



Title	高速移動通信技術を活用したロボット農機の遠隔監視・遠隔操作に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	森田, 豪
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第15761号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/92042">https://hdl.handle.net/2115/92042</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	MORITA_Tsuyoshi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



# 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称： 博士（農学）

氏名 森田 豪

## 学位論文題名

### 高速移動通信技術を活用したロボット農機の遠隔監視・遠隔操作に関する研究

農業ロボットの更なる発展に向けて、様々なメーカーや機関が研究開発を行っている。その中で、農業機械の自動化に伴って、自動化安全レベルというものが定義されており、さらなる高機能化に向けた研究がされている。『レベル0』は完全手動運転、『レベル1』はステアリングアシストのような半自動運転であり、人が搭乗することを要する。『レベル2』は、人が搭乗せずとも自動で作業や走行が可能であり、そのロボット農機を人が目視で監視するものである。現在、メーカーから販売されているロボット農機はこの『レベル2』である。『レベル3』は研究開発段階であり、複数のロボット農機を遠隔に存在するロボット監視室から監視する。『レベル3』の自動化では、『レベル2』までのように高度な機械化・自動化にとどまらず、ICTを活用したロボット農機の複数管理や複雑な意思決定といった、ロボット農機単体ではなし得なかった機能の拡張が可能となり、デジタル領域と物理領域を高度に組み合わせたサイバーフィジカルシステムとなることが予想される。本研究は、この『レベル3』の自動化レベルにおけるロボット農機の遠隔監視や遠隔操作といったテーマに焦点を当てた。

#### サイバーフィジカルシステムにおけるロボットトラクタの走行制御

主要なロボット農機として、大規模な作業が行えるロボットトラクタがある。このロボットトラクタにおける自動走行を、遠隔の監視室から制御する研究を行った。ロボット農機内は、砂塵や高温といった過酷な環境であるため、自動走行のような高負荷な計算を行い続けることは非常に難しく、過酷な環境における可用性の確保は重要な課題である。これを解決するために、遠隔に存在するクラウド基盤に制御系を配置し、過酷な環境という制約を克服することを試みた。しかし、遠隔に存在する制御系によってロボット農機を制御する場合、ロボット農機と監視室間の通信に生じる遅延が制御に悪影響を与えてしまう。この遅延によって自動走行の精度が著しく悪化し、実環境では脱輪などの様々な危険が考えられる。そのため、この遅延の影響を克服するために、車両のモデルから遅延時間に動く横方向距離を推定し、遅延を補償する手法を考案し、自動走行へと適用した。車両モデルによる横方向距離の推定精度は  $0.04\text{m}$  を達成し、十分な精度であった。また、高負荷な計算を行うマシンビジョンによるシステムをクラウド基盤上に配置し、遅延補償による影響を確認した。これにより、横方向の RMSE において、自動走行の精度が最大 76% 改善したことが確認された。

#### ロボット農機におけるローカル 5G を用いた低遅延な安全システム

『レベル3』の自動化において、遠隔からロボット農機の作業映像が絶え間なくリアルタイムに送られることが予想される。画像処理による安全システムも、自動走行と同様に高負荷な計算となるため、ロボット農機側で計算を完結させることは容易ではない。そのため、遠隔監視として送られた映像を用いて、画像処理によってロボットトラクタを制御するというクラウド利用の安全システムの開発を行った。しかし、こうした通信を要するシステム体系において、ロボット農機と監視室の間には遅延が生じており、安全性に悪影響を及ぼすことが考えられる。LTE を用いたロボット農機と監視室の通信を行い、安全システムに生じる停止距離を計測し、システムの安全性を確認した。更に、超低遅延かつ大容量な通信が可能なローカル 5G を活用したシステムの停

止距離を併せて計測し、遅延の影響を確認した。結果として、ローカル 5G を活用することで、最大 27% の停止距離の減少が確認され、安全性の向上が示された。

## ロボット農機における遠隔操作

ロボット農機の自動化、高度化は更に進むことが予想されるが、『レベル 3』の自動化では、ロボット農機が距離の制限を超えて、離れた場所に存在し、それぞれが作業をすることが想定される。高度に自動化されたロボット農機においても、複雑で時変な農業フィールドにおいて、常に安全に正確な意思決定を行うことは非常に難しい。この問題を解決するために、人の意思決定を介入させる遠隔操作機能を開発した。遠隔に存在するオペレータは、遠隔監視として送られるリアルタイムな映像を基に、監視室に設置されたハンドルコントローラによって、遠隔に存在するロボット農機を直接運転する。オペレータは、自動走行モードと遠隔操作モードを手元のコントローラによって任意のタイミングで変更することが可能である。しかし、遠隔操作においても、運転を困難にする様々な要因が生じている。通信では避けられない遅延はこの最たる要因である。そのため、遠隔操作システムに生じている遅延の最小化を目指した。加えて、このシステムにローカル 5G を活用し、最小 100msec を下回る超低遅延な遠隔操作システムの開発に成功した。従来の手法であった LTE と、今回適用したローカル 5G をそれぞれ用いた場合の遅延の比較を行い、運転タスクに関する影響を確認した。また、遠隔操作による困難の一つに、固定化された自己中心的なカメラ映像による認知負荷の上昇という影響も考えられる。人が一般的に行う運転とは異なり、視点が固定されていることや視野角の不一致であることにより、運転が難しくなる要因となることである。遠隔操作による圃場間移動を仮定した走行試験を行い、異なるカメラ視野角の操舵制御への影響を評価した。