



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Research on a digital twin system on farm work utilizing agricultural machinery
Author(s)	YU, Yue
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16591号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16591
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98201
Type	doctoral thesis
File Information	YU_Yue_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（農学） 氏 名 YU Yue

審査担当者	主査	教 授	野口 伸
	副査	教 授	岩渕 和則
	副査	助 教	オズビナ アラルコン リカルト
	副査	准教授	石井 一暢（国際食資源学院）

学位論文題名

Research on a digital twin system on farm work utilizing
agricultural machinery

（農業機械作業のデジタルツインシステムに関する研究）

本論文は英文 129 頁、図 42、表 13、7 章からなり、参考論文 3 編が付されている。

無人トラクタなどのロボット農機は農業現場における農業従事者の軽労化に対して大きな効果を発揮する。しかしながら、ロボット農機の開発と社会実装において、いまだ課題が残されている。ロボット開発の観点では標準化されていない様々な圃場のため数多くの作業走行試験や安全試験が要求され、膨大な開発コストと開発時間が必要である。また、社会実装面ではロボット農機の価格が高く、小規模な経営体では導入できない。また、ロボット農機の作業スケジュール最適化も課題である。他方、サイバー空間とフィジカル空間を統合するデジタルツインシステムは様々な分野で注目され、研究開発が進められている。本研究では農業機械開発や機械システム運用面で、デジタルツインシステムによるメリットを最大化するために、まずサイバー空間に高精度にモデル化された農業機械システムを構築することを目標とした。農業機械のデジタルツインシステムでは、オフロードを走行する農業機械特有な非線形運動を再現できるトラクタモデルを構築する必要がある。また、サイバー空間のみならず実空間であるフィジカル空間の実験によって、デジタルツインシステムの精度評価も必要である。そして最終的にはロボット農機を含めた新規の農業機械の開発や実利用面において、デジタルツインシステムの有用性を明らかにすることも求められる。以上、本研究では新規性の高い農業デジタルツインシステムに関する諸問題を網羅的に検討した。

1. デジタルツインシステムフレームワークの構築

Unity ソフトウェアを供試して作成されたサイバー空間に、実際の地形と農業機械をモデル化してインポートした。地形点群データはドローンで収集され、三次元再構成技術を用いて三次元モデルに変換した。モデル化誤差は 5cm 以下であった。農業機械はヤンマートラクタ EG105 をプロトタイプとして採用し、実トラクタに搭載されている制御装置を含み主要な物理パラメータ・仕様を再現した仮想トラクタ

をサイバー空間に構築した。仮想トラクタには、衛星測位システム（GNSS）シミュレータ、操舵シミュレータ、タイヤ・路面間の力学相互作用シミュレータなどのサブシステムが含まれている。トラクタのモデル精度は北方生物圏フィールド科学センター研究農場の駐車場と乾いた圃場において評価した。その結果、仮想トラクタはアスファルトや路面変形が少ない乾いた圃場において実トラクタと高い走行類似性を有することを確認した。

2. トラクタ走行系の非線形性を考慮したシミュレーション

トラクタは土壌含水比が高まり路面が塑性変形すると車輪と路面間の非線形性は顕在化し、上述のタイヤ・路面間の力学相互作用シミュレータの誤差が大きくなる。この問題を解決するために本研究では、主要な非線形要素を組み込んだ非線形運動モデルを開発した。サイバー空間と実世界の実験による検証結果から、提案した非線形モデルは高い実用性を有し、特にぬかるんだ圃場環境下では従来の線形車両モデルに比べて高い精度でモデル化された。

3. デジタルツインシステムの複合現実への応用と潜在性

サイバー空間のモデルは経時的に誤差が蓄積する。この問題はサイバー空間とフィジカル空間を同時に動作させたときに問題になる。そこで本研究ではサイバー空間とフィジカル空間の同時使用を想定して Web ソケットプログラミングを用いてリアルタイム誤差補償システムを開発した。さらに、通信遅延を可能な限り排除するために、状態誤差推定法を適用してデジタルツインシステムを複合現実としての利用も可能にした。

さらに開発したデジタルツインシステムの高い潜在性を明らかにするために、農業現場への適用例を検討した。デジタルツインシステムの応用例を3つに分類して整理した。(1) ロボットトラクタ開発の効率化、(2) 農地整備計画の立案、(3) 農業ロボット運用計画の最適化である。いずれの事例においてもデジタルツインシステムの有効性をシミュレーションにより明らかにした。

以上、本研究では農業デジタルツインシステム構築を目的に研究を行った。製造現場や宇宙開発ではデジタルツインシステムはすでに一部利用されているが、農業分野では世界初の取り組みである。特に本研究は自然環境特有の強い非線形現象を補償する研究も進め、研究のオリジナリティとともに学術的価値も極めて高い。よって審査員一同は、Yu Yue が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。