

農業 DX のための精密農業機械の VR 遠隔操作／AI 自律制御システムの開発

代表研究者	ヤエム ヴィボル	筑波大学 システム情報系 特任准教授
共同研究者	池井 寧	東京大学 情報理工学系研究科 教授
共同研究者	小島 優希也	東京都立大学システムデザイン研究科 大学院生
共同研究者	米田 悠人	東京都立大学システムデザイン研究科 大学院生
共同研究者	芹澤 尚舜	東京都立大学システムデザイン研究科 大学院生

1 はじめに

我が国では、今後の深刻な労働力不足が懸念されており、DX（デジタルトランスフォーメーション）によって効率的な労働環境への転換が求められている。特に農業分野では、基幹的従事者の著しい減少に伴い、作業知識の継承も大きな課題となっている。総務省の「Beyond 5G 推進戦略」では[1]、2030 年代を見据えた超低遅延・大容量・高信頼の無線通信基盤の整備が掲げられており、空間的に離れた場所でもリアルタイムでの作業支援や遠隔操作を可能にする社会の実現が期待されている。このような通信基盤は、農作業を含む空間的な作業に用いられる機械を、現地に赴くことなく遠隔地から操作するためのインフラとして極めて有効である。通信遅延の影響を受けずに安定して機械を制御できれば、農業に限らず多様な分野での応用が可能である。しかし、人間が現地で機械を操作する際には、視覚、聴覚、触覚などの五感による膨大な情報を統合して判断を行っており、これらの通信を通じて遠隔に再現することは技術的に極めて困難である。もしそれが可能になれば、都市部に居住する人々が過疎地域の農地で遠隔就労する未来が現実となる。さらに、再現精度が高ければ、これを記録・集約・保存することで、作業知識を機械的に蓄積し、別の人間に継承することも可能となる。このようなシステムの実現には、実機の農業機械（例：田植機）を構築し、必要な感覚情報の特定・検出・送信・提示を行うことが求められる。これにより、他の農業機械にも応用可能なプロトコルの標準化が期待される。例えば近年の研究では、VR ヘッドセットと手のコントローラ操作によって果実収穫や葉の検査を遠隔で行う実験が行われ、果実収穫の訓練で約 90%の成功率を記録した[2]。ただし、視覚主導の操作にとどまり、前庭感覚などの感覚再現は未解決の課題として残されている。

本研究では、次世代無線通信を活用し、遠隔地からでも低遅延かつ高臨場感をもってライブ農作業を可能にする精密農業機械と、それを操作するための VR 制御技術の開発を行っている。機械本体および作業対象のセンシング、運動制御を担う AI システムを構築し、電動化による低コストで高機能な農業機械の遠隔運用を実現するプロトタイプの基盤技術を開発中である。また、この DX 農業システムは、我が国のみならず、将来的に東南アジア諸国への展開も視野に入れて設計されている。

2 農業 DX のためのシステムの開発

本研究では、次世代の高速低遅延無線通信を用いて遠隔操作される、AI センシング/制御機能を搭載する精密農業機械を開発し、それを遠隔操作するための情報提示/操作用の VR インタフェース、およびそれらを結合する多感覚情報のリアルタイム通信システムを構築し、遠隔地から農作業を実行するライブ農業システムのプロトタイプを開発する。

具体的には、

- ① 遠隔操作できる廉価で高機能な精密農業機械（田植機）を設計構築、
 - ② 精密農業機械の各部状態と、環境（農場）についての状況を検出し、全方位立体視映像を含む総合的現場情報をリアルタイム伝送する通信システムの構築、
 - ③ 現地状況の総合的アウェアネスを与える多感覚 VR（身体感覚を含む）のフィードバック装置の構築、
- によって、小規模農業従事者のための農業 DX のシステム技術を構築する。

2-1 精密農業機械（田植ロボット）の設計と実証実験

従来の農業機械は、大型・高価かつ重装備であり、広大な圃場での効率的な作業を前提に設計されている。そのため、中山間地域や都市近郊に多い狭小な農地、さらには途上国の小規模農家にとっては、導入・運搬・

維持が困難である。また、遠隔操作やセンシングを活用したスマート農業への対応も限定的であり、新たな運用形態への柔軟性に欠けるという課題がある。こうした背景に対し、Bechar & Vigneault [3]は、農業ロボットの实用化には軽量・モジュール構造・コスト効率の良さが不可欠であるとし、非構造的な農業環境への柔軟な対応や、人間との協調的制御（ヒューマン・イン・ザ・ループ）の重要性を強調している。さらに、センサ統合・情報処理・信頼性確保などの高度な統合技術も必要とされている。また、Blackmore ら[4]は、精密農業の次の段階として、小型・スマート・自律的なマシンを用い、「適切な作業を、適切な場所で、適切な方法・タイミングで行う」ことが求められるとし、従来の大型汎用機からのパラダイムシフトを提唱している。

これらの先行研究の方向性を受け、本研究では、軽量・低コストで可搬性に優れた田植えロボットを一から新規設計し、身体フィードバック VR 遠隔操作と AI 自律制御を融合した次世代型農業機械の開発を目指している。2024 年 7 月に基本設計（図 1 左）を完了し、苗を把持するクランク式の爪機構と、移動を担う車輪駆動部として独立制御可能な構造を採用した。1 つのクランクで 4 条植えが可能な効率のレイアウトとし、部品加工はミスミ社に外注することで、高精度・低コストの機体を実現した。従来の田植え機はガソリンエンジンによって駆動されており、高出力で長時間の稼働が可能である一方で、騒音や排気ガス、定期的な燃料補給や整備の手間といった課題があった。そこで本研究では、田植えロボットにバッテリー駆動方式を採用した。これにより、エンジン機構の簡略化によって機体を軽量化できるとともに、排気ガスを出さず静音性にも優れるため、屋内外を問わずさまざまな環境下での作業が可能となる。さらに、外部電源を必要とせず、充電式の電力のみで運用できるため、発展途上国や農村部など電源インフラが整っていない地域においても、簡便に導入・運用できる点は大きな利点である。本試作品の完成後、国際展開を見据えた初期実証として、2024 年 8 月に機体を分解し、3 つの機内持ち込みスーツケースに収めてカンボジアへ輸送した。現地の苗を用いた室内実験（図 1 中央）では、異なる環境下でもロボットが安定動作し、遠隔操作の初期的有効性と分解運搬の実用性が確認された。一方で、継続使用を通じて、クランク機構と駆動部における耐久性の課題が明らかとなった。部品の摩耗や構造強度に課題が見られたため、現在は長期利用に耐える構造設計の改良（図 1 右）に取り組んでいる。

また、本研究の田植えロボットは、身体感覚フィードバックを伴う VR 遠隔操作と、AI によるセンシング・運動制御の自律化を統合することで、直感的な操作性と効率的な自動化の両立を目指している。このヒューマン・マシン融合型の設計は、単なる小型化を超え、熟練技能の再現と反復作業の自律化を両立する次世代スマート農業の新しいモデルを提示するものである。本研究は、先行研究が指摘する技術的・社会的要件を踏まえつつ、途上国の農業支援や、日本国内の中山間地域など多様な圃場条件への適応を可能にする次世代農業インフラの一環として期待される。



図 1：（左）田植えロボットの設計図、（中央）カンボジアにおけるフィールドワークで苗を使って田植えロボットを実際に動作させた実験の様子、（右）耐久性向上のために行った機構設計の改良

2-2 センサ・全方位カメラを用いたアルタイム通信システムと遠隔操作インタフェースおよび VR 遠隔操作のための XR 遠隔対話システムの構築

本節では、田植えロボットの身体フィードバック型遠隔操作を実現するための通信・センシング基盤の構築と、操作者との円滑な多感覚的インタラクションを可能とする XR 遠隔対話システムの構築について述べる。まずは、ロボットと操作者の間でリアルタイムな情報伝達と操作を可能にする通信・センシングシステムの構築内容について述べ、その後に視線や音声、立体映像などを通じた自然な遠隔コミュニケーションを実現

する XR 遠隔対話システムの構成について説明する。

本研究では、ロボットの各部状態や農場の環境状況をリアルタイムで取得・伝送し、操作者が現場の状況を即時に把握できる通信システムの構築を行った。環境センシングには空間 AI カメラ「OAK-D」を採用し、制御 PC の Jetson Nano と接続することで、農場の立体視映像および深度情報、センサデータを同時に取得可能とした。これらの情報は、WebRTC ベースのクラウド配信ソフト「Sora SFU SDK」を用いて送受信され、操作者とロボット間で全方位立体視映像および各種環境情報を双方向で伝達できる通信インフラを整備した（図 2 左）。広域ネットワーク環境でも高い即時性と安定性を保持した映像・制御信号の送受信が可能である。加えて、通信環境が不安定な地域での利用も想定し、ローカルネットワークによるスマートフォンと制御 PC 間の接続にも対応した（図 2 右）。この環境に合わせた遠隔操作 GUI も新たに設計し、既にモータの遠隔制御が安定して動作することを確認している。今後は、この GUI を組み込んだロボット本体全体での総合動作検証を進める予定である。

ロボット本体には 3 つの DC モータが搭載されており、1 つは苗を植える爪機構を、残り 2 つは左右の車輪の駆動を担っている。各モータには回転速度を測定するエンコーダを備えており、そのデータはスマートフォンや PC とリアルタイムで送受信可能なシステムを構築した。操作者はこの情報を用いて、ロボットの移動速度や苗植え機構の動作速度を遠隔から確認・制御することができる。なお、田植えロボットの実現には多くの技術的課題が伴う。現段階では、遠隔操作機能の基礎検証を室内環境で完了しており、屋外の水田における実験には今後の段階で取り組む予定である。

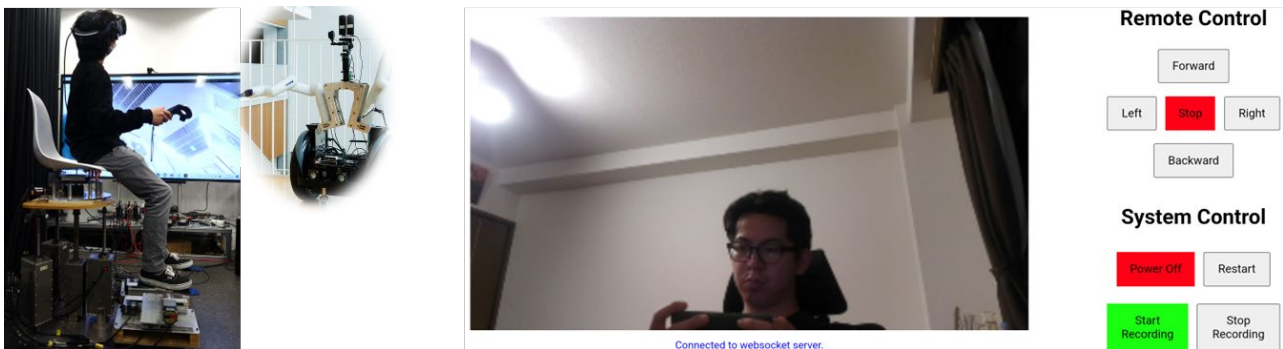


図 2: (左) 身体感覚フィードバック提示装置と、VR 遠隔操作のための全方位立体視映像のリアルタイム伝送の構成。操作者は遠隔地の農場状況を立体映像と触覚情報で把握しながら操作が可能である。(右) OAK-D カメラによる映像をリアルタイムで伝送し、スマートフォン上で田植えロボットを制御するための GUI の試作画面。操作画面により操縦者がロボットの爪機構の動作と移動・回転速度を制御できる。

農業現場における遠隔作業では、単にロボットを操作するだけでなく、現場（水田など）の作業者との円滑なコミュニケーション環境の確保が極めて重要である。そこで本研究では、ロボット操縦者と現地参加者との対話を支援するための XR 遠隔対話システムを構築している。本システムでは、HMD を装着した操縦者の顔をアバタ化し、そのアバタの頭部を遠隔地に存在するロボットの上空に浮かぶように表示する。これにより、現地参加者は MR ヘッドセットを通じて操縦者の表情や視線方向をリアルタイムに視認できるようになり、言語情報に加えて非言語的な感情・意図の共有を可能にする（図 3）。これは、単なる作業支援を超えた、人間同士の臨場感ある関係性の構築を目指した取り組みである。ただし、現段階では田植えロボットが水田環境で駆動できる状態に至っていないため、屋外での実証は未実施である。したがって本研究では、室内用の移動ロボットを代用し、同様の構成によって遠隔コミュニケーションの評価実験を行った。

本研究で構築している XR 遠隔作業・対話システムの全体構成を図 3（左）に示す。図中の左側は遠隔空間 A を表し、そこにいる遠隔対話者 A（ロボット操縦者）は、現場作業空間 B（水田にいる作業者）へ直接行くことなく、農業機械の代用のテレグジスタンスロボットを B 地点に設置する。このロボットには、全天球カメラ（Ricoh 社製 THETA Z1）2 台が搭載されており、360° のリアルタイム立体映像（4K, 30 fps）を遠隔対話者 A の HMD（Vive Pro Eye, HTC 社）に提示する。提示される映像は両眼視差を含み、見かけ上の遅延を感じさせない高臨場映像となっている。一方、現場作業空間 B では、MR グラス（HoloLens 2, Microsoft 社）を装着した現地作業者 B が、ロボット上のカメラ位置に遠隔対話者 A のリアル CG アバターを視認し、自然な対話が可能となる [5]。

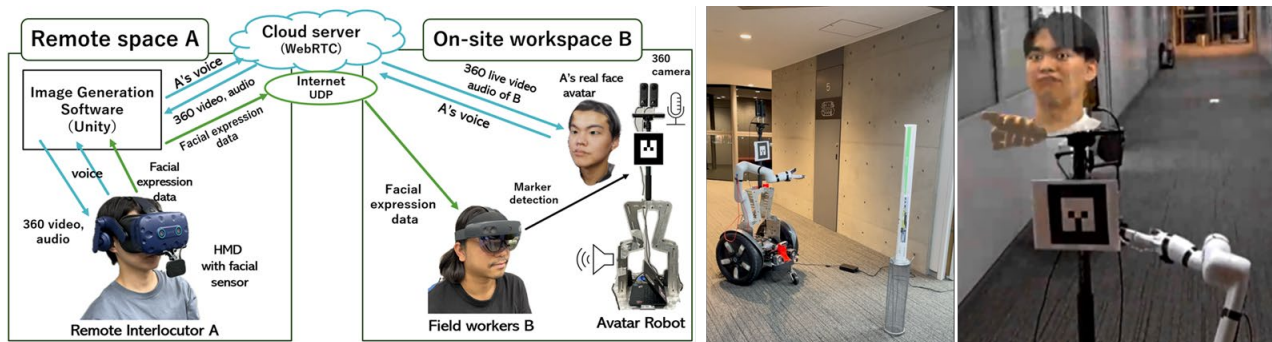


図 3：（左）XR 遠隔対話システムの全体構成．（右）遠隔操作時に，ロボット操縦者と現地参加者とのコミュニケーションを支援するため，XR 技術を用いて操縦者のアバタの頭部を現地に表示している様子．

遠隔対話者 A の HMD に内蔵されたセンサにより，頭部の回転運動，眼球運動，口部の動きが計測され，そのデータは現場作業空間 B に送信される．これにより，MR グラス内の CG アバタは遠隔対話者 A の表情や視線，発話動作をリアルタイムに再現することができる．また，遠隔対話者 A は HMD の両手コントローラを用いて，現場に設置されたロボットの操作も行う．右手のコントローラはロボットアームの操縦に用いられ，コントローラの空間移動により得られた x_1, y_1, z_1 の 3 軸の差分量を現場に送信し，アーム動作を遠隔操作する．左手のコントローラは，ロボットの台車部分（セグウェイ）の操縦に使用され，トラックパッド上での指の位置に応じた x_2, y_2 の 2 軸情報を現場に送信し，ロボットを操縦する．

本システムを評価するために，リアル CG アバタの視線や頭部の向きといった非言語的特徴を通じて，現場作業者が遠隔対話者の意図を正確に把握し，円滑かつ効率的なコミュニケーションに関する実験を行った．本実験では，トレイグジスタンス技術を活用した遠隔協調作業を設計し，遠隔対話者 A と現場作業員 B が共同で取り組むタスクを設定した．タスクは以下の 2 つの要素から構成される：

- ・共有バーチャルオブジェクトの形状を目標としたレゴブロックの組立作業
- ・トレイグジスタンスロボットによる完成品の運搬作業

実験は参加者が遠隔対話者 A と現場作業員 B の役割を交代しながら行われ，現場作業員の視点では，リアル CG アバタを 2D 表示と 3D 表示の 2 条件で提示する比較実験を行った．実験の様子を図 4 に示す．

実験手順：

- 1) バーチャルオブジェクトの確認：両参加者が HMD や MR グラスを通してバーチャルオブジェクトを共有できることを確認し，そのオブジェクトを回転・拡大縮小させながら，形状や特徴を詳細に観察・把握する．
- 2) レゴブロックの選定・組立作業：机 A 上にある複数のレゴブロックの中から，目標とするバーチャルオブジェクトの形状に最も近いブロックを両者の対話により選定する．色は双方の好みを考慮して決定し，選ばれたブロックは現場作業員 B が実際に組み立てる．
- 3) カゴへの収納：完成したレゴ作品を現場作業員 B がカゴに収納し，そのカゴをトレイグジスタンスロボットのロボットアームのグリップ部に手渡す．
- 4) 遠隔操作による運搬：遠隔対話者 A が HMD のコントローラを操作して，トレイグジスタンスロボットのアームでカゴを把持し，約 3m 離れた机 B まで運搬する．運搬後，机 B の所定位置にカゴを丁寧に配置することでタスクを完了とする．

実験参加者は 7 名（男性 3 名，女性 4 名，21-24 歳）であり，遠隔対話者 A と現場作業員 B の 2 グループに分け，A, B の 2 人を 1 組として，4 組が実施した．実験では，遠隔対話者 A と現場作業員 B の両役を交互に実施した．遠隔対話者 A と現場作業員 B に質問紙で回答を求めた．その結果，HMD を装着した遠隔対話者と，MR グラスを装着した現場作業員の双方において，XR 技術を活用した遠隔作業・対話システムは概ね良好な評価を得ており，本システムの有効性が示唆された．遠隔対話者 A の評価においては，立体視可能な映像により，現場作業空間の臨場感やオブジェクトの理解度が高まったとの意見が得られた．一方で，トレイグジスタンスロボットの操作性については，通信遅延や操作インターフェースの改善余地が指摘された．特に，カメラの振動による酔いの発生や，ロボットアームの自由度の低さが，操作時の課題として浮上した．現場作業員 B の評価では，リアル CG アバタの 3D 表示が 2D 表示よりも有意に高い評価を得た（図 5 左）．具体的に

は、アバタの存在感、視線運動、身体回転による指示の明確さにおいて 3D 表示の有効性が統計的に確認された。一方で、表情の再現性については改善の余地があることも示唆された。さらに、テレグジスタンスロボットのユーザビリティに関する評価（SUS：System Usability Scale の 0 から 100 のスコア）では、平均スコアは約 69 となり、一般的な基準を上回る良好な使いやすさが示された（図 5 右）。特に、機能の一貫性、複雑さの少なさ、学習の容易さなどにおいて高い評価が得られた。作業負荷の評価（NASA-TLX）においても、全体的な作業負荷は中程度以下にとどまり、本システムが操作者に過度な認知的・身体的負担をかけない設計であることが示された。以上の結果から、本システムは基本的な機能性およびユーザビリティにおいて良好な水準にあることが確認された。



図 4：A) リアル CG アバタ 2D 表示，B) リアル CG アバタ 3D 表示，C) 実験中の現場作業者 A（ロボット操縦者）の様子，D) 実験中の遠隔対話者 B（現場作業者）の様子

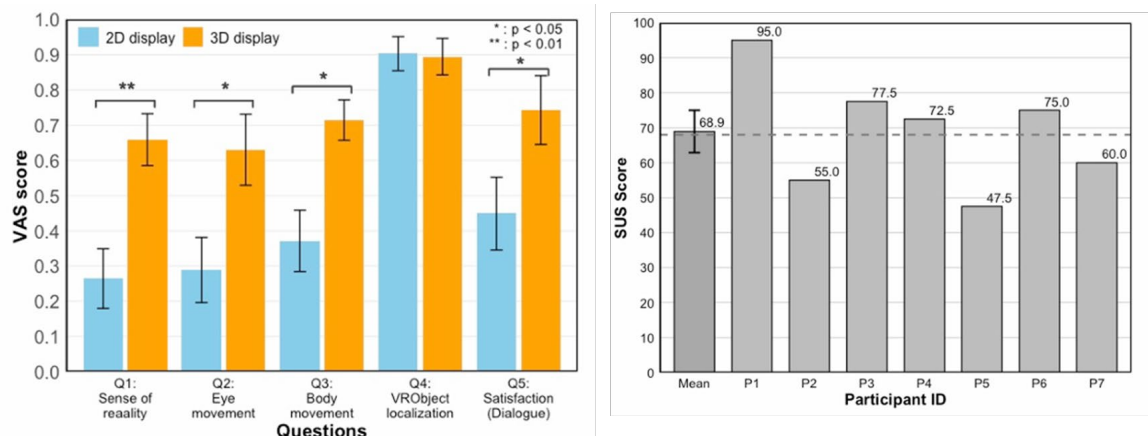


図 5：（左）現場作業者 B の回答によるアバタの 2D と 3D 表示の比較の結果。（右）各参加者とその平均の SUS（ユーザビリティに関する評価）スコアの結果

今後は、田植えロボットの屋外運用とあわせ、遠隔操縦者と現場作業者の間のスムーズな意思疎通を支援する実用的なコミュニケーション手段としての活用が期待される。

2-3 多感覚 VR フィードバック装置の開発と操作支援環境の整備

近年、テレプレゼンスやテレグジスタンス技術の進展により、遠隔地にいながら現地にいるかのような臨場感を実現することが可能となってきた[6]。これにより、農業を含む多様な分野での遠隔作業支援が期待されている。しかし、遠隔操作に伴う課題も依然として存在する。特に、視覚や聴覚に偏った情報提示では、操作中に生じる身体との感覚的不一致が原因で VR 酔いが発生しやすく、長時間の作業継続が困難となる。こうした問題に対し、身体フィードバック（触覚・前庭感覚など）を付加することは、酔いの抑制や操作時の没入感向上に効果的であるとされており、実際の遠隔作業における総合的な状況把握（アウェアネス）の支援につながると期待される。身体の動きに応じた適切な感覚フィードバックを与えることで、遠隔操縦者は現地環境との一体感を得やすくなり、直感的で安定した操作が可能となる。しかしながら、農業分野においては、こうした多感覚テレグジスタンスの適用事例はまだ極めて少なく、操作性や作業支援効果に関する検証は十分に行われていない。そこで本研究では、農作業現場におけるテレグジスタンス操作を支援する

ために、身体感覚を含む多感覚 VR フィードバック装置を新たに構築し、その有用性の実証に取り組んでいる。

本研究では、ここ数年にわたり多感覚 VR フィードバック装置の継続的な設計・開発を進めてきた。初期の試作機として、図 2 (左) に示す大型の装置を開発し、運動感覚や身体感覚の提示に関する基礎的な検証を行った。その成果を踏まえ、装置の小型・軽量化を目指して改良を加えたのが、図 5 (左) に示すモデルである。この軽量化モデルは、3 自由度の椅子ユニットと 2 自由度のペダル機構の 2 つの構成要素から成り、合計で 7 自由度の運動提示が可能となっている。これにより、ロボットの前進・旋回・加減速といった動作に応じて、操縦者に対応する身体フィードバックを提供できる設計となっている。さらに、装置のさらなる省スペース化を目的として、3 自由度の椅子ユニットを 1 自由度のサドル型構造に置き換える設計を行い、その開発も進めている(図 5 右)。この構成により、より可搬性に優れた装置として運用可能になるとともに、必要最小限の身体情報を効率的に提示することが可能となる。本装置群を用いることで、操縦者は HMD のコントローラによってロボットを遠隔操作しながら、ロボットの移動に応じた身体感覚を得ることができ、あたかも現地を自身の身体で歩いているかのような臨場感を体験することが可能となる。このような感覚統合は、作業への没入感を高め、操作の正確性と持続性の向上に寄与すると期待される。

本研究では、さらなる身体的臨場感と運動主体感を実現するため、登山ポールと送風ファンを組み合わせた多感覚 VR フィードバック装置の設計・開発を行っている(図 6)。本装置の特徴は、ポールを単なる感覚提示だけでなく、入力インタフェースとして活用する点にある。これにより、ユーザがポールを操作することでバーチャル空間に直接的な影響を与えられるようになり、自身の運動が環境に作用するという主体感(sense of agency)の向上が期待される。また、送風ファンによって移動時の風や環境の気流を模倣することで、気候条件も再現し、没入感の高い体験を実現している。構成としては、HMD による視覚・聴覚提示に加え、上下動が可能なサドル機構(1 自由度)と、スライドおよびピッチ回転が可能なペダル機構(合計 4 自由度)により下肢や体幹の動きを提示する。さらに、左右の登山ポールには伸縮と傾斜の 3 自由度があり、合計 11 自由度のフィードバックが可能なシステムとなっている。ペダル、サドル、ポールそれぞれに振動モジュールを搭載し、地面接触や滑走時の微細な身体感覚を再現することで、現実に近い空間体験を提供する。

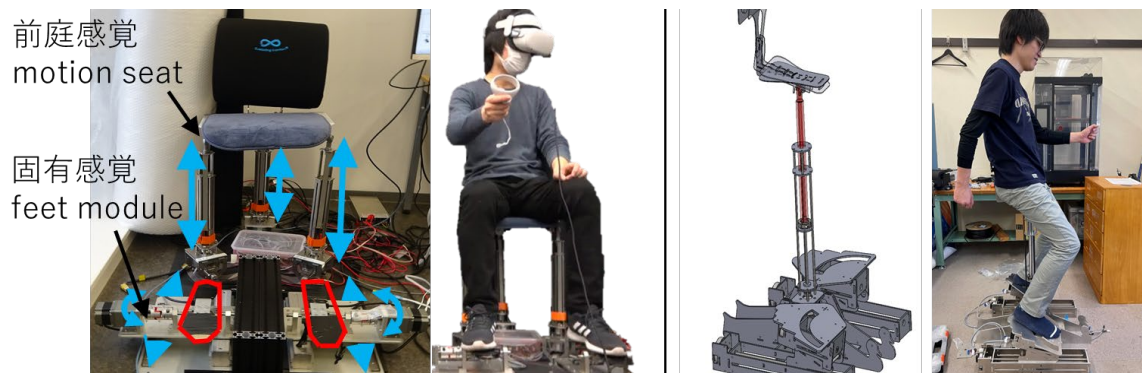


図 5： 現地状況に関する総合的なアウェアネスを提供する多感覚 VR フィードバック装置の構築例。(左) 7 自由度の椅子型装置、(右) 5 自由度のサドル型装置。

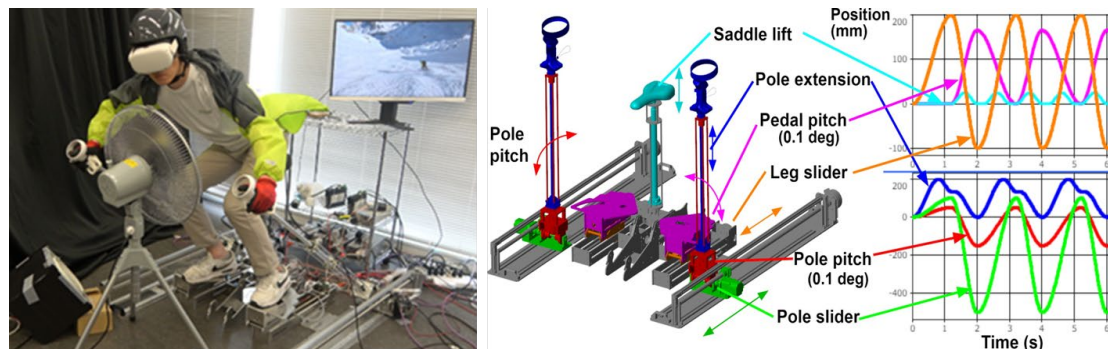


図 6： 登山ポールを活用した多感覚 VR フィードバック装置の開発例。ポールの操作感や接地感を再現することで、より自然な遠隔作業体験を提供することを目的としている。(右) 多感覚 VR フィードバック装置の構造モデルと、シミュレーション中に観察された各自由度(並進および回転)の典型的な軌道。

本装置は、すでにトレイグジスタンスロボットと連動しており、ロボットの動作と同期して全身の身体感覚を提示することが可能である。ただし、田植えロボットとの連動はまだ実現しておらず、現在は自然環境を模したシナリオとして登山およびスキーを題材にシミュレーションを行っている。登山やスキーは、農業作業と同様に不整地での身体バランス保持、道具を用いた推進動作など、多様な感覚統合を必要とする点で共通点がある。特に、登山ではポールによる地面接触や手足の協調、スキーでは滑走と姿勢制御が求められ、これらの体験は将来的な農作業（例：ぬかるんだ田んぼでのバランス保持や長時間作業時の身体負荷の軽減）の感覚設計に資する。このシステムでは、サドルの上下動や足のスライダの前後運動、ペダルの往復回転によって、体幹と下肢の動きを再現する。また、ポールの伸縮や急停止は、地面接触の感覚や反動動作を模倣し、推進運動を提示する。雪面や地面への接触に合わせて、サドル、足元、手元のコントローラには振動刺激が付加され、バーチャル空間内での自己運動感覚が強化されている。登山動作では、ポールの接地高さや角度を操作可能とし、サドルや足からの動きとあわせて、登坂に特有な全身的な負荷感やバランス感覚を提示する。一方、スキー動作では、特にクロスカンリースキーに類似した運動に適しており、左右交互の滑走やポールによる推進を再現可能である。加えて、最近の評価実験では、本装置によって提供される全身上昇感覚が階段昇降に近い感覚を提示できるかを検証した。大学院生5名の参加者に対して、階段・坂道の勾配を模したポール操作とともに階段昇りの感覚を評価させた結果、各勾配率を表現するポール動作により身体感覚の主観評価に差が認められた。これは、農業現場での身体バランス保持や接地感の再現においてもポールが有効である可能性を示唆している。

今後は、田植えロボットとの連携を通じて、ぬかるんだ水田での不安定な足場や身体姿勢の変化をリアルタイムに反映したフィードバックを実現することを目指す。視覚情報に依存しない多感覚の提示により、VR酔いの抑制、認知負荷の軽減、作業効率の向上が期待される。

3 おわりに

本研究では、遠隔操作とAIによる自律制御を統合した次世代型スマート農業機械の実現を目指し、複数の構成要素の開発と実証を進めている。まず、廉価で分解・運搬可能な田植えロボットを設計・構築し、苗を把持する4条植え対応のクランク式爪機構と、左右独立駆動の車輪機構を備えた構造とした。加工はミスミ社を用いて高精度かつ低コストに実現した。このロボットは、2024年8月にカンボジアヘスーツケース3個分に分解して輸送され、現地の苗を用いた室内実験で動作を確認した。異なる気候・環境下でも安定して作動し、将来的な国際展開に向けた有効性を確認した一方で、継続使用による部品の摩耗や強度の課題が明らかとなり、現在は耐久性を高めた構造への改良設計を進めている。

並行して、ロボットの各部の状態や農場環境のデータ（映像・センサ情報）をリアルタイムで取得・伝送するために、空間AIカメラ（OAK-D）とJetson Nanoを組み合わせたセンシング基盤を整備し、WebRTCベースの通信技術（Sora SFU）を用いた映像・データの送受信システムを構築した。これにより、スマートフォンやPCを通じて、現場の立体映像やロボットの速度・動作状況を遠隔から確認・操作可能なGUIも実装している。さらに、遠隔操作者と現地作業者との円滑なコミュニケーションを実現するため、HMDとMRグラスを活用したXR遠隔対話システムを開発した。このシステムでは、HMDを装着した操縦者の顔の動きや視線、口元の動きなどをリアルCGアバタとしてロボット上に表示し、MRグラスを装着した現地作業者が、アバタを通して自然な非言語的コミュニケーションを行うことができる。実証実験では、遠隔協調作業においてアバタの3D表示が2D表示よりも対話の明瞭性や存在感で有意に高い評価を得ており、その有効性が確認された。

加えて、長時間の遠隔操作に伴う身体的・認知的負荷やVR酔いを軽減し、操縦者の空間アウェアネスを高めることを目的として、多感覚VRフィードバック装置も開発している。初期は7自由度の椅子型装置から出発し、より軽量のサドル型（1自由度）や足・ペダル機構（2自由度）、さらに両手で持つ登山ポール（左右各3自由度）を組み合わせた合計11自由度の装置へと進化させた。また、風速や温度変化を模倣するためのファン、振動フィードバックなどを組み込むことで、登山やスキーのバーチャル環境において全身的な感覚を提示する実験を行った。この装置は現在、トレイグジスタンスロボットとは連動実績があるが、田植えロボットとはまだ未接続である。今後は田植えロボットの操作系と本装置を統合し、ぬかるみや傾斜など圃場特有の身体感覚を再現することで、遠隔農作業中の身体負荷を軽減しつつ、VR酔いや認知負荷を抑制し、効率的で直感的な操作環境の実現を目指す。

最終的には、こうしたヒューマン・マシン融合型のシステムに、AIによるセンシング・判断・自律制御機

能を追加することで、操作者の負担を軽減しつつ、自動で最適な行動をとるスマート農業機械への発展を目指す。遠隔操作と AI 自律制御を融合させた本研究のアプローチは、農業 DX を支える次世代インフラとして、国内外における多様な圃場条件への適応と展開が期待される。

【参考文献】

- [1] 総務省 (2020)「Beyond 5G 推進戦略」:
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/B5G_sokushin/index.html (2025 年 6 月 24 日アクセス)
- [2] Daniel Udekwe and Hasan Seyyedhasani, “Human robot interaction for agricultural Tele-Operation, using virtual Reality: A feasibility study.” Elsevier, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 228, 2025.
- [3] Avital Bechar and Clément Vigneault, “Agricultural robots for field operations: Concepts and components.” Elsevier, Biosystems Engineering, Vol. 149, pp. 94-111, 2016.
- [4] Simon Blackmore, Bill Stout, Maohua Wang, Boris Runov, “Robotic agriculture - the future of agricultural mechanisation?” Precision Agriculture 2005, ECPA 2005.
- [5] Yusuke Kikuchi, Ryoto Kato, Vibol Yem, Yukie Nagai, Yasushi Ikei, “Mobile cross reality (XR) space for remote collaboration.” AHFE2022, July 2022.
- [6] Susumu Tachi, “Telexistence: Enabling Humans to Be Virtually Ubiquitous.” IEEE Computer Graphics and Applications Vol. 36, No. 1, pp. 8-14, 2016.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Go Mountain! VR: Virtual Poles and Physical Motions for Trekking and Skiing Experiences	ACM Siggraph Asia E-tech	2024 年 12 月
XR Remote Dialogue System Presenting Speaker's Expression Using a Real-Space Avatar Robot	ICAT- EGVE	2024 年 12 月
Study on Multiple-virtual Body Perception: Effects of Different Spatial Presentation and Command Input Methods	ICAT- EGVE	2024 年 12 月
話者 CG モデルを実空間アバターロボットに提示する XR 遠隔対話システム	日本バチャールリアリティ学会	2024 年 9 月
空間提示手法と指令入力手法の違いが VR 空間での多重身体認知に及ぼす影響	日本バチャールリアリティ学会	2024 年 9 月
山岳トレッキングを表現するバーチャルストックと身体運動感覚の研究	日本バチャールリアリティ学会	2024 年 9 月