため，複数台の試作機を開発し，収穫範囲の向上や動作スピード・精度の改善を行なった．

アームは不整地移動式の収穫ロボットを開発した（図 4）．



Fig.4 Titan with a harvesting attachment.

ハンドには市販のトングを使用することで，トマトが掴みやすく適度な弾性を持つ構造を安価に作ることができた．弊社が栽培・収穫するトマトはハサミを必要とせず捻ると実がヘタから取れるため，簡易な構造で収穫用ハンドを開発することができた．

この段階で開発した収穫ロボットにより実際の自社農場で生育したミニトマトの収穫実験を行なった（図 5）．ミニトマトの実のヘタ部分がロボットに対して①向こう側，②右側，③左側と三種類の条件で各 10 個のトマトに対して収穫動作を行ったところ 14/30 の成功となった．

収穫用インターフェースはスマホやタブレットなどでもすぐに使えるように Web ページの形でロボット内部のサーバから提供される（図 6）．トマトの実の認識結果が表示され，収穫したトマトの実をクリックして，収穫開始ボタンを押すと収穫動作が開始される．

4.2 葉かきアタッチメント

葉かきは栄養を葉の成長でなく実へ移行するために，不要な葉を切り取る作業であるが，トマトの自動収穫という観点からはアームの動作の邪魔になる葉をなくすことで収穫率を向上させる意味がある．



Fig5. Harvesting movement for real mini tomato



Fig.6 User interface for the harvesting task.

我々が開発した葉かきのためのエンドエフェクタを図 6 に示す．アームは収穫アタッチメントと同じものを流用している．エンドエフェクタの構造は市販の枝ハサミを分解して，サーボモータを接続したもので，切り取った枝はハサミで保持することができる．この葉かき用エンドエフェクタを実際のトマトの枝に適用したところ，適切に枝を切ることができた．

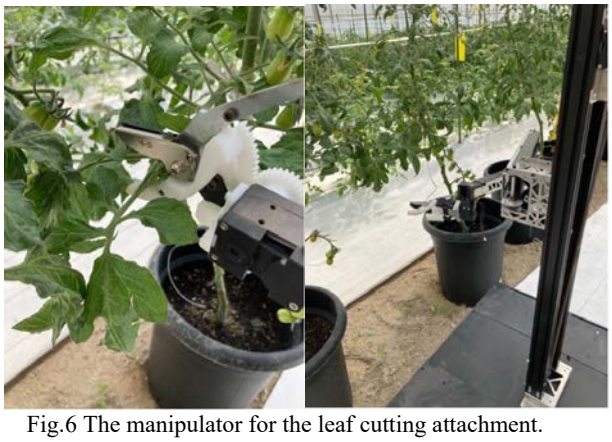


Fig.6 The manipulator for the leaf cutting attachment.



Fig.7 Titan with a spraying attachment.

4.3　噴霧アタッチメント

農薬の噴霧は作物の栽培全体に占める工数割合は少ないものの，農薬への暴露や高温なハウスの中では作業者に負荷のかかる作業である．作業者が限られることや離職に繋がるという意味でロボットで代替する意味がある作業である．

我々が開発した噴霧器を図 7 に示す．農薬の搭載は 30L で市販の背負い噴霧器よりも多くなっており，所定の位置に到達すると噴霧を開始し，終了位置に到達すると自動的に噴霧を終了することができる．．PC 操作などが必要なく農作業者が噴霧の範囲を簡便に設定することが出来るためこの手法を選択した．

4.4　防虫アタッチメント

使用出来る農薬に制限のある有機農業において防虫の作業は慣行農業の栽培に比べ工数のかかる作業である．コナジラミ類，アザミウマ類，ハエ類などを主体的に誘引・捕獲し防除することを目的とした既存製品「光防虫器 GAC 型」（株式会社光バイオ：以下防虫器）を Titan に搭載した（図 8）．

Titan が圃場を走行する際にトマトの株に触れて揺らすため，株に取り付いている虫が飛び立ち，防虫器を固定して設置するよりも効率よく虫を捕獲することが出来る．

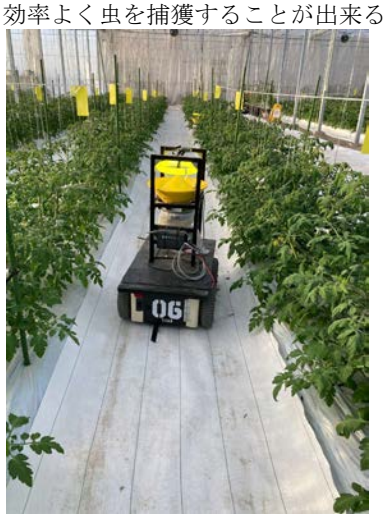


Fig.8 Titan with an insect trap.

4.5　モニタリングアタッチメント

病気や害虫検出，収量予測のため農場を巡回して各種指標を計測することは，高い収量を実現するために必要な作業である．製作した，フレームに RGB カメラを搭載したアタッチメントを図 9 に示し，撮影した画像を繋げたパノラマ画像を図 10 に示す．



Fig.9 Titan with a monitoring attachment


Fig.10 Generated panorama photo from video

5.　結言

本論文では，株式会社トクイテンが行っている有機農業自動化の戦略と開発しているロボットについて報告した．移動ロボットを基本として，機能拡張のためのアタッチメントを搭載することで様々な用途に使用することができる．

本論文で紹介したロボットやアタッチメントは，今後有機農業に使用する中で改善していく予定である．収穫作業の速度や精度の向上をはじめとして，自律走行のアルゴリズムのアルゴリズムに関しても太陽光を原因とする誤認識などが問題となっており改善の必要がある．

本報告の取り組みを続けることで，持続可能な農業生産を実現していきたい．

参考文献

[1] 藤原辰史，"トラクターの世界史　人類の人類の歴史を変えた「鉄の馬」たち"，中央公論新社，2017

[2] 農林水産省，"特集　変化（シフト）する我が国の農業構造"，"令和 3 年度 食料・農業・農村白書"，2021

[3] 全国農業協同組合連合会（ＪＡ全農），"令和４肥料年度秋肥（６～１０月）の肥料価格について"，全農ニュースリリース，2022 年 5 月 31 日，https://www.zennoh.or.jp/press/release/2022/90257.html

[4] 農林水産省，"スマート農業推進総合パッケージ"，https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/package.html

[5] 農林水産省，"みどりの食料システム戦略トップページ"，https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/

[6] 農林水産省，"有機食品の検査認証制度について"，

[7] 谷口裕明，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

[8] Shinjuku, D., Shibuya, J. and Tokyo, M., “Swing Motion Control of Casting Manipulation,” *IEEE Control Systems*, vol.19-4, pp.56-64, 1999.