「主茎ガイド方式」を用いたトマト下葉処理ロボットを開発

1台で複数作業をこなすマルチユース化で施設栽培のロボット導入を加速させる

国立研究開発法人　農研機構
農業機械研究部門　知能化農機研究領域　施設園芸作業グループ長
（兼 国立大学法人　筑波大学　生命環境系　教授）
深津時広

大規模施設園芸では、収穫や栽培管理にかかる労働時間の長さが大きな課題であり、解決策のひとつとして作業ロボットによる省力化・効率化が期待されている。これまで、多くの企業や研究機関で収穫作業ロボットの研究・開発が進められているが、ハウス全体の自動化・効率化をめざすには、収穫以外の管理作業についてもロボット化の実現が求められる。

そこで、農研機構では、収穫作業に次いで作業時間の割合が多い“下葉処理”に着目し、ロボット開発を進めてきた。今号では、従来と異なる「主茎ガイド方式」で構築した下葉処理ロボットの特徴を示すとともに、現場実装に向けた課題や今後の展望を解説する。

下葉処理作業の現状とロボット化の意義

施設野菜作は、10ａ当たりの総労働時間が平均1,382時間（稲作の約40倍）と突出して長く、大規模施設では2,000時間を超える事例も少なくない。なかでも、トマト栽培では作業負担は大きく、収穫作業が全体の30～40％を占めている（図１）。そのため、収穫ロボットの研究・開発が数多く進められているが、葉が繁茂した状態では果実の検出やアームの接近が難しく、性能を十分に発揮できない。ロボットの実用化には、あらかじめ下葉を除去して果実を露出させる「前処理」が不可欠となる。

他方、下葉処理の作業時間も10～15％程度と収穫に次いで大きく、現場からは作業負担の軽減が求められている。しかし、下葉処理ロボットの研究・開発の事例は少なく、課題も山積している。一般的なロボットのように「下葉や切断部の葉柄を認識して直接アームを近づける」手法では、やはり繁茂状態での対象部位の検出は難しく、処理速度も遅いため、実用化が困難であった。

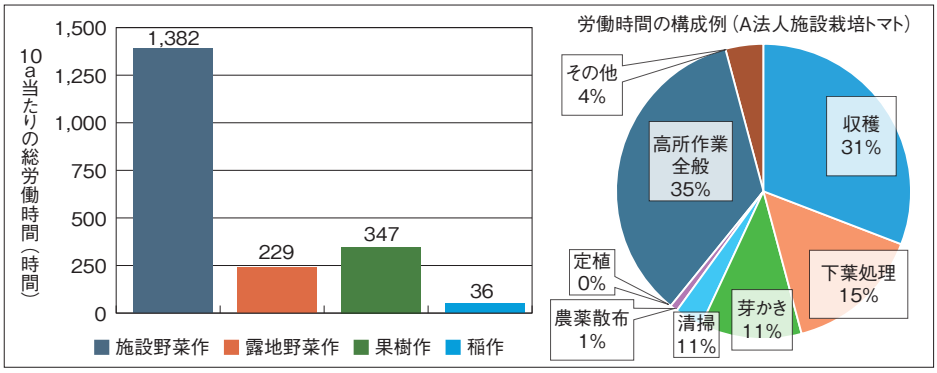


図１　施設園芸における労働時間の比較　資料：農林水産省「営農類型別経営統計」ほか

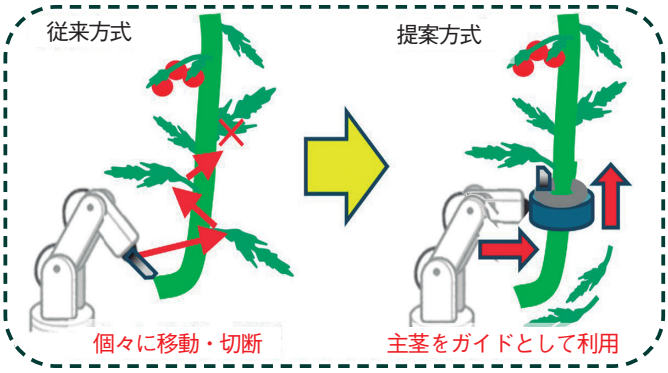


図２　従来方式と提案する「主茎ガイド方式」

そこで、トマト栽培全体のさらなる省力化・効率化に向け、新たな方式による下葉処理ロボットの開発に取り組んだ。

「主茎ガイド方式」の特長

今回開発した「主茎ガイド方式」は、見えにくい葉柄をピンポイントで直接ねらうのを止め、株の中心にある太い主茎を物理的・論理的なガイドライン（基準）として利用する全く新しい仕組みとした（図２）。この方式の場合、まず、生い茂る下葉や小さな葉柄を１枚ずつ緻密に認識する必要がない。ガイドとする主茎は、株元で容易に見つけやすいため、繁茂による死角の影響を受けにくいといった特徴がある。さらに、主茎という「１本の線」に沿ってアームを動かせばよいため、作業時の認識・制御が大幅に容易になる。そのため、数ミリ単位の精密な位置合わせをする必要がなくなり、作業中に作物の

株が多少揺れたり逃げたりしても、問題なく追従して処理できるという特長を持つ。

この現場環境に適した仕組みは、高度な「認識推定」、主茎に倣う「力制御」、そして連続処理可能な「バリカン型エンドエフェクタ（手先）」の３つの要素の融合によって実現している。

実用化に向けて試作機を開発

「主茎ガイド方式」の実用化に向けて、前述した３つの要素を組み込んだ下葉処理ロボットの試作機を開発した（図３）。試作機は、自律走行台車の上に、植物体を認識する深度カメラ、認識および制御を行うＰＣ、主茎からの反力を感知する力覚センサ、下葉を切断するバリカン刃、そしてこれを動かす産業用６軸ロボットアームで構成されている。

主茎の認識・推定では、撮影画像にAIセグメンテーションと幾何学演算を施し、下葉や果実などの部位とともに主茎部位を検出する。このとき、主茎が葉や果実に覆われて分断状態で検出された場合でも、同一主茎と判定された要素をつなぎ合わせて分断箇所を補完し、１本の連続した形状として正しく推定することができる（図４）。

実際の切断では、往復刃を持つバリカン刃を主茎に沿って動かすが、接触時の力で主茎が変形するため、画像データだけの制御では限界がある。そこで、接触反力を力覚センサで検出し、アームの軌道をリアルタイムで補正して反力を一定に保つ「倣い力制御」を導入した（図５）。これにより、植物体の変形に追従し、長段栽培のカーブした主茎を傷つけずに精度の高い切断が可能となる。

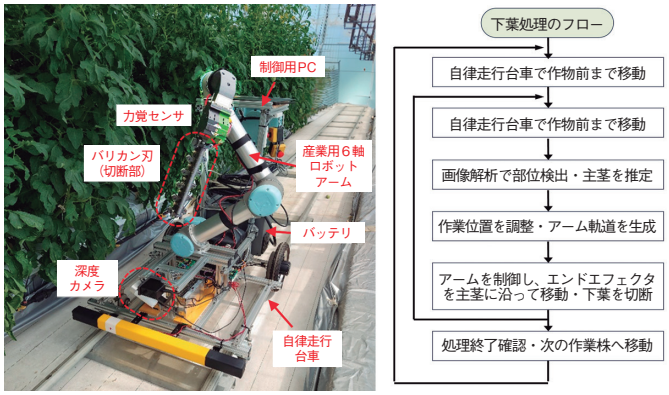


図３　試作した下葉処理ロボットシステム

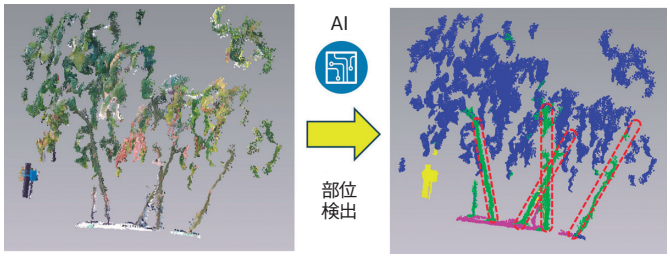


図４　画像AIによる主茎の認識・推定手法

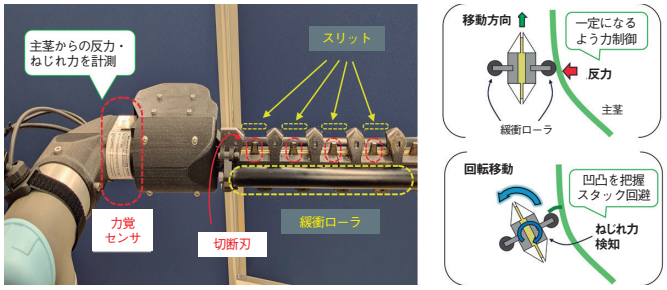


図５　主茎に追従する「倣い力制御」の概要


図６　下葉処理作業の動作例（認識画面、作業前、作業後）

具体的な動作は、株の右側からエンドエフェクタ（手先）を主茎に押し付けながら上下させ、次に左側からも同様に行う。ロボットは作物列を自律走行し「移動・撮影・検出・位置調整・切断」の手順を繰り返すことで連続作業を実現している。

試作機のパフォーマンスと今後の展望

温室で行った実証試験では、１株当たり平均66秒の処理速度で、対象とした下葉の約72％を切除できた（図６）。最も懸念される主茎の誤切断はゼロであり、力制御による物理的な安全性が確認されたほか、処理後のトマトに生育不良や異常などはみられなかった。現在は制御アルゴリズムなどの改良を進めており、処理速度の高速化や切断精度のさらなる向上といった性能面の余力を引き出している。

「主茎ガイド方式」によって下葉が適切に処理されれば、認識やアプローチの性能が向上し、収穫をはじめとするさまざまな作業の自動化を阻むハードルが下がる。特に、作業負担の大きい「収穫」と「下葉処理」の双方が自動化されれば、施設園芸における作業時間は大幅に減り、省力化に直結する。

また、こうした複数作業の自動化を見据え、同一の走行台車やアーム（プラットフォーム）を活用した「マルチユース（多目的）化」への展開も進めている。エンドエフェクタ（手先）を交換することで、下葉処理だけでなく収穫など複数の作業を１台のロボットで行える仕組みを構築し、ロボット普及の最大の壁であった導入コストの高さという課題の解決をめざしている。本技術を基盤とし、施設園芸におけるロボット化の社会実装に向けた展開が期待される。