

AIによる自律化を目指した ハウス栽培管理作業向けフィールドロボットの開発

浦池 隆文, 今岡 広一, 伊藤 壮生, 全 慶樹, 岡崎 伸哉,
佐野 亮*, 鈴木 廣明**

Development of Field Robot for Greenhouse Cultivation Aimed at Autonomy by AI

Takafumi URAIKE, Koichi IMAOKA, Soki ITOU, Keiki ZEN, Shin'ya OKAZAKI,
Ryo SANO*, Hiroaki SUZUKI**

抄 録

農業分野では深刻な人手不足に対応するため、さまざまな作業の機械化・自動化が進んでいる。しかし、野菜や果物のハウス栽培では、整枝・誘引や収穫などの作業は依然として人手で行われており、過酷な環境での重労働となっている。そこで本研究では、ハウス栽培における作業の軽労力化を目的としたフィールドロボットの開発を行った。対象作業はイチゴ栽培における管理作業（不要な葉やランナーの除去）とした。将来的には完全な自律作業が可能なロボットの実現が求められるが、本研究では遠隔操作ロボットを開発し、自律化のための基盤技術の確立を図った。

ロボットは、四輪駆動・四輪独立操舵方式の台車に、6自由度のロボットアームを2機搭載する構成とした。作業者はロボットに搭載したステレオカメラの映像を三次元ディスプレイで確認しながら、アームや台車の操作を遠隔で行うことが可能である。また、ロボットの自律化に必要な、不要な葉とランナーを認識するAIの構築を試みた結果、適切なモデルの選択と学習を行うことで認識AIの構築と認識精度の向上が可能なることを確認した。開発した遠隔操作ロボットによる作業試験を行った結果、未経験者でも比較的短時間の試行で一連の作業を実施できることを確認した。

キーワード：ハウス栽培, 人手作業, ロボット, AI

Abstract

In order to deal with the problem of labor shortage in agriculture, mechanization and automation of various work are progressing. However, in greenhouse cultivation of vegetables and fruits, operations such as pruning and harvesting are still performed manually. It's hard work in a harsh environment. In this research, we developed a field robot to reduce manual work in greenhouse cultivation. The target work was management work (removal of unnecessary leaves and runners) in strawberry cultivation. In the future, the realization of robots capable of fully autonomous work will be required. In this research, we developed a remote control robot and tried to establish the basic technology.

The robot consists of two 6-DOF robotic arms mounted on a 4-wheel drive, 4-wheel independent steering mobile cart. The operator can remotely control the arm and cart while checking the image of the stereo camera mounted on the robot by the 3D display. We also tried to build an AI for recognizing unnecessary leaves and runners, which are necessary for autonomous robot. We found that by selecting and learning an appropriate model, it is possible to build recognition AI and improve recognition accuracy. When the developed robot was actually operated, it was confirmed that even an inexperienced persons could perform a series of tasks in a relatively short trial period.

KEY-WORDS : Greenhouse Cultivation, Manual Work, Robots, AI

* かもけいアグリ株式会社 * Kamokei Agri Co., Ltd.

** 加茂川啓明電機株式会社 ** Kamogawa Keimei Denki Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：AIによる自律化を目指したハウス栽培管理作業向けフィールドロボットの開発



図1 イチゴの不要な葉とランナー

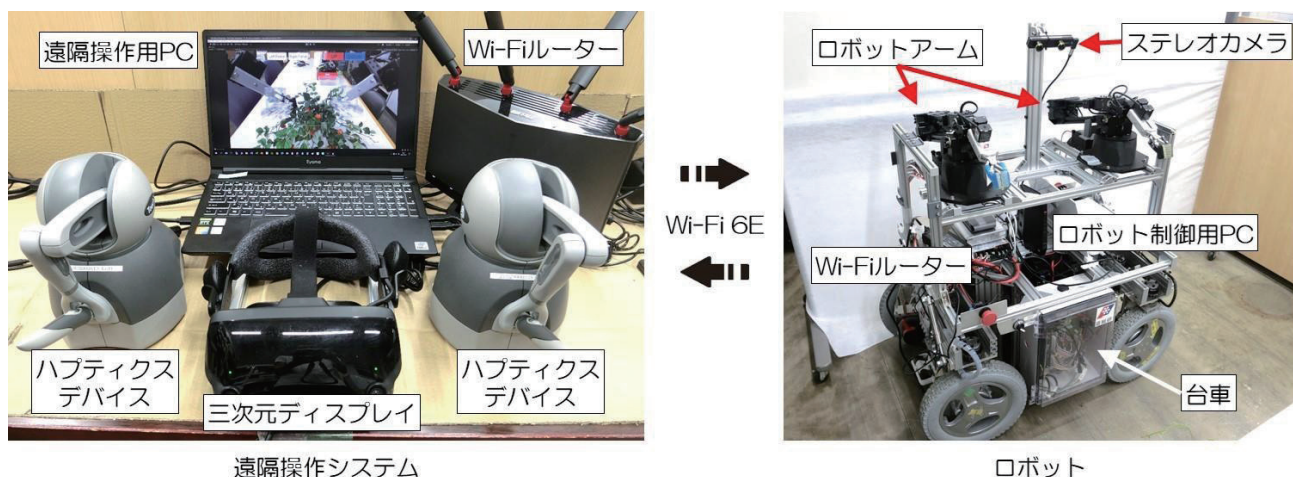


図2 遠隔操作ロボットシステムの概観

1. はじめに

農業分野においては人手不足が深刻な課題となっており、これを解決するためロボット技術の導入など、さまざまな作業の機械化・自動化が進められている。野菜や果物のハウス栽培においても、温度や日射などの栽培環境の計測・制御や液肥の調整・自動灌水といった、情報通信技術を活用した効率的な生育管理と品質の向上に向けた取り組みが進んでいる。その一方、整枝・誘引や収穫などの作業は依然として人手で行われており、猛暑下で作業せざるを得ないなど過酷な環境での重労働となっている。そこで本研究では、ハウス栽培における人手作業の軽労力化と将来的な自動化・自律化に向けた、遠隔作業型フィールドロボットの開発を行った。本研究で対象とする作業はイチゴ栽培における管理作業（不要な葉やランナーの除去）(図1)とした。これは、イチゴが高付加価値な作物であることと、イチゴ栽培では管理作業に最も多くの労力が必要とされていること¹⁾を根拠としている。

管理作業自体は人にとっては単純な作業だが、ロボットで代行する場合、人手に準じた複雑な動作を可能とする機構(ロボット本体)の開発や、AI等を活用した、作物の生育状態に応じた的確な作業判断の実現などが必要となる。本研究では、管理作業に必要な機能を有するロボット本体を開発する

とともに、これを作業者が遠隔で操作するシステムを構築することで、ハウス内作業の自動化・ロボット化に向けた基盤技術を確立した。ロボットの構成要素として、①管理作業を行うロボットアーム、②ハウス内を移動するための移動台車、③ロボットの操作を行う遠隔操作システム、④作業判断のためのAIを開発し、これらを統合したロボットシステムによる実証試験を行った。

2. 遠隔操作ロボットシステムの概要

図2に開発したロボットと遠隔操作システムの概観を示す。ロボット本体は、四輪駆動・四輪独立操舵方式の移動台車に6自由度のロボットアームを2機搭載する構成とした。作業者は、ロボットに搭載したステレオカメラの映像を三次元ディスプレイで立体的に視認しながら、ロボットアームと台車の操作を行う。ロボットと遠隔操作システムの通信は、無線LANの最新規格であるWi-Fi 6Eの6GHz帯で行うこととした。

3. ロボットアームの開発

イチゴの管理作業では、軸部直径1～5mmの不要な葉やランナーを確実に把持し、株元から引抜く必要がある。この

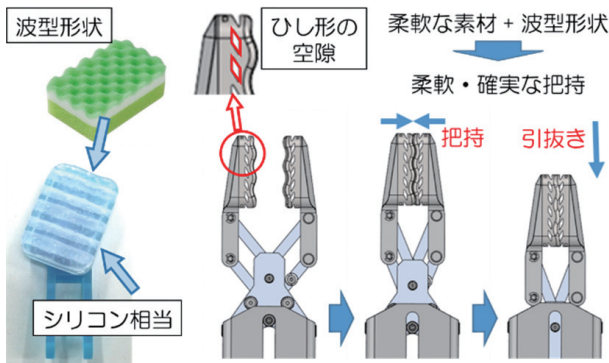


図3 開発したロボットハンド



図4 ロボットアームの構成

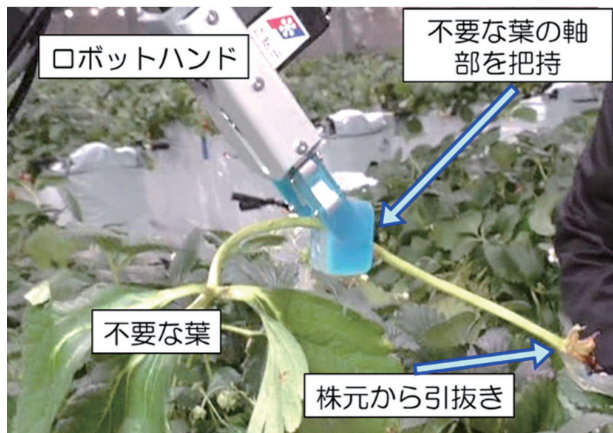


図5 不要葉除去の様子

ため、図3に示す2指のロボットハンドを開発した。ハンドの指先部はシリコン相当の柔軟な素材を使用して製作しており、表面に波型の凹凸と、ひし形の空隙を有することを特徴としている。これにより、対象物を柔軟かつ確実に把持することを可能とした。またロボットハンドに、直動機構と平行リンク機構を組み合わせた機構を内蔵することで、把持と引抜きの2段階の動作を1個のモーターで行うことを可能とした。

開発したハンドを既製のアーム（Trossen Robotics社製 ViperX 300 Robot Arm 6DOF、最大リーチ82cm、可搬重量750g）の先端に設置することでロボットアームを構成した（図4）。なお、ハンドは人の手と同様に空間上の任意の位置・姿勢で配置する必要がある。そのため、アームは6つ

の関節自由度を有する垂直多関節型を用いることとした。図5に動作試験の様子を示す。不要な葉の軸部を潰したり折損したりすることなく把持し、株元から引抜くように除去できることを確認した。同様の動作は、ランナーの除去においても可能であった。管理作業では、感染症の発生及び拡大の防止のため、植物体を潰すなどして傷付けないことが重要とされており、開発したロボットアームは管理作業に必要な機能の有していることを確認した。

4. 移動台車の開発

近年イチゴのハウス栽培では、栽培管理や収穫など作業性の向上を主な目的として、地上1m程度の架台（ベンチ）上に栽培床を配置して作業を行う高設栽培と呼ばれる方法が普及している。本研究では、共同研究機関が運営するイチゴハウス内（図6）においてロボットによる管理作業を行うことを想定し、移動台車の開発を行った（図7）。

台車の駆動は四輪駆動方式とし、電動車いす用ギヤモーター（Golden Motor Technology社製 PW12M、電源電圧24V、最大出力250W）を四輪に使用することで、十分な駆動力を確保した。また、前後の車軸にサスペンションを配置し、凹凸のある路面においても安定した走行を可能にした。

ベンチや灌水用配管など既設の構造物に接触することなくハウス内を自在に走行させるため、台車の進行方向は四輪操舵方式で制御することとした。前後の車輪の方向をそれぞれ図7のように制御することで、通常の旋回走行に加え、平行移動とその場旋回を行うことができ、限られたスペースのハウス内通路を自在に走行することを可能とした。

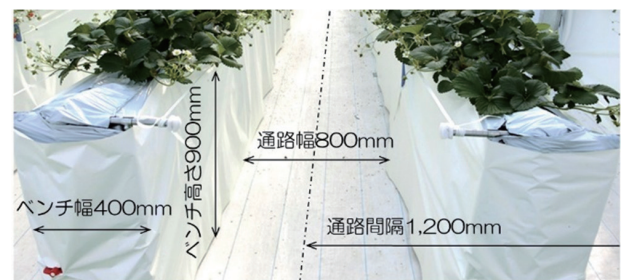


図6 ハウス内代表寸法

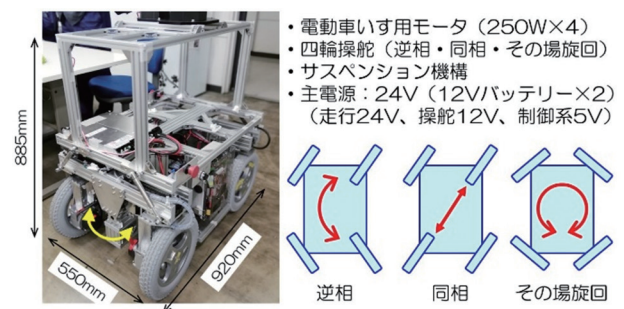


図7 開発した移動台車

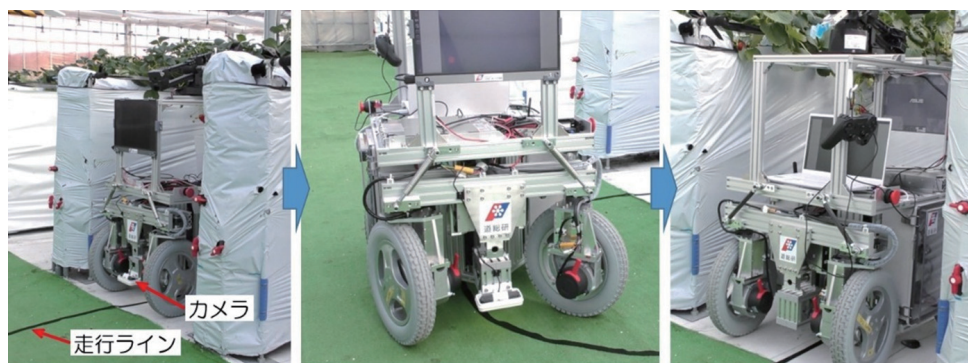


図8 ハウス内走行の様子

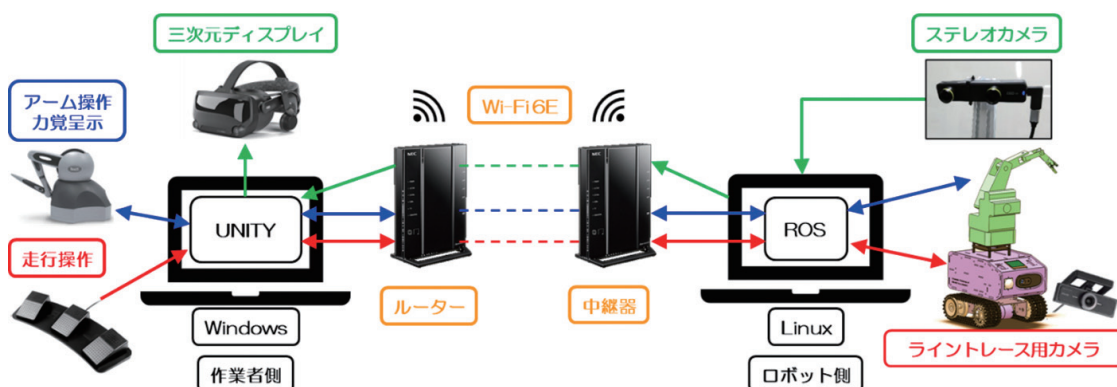


図9 遠隔操作システムの構成

通路に沿って自動走行するための制御方式として、路盤に敷設した走行ラインをカメラで認識しながら自動で追従走行する方式（ライトレース）を採用した。未知の環境における自動走行では、高度な自己位置推定手法にもとづいた走行経路の生成等が必要となる。しかし、整備が行き届き環境の変化も少ないハウス内で台車を自動走行させる場合、ライトレース方式は確実性の高い走行制御方式として有効である。ハウス内走行の様子を図8に示す。通路間に曲線状に敷設したラインに沿って、ラインから逸脱することなく、かつベンチ等の構造物に接触することなく通路間の移動が可能であることを確認した。

また実際の運用においては、図8のように決められた通路間を移動するだけでなく、作業内容に応じて任意の通路間を選択しながら移動する必要があるため、路盤に敷設する走行ラインには分岐点が存在する。このため、カメラ画像から通路分岐点の形状（T字、十字など）を認識のうえ作業員へ提示し、作業員から指示された方向へ自動で旋回する機能を組み込んだ。以上の走行操作（前後進・旋回）は、作業員の足元に設置したフットスイッチで行えるようにするなど、簡便な操作で台車を制御できる仕様とした。

5. 遠隔操作システムの開発

遠隔操作システムの構成を図9に示す。作業員は、ロボッ



ZED Mini

- ・片眼最高解像度：2208×1242ピクセル
- ・フレームレート：15fps、・視野角：90°×60°

図10 ステレオカメラ

トに搭載したステレオカメラ（図10、STEREO LABS社製 ZED Mini、最高解像度2208×1242、最大フレームレート15fps）から送られてくる作物周辺の映像を、三次元ディスプレイで立体的に視認しながらロボットを操作する。作業員側システム（遠隔操作側）ではWindowsPCを中心として、PCに接続したロボット操作装置やステレオカメラからの信号を処理し、作業員への映像提示やロボットへの制御信号の送信を行う。これらのプログラムの開発には三次元表示などの機能が充実したUNITYを使用した。ロボット側システムではLinuxPCを中心として、作業員側システムから送られてくるロボット制御信号を処理し、PCに接続したロボットアームや台車を制御するとともに、作業員側システムに対してロボットの動作状態やステレオカメラ映像を送信する。これらのプログラムの開発にはロボット開発で広く利用されているROSを使用した。

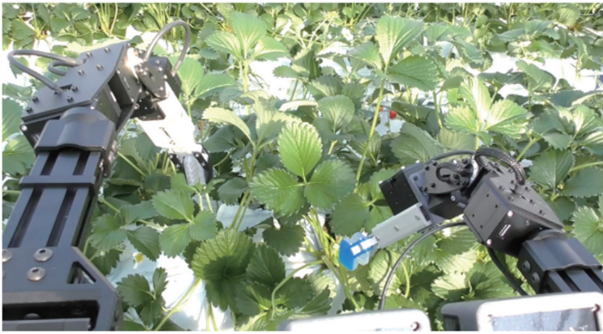


図 11 作業者へ提示される映像の例

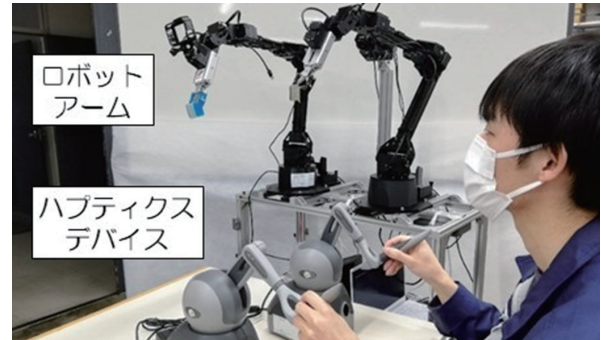


図 13 ロボットアームの操作



図 12 三次元ディスプレイ



図 14 ロボットアームの制御

図11に作業者へ提示される映像の例を示す。作業者は図のような視点の立体映像を確認しながら、ロボットアームを自分の手を動かすのと同様に動作させて作業を行うことが可能となっている。ここで三次元ディスプレイとして、ヘッドマウントディスプレイ、もしくは裸眼立体視ディスプレイの使用を想定するが、両者には視認性や没入感に異なる特徴がある(図12)ことから、作業者が選択して使用できるよう構成した。

ロボットアームの操作は、ハプティクスデバイスと呼ばれる入力装置を用いて行う(図13, 図14)。ハプティクスデバイスは、デバイスの先端に取り付けられたペンの空間的な位置と姿勢を取得可能であり、これをロボットアーム先端の位置と姿勢の指令値として出力する(リーダー・フォロワー制御)。すなわち、ペンを持つ作業者の手の動きがそのままロボットアーム先端に伝達され、その結果、ロボットアームが手の動きと同調して動作するため直感的な操作が可能となっている。また、ロボットアームに作用する外力を推定し、作業者が操作するデバイスへ反力として伝達する機能(力覚フィードバック)を組み込んだ。これにより、ロボットアームが何らかの構造物に接触した場合の過剰な負荷を作業者が感知することが可能となり、アームや構造物の損傷など危険な状況を回避することができる。

遠隔操作システムとロボット間の無線通信は、新たに利用可能となったWi-Fi 6Eの6GHz帯で行うこととした。これにより、既存の2.4GHz・5GHz帯で問題となる、他機器との干

渉などによる通信速度の低下や切断が発生することなく、安定かつ高速なデータ通信が可能となった。本システムでは、使用したカメラで設定可能な片眼あたり最高解像度2208×1242ピクセル、最高フレームレート15fpsの映像を、リアルタイムに伝送可能なことを確認した。

6. AIの構築

管理作業の自動化へ向けたAI認識機能開発の一例として、セマンティックセグメンテーションによる不要部(不要な葉とランナー)の認識技術を開発した。セマンティックセグメンテーションは、画像をピクセル単位で分類する手法であり、不定形な領域の抽出に適している。図15に、ランナーの学習と認識結果の例を示す。左図のように、人手によりランナーの輪郭を選択(アノテーション)した画像を複数作成して学習させたところ、右図に示すようにランナーと推定される領域の抽出が可能であることを確認した。



図 15 ランナーの学習と認識結果の例

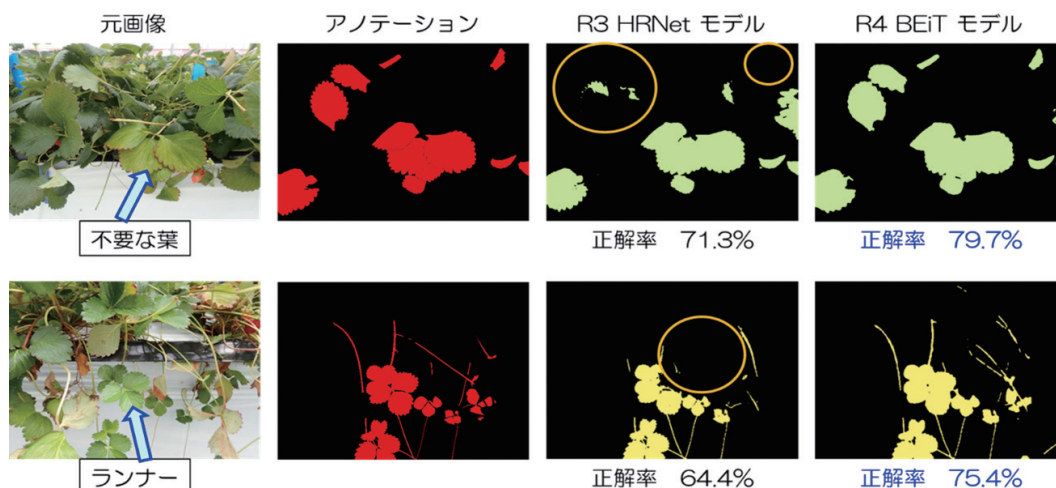


図 16 AI による不要な葉とランナーの認識例

本研究では、推定精度向上のためセマンティックセグメンテーションに使用するAIモデルの選定と改良を行った。R3年度は2019年に発表されたHRNetモデルを、R4年度は2021年に新たに発表されたBEiTモデルを用い、学習パラメータの改良などを行い不要な葉とランナーの学習を行った。図16に認識結果を比較して示す。不要な葉の認識結果(図16上段)では、HRNetモデルでは円形で図示した領域に未抽出部が見られ正解率71.3%となったのに対し、BEiTモデルでは正解率79.7%に向上した。ランナーの認識結果(図16下段)では、不要な葉の認識結果と同様にHRNetモデルでは円形で図示した領域に未抽出部が見られ正解率64.4%となったのに対し、BEiTモデルでは正解率75.4%に向上した。

以上より、不要部認識AIの構築が可能であること、また、適切なモデルを選択して学習を行うことにより認識精度の向上が可能であることを確認した。さらに、ロボットの自動化を想定し、ウェブカメラからWi-Fiで転送される画像をリアルタイムにAIで処理するシステムを開発した。ハウス内での試験により、毎秒約3フレームのAI認識処理が可能であることを確認した。

7. 実作業試験

以上のように構成した遠隔操作ロボットシステムにより、イチゴハウス内において実作業試験を行った。試験の様子を図17に示す。実際にイチゴ栽培管理作業に従事している熟練作業者と、作業未経験者を対象とした複数名による実作業試験を実施した結果、ハプティクスデバイスの操作や、三次元ディスプレイへの適応性に個人差はあるものの、比較的短時間の試行で一連の操作が可能であることを確認した。



図 17 実作業試験の様子

8. おわりに

本研究では、ハウス栽培における人手作業を代替するロボットの実現を目指し、その初期段階として遠隔操作型フィールドロボットを開発し、ロボットの自律化に必要な基盤技術の確立を図った。ロボットの自律化へ向けては、人が行っている作業の認識と判断を、AI技術等で可能とする必要がある。そのため、開発した遠隔操作システムを活用して、今後も継続的に人の動作をデジタル化し、学習データとして蓄積・活用することにより、AIの高度化に向けた取り組みを進める。また、本研究で確立したマニピュレーションや遠隔操作システムなどの要素技術は、他の栽培品目や作業に適用することが可能である。人手不足への対応や軽労力化を目指した機械化・自動化に対する現場ニーズの把握に努めながら、更なる応用展開を進める。

参考文献

- 1) 北海道農政部編:北海道農業生産技術体系(第5版),(公社)北海道農業改良普及協会, 538PP., (2019)