



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
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
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15761
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94558
Type	doctoral thesis
File Information	MORITA_Tsuyoshi.pdf



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

北海道大学 大学院農学院

農学専攻 博士課程

森田 豪

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	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	5
2.1	背景	5
2.2	機材と方法	9
2.2.1	供試機材	9
2.2.2	伝送遅延時間補償手法	10
2.2.3	仮想遅延時間を適用した RTK-GNSS による走行試験	13
2.2.4	マシンビジョンを用いた走行制御系への適用	15
2.3	結果と考察	18
2.3.1	仮想遅延時間を適用した RTK-GNSS による走行試験	18
2.3.2	マシンビジョンを用いた走行制御系への影響	32
2.4	結論	34
第 3 章	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	37
3.1	背景	37

3.2	機材と方法	39
3.2.1	供試機材	39
3.2.2	システム概要	40
3.2.3	実験方法	42
3.3	結果と考察	43
3.4	結論	45
第4章	ロボットトラクタにおける遠隔操作	46
4.1	背景	46
4.2	機材と方法	50
4.2.1	供試機材	51
4.2.2	システム概要	52
4.2.3	遠隔操作における動画の遅延測定	54
4.2.4	遠隔操作による走行試験	57
4.3	結果と考察	58
4.3.1	遠隔操作における動画の遅延測定	58

4.3.2	遠隔操作による走行試験.....	62
4.4	結論.....	67
第 5 章	結論	69
Acknowledgement		71
References		72

第1章 序論

我が国の農業における労働力の低下は喫緊の課題となっている。2010年から2020年における基幹的農業従事者は66%の減少を示し、2020年における65歳以上の基幹的農業従事者の割合は70%を占めていることから、高齢化の一途をたどっている(農林水産省, 2022)。限られた労働力の中で、農業の効率を向上させることが急務となっているが、人口が減少する我が国において、この要求は困難である。こうした背景から、ロボット技術やICTを活用した新しい農業体系であるスマート農業の研究・実証が広く行われている。

この中でも、農業のロボット化は、少ない労働人口でも、作付け可能面積を向上させることが可能であることや、夜間における作業など、農業の人口減少に対する切り札となることが期待されている。また、ロボット技術を駆使した世界トップレベルのスマート農業を推進していることから、その期待は大きい。

ロボット農機の更なる高度な自動化に向け、研究機関や機械メーカーによって日々研究されている。農業機械においても、自動車の自動運転レベルのように、自動化における段階的なランク付けがされている。レベル0はオペレータによる完全な手動運転であり、レベル1は人が農業機械に搭乗することを前提

とした操舵の補助を行うステアリングアシスト機能を指す。レベル2は、人の目視監視における管理の下、人が機械に搭乗せず、あらかじめ設定された作業計画を自動で行うものである。現在大手メーカー各社から、自動走行や作業が可能なロボットトラクタが販売されており、レベル2のロボット農機が実用化されている。

これからの発展が望まれるレベル3の自動化では、人は機械の近傍にいないことを想定せず、ロボットに取り付けられたカメラから、遠隔にいるオペレータにその映像をリアルタイムに送信を行い、オペレータはその映像を見ることで監視を行う遠隔監視という体系をとる。これにより、遠隔にいるオペレータは離れた圃場に存在する複数の農機を一度に管理することが可能となり、人が管理できる農機の数が増え、従来よりも効率の向上が見込まれる。更に、このようなICTを活用したロボット農機の役割は、物理空間で作業を行うだけの労働力にとどまらず、膨大な量の農業情報をセンシングし、データを蓄積するエージェントとなることが想定される。農業システムは、こうした情報を活用し、システム全体の価値を最大化する農業情報のセンシングや活用を目指す全く新しいものとなる。このような物理領域と情報領域を組み合わせたダイナミックなシステムをサイバーフィジカルシステムといい、レベル3の農業では2

つの領域を考慮した農業システムを構築することで、農業全体の価値を最大化していく体系となることが予想される。

しかし、レベル3の自動化における農業においては、現在行われている農業とは大きく異なり、従来では考えられなかった多くの困難が存在するだろう。例えば、オペレータと農業ロボット間の意思伝達は全て通信を介して行われる。しかし、通信を行う際に、オペレータとロボットの間には遅延の影響があり、遅延によってリアルタイム性を要する意思決定において重大な悪影響を及ぼす。例えば、オペレータによるロボットの緊急停止を考えると、遅延時間分だけ停止距離が増加してしまうことが考えられる。また、ロボット農機の室内は一般的に過酷であり、工場のように整備された環境ではない。そのため、砂塵、高温、電力や積載スペースなど、計算機をはじめとした電子機器に様々な悪影響があり、常に高負荷な計算をロボット側で行うことは容易ではない。そのため、高負荷な操舵系を行う際には、自動走行における制御系を遠隔に設置するということも考えられる。

本研究では、『レベル3』の自動化レベルに向け、様々な観点から研究を行った。2章では、クラウド基盤を用いた操舵制御について述べる。ロボット農機内の過酷な環境下で自動走行のための高負荷な計算を続けることは難しく、

可用性への課題があった。この問題を解決するため、クラウド基盤を用いた操舵制御のシステムによって、この制約の克服を試みた。3章では、ロボット農機が安全に停止を行うための安全システムについて述べる。安全システムにおいても制御系と同様で、高負荷な計算を行い続けなければならないため、クラウド基盤を活用することで、環境の克服を試みた。4章では、ロボット農機の遠隔操作について述べる。『レベル3』の自動化では、ロボット農機近傍に人がいないことが見込まれるため、不測の事態において、人の意思決定を介入することが難しいことが考えられる。このような状況において、人がその都度移動することがロボット農機の可用性を大幅に減少させるだろう。この問題を解決するために、人が遠隔から意思決定を介入させる機能を開発し、自動走行が可能なロボット農機に組み合わせることで、課題の解決を試みた。

第2章 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

2.1 背景

現在開発されているロボットトラクタは、リアルタイムキネマティック測位システム(RTK-GNSS)と慣性計測装置(Inertial Measurement Unit; IMU)を航法センサとして使用し、自律的な走行を可能としている。しかし、こうした RTK-GNSS を用いたシステムは、センサの特性上、林冠や建造物によるマルチパスによって、測定精度の低下は避けられない。そのため、RTK-GNSS 以外の航法センサを用いて、走行を行えるような冗長構成が必要とされている。画像処理やニューラルネットワークを用いたマシンビジョンベースの走行システムは、センサの価格が安価であることや適用範囲が広いなどのメリットを有しており、マシンビジョンを用いた農用車両の走行制御に関する研究は盛んである (Wang et al., 2022)。しかし、農業で使用される屋外環境は、一般的に温度などが工場内と比較して過酷なことが多く (Farooq et al., 2019, Abbasi et al., 2022 ;), ロボット農機においても例外ではない。例えば、先述のように車内の温度に伴う排熱性の問題、電力、積載スペース、防塵などの観点から、膨大な計算を行えるワークステーションをロボット農機内に設置することが難しい、機器の可

用性を確保し続けることが難しいなど課題は多い。そのため、現在開発が盛んな画像処理やニューラルネットワークなど、高負荷な計算による走行を車両側で完結することは、容易ではない。したがって、高負荷な計算を用いる際は、データのみをセンサによって計測し、センサデータをクラウド上にアップロード、計算をクラウド上のワークステーションで行い、再びロボットトラクタへフィードバックを行うといったように、IoT 的発想が一つの方向と考えられる。こうした手法により、クラウド上に存在する潤沢なリソースを使用することが可能であり (Xia, 2015), ロボット農機内への設置という制約を克服することが可能となる。さらに、これからのシステムは現実社会であるフィジカル空間のみならず、情報空間であるサイバー空間を最大限活用し、フィジカル空間の写像空間をサイバー空間に構成して、システムをリアルタイムで進化させるサイバー・フィジカルシステム(CPS)の導入を検討すべきであろう。これによりフィジカル空間のみならず、サイバー空間を使用した制御の拡張が期待できる (Dumitrache et al., 2017)。

しかし、こうしたシステムを踏襲し、クラウド上に制御系を構築した場合に問題となるのが、ネットワークを介する際の制御システムに生じる伝送遅延による制御遅れ時間である。図 2-1 のように、ロボットトラクタにおいて撮像された動画データをクラウドへ入力し、クラウド基盤は入力からエラーを算出し、

そのエラーに基づいたステアリングを、ロボットトラクタへフィードバックを行うようなシステムを仮定すると、システム全体における遅延によって、制御にむだ時間が生じ、意図した時刻にフィードバックが適用されず、実走行に対して悪影響を及ぼしてしまう可能性が高い。一般的に、むだ時間が生じる制御においては、比例ゲインを小さくしないことによって、振動的な応答を示してしまうことが多い(Abe, 2007)。

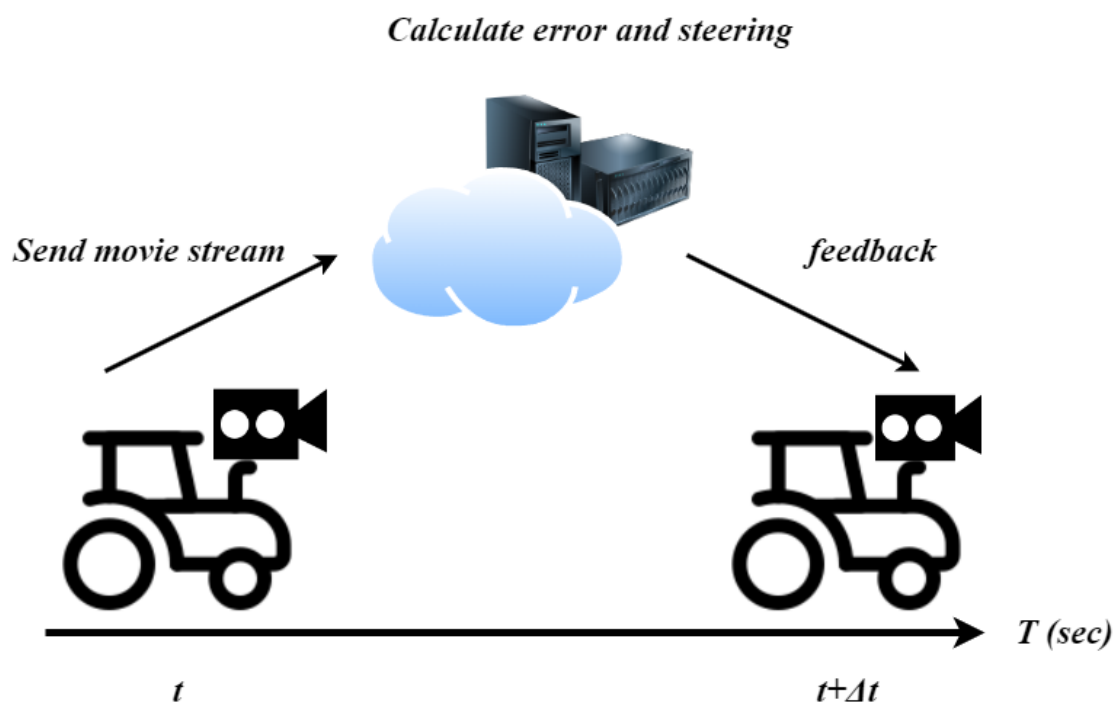


図 2-1 遅延時間が生じるシステムにおける操舵制御

遅延時間が生じるビークルの制御に関して、様々な研究がなされている。類似研究として Cox らは、オンラインゲームの同期手法を取り入れ、ドローンの操作遅延による影響を考慮したフィードバック増強を提案している (Cox & Wong, 2019)。また、車両の自動走行に関する研究として、Murphy は、マシンビジョンによる走行において、計算時間が長く生じるような環境を遅延が生じる系と置き、その安定性解析を行っている (Murphy, 1994)。なかでも、IMU などのナビゲーションセンサによる補償を、遅延した時間において行うことが有効であると述べている。門田らは、非ホロノミック車両において、スミス法によって、運動モデルに基づいたむだ時間の補償を行い、円経路の追従試験を行い、走行精度の向上を達成した (Monden & Nonaka, n.d.)。一方で、実車においてモデル化誤差が生じる場合には、むだ時間の大きさによって安定性が変わってくることについて述べている。

これらのように定常的に遅延時間が生じる環境を補償した研究はあるものの、遅延時間によって生じる走行精度や車両の運動モデルを用いて補償を適用した際に、運動モデルの精度が、実際の走行に対して、どの程度有効かについて定量的に評価している既往の研究は皆無である。さらに、農用車両を対象にしてサイバー空間に制御系をおいた CPS に関する研究は今まで行われていない。本研究では将来、遠隔操縦を含めたサイバー空間を活用した農用車両の自動化が進

むことを想定し、ロボット農機の走行制御を、ネットワークを介して行った場合に発生する伝送遅延が生じる環境下の走行について、システムの遅延時間と走行速度を変えながらパラメータとして基礎的データを取得した。次に、遅延時間に生じる車両の横方向距離を、車両の運動モデルを用いて推定し、操舵制御に組み込むことで、車両の走行精度の改善効果を調べ、車両運動モデルによる遅延時間の補償が有効かを検証した。さらに、運動モデルによる遅延補償が、遅延時間がない場合と比較することで、採用した車両運動モデルの推定精度を検証する。最後に、本研究室で開発したマシンビジョンシステムによる操舵制御系を、クラウド基盤上に配置し、本研究で考案した伝送遅延を補償したロボットトラクタの走行制御結果について論じた。

2.2 機材と方法

2.2.1 供試機材

本研究では、自動走行が可能なロボットトラクタを供試した。ロボットトラクタは農業用トラクタ(MR1000A, クボタ, 日本)をベースとしている。ロボットトラクタには各種センサを読み込むための PC(Intel® Core™ i3-6100U, 16GB RAM, Windows10 64 bit OS)が 1 台、航法センサとして RTK-GNSS(TrimbleAlloy, Trimble, USA)および IMU(VN-100, VectorNav, USA)が取り

付けられている。また、IMU のヨー角の分解能は 0.001° である。これらのセンサ情報を利用した操舵制御系を構築することで、自動走行を実現している。制御周期は 10Hz である。

加えて、マシンビジョンによる自動走行も可能としている。供試ロボットトラックには RGB カメラ (PIXPRO360 4KVR, Kodak, USA) およびカメラ映像を送信するための PC (Intel Core i5, 8GB RAM, Windows 10 64bit OS) も搭載している。マシンビジョンのフレームレートは 10Hz を設定した。

2.2.2 伝送遅延時間補償手法

伝送遅延時間補償手法について解説する。走行制御を行う系において、遅延時間が既知であるとし、簡易な車両モデルによる遅延補償アルゴリズムが、伝送遅延の生じる系において有効かを検証する。図 2-2 のように低速車両の運動の記述に有効な、地上座標系における車両の等価二輪モデルを定義する。

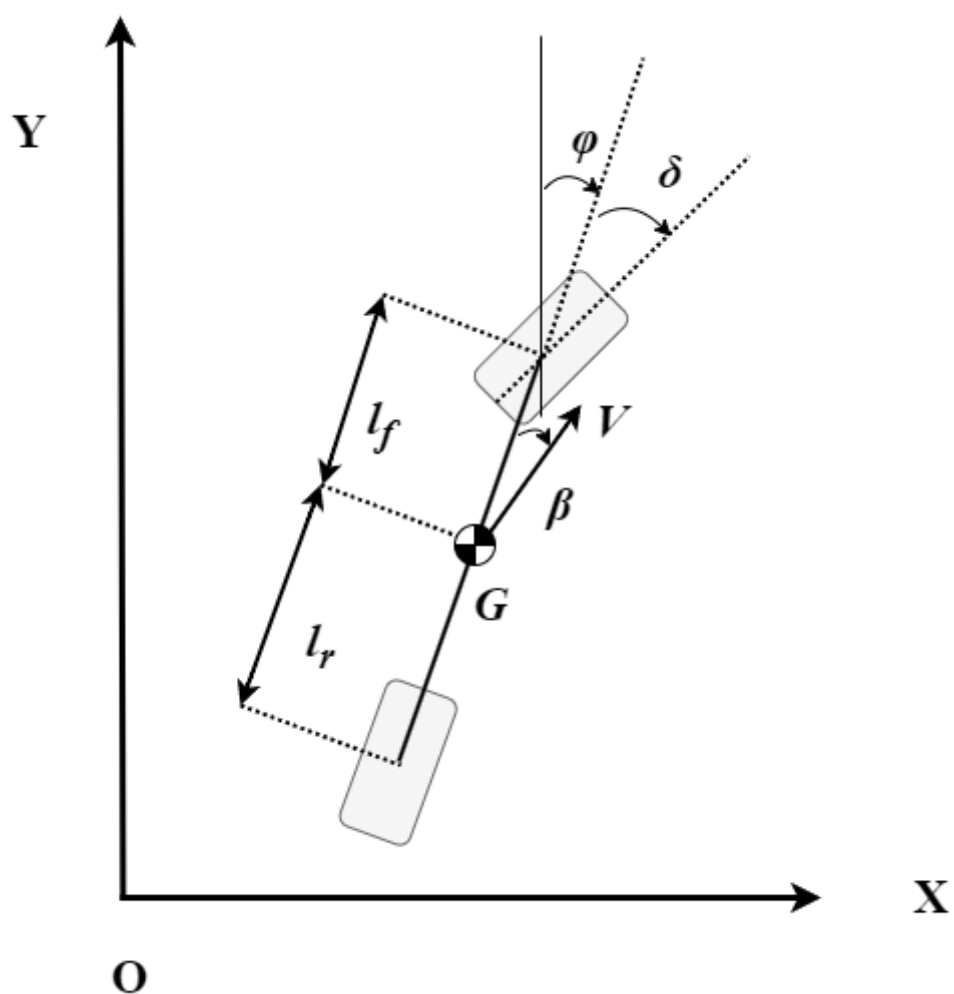


図 2-2 車両の等価二輪モデル

時刻 0 から t において、ビークル位置 (x, y) は、初期位置を (x_0, y_0) としたときに、速度 V 、横滑り角 β 、ビークル方位を φ として、以下のように表すことができる。

$$x = x_0 + V \int_0^t \sin(\beta + \varphi) dt \quad (1)$$

$$y = y_0 + V \int_0^t \cos(\beta + \varphi) dt \quad (2)$$

式(1)から，本研究で推定したい t から $t + \Delta t$ の時間における， X 方向に対する横方向距離 d を以下のように表す。

$$d = V \int_t^{t+\Delta t} \sin(\beta + \varphi) dt \quad (3)$$

ここで横滑り角 β は，以下のように表すことが可能である。 l_f は前車軸から車両重心までの距離， l_r は車両重心から後車軸までの距離， δ は操舵角とする。

$$\tan\beta = \frac{l_r}{l_f + l_r} \tan\delta \quad (4)$$

本研究では直線の走行を想定しており，ステアリング角が大きくなならないことを仮定している。そのため β および δ は0に近い値とみなせることから以下のよう近似する。

$$\tan\beta \approx \beta$$

$$\tan\delta \approx \delta$$

したがって式(4)における β を式(5)の通りに近似する。

$$\beta = \frac{l_r}{l_f + l_r} \delta \quad (5)$$

センサからの計測値 δ, φ および式(3), 式(5)を用いて, 時刻 t から $t + \Delta t$ における Δt 間の遅延時間中に生じた, ヨー角に対する横方向移動距離 d を算出する。

2.2.3 仮想遅延時間を適用した RTK-GNSS による走行試験

まず, 伝送遅延時間中に生じる横方向偏差 d を推定し, 走行制御に適用することにより, 横方向偏差の推定と走行精度の改善効果を評価する。操舵制御に関しては木瀬らの手法を用いた(Kise et al., 2001)。地上座標系を定義し, 方位偏差 θ は車両重心における方位と目標経路のなす角, 横方向偏差 ε を車両重心から目標経路までの垂線の長さとし, これらを用いて前輪の操舵角 δ を算出する。

K_{head} および K_{lat} はそれぞれ制御ゲインであり, 走行試験により調節した。

$$\delta = K_{head}\theta + K_{lat}\varepsilon \quad (6)$$

本研究では, 観測される ε を所定の時間分 PC に記憶させ, 任意の時間の後に走行制御に組み込むことで, 疑似的に遅延時間が生じるような環境を構築した。この時, 過去の横方向偏差を ε_{past} とおく。

$$\varepsilon = \varepsilon_{past} \quad (7)$$

疑似的な遅延時間が生じる式(7)の状態の横方向偏差を用いて式(6)による走行制御を行い、経路を走行させる。次に、式(3)による横方向移動距離 d を任意の遅延時間分計算することで、任意の遅延時間前における横方向偏差 ε_{past} と遅延時間中に動いたとされる、横方向移動距離 d を足し合わせる。

$$\varepsilon = \varepsilon_{past} + d \quad (8)$$

こちらも同様に、経路を走行させ、式(8)の横方向偏差を用いて式(3)の走行制御を行う。

評価項目として、式(7)と式(8)をそれぞれ用いて走行した際における、目標経路と車両位置との横方向偏差を用いた。また、遅延時間が生じない真値となる横方向偏差 ε_{true} も同時に計測しており、式(7)の過去の横方向偏差と式(8)の補償された過去の横方向偏差を、 ε_{true} とそれぞれ比較することで、遅延時間が生じない横方向偏差との誤差を併せて算出した。これにより、今回考案した補償式の精度がどの程度かを検証する。

次に、目標経路をステップ状に変化させ、開発した遅延補償アルゴリズムの操舵制御の応答性・安定性改善効果を調べた。直線上の目標経路を走行させ、20m 程走行した時点で、進行方向と垂直の方向に 1m のオフセットを目標経路

に意図的に与え、制御の収束を、複数の走行条件で確認した。目標経路を図 2-3 に示す。

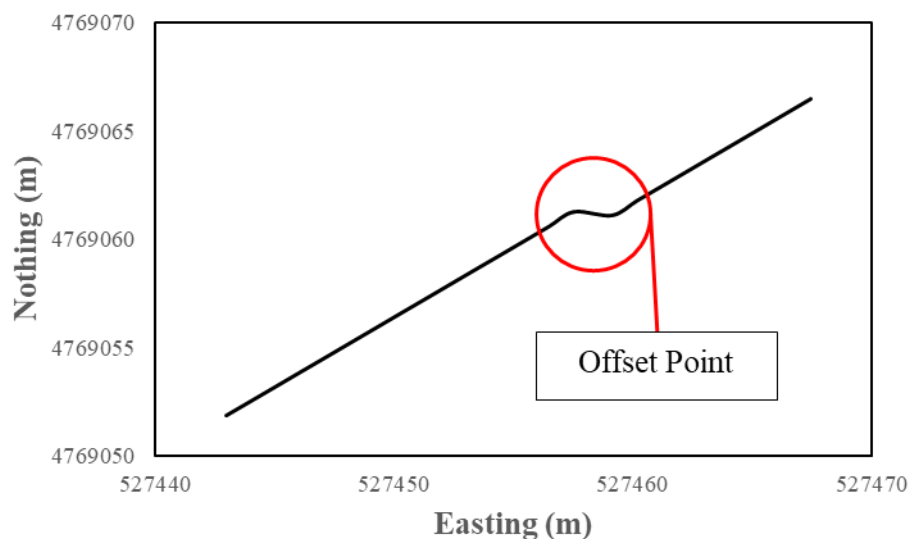


図 2-3 ステップ状のオフセットを与えた目標経路

2.2.4 マシンビジョンを用いた走行制御系への適用

著者らが開発したマシンビジョンベース自動走行システム(Sristi.S et al., 2022)により道路端を認識して農道の自動走行が可能な走行制御システムを、クラウド基盤に搭載し、ネットワークを介したロボットトラクタの走行制御を行った。これは走行時に、トラクタに装備した RGB カメラで走路を撮影し、動画ストリーミングをリアルタイムにクラウド上に送信する。クラウド基盤上には Docker コンテナとしてマシンビジョンシステムが動作しており、ロボットトラ

クタの走行時のストリーミングを入力することで道路端を認識，道路中心を検知することで，車両中心と道路中心の横方向偏差 ε_{mv} を計算し，トラクタにフィードバックを行い，自動走行を行うシステムである。実際にマシンビジョンシステムにおける走行の様子を図 2-4 に示した。トラクタとクラウド基盤上の通信は，NTT 情報ネットワーク総合研究所によって開発されたネットワークシステムを用いた(Ishibashi et al., 2021)。

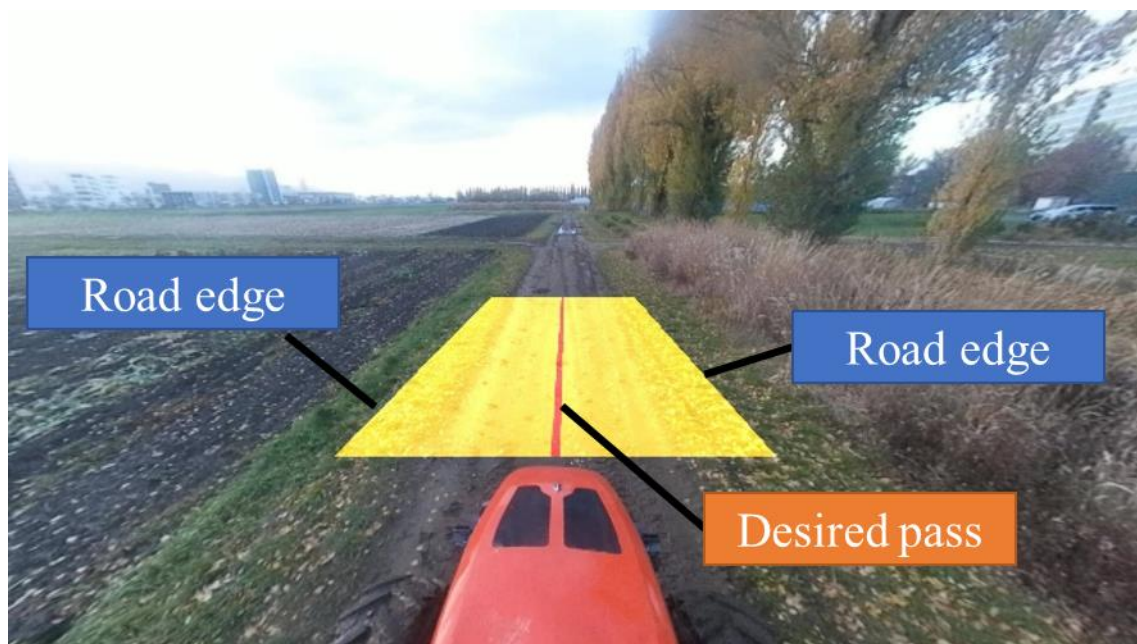


図 2-4 マシンビジョンによる操舵制御

このビジョンベースナビゲーションではロボットトラクタ前方の画像から横方向偏差を算出しているため，方位偏差を陰に含んでいることから式(9)のように操舵制御を行う。

$$\delta = K_{lat}\varepsilon_{mv} \quad (9)$$

マシンビジョンによって計算される横方向偏差 ε_{mv} は、クラウドシステムを介した遅延時間分前の値となる。実際に、動画の撮像からフィードバックまでのシステム全体の遅延時間を計測したところ、約 1.0 秒の遅延時間が生じていたため、遅延時間を 1.0 秒として横方向偏差を補償する。しかし、ビジョンベースの自動走行では、RTK-GNSS による測位が行えないことを仮定しているため、地上座標系における絶対方位を高い精度で算出することが不可能であり、操舵制御においても式(9)のように横方向偏差のみを用いている。そのため、式(3)の補償式における絶対方位を用いず、式(10)のような補償を行った。

$$d_{mv} = V \int_t^{t+\Delta t} \sin(\beta) dt \quad (10)$$

これを踏まえて、式(11)のような操舵制御を行った。

$$\delta = K_{lat}(\varepsilon_{mv} + d_{mv}) \quad (11)$$

RTK-GNSS を用いた実験と同様に、式(9)のように遅延時間前の横方向偏差を補償せずに用いた場合と、式(11)のように遅延時間に生じる距離を補償した場合の操舵制御を、走行時の目標経路と車両位置の横方向偏差を比較して評価を行った。

2.3 結果と考察

2.3.1 仮想遅延時間を適用した RTK-GNSS による走行試験

遅延時間の条件を 0 秒, 1 秒, 2 秒, 3 秒の 4 種類, 速度の条件を 3.2km/h, 6.8km/h, 8.8km/h の 3 種類として, それぞれ変化させ, 50m の走行を行い, 走行目標経路と実際の走行位置の横方向偏差における RMSE, その最大横方向偏差を計測した。また, 遅延時間が生じない場合の横方向偏差と実際に使用した横方向偏差の RMSE を算出することで, 使用した運動モデルによる推定精度の確認を行った。走行距離が 50m に満たないものについては, 走行精度が悪く, 脱輪してしまう恐れがあったため, 手動で停止を行ったことによる。

図 2-7 に 3.2km/h, 遅延時間 3 秒の走行における横方向偏差を示す。遅延補償の有無に関わらず, 両条件で完走しているが, 遅延補償によって横方向偏差が抑えられている。また, 6.8km/h および 8.8km/h の走行においては, 走行不可能な条件が存在するが, 遅延時間補償を行うことで, 今回設定した遅延の条件では, 全て完走が可能となった。特に, 図 2-10 のように, 6.8km/h, 遅延時間が 3 秒の設定において, 補償がないことによって制御周期に遅れ時間が生じ, 振動

的な応答を示してしまい、完走が不可能となってしまった一方で、補償を行うことで振動が抑制されたことが判明した。

遅延時間中に生じる横方向距離の推定精度に関しては、補償を行った場合と行わない場合では、今回実験した全てのパターンにおいて、遅延時間が生じない値に対して、同じか改善される結果が得られた。また、今回の条件の中で最も走行速度が速い 8.8km/h の遅延時間 3 秒の走行においても、遅延時間が生じない場合の計測値と使用した値の RMSE が 0.04m となっている。遅延時間が生じない場合の横方向偏差が約 0.04m であることから、遅延時間補償を行うことによって、最も悪い設定条件下においても、目標経路に対して 0.10m 以内の RMSE を達成するような横方向偏差の推定を行えていることが判明した。

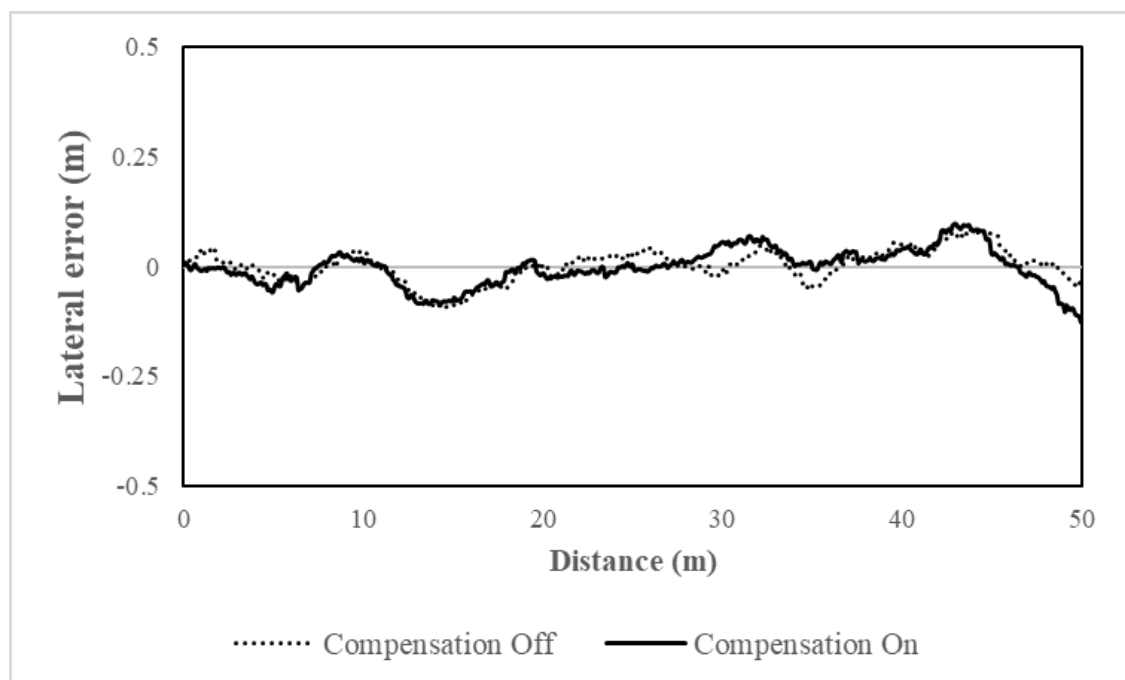


図 2-5 3.2 km/h, 遅延時間 1 秒の走行における横方向偏差

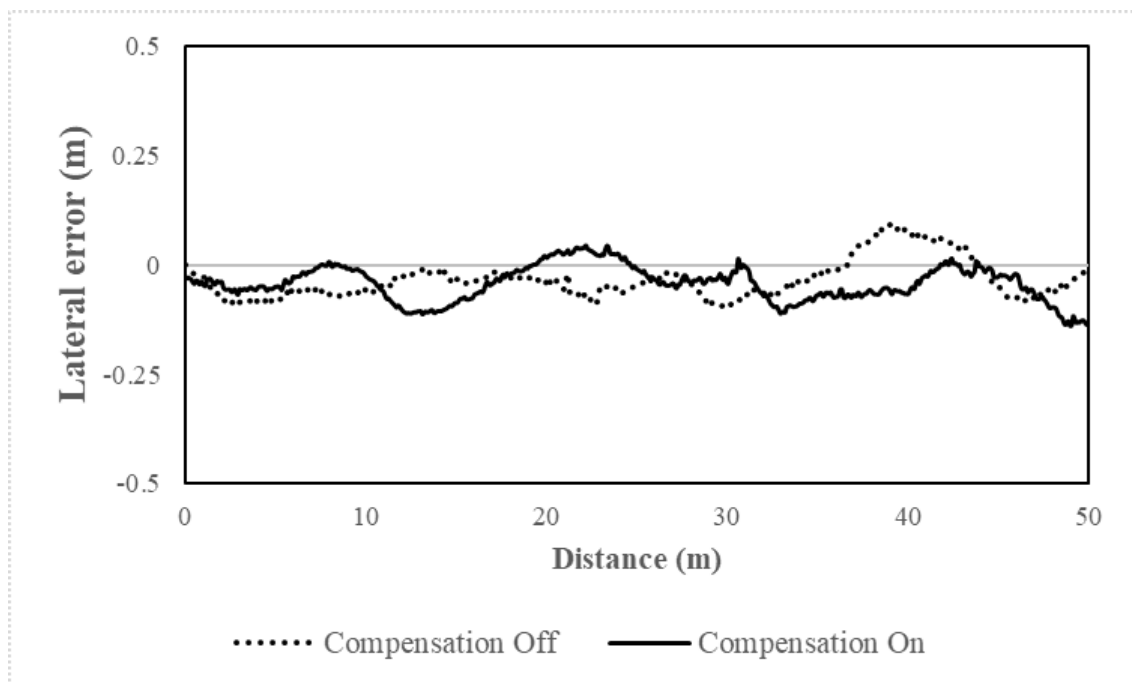


図 2-6 3.2km/h, 遅延時間 2 秒の走行における横方向偏差

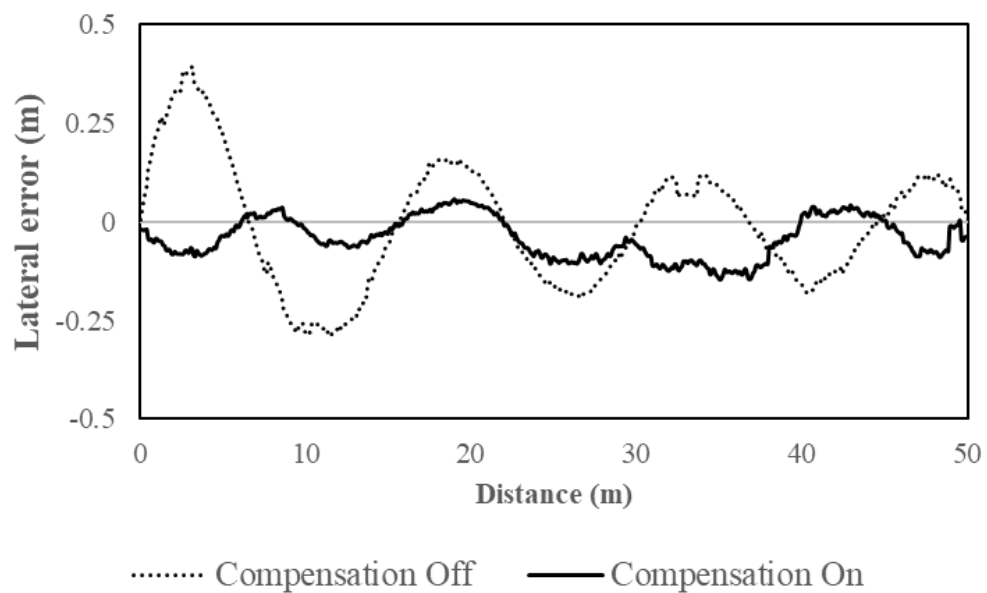


図 2-7 3.2km/h, 遅延時間 3 秒の走行における横方向偏差

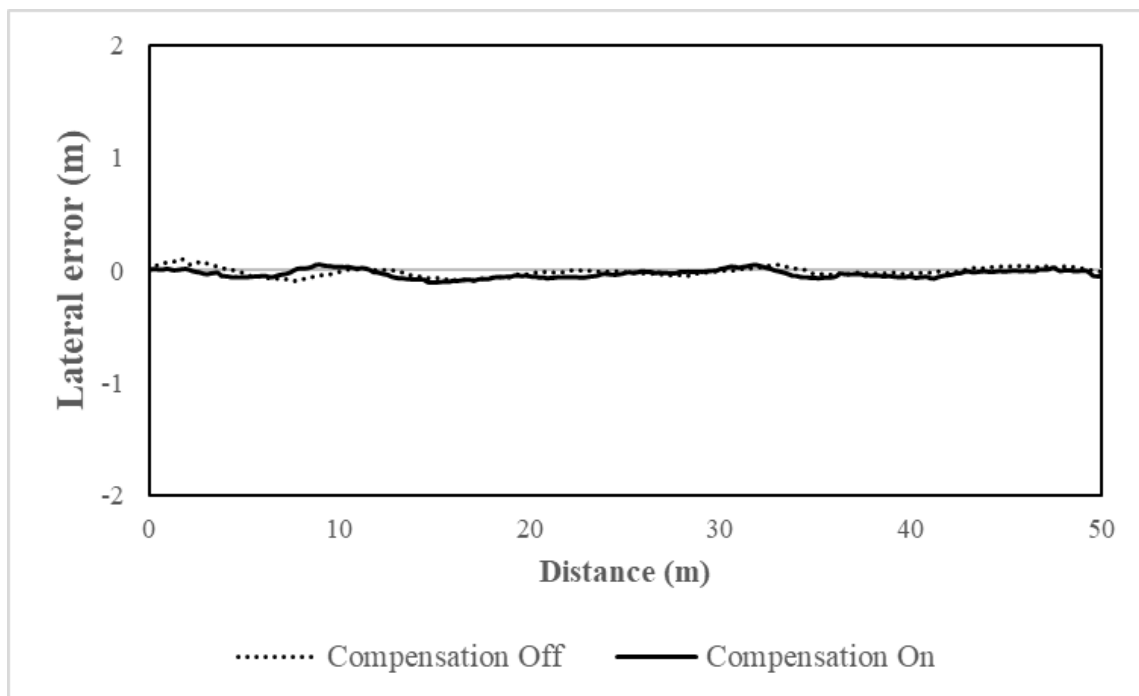


図 2-8 6.8 km/h, 遅延時間 1 秒の走行における横方向偏差

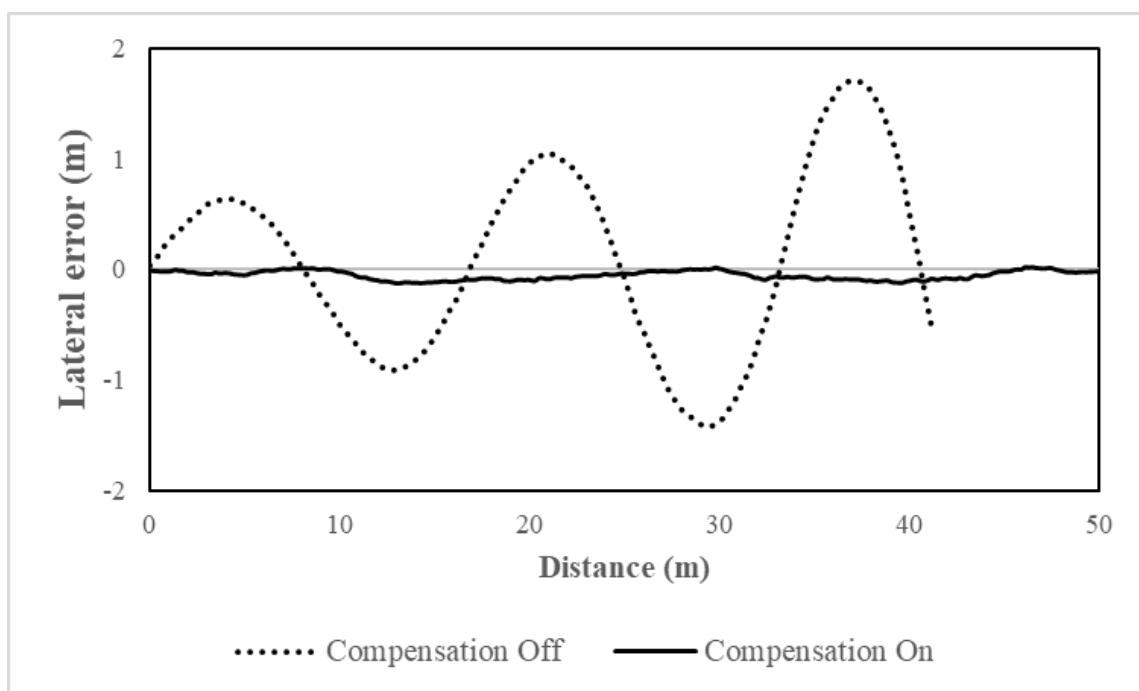


図 2-9 6.8 km/h, 遅延時間 2 秒の走行における横方向偏差

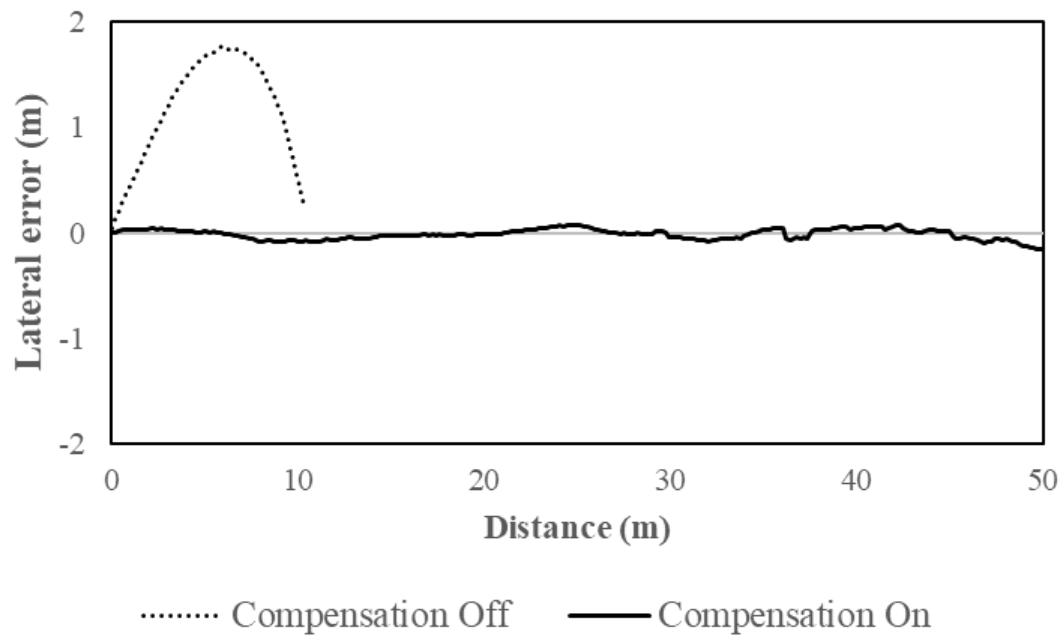


図 2-10 6.8 km/h, 遅延時間 3 秒の走行における横方向偏差

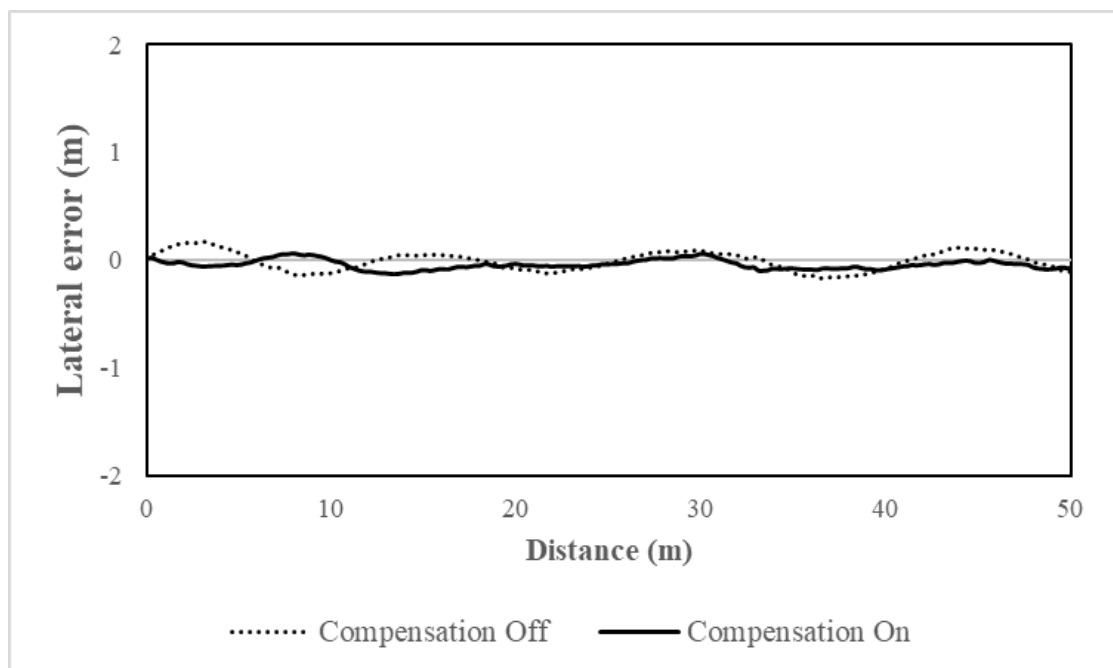


図 2-11 8.8 km/h, 遅延時間 1 秒の走行における横方向偏差

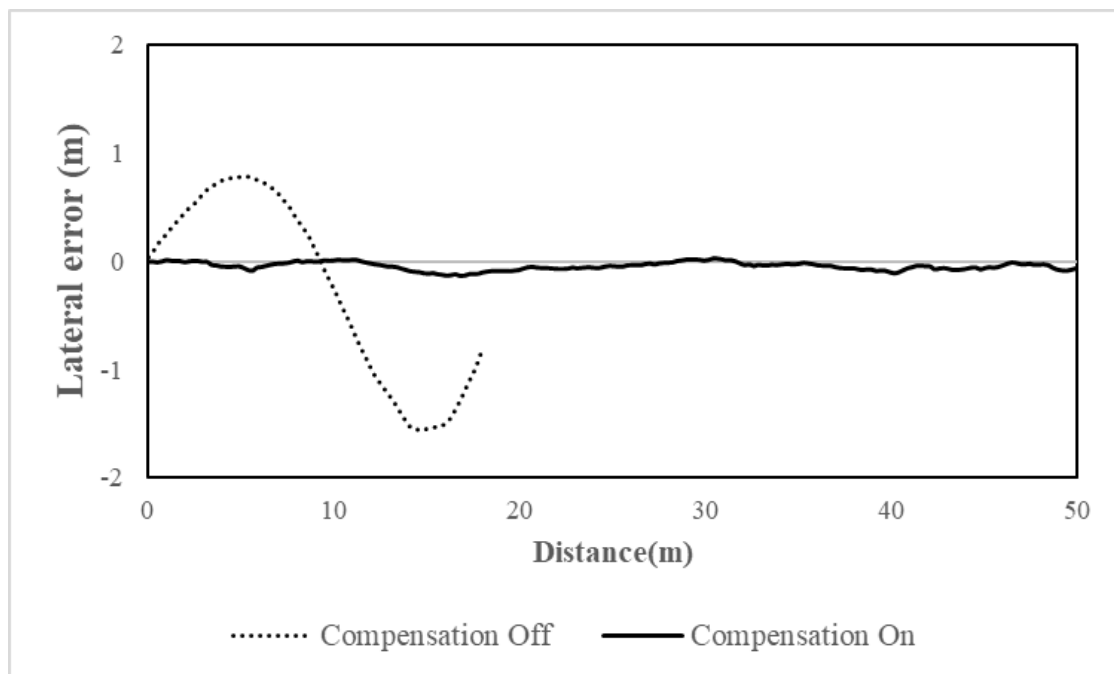


図 2-12 8.8 km/h, 遅延時間 2 秒の走行における横方向偏差

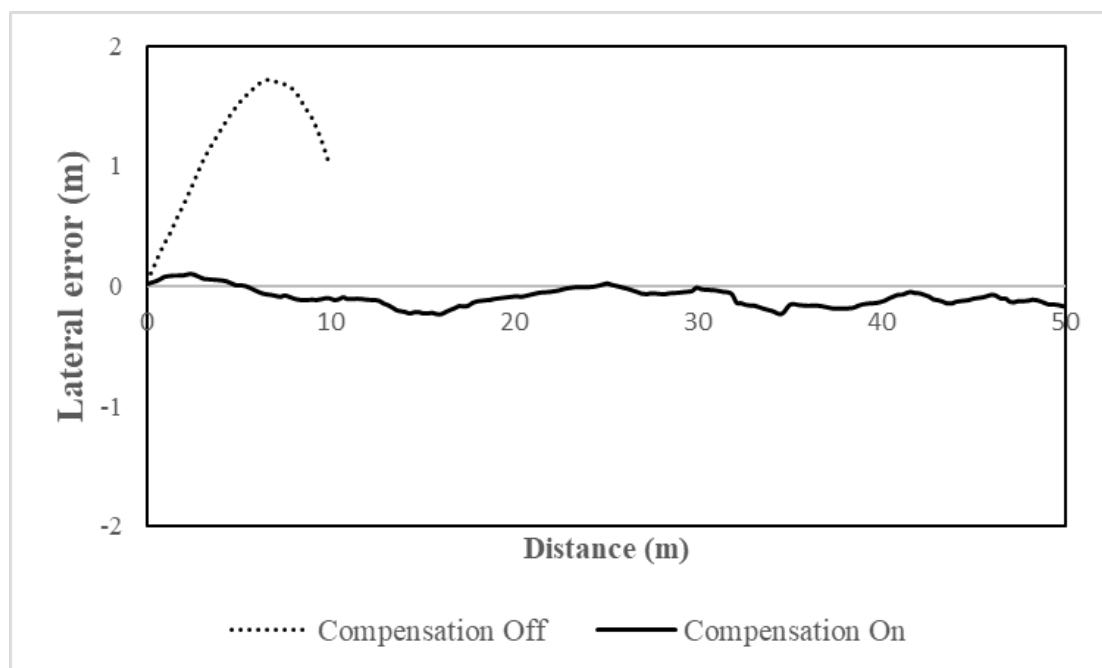


図 2-13 8.8 km/h, 遅延時間 3 秒の走行における横方向偏差

表 2-1 3.2 km/h における走行まとめ

Latency and Compensation	RMSE	Max	Speed (m/s)	Distance (m)	RMSE of estimation(m)
	of lateral (m)	lateral error (m)			
No latency	0.04	0.08	0.89	50.0	None
1sec (Compensation Off)	0.04	0.09	0.90	50.0	0.02
1sec (Compensation On)	0.04	0.13	0.90	50.0	0.02
2sec (Compensation Off)	0.06	0.1	0.89	50.1	0.04
2sec (Compensation On)	0.06	0.14	0.89	50.0	0.03
3sec (Compensation Off)	0.17	0.4	0.90	50.1	0.18
3sec	0.07	0.15	0.90	50.0	0.04

(Compensation On)

表 2-2 6.8 km/h における走行まとめ

Latency and Compensation	RMSE of lateral(m)	Max		Speed (m/s)	Distance (m)	RMSE of estimation(m)
		lateral error (m)				
No latency	0.04	0.08		1.90	50.1	None
1sec (Compensation Off)	0.04	0.1		1.90	50.1	0.04
1sec (Compensation On)	0.04	0.1		1.90	50.1	0.03
2sec (Compensation Off)	0.83 (Not finished)	1.7		1.90	42.1	1
2sec (Compensation On)	0.07	0.12		1.90	50.1	0.05
3sec (Compensation Off)	1.27 (Not finished)	1.77		1.90	10.4	1.49

3sec	0.05	0.16	1.90	50.1	0.05
(Compensation On)					

表 2-3 8.8 km/h における走行まとめ

Max					
Latency and	RMSE of	lateral	Speed	Distance	RMSE of
Compensation	lateral(m)	error	(m/s)	(m)	estimation(m)
		(m)			
No latency	0.03	0.09	2.43	50.1	NULL
1sec	0.09	0.18	2.41	50.2	0.09
(Compensation Off)					
1sec	0.06	0.12	2.43	50.1	0.04
(Compensation On)					
2sec	0.90 (Not				
(Compensation Off)		1.6	2.44	18.0	0.91
	finished)				
2sec	0.06	0.13	2.43	50.1	0.05
(Compensation On)					

3sec	1.28 (Not				
(Compensation Off)	finished)	1.71	2.43	9.9	1.53
3sec	0.12	0.24	2.44	50.1	0.04
(Compensation On)					

直線の目標経路に対して 1m のオフセットを与え、50m 走行した。図 2-7 に時速 6.8km/h、遅延時間 1 秒の結果を示した。また、横方向偏差の振幅が最初に 0.10m 以内に達する時間を算出すると、遅延補償を行った場合では条件を 12 秒で達成し、遅延補償を行わない場合では 50m の走行に要した 28 秒時点で振幅が 0.10m 以内に収まらず、遅延補償によって、オーバーシュートが抑えられ、振動も少なくなったことが判明した。同速度において、遅延時間を 2 秒以上とした際には脱輪の恐れがあり走行が不可能となってしまったため、遅延時間補償における横方向の推定の効果は大きいことが確認できた。

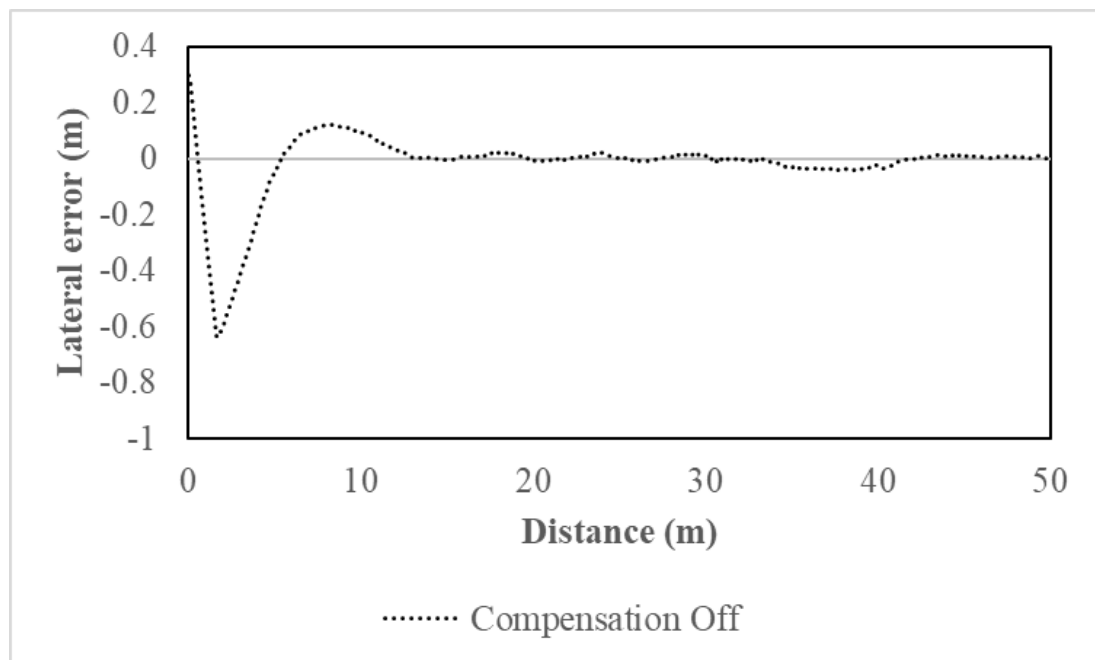


図 2-14 オフセットを与えた経路における 3.0 km/h, 遅延時間 0 秒の横方向偏差

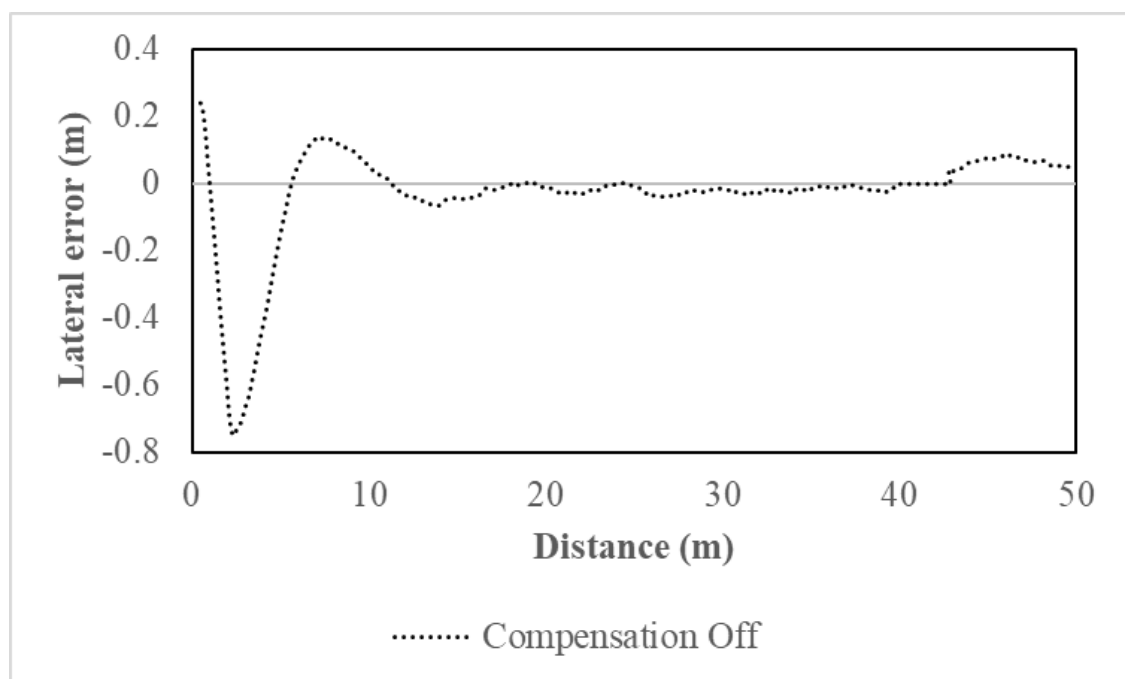


図 2-15 オフセットを与えた経路における 6.5 km/h, 遅延時間 0 秒の横方向偏差

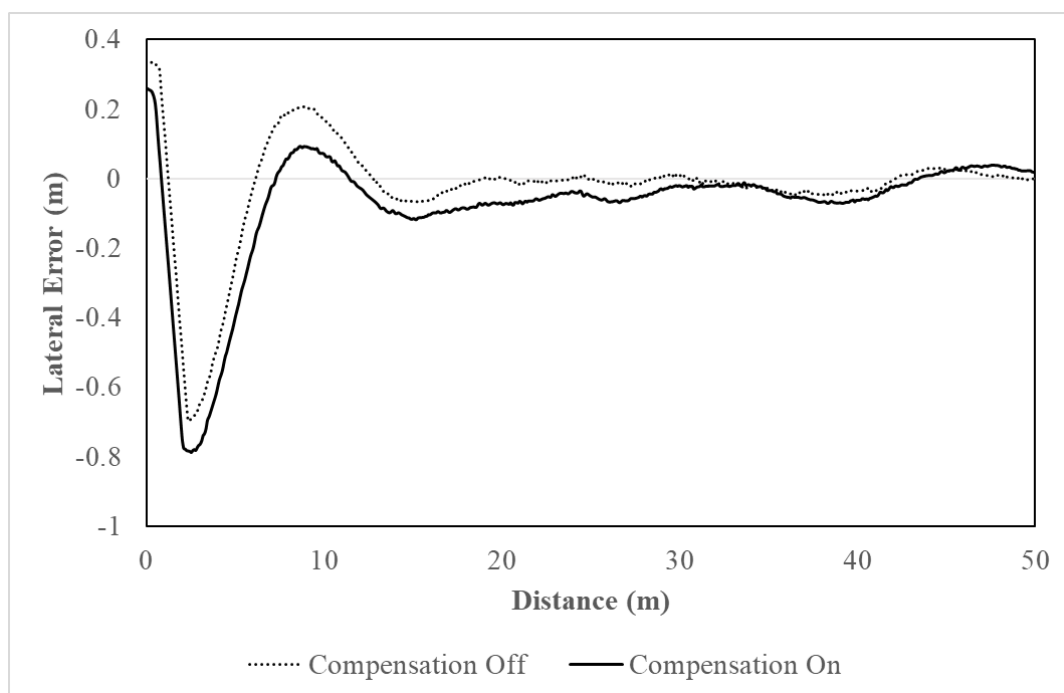


図 2-16 オフセットを与えた経路における 3.0 km/h, 遅延時間 1 秒の横方向偏差

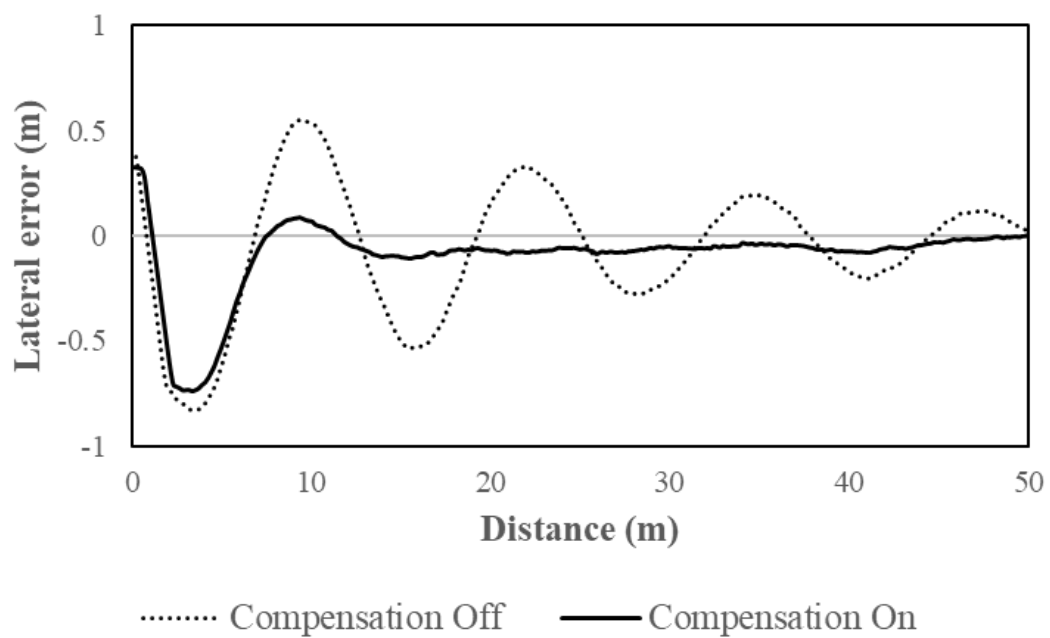


図 2-17 オフセットを与えた経路における 6.5km/h, 遅延時間 1 秒の横方向偏差

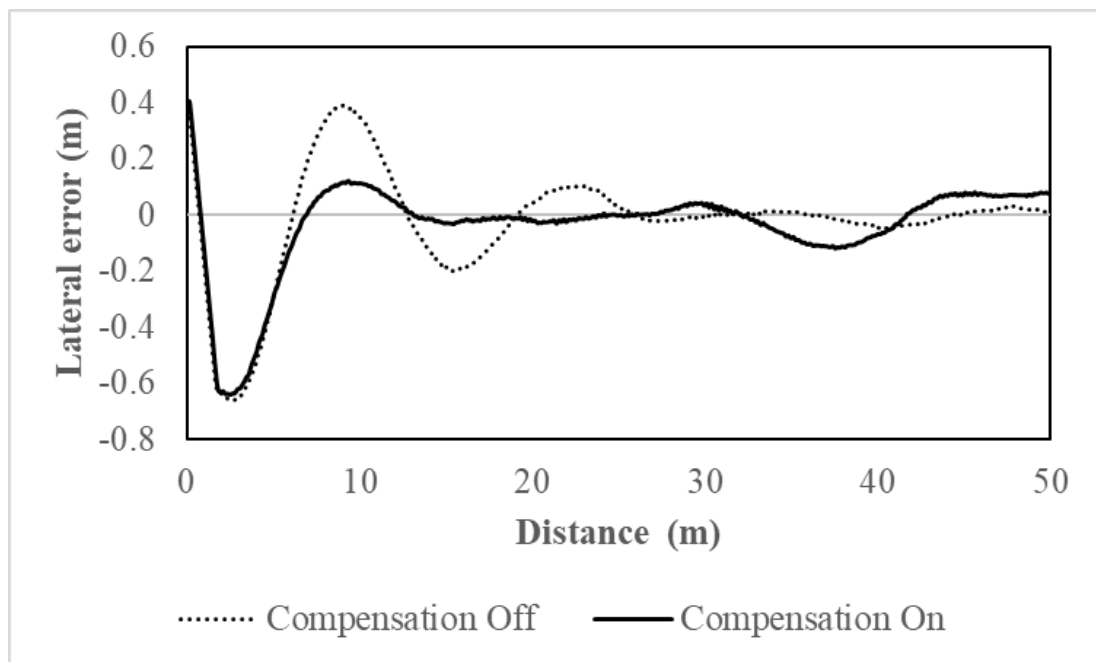


図 2-18 オフセットを与えた経路における 3.0 km/h, 遅延時間 2 秒の横方向偏差

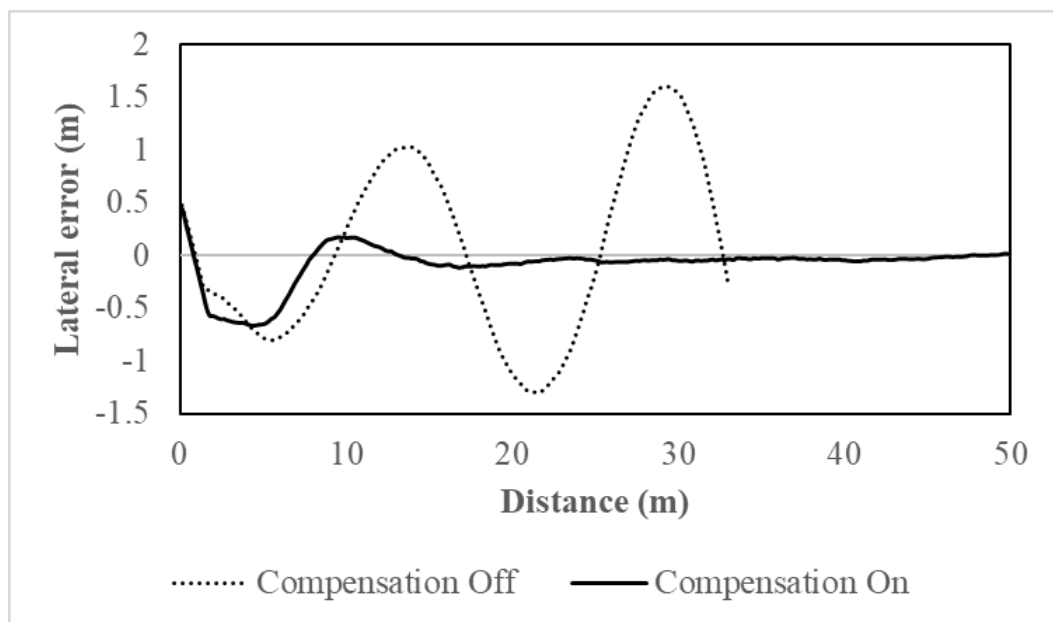


図 2-19 オフセットを与えた経路における 6.5 km/h, 遅延時間 2 秒の横方向偏差

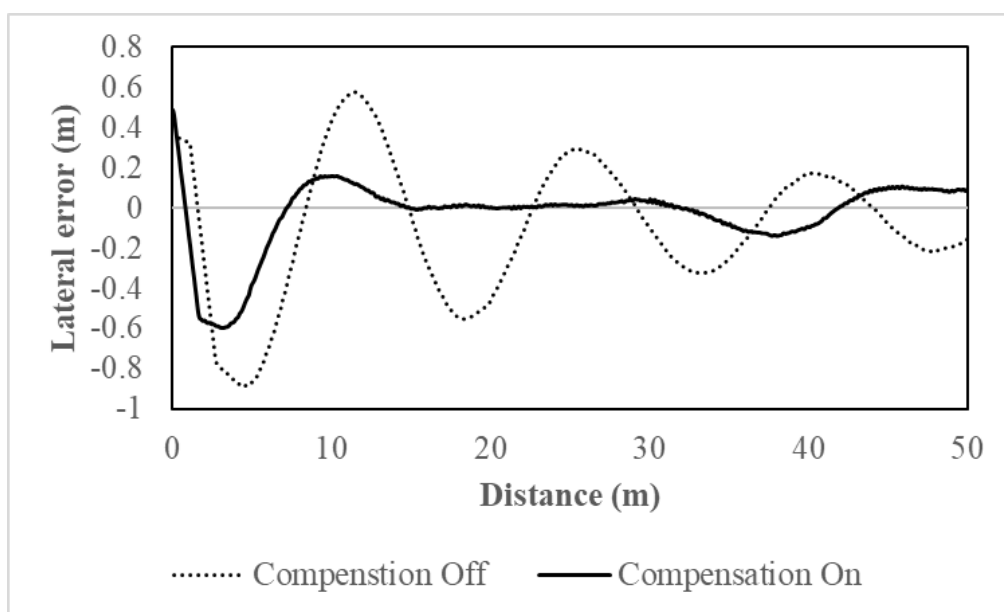


図 2-20 オフセットを与えた経路における 3.0 km/h, 遅延時間 3 秒の横方向偏差

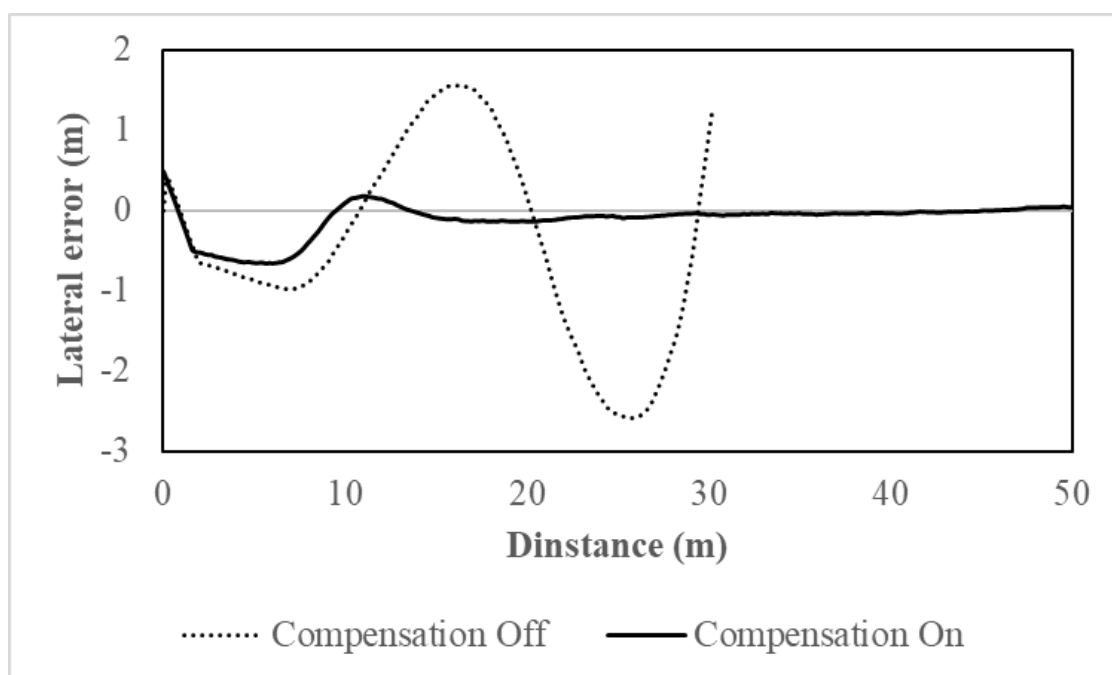


図 2-21 オフセットを与えた経路における 6.5 km/h, 遅延時間 3 秒の横方向偏差

2.3.2 マシンビジョンを用いた走行制御系への影響

マシンビジョンを用いた走路認識による操舵制御を行い、遅延時間補償の有無で比較した。横方向偏差の結果を図 2-22、図 2-23 に、まとめを表 2-4、表 2-5 にそれぞれ示した。結果として、横方向偏差の RMSE が、遅延時間の補償を行うことによって最大 76%減少し、実際にネットワークを介した操舵制御において走行精度の改善が確認された。また、横方向偏差の最大値も減少した。マシンビジョンによる走行では、元来蛇行するような操舵を行うことが多く、フィードバック制御における、比例ゲインが大きいような走行になってしまうため、遅延時間の有無が走行精度の影響として顕著に表れたと考えられる。そのため、操舵量を抑えるような補償を行うことによって、結果的に横方向偏差が大幅に減少したと考えられる。3.2 km/h においては、その現象が顕著であり、RMSE の減少も同様に大きかった。4.5 km/h では、補償により横方向偏差の RMSE こそ減少したものの、マシンビジョンによる操舵制御自体の誤差が大きくなり、蛇行するような走行が多くなってしまった。補償式に絶対方位を考慮することにより、より正確な遅延補償が可能になると考えられる。

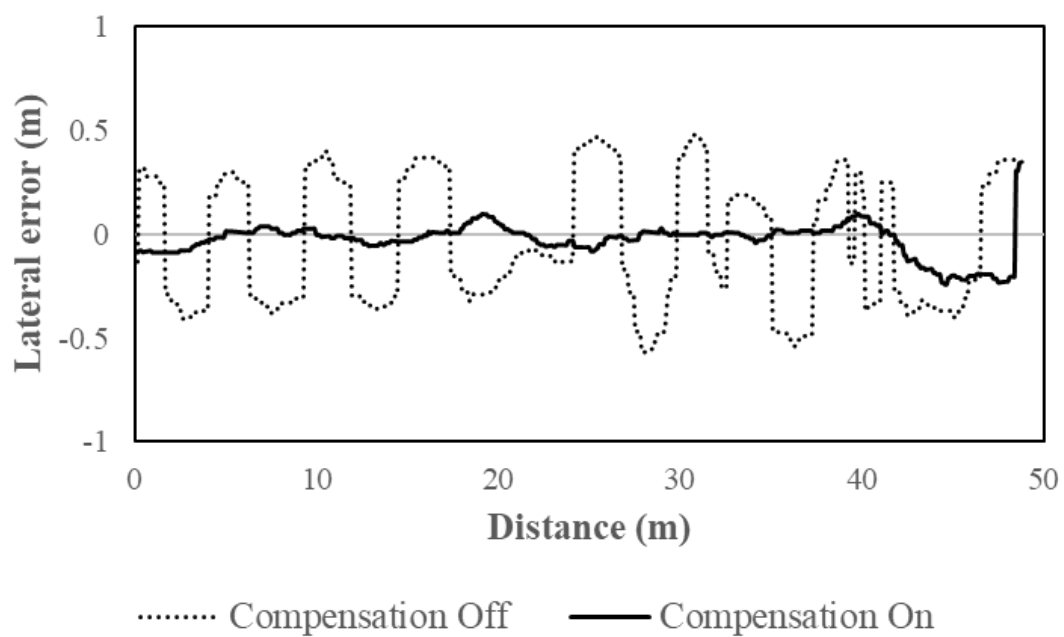


図 2-22 3.2km/h の走行における横方向偏差

表 2-4 3.2km/h の走行における横方向偏差

	RMSE of map to position (m)	Max (m)
Compensation Off	0.33	0.57
Compensation On	0.08	0.35

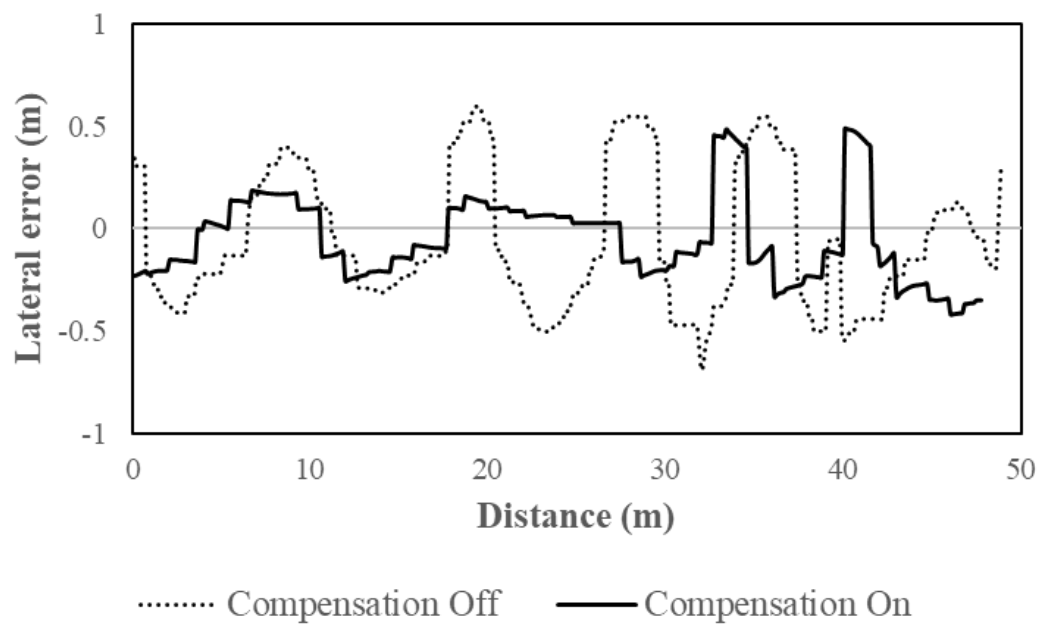


図 2-23 3.2km/h の走行における横方向偏差

表 2-5 4.7km/h の走行における横方向偏差

	RMSE of map to position (m)	Max (m)
Compensation Off	0.35	0.69
Compensation On	0.22	0.49

2.4 結論

本研究では、サイバーフィジカルシステムをロボットトラクタの走行制御系に導入することを目指した。フィジカル空間とサイバー空間のデータ伝送において遅延時間が生じるが、その遅延に生じる横方向距離を運動モデルに基づいた補償式を使うことによって推定し、その移動距離分を補償する方法を考案した。本研究で使われた、遅延時間補償手法を用いることで、遅延時間が生じない場合の横方向偏差に近い値を算出できることが示された。今回の設定条件で最も悪い条件である、遅延時間 3 秒、8.8km/h の条件下においても、遅延時間が発生しない場合の横方向偏差と比較して、RMSE として 0.04(m)以内の精度を確保できることが確認された。そして、マシンビジョンを用いた実験において、遅延時間を補償した操舵制御を行うことにより、走行精度が最大 76%改善したことが示され、ネットワークを介した操舵制御における遅延補償の有効性が示された。しかし、今回は遅延時間が一定間隔であり、既知であるという条件を用いて、補償を行った。そのため、実用に際して突発的な遅延やばらつきが生じる場合、考慮されていない遅延時間の増加によって、ロバスト性を確保できない可能性がある(Liu & Goldsmith, 2001)。そのため、動画の圧縮に生じるに遅延時間の計測や、データの送受信に伴うタイムスタンプの取得など、遅延時間に関わる項目を逐次計測し、最適なフィードバックを行えるようなシステムの構築が重要となる。

第3章 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

3.1 背景

サイバーフィジカルシステムを活用したレベル 3 の自動走行では多くの機能がロボット本体以外にも拡張されることが想定される。特に、高負荷な計算を行う機能に関して、常に可用性を確保し続けることは、トラクタの過酷な環境から難しい。多くのロボットトラクタにおいて、トラクタは障害物を検知し、自動で停止するという安全センサが取り付けられており、それにより自動走行中の安全を確保する取り組みがされている。このようなセンサとして、レーザースキャナーを使用されるが(Yang & Noguchi, 2014)、対象の障害物に対して、障害物の色や材質など、得られる情報が少ないということ、障害物を検知可能な距離が短いという課題がある。また、LiDAR では、センサコストの高さを制約として述べている。このような背景から、カメラを安全センサとして使用することも多く研究されている。(Yang & Noguchi, 2012)は全方位カメラによってステレオ視をすることで、全周を検知可能な安全センサを開発したが、特殊なカメラを使うことで価格が高価であるという制約を持つことが課題であった。一方で、単眼カメラは一般的にセンサ価格が安価であるが、得られる情報が少ない

ことや、画像処理による計算が高負荷であることが多い。そのため、過酷な環境で動作するロボット農機では、負荷が大きい安全システムの可用性を確保し続けることが困難であるという欠点があった。

この問題の解決の一つの方法として、サイバーフィジカル型のクラウドを用いた安全システムによる手法が考えられる。そもそも、レベル3のロボット農機においては、遠隔監視が必須となっており、ロボット農機に取り付けられたカメラによる映像が、常に集約的に送られていることが想定される。遠隔監視を行っているロボット監視室はクリーンな環境であるため、高性能サーバのようなPCを常時使用することが可能であり、ロボット農機では多く生じていた制約を克服できる。この映像およびPCを用いて画像処理を行うことで、遠隔監視としての役割を超えて、安全センサとして活用することが可能である。しかし、こうしたクラウド型のシステムでは、ロボット農機とロボット監視室を繋ぐための通信が重要となる。具体的には、ロボット農機が映像をロボット監視室へ送り、この映像を監視室の高性能デバイスにより画像処理を行い、再びロボット農機へフィードバックするといった具合であるが、この往復の通信には、通信や画像処理による遅延時間の合計値である Round Trip Time(RTT)が生じている。クラウド型の安全システムでは、RTTが事実上のセンサ遅れとなる。今回のようなロボット農機の停止を行うための安全システムでは、遅延が

無い場合の停止距離に加えて、ロボット農機の実速に RTT を乗じた停止距離の増加が見込まれる。ロボットトラクタのような車両重量が高いロボット農機は減速に時間がかかるため、障害物との衝突なく限られた距離の間で安全に停止を行うことは重要な課題である(Oksanen, 2015)。

本研究では、クラウド基盤を活用した安全システムの確立に向け、開発したシステムの安全性の計測を行った。また、更なる安全性向上のため、開発したシステムにおいて大容量通信であるローカル 5G を活用し、その影響を併せて計測した。ローカル 5G の農業におけるユースケースは広く考えられており、従来ではなし得なかった低遅延コミュニケーションによってロボット農機とクラウド基盤が通信可能なことで、ロボット農機単体では不可能であった機能の拡張が可能である。

3.2 機材と方法

3.2.1 供試機材

本研究で使用されたシステムおよび供試機材について説明する。システムはロボット農機側とロボット監視室側に分けられる。ロボット農機側には、供試ロボット農機(MR1000A, クボタ, 日本)があり、あらかじめ設定した作業計画を読み込むことで、自動走行や作業が可能である。自動走行を実現するため

に、PC(Intel® Core™ i3-6100U, 16GB RAM, Windows10 64 bit OS)が 1 台、航法センサとして RTK-GNSS(TrimbleAlloy,Trimble, USA)および IMU(VN-100,VectorNav, USA)が取り付けられている。本研究で使用した安全センサとしては、RGB カメラ(PIXPRO360 4KVR,Kodak, USA)およびカメラ映像をロボット管制室へリアルタイムに送信するための PC(Intel Corei5, 8GB RAM, Windows10 64bit OS)が取り付けられている。ロボット監視室側では、映像を受信し、画像処理を行うための PC(Intel® Xeon E3-1535 M V6, 16GB RAM, Windows10 64 bit OS)を設置している。この PC には NVIDIA Quadro P4000 が内蔵されたグラフィックボードが取り付けられており、高速な画像処理が可能である。

3.2.2 システム概要

システムの構成は図 3-1 のようになっている。ロボット農機側に取り付けられた PC は、USB によって接続されているカメラの映像を読み込み、逐次遠隔に存在する管制室へ送信する。ロボット農機と監視室は、LTE によるインターネットを介した通信およびローカル 5G によるネットワークによって通信を行っている。LTE によるインターネットを介した通信およびローカル 5G によるネットワーク通信は、それぞれ WebRTC によって、低遅延な動画コミュニケーション

ョンを実現している。具体的な遅延時間については、4章で後述する。動画品質について、解像度は1280×720ピクセルのHD画質、フレームレートは30Hzでの取得をしている。また、動画のコーデックは圧縮率の高いVP9を用いている。また、ロボット監視室では、ロボット農機から送られてきた映像を解答し、ディスプレイに表示する。オペレータがその映像を確認することで遠隔監視を可能としている。加えて、映像を受け取るサーバでは、画像処理のプログラムをホスティングしており、遠隔監視として送られてくる映像から、映像中に存在する障害物を検知することが可能である。画像処理の使用ライブラリは、YOLOv5sを用いている。また、映像中に存在する障害物のバウンディングボックス底部から障害物と自車位置間の距離を同時に計算している。この距離とロボット農機の走行経路から算出された関心領域を考慮して、安全ステータスを4段階に決定している。0は障害物無し、1は障害物があるが安全、2は障害物を検知し注意が必要、3は障害物との接触可能性が高く危険となっている。ステータスが2以上になった際は、監視室のモニター近傍に存在する赤色灯を光らせ、監視者に注意を促す。ステータスが3になった際は、赤色灯の点滅とアラート音を発生させ、監視者に警告を出し、安全を確認した後に、自動走行の再開を促す。また、監視室のサーバで計算された安全ステータスと障害物までの距離をロボット農機へとフィードバックし、ロボット農機は所定のア

クションを実行する。安全ステータスによるロボット農機のアクションは任意に決定できるが、本研究では、ステータス3になった際にトラクタのシャトルをニュートラルとし、ロボット農機を停止させる設定を行った。

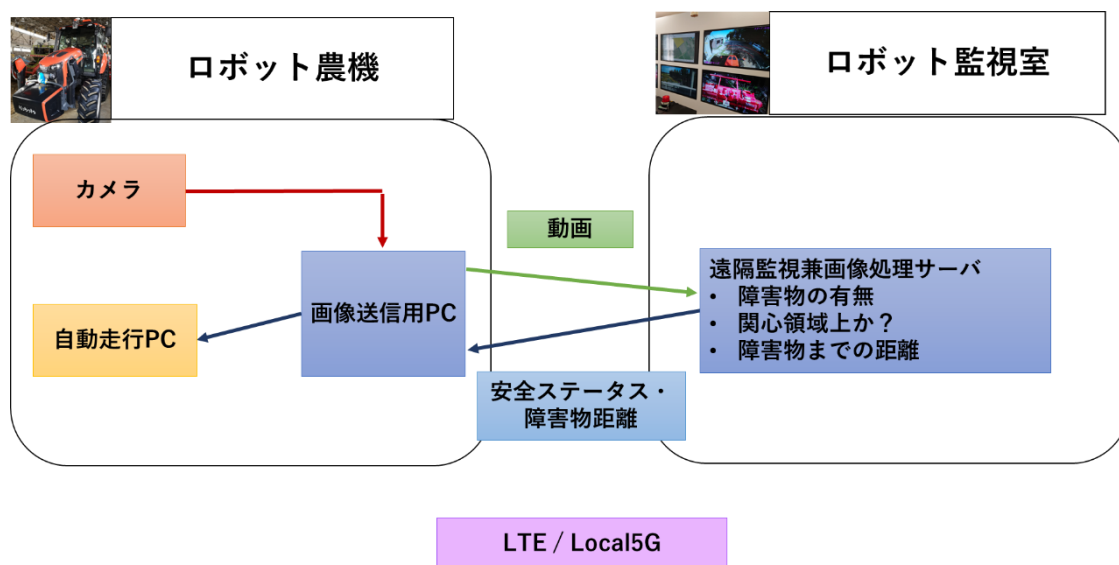


図 3-1 クラウド基盤を活用した安全システム

3.2.3 実験方法

ロボット農機の走行経路上に障害物を設置し、ロボット農機の安全ステータスが3になる点をあらかじめ計測した。この点から実際にロボット農機が停止するまでの距離を計測した。最初にロボット農機と管制室間の通信に使用しているネットワークをLTEとし、安全システムに生じている停止距離を測定した。

次に，安全システムにおけるロボット農機と監視室の通信をローカル 5G に変更し，同様に停止距離を測定した。各条件について，停止距離をそれぞれ 3 回計測した。

3.3 結果と考察

表 3-1 に結果を示す。実速度は全て 8.8km であった。

表 3-1 停止距離実験結果

ネットワーク種類	試行回数	停止距離 (m)
LTE	1	10.0
LTE	2	10.2
LTE	3	10.3
ローカル 5G	1	6.8
ローカル 5G	2	7.6
ローカル 5G	3	7.8
LTE	平均	10.2
ローカル 5G	平均	7.4

LTE とローカル 5G を用いたそれぞれの停止距離が計測された。LTE による停止距離の平均が 10.2m, ローカル 5G による停止距離の平均が 7.4m であったことから、ローカル 5G を用いることで約 27%の停止距離の減少効果が確認された。また、停止距離の平均の差が 2.8m であり、実速度が 8.8km/h であることを考慮すると、ローカル 5G を用いることで、約 1.2 秒の RTT の減少が確認された。本実験では、ある一定時間におけるデータを計測した。LTE のようなパブリックなネットワークは時変であるため、RTT のような遅延時間に加えて、輻輳や再ルーティングによって、可変遅延であるジッタが著しく増加することもあると考えられる。実用化に向けた課題として、安全センサのような遅延に敏感な通信では、突発的な遅延時間の増加によって大きな危険を伴うことは明らかである。本研究で行ったように、ローカル 5G のようにプライベートネットワークでは、プライベートネットワークよりも安定した環境となることが予想されるため、遅延に敏感な通信はローカル 5G のような安定したネットワークを使用することなど、ロボットが行うタスク、許容可能な遅延時間、データ量から使用する無線周波数を考慮する必要がある。また、突発的な遅延時間の増加が生じた際に、ロボット側で通信が途切れたことを検知し、停止をロボット側でも担保するなど、物理領域とデジタル領域の双方から、安全に対してアプローチを行うことが重要となるだろう。

3.4 結論

本研究では、制約の多いロボット農機という環境を克服するため、遠隔監視として用いられているリアルタイムな映像を活用した安全センサの開発を行った。そして、制動距離を計測し、システムの安全性を確認した。また、このシステムを超低遅延なネットワーク基盤であるローカル 5G を使用してシステムの性能を確認した。走行速度は 8.8km/h であり、LTE では平均の停止距離が 10.2m, ローカル 5G による停止距離の平均が 7.4m であるため、ローカル 5G を用いることで、停止距離は 27%の減少を示した。

第4章 ロボットトラクタにおける遠隔操作

4.1 背景

第2章および第3章で先述した通り、レベル3の自動化に向けて、サイバーフィジカルシステムを活用した自動走行の枠組みへと、システムを拡張することが想定される。レベル3の自動化では、ロボット農機が作業する圃場の近くに農機のオペレータが存在する確証はない。しかし、農業環境は時変で複雑な環境であり(Bechar & Vigneault, 2016)、予測不可能なトラブルが生じることは想像に難くない。また、第2章で述べたようにロボット農機に内蔵された安全センサで「停止」ということが可能である一方、その障害物を「回避」することは、精細な環境情報のセンシングおよび複雑な意思決定が求められる困難なタスクである。こうした不測の状況に対して、ロボットの意思決定だけで常にタスクの解決を図ることは非常に難しい。こうした状況において、作業が止まることで作業効率の低下が考えられる。しかし、困難タスクを人が解決するために、停止したロボット農機をオペレータが操作することは効率的ではない。これらを踏まえると、圃場近くにオペレータが存在しないレベル3の自動化では、離れた場所に存在するロボット農機に対して、人の意思決定を介入する手段を持つ Human-in-the-Loop なシステムを構築することが効果的であると考え

られる。(Bechar & Vigneault, 2017)は複雑な農業環境において、人の意思決定をロボットに介入することができる Human-robot-System(HRS)がより重要になると述べている。人の複雑な意思決定に関する認知力は自律的なロボットよりも優れていることが多いため(Benos et al., 2020), オペレータによる複雑な意思決定を要するタイミングのみ遠隔操作による運転を行い、反復で比較的複雑ではないシンプルなタスクをロボットが自律的に行うことで、効率的な Human robot interaction を達成することが可能となる。また, (Marinoudi et al., 2019)は農業におけるロボット導入において、あるタスクを仮定し、ロボットによる実行が容易であるのが 80%, 残りの 20%が人間の意思決定を必要とするような困難であると、パレートの法則に基づいて述べている。これらからも、ロボットが人間の意思決定を介入する手段を持つことは、ロボットによる農業のオートメーションが進む上でより重要な意味を持つことになるだろう。

これらの観点から、本研究では自動走行機能を有するロボットトラクタに加えて、遠隔地に存在するロボット農機を直接遠隔操作可能な機能を開発した。また、自動走行と遠隔操作を任意のタイミングで切り替えることを可能とした。そして、農業におけるタスクを、遠隔操作によって達成できるかを確認した。

遠隔操作技術を活用した農業ロボットの研究は、エンドエフェクタにおいては広く行われている(Adamides et al., 2017)が、無人車両としての遠隔操作の研究はあまり行われていない。いくつかの先行研究を紹介すると、(Murakami et al., 2008)らは、遠隔監視下における農用ロボットのテレオペレーションの先駆けとなっている。この研究では広域 IP 通信を用いて、1km 離れたオペレータとロボット化されたマニユアスプレッダーの通信を行った。ロボットに搭載されたカメラから送られる画像を基に、オペレータがジョイスティックによって操作することで直接遠隔操作を実現している。しかし、広域 IP 通信による帯域幅は現代の通信インフラよりも非常に狭く、研究で使用したシステムにおける画像のフレームレートは 0.2~0.5Hz ほどであった。また、遅延や遠隔操作に関して厳密に論じられていないが、直接遠隔操作による 180°旋回では、遅延によって正確な制御が困難であったと述べている。(Lohan et al., 2022)は、歩行型の牽引パディプランターを遠隔操作することによって、オペレータの農薬被爆、振動や高温といった過酷な環境からの解放がメリットとしてあることを述べ、オペレータの疲労感の低減や効率の向上といった効果を示した。しかし、この研究では、ラジオ波によって目視環境下における使用を想定している。(Lu et al., 2023)は、自動走行および遠隔操作を組み合わせたトラクタを開発しており、その組み合わせによる有効性について述べている。文献の中では、自動運転の走

行において状態遷移を提示し、一定条件で自動運転から遠隔操作へ切り替えを行うような、走行権利の遷移フレームワークを構築した。このフレームワークを適用して、コースの外周を走行し、GNSS の信号が失われる区間において状態を遷移させ、トラクタの可用性が向上したことを示した。しかし、Human-in-the-Loop な制御である遠隔操作において、走行の精度は運転者の経験や環境によって大きく異なることが考えられるため、軌跡誤差だけでは単純に比較することが難しいと述べており、遠隔操作に関する課題について議論されていない。これらが農業における遠隔操作に関する主要な研究であるが、地上車両型農業ロボットの遠隔操作に関する、走行を伴ったタスクの難易度にフォーカスしたものは少ない。

一方で、農業以外の分野では UGV の遠隔操作に関する研究が広く行われている。(Moniruzzaman et al., 2022)はモバイルロボットの遠隔操作に関する文献のレビューを行っており、遠隔操作の研究内容を体系的にまとめている。その中で遠隔操作の課題に対する強化手法を 4 つの分類として行っており、1. オペレータの知覚向上、2. インターフェースの改善、3. 制御システムの改善、4. 遅延補償である。文献によると、遠隔操作においては、オペレータは固定されたカメラにおける運転を行わなければならない、その限られた視点と FOV によって、自己中心的な映像となってしまう。簡易なタスクであれば、この問

題はタスクの達成に影響を与えることは少ないが、困難な操作を伴うタスクになれば、悪影響を与えることが示されている。この問題はしばしばソーダストロービジョンと呼ばれる(Nielsen et al., 2007)。それらに加えて、映像の送受信という、制御上のむだ時間となってしまうような遅延時間の存在も重要な課題として認知されている。(Chen et al., 2007)のレビュー論文では、遠隔操作を困難にする複数の要因は、個別に悪影響を与えるのではなく、要因が複合的に絡み合って、遠隔操作をより一層困難にしていると結論付けている。

例えば、曲率を持った経路を走行する際に、オペレータは、カーブ内側にある「tangent point」を注視し、道路の曲率を計算することが示されている(M.F.Land & D.N.Lee, 1994)。しかし、遠隔操作においては、オペレータが操舵を行ったにも関わらず、映像の遅延が存在して、操舵を行った映像を直ぐに見ることができないことや、固定された映像による限られた FOV という制約によって、操舵先の映像をリアルタイムに見ることが出来ず、操舵に対する認知が遅れてしまうことが問題であると考えられる。農業におけるタスクも、操舵を伴う複雑なものが多く、その課題を克服しなければならない困難なものである。

4.2 機材と方法

4.2.1 供試機材

本研究で使用されたシステムおよび供試機材について説明する。システムはロボット農機側とロボット監視室側に分けられる。ロボット農機側には、供試ロボット農機(MR1000A, クボタ, 日本)があり、各種センサを読み込むことで、自動走行や作業が可能である。自動走行を実現するために、PC(Intel® Core™ i3-6100U, 16GB RAM, Windows10 64 bit OS)が1台、航法センサとしてRTK-GNSS(TrimbleAlloy, Trimble, USA)およびIMU(VN-100, VectorNav, USA)が取り付けられている。遠隔操作として使用した供試機材として、カメラ映像をロボット管制室へリアルタイムに送信するための供試PC(Intel Corei9, 32GB RAM, Windows11 64bit OS)が取り付けられている。ロボット農機の遠隔操作の供試PCには、RTX4080 for Laptopが内蔵されたグラフィックボードを取り付けており、各種動画のエンコードなどを高速で行うことが可能である。しかし、本供試PCは消費電力が大きいことや、高温や防塵性能は高くないため、ロボット農機に搭載することは本来適していないが、カメラドライバの関係から上記の供試PCを試験的に採用した。実用化に関しては、低電力で産業機器向けのJetson AGX Orinなどでほぼ同等の性能を維持しつつ代用可能であると考えられる。供試カメラとして、同一モデルの異なる画角の車載カメラを採用した(Tier4 C1 120deg, Tier4, 日本)(Tier4 C1 198deg, Tier4, 日本)。供試カメラ

は解像度として最大 1920×1080 pixel のフル HD, フレームとして最大 30Hz の設定がそれぞれ可能である。供試 PC と供試カメラは, USB3.0 規格によって有線接続されている。また, ロボット管制室側の供試機材として, 映像を受信および遠隔操作を行うためのデスクトップ PC(Intel corei7 1300KF, 16GB RAM, Windows11 64 bit OS)を供試 PC として設置している。この PC には NVIDIA RTX4070 が内蔵されたグラフィックボードが取り付けられており, ロボット農機から送られてくる映像を効率的に解凍することが可能である。遠隔監視室側の供試 PC には, コンシューマゲーム向けハンドルコントローラ(G29, Logitech, Switzerland)が USB2.0 規格にて接続されている。

4.2.2 システム概要

4.2.1 で述べた供試機材を用いたシステム概要について説明する。供試ロボット農機内に設置された供試機材によって自動走行が可能である。そして, 自動走行アプリケーションと本研究で開発した遠隔操作アプリケーションが通信を行うことで, 遠隔操作機能を実現している。ロボット農機側の遠隔操作の供試 PC では, Node.js によるサーバアプリケーションが作動しており, このアプリケーションによって自動走行用供試 PC とデータ通信を行っている。通信プロトコルは, TCP/IP を用いたソケット通信を行っている。また, サーバアプ

리케이션の中には、Web サーバのホスティングも同時に行っている。これにより、ブラウザで Web アプリケーションを動作させている。Web アプリケーションは JavaScript によって記述されており、GoogleChrome 上で動作する。また、Web アプリケーションは、WebSocket を用いることでサーバプログラムと各種遠隔操作に関するデータの通信を実現している。Web アプリケーションでは、USB によって接続されている供試カメラの映像を取得し、そのカメラ映像をストリームとして配信する処理を行い、遠隔監視室用の供試 PC からの接続を待つ。遠隔監視室側では、遠隔操作用供試 PC 上で、同じく JavaScript によって記述された Web アプリケーションを動作させる。監視室側の Web アプリケーションでは、ハンドルコントローラを読み込み、60Hz でコントローラの操作情報を取得する。そして、ロボット農機の供試 PC が接続待ちになったことを確認し、遠接続処理を行うことで、WebRTC によるデータのコミュニケーションを行う。WebRTC では、動画や音声を通信するための MediaStream とそれ以外のデータ通信を行う DataConnection のストリームが存在している。本研究では、MediaStream においてロボット農機からの映像を受け取り、DataConnectin において、遠隔操作側から送信する操作情報およびロボット農機側の現在の車両情報を逐次送信し続けている。ロボット農機は通常自動走行を行うが、遠隔操作側のハンドルコントローラによる、モード切り替えボタンを

押下した際に、モードの変更を行い、自動走行と遠隔操作を切り替える。モードの切り替えは任意のタイミングで可能である。遠隔操作モードになった場合、取得しているハンドルコントローラの情報を車両の操作に変換し、ロボット農機から送られる映像を基に、オペレータは模擬的な運転を行う。ハンドルコントローラの操舵範囲については、操作していない状態を 0degree とし、±90degree の範囲を用いて、その値を直接ロボット農機の操舵角へと変換する。遠隔操作のようなリーダー/フォロワーなシステムにおいて、操作を行うリーダー側と、リーダーの動作に従うフォロワー側の操作間の不一致は遠隔操作のタスク難易度の増加を示す事が多いため、ロボット農機の操舵角 とオペレータのハンドルコントローラの範囲を一致させることで、この影響を緩和することを目的とした。

4.2.3 遠隔操作における動画の遅延測定

本試験は、遠隔操作における映像の遅延を測定することが目的である。図 4-1 のようなディスプレイの配置を考えると、遠隔操作の区間ごとに生じている遅延を計測することが可能となる。1msec 単位で動作が可能なストップウォッチ①を PC に表示し、それを Web カメラによって撮影した際の映像②を同時に写し出す。①-②の区間では、カメラに生じている固有の遅延とその映像をディ

スプレイに表示する遅延が判明する。本実験では、供試カメラとして、あらかじめ低遅延なものを選定したため、先述した供試カメラのみを用いるが、カメラを変更することにより、この区間の遅延は大きく変動する。また、同一カメラを使用するため、理論上はこの区間の遅延時間は変動しないことが考えられるが、PCのリソースなどによってこの区間の遅延が同一環境でも変動してしまう可能性を考慮し、この区間における遅延の計測を行う。次に、映像を読み込んだPCから、WebRTCを用いて受信用のPCに動画を送信し、受信用のPCでも同様にストップウォッチ③を表示する。このストップウォッチの秒数の差である②-③では、ネットワーク間を伝播する遅延および動画の圧縮・解凍に関する遅延が含まれる。本実験では、動画のコーデックは一律としてAV1を採用した。AV1はフリーライセンスの最新の動画規格であり、高い圧縮率を実現している。供試PCはそれぞれGPUによるAV1のエンコード、デコードのハードウェアアクセラレータを有している。供試PCがハードウェアアクセラレータを有していない場合、ソフトウェアエンコード・デコードとなってしまう、CPUによる計算が行われ、遅延時間の増加となることが考えられる。また、ネットワーク経路による機器のバッファ遅延なども遅延の増加となることが考えられる。そのため、少ないホップ数で映像を送受信する事が可能であれば、この区間の遅延時間は少なくなることが見込まれる。そして、動画を送受

信するための、ネットワーク帯域が不足している場合、遅延時間は増加することが考えられる。①-③の区間では、本遠隔操作システムに生じているトータルの遅延となり、オペレータは、この時間分遅延した映像を見ながら運転を行うこととなる。本実験では、映像の遅延がどの区間で生じているかを明らかにするため、区間毎に分割したディスプレイによって遅延時間を計測した。ディスプレイは全て 240Hz の表示が可能であり、PC とディスプレイ間はディスプレイポートによって接続した。全体を映す動画は、供試スマートフォン(Pixel7 Pro, Google, USA)による 240fps のスロー撮影を行った。ネットワークとして、LTE とローカル 5G を比較することで、遅延時間の変動を確認した。

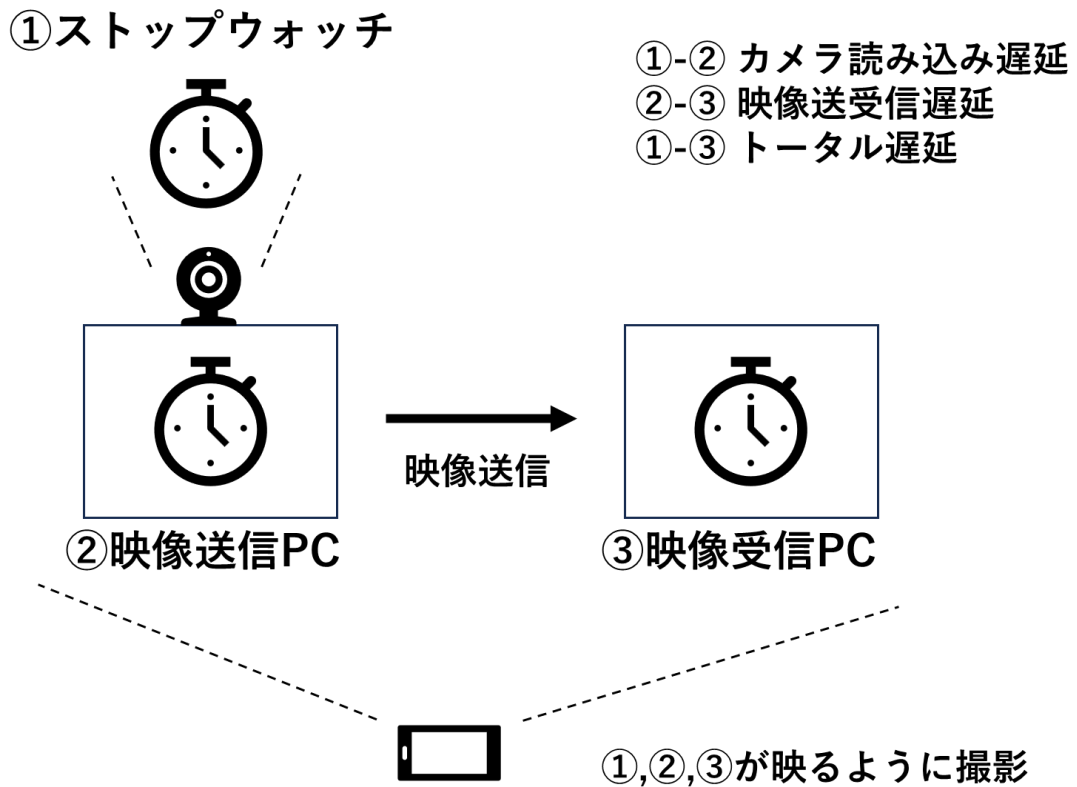


図 4-1 実験のディスプレイ構成

4.2.4 遠隔操作による走行試験

この試験は『レベル 3』の自動化を想定した，遠隔操作による走行を行う。遠隔操作によるロボット農機について定量的なデータを計測するため，圃場間移動のタスクを模した運転を行い，その安定性を評価するものである。走行試験の場所として，北海道大学農場内における農道での走行を行う。遠隔操作では，オペレータは目標経路となる道が不明であることから，農道において白線

を引き、その上を RTK-GNSS における測量を行うことで、評価に必要な目標経路を、人が目視で判断できるように作成した。走行試験において、走行開始の点は、農道中央から進行方向に対して 1m 左にずれた点からスタート行う。

10m 走行した後に、進行方向に対し右へ 1m 分目標経路をオフセットし、農道の中央を直線状に走行するように設定する。遠隔操作において、操舵の必要性が生じる経路の横方向偏差を計測し、遠隔操作における安定性を評価する。横方向偏差の算出は(N. Noguchi et al., 2002)に則り定義した。また、遠隔操作におけるネットワークを LTE とローカル 5G をそれぞれ使用し、ネットワークによる遅延の影響を考慮する。また、異なる画角による運転特性の影響を合わせて評価する。

4.3 結果と考察

4.3.1 遠隔操作における動画の遅延測定

4.2.3 で述べた通り、供試機材を用いて、動画の送信を行い、区間毎の遅延時間を計測した。遅延時間の計測は、供試スマートフォンによって 240fps でのスロー撮影された動画を用いた。スロー撮影された動画を VLC メディアプレイヤーのコマ送り機能を用い、目視で遅延時間を計測した。10 秒間撮影された動画

中において、1sにつき10フレーム抜粋し、合計100フレーム分カウントすることで、遅延時間を計測する区間が固まらないように考慮した。図4-2はL5Gによる送受信を行った際の1フレームであり、ストップウォッチから遠隔操作側までのトータル遅延において、99msecを実現していることが確認された。また、LTEおよびローカル5Gを用いて計測された遅延時間の総合的なデータを図4-3および表4-1に示す。留意しなければならない点として、4.2.3でも述べた通り、①-②区間における遅延時間は、同一供試機材を使用していることおよび通信を介する前の区間であるため、本来LTEおよびローカル5Gで同一でなければならないが、本実験では差異が生じてしまった。表4-1から、LTEにおける①-②の平均遅延時間が154ms、ローカル5Gにおける①-②区間の平均遅延時間が86msであるため、LTEにおける遅延時間から68ms分の遅延時間を差し引くことで、本実験では正しい評価となることが見込まれる。実際に、①-③区間の遅延時間は、LTEでは311msであり、これを①-②間の補正を行った場合でも、LTEの平均遅延時間は243msとなっている。一方、ローカル5Gでの平均遅延時間137msとなっている。ローカル5Gを活用することで、少なくとも平均106msの遅延時間の減少効果が示された。また、最大遅延時間はより顕著である。LTEの①-③の区間における最大遅延時間は558msとなっており、①-②区間の補正を行った場合でも、およそ490msとなっている。一方で、ローカ

ル 5G における①-③区間の最大遅延時間は 175ms となっており、両者には平均遅延時間よりも大きな差異が生じている。これは、LTE が輻輳の影響を受けやすいことなどから、帯域を安定して確保できないため、遅延時間増加してしまったことが考えられる。図 4-3 の箱ひげ図からも、ローカル 5G は遅延時間の変動幅が少ないことが確認できるが、LTE では②-③および①-③の区間における遅延時間の変動幅が非常に大きいことが確認できる。遠隔操作において、遅延時間の増加はタスクに影響を与えることが一般的に言われているが。可変遅延時間であるジッタの存在は、遠隔操作におけるタスクの難易度を著しく悪化させる要因として指摘されている(Chen et al., 2007)。

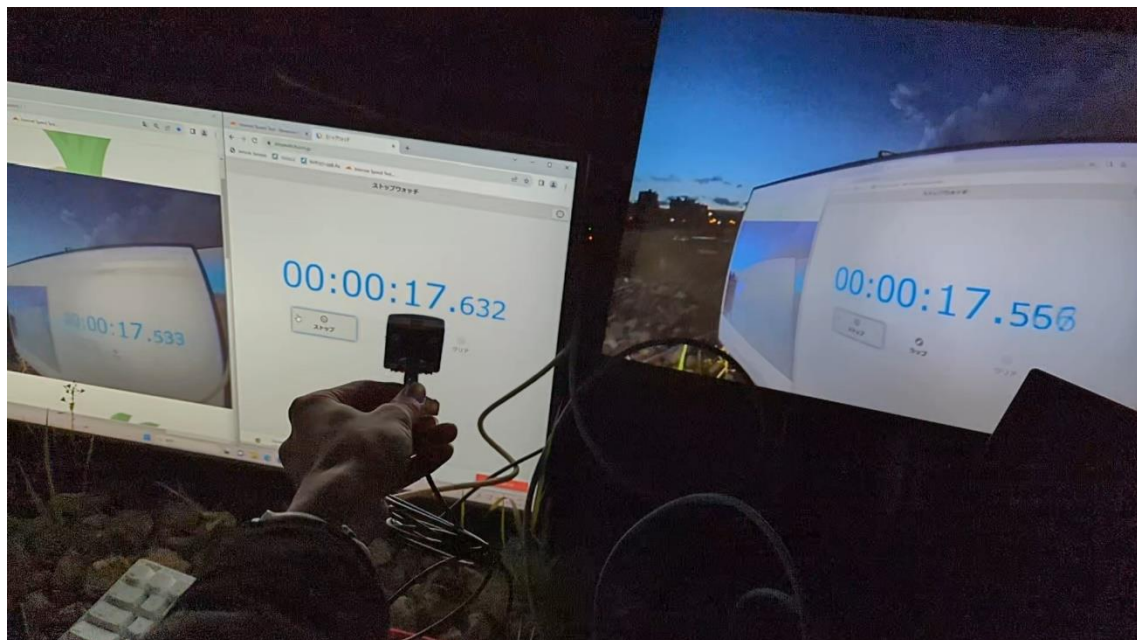


図 4-2 遅延時間 99ms の動画送信

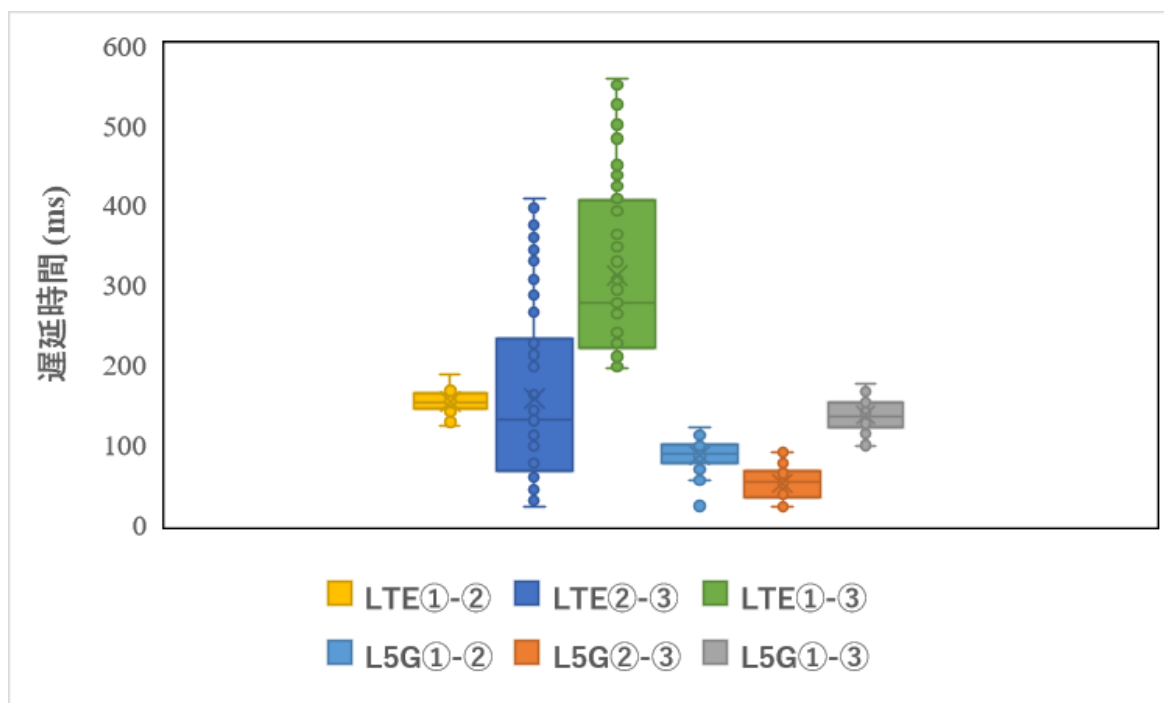


図 4-3 動画遅延時間

	①-②(平均)	②-③(平均)	①-③(平均)	①-②(最大)	②-③(最大)	①-③(最大)
LTE	154	158	311	187	408	558
L5G	86	51	137	122	91	175

表 4-1 区間毎の遅延時間の平均値・最大値(単位 ms)

4.3.2 遠隔操作による走行試験

遠隔操作による走行試験を行った。被験者は2名とし、速度は3.6km/hとした。カメラ画角を190 degree と128 degree とし、通信をLTE とL5Gによる変更を行った。以下に示すのは、10 m 走行した後に、進行方向に対して右へ1m分目標経路をオフセットし、農道の中央を直線状に走行したものである。オフセットを行った後、最初に横方向偏差が0.10mを下回った時点からデータの計測を行い、50m 走行させた値である。図 4-4,4-5,4-6,4-7 にて、横方向偏差のグラフを示す。また、計測された横方向の RMSE および MAE を算出し、表 4-2,4-3,4-4,4-5 にそれぞれ記載した。

図 4-4 被験者 1 の広角カメラによる遠隔操作における横方向偏差

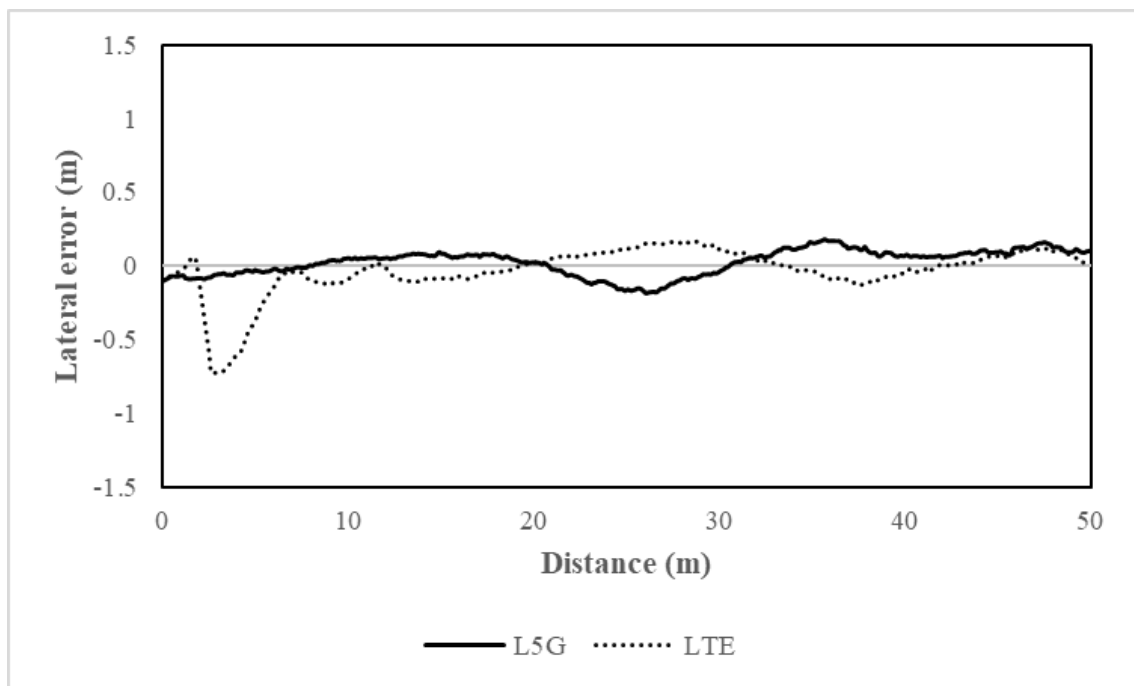


表 4-2 被験者 1 による広角カメラの横方向偏差

	RMSE (m)	MAE (m)
LTE	0.17	0.11
L5G	0.09	0.08

図 4-5 被験者 2 における広角カメラによる遠隔操作における横方向偏差

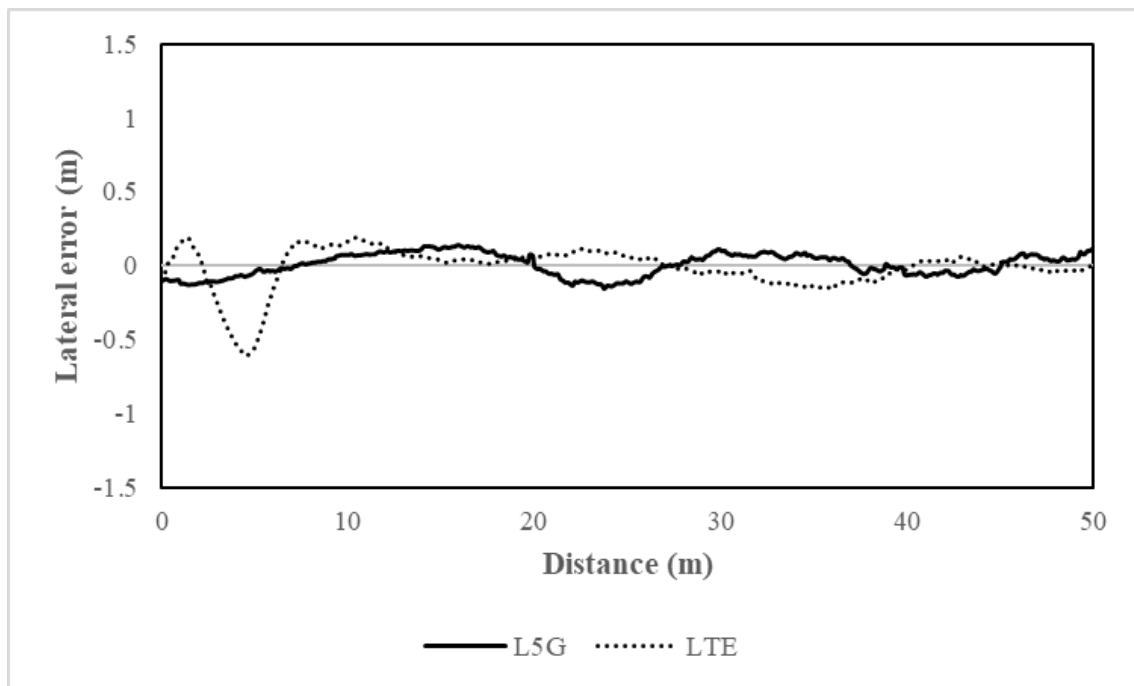


表 4-3 被験者 2 による広角カメラの横方向偏差

	RMSE (m)	MAE (m)
LTE	0.14	0.10
L5G	0.08	0.07

図 4-6 被験者 1 の超広角カメラによる遠隔操作における横方向偏差

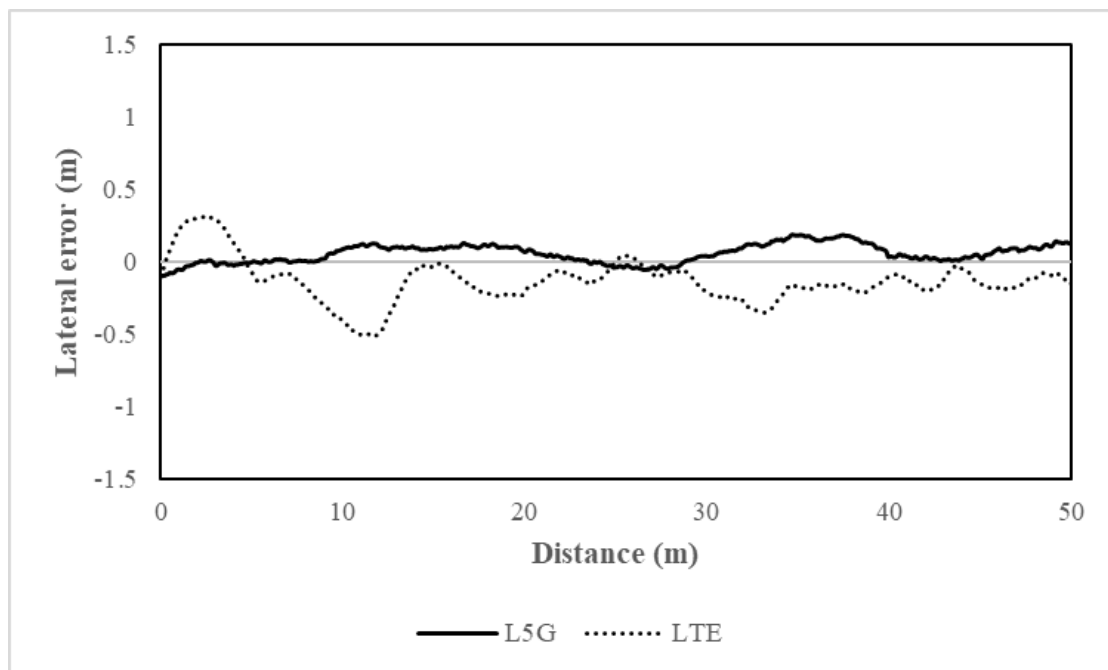


表 4-4 被験者 1 による超広角カメラの横方向偏差

	RMSE (m)	MAE (m)
LTE	0.20	0.17
L5G	0.09	0.07

図 4-7 被験者 2 の超広角カメラによる遠隔操作における横方向偏差

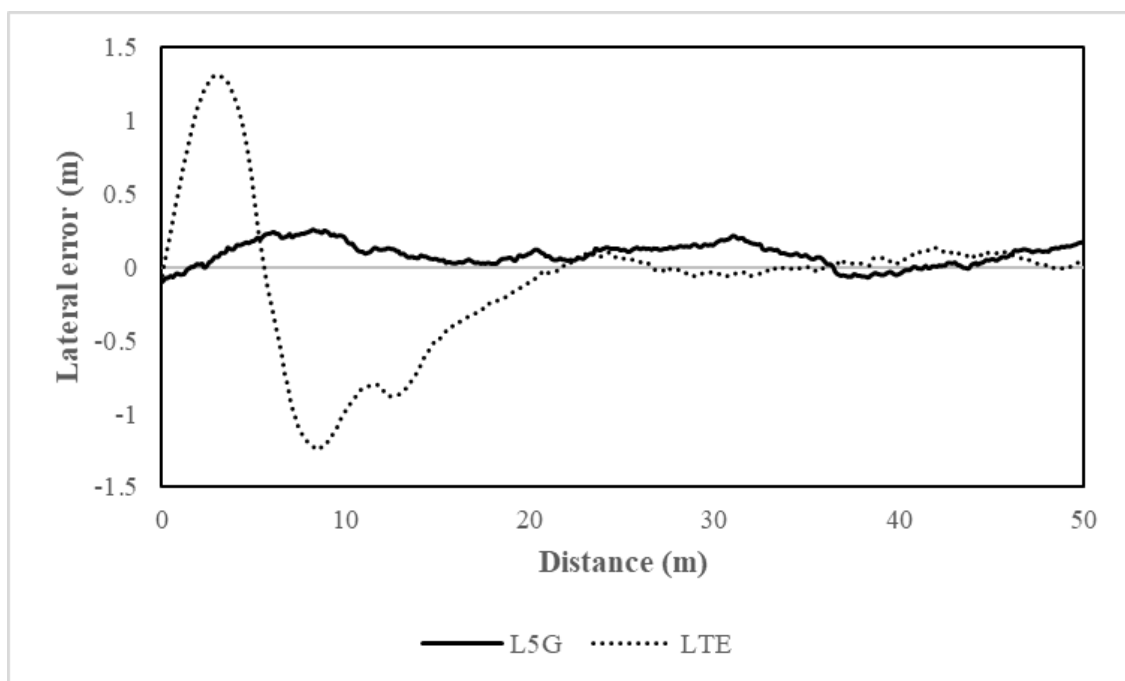


表 4-5 被験者 2 による超広角カメラを用いた横方向偏差

	RMSE (m)	MAE (m)
LTE	0.51	0.32
L5G	0.12	0.10

すべての条件において、LTE からローカル 5G にすることで、横方向への RMSE および MAE は改善が確認された。被験者 1 では最大 55%，被験者 2 では最大 76%の RMSE の改善がされた。これは、遠隔車両の操作というタスクにおいて、遅延時間やジッタ遅延が操作精度に悪影響を与えることを示している。また、LTE における横方向誤差の波形において、マイナスの範囲における誤差の最大値の出現地点が画角によって異なっている。一方、ローカル 5G では、そもそも誤差が少なく、大きな違いは確認されなかった。本実験のような操舵を伴う横方向への移動を含めた運転タスクにおいて、カメラの歪みと遅延の影響が合わさることによって、オペレータの認知が変わり、運転特性が変わってしまうことが考えられる。遠隔操作における運転を困難にする要因は、個別に影響を与えるのではなく、相互に影響し合う可能性が示唆されており (Chen et al., 2007)，本研究でもその可能性が示唆されている。加えて，本研究の限界として，被験者の数が 2 名であることが考えられる。被験者の数を増やし，外れ値の影響を少なくし，より詳細な議論を行っていくことがより必要である。

4.4 結論

本研究では、人の高度な意思決定をロボット農機に介入するための手段として、遠隔操作機能を開発し、自動走行が可能なロボット農機に組み合わせた。遠隔操作システムの動画に生じている遅延時間を測定し、オペレータがどの程度の遅延を感じながら運転しているかを明らかにした。また、システムを最適化し、ローカル 5G を活用することにより、最小 99 ms の低遅延による動画の送受信が可能であることが確認された。また、ローカル 5G では、LTE と比較した際に、動画の送受信に伴った遅延時間が大幅に短いことに加えて、遅延時間の変動が非常に小さいことが確認された。そして、ロボット農機の遠隔操作における運転の精度を、諸条件を変えることで比較した。結論としてネットワークの違いによって進行方向に対する横方向誤差は最大 76%改善されたことが確認された。

第5章 結論

『レベル 3』の自動化レベルを見据えた，ロボット農機の拡張を目指した研究を行った。クラウド基盤を活用し，画像処理のような負荷の大きい計算を，ロボット農機ではなく，クラウド基盤上の高性能サーバによって担うことで，可用性の向上およびロボット農機内の過酷な環境という制約の克服を目指した。また，ロボット農機とサーバ間の通信に生じる遅延を車両モデルにより補償することで，クラウド基盤を用いた画像処理による操舵の制御系を改善し，クラウド基盤上における遠隔からの自動走行の可能性が示された。

また，クラウド基盤を用いた安全システムについての検討を行った。安全システムにおける計算も，操舵制御と同様に高負荷な計算を行うもので，ロボット農機側で計算を完結することは困難であったが，これをクラウド基盤によるシステムへと移行することで，この問題を解決した。しかし，通信を伴う安全システムでは，通信の遅延が停止距離の増加となってしまう。クラウド基盤上での安全システムによる停止距離を測定し，その安全性を確認した。そして，従来用いていた LTE だけでなく，ローカル 5G を用いたシステムの停止距離を確認した。結果として，ローカル 5G を用いることで，停止距離安全性の大幅

な減少が見られ、クラウド基盤を活用した安全システムの実現可能性が示された。

また、『レベル3』の自動化では、人が圃場近くにいないことが想定されるため、人の意思決定を介入させることが難しいという課題があった。この課題の解決のために、人の意思決定を介入させる遠隔操作機能を開発し、自動走行が可能なロボット農機に組み合わせた。遠隔操作における、動画の遅延時間はオペレータの運転間隔を悪化させる大きな要因であることが考えられるため、本研究で用いた遠隔操作システムに生じている遅延時間を計測した。ロボット農機と監視室の通信は、従来まではLTEによって行われていたが、遅延時間が長いことや遅延の変動が生じていることが問題であった。そのため、高速で低遅延なローカル5Gをシステムに適用し、その遅延時間を計測した。LTEおよびローカル5Gを用いた際の遠隔操作システムに生じている遅延時間を計測した。結果として、ローカル5Gによって、遅延時間の減少が確認され、最小99msの動画送信が可能であった。加えて、遅延時間の変動であるジッタも抑制されていたことが確認された。また、実際に遠隔操作をおこなった際の走行精度について評価を行った。遠隔操作でも同様に、LTEとローカル5Gをそれぞれ用いて、運転を行ったところ、全ての走行において、ローカル5Gを用いることで、横方向誤差の改善が改善された。

Acknowledgement

本研究を進めるにあたって、熱心なご指導をいただいた北海道大学大学院農学研究院ビークルロボティクス研究室の野口伸教授，岡本博史准教授，生物生産応用工学研究室内の石井一暢准教授に篤く感謝申し上げます。また，実験に参加し続けた藤井凌修士学生をはじめ，ビークルロボティクス研究室の皆様に感謝申し上げます。

References

- Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
- Abe, N. (2007). Control on Time-delay systems. *The 50th Japan Joint Automatic Control Conference*, 148–151.
- Adamides, G., Katsanos, C., Constantinou, I., Christou, G., Xenos, M., Hadzilacos, T., & Edan, Y. (2017). Design and development of a semi-autonomous agricultural vineyard sprayer: Human–robot interaction aspects. *Journal of Field Robotics*, 34(8), 1407–1426. <https://doi.org/10.1002/rob.21721>
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. In *Biosystems Engineering* (Vol. 149, pp. 94–111). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*, 153, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>

- Benos, L., Bechar, A., & Bochtis, D. (2020). Safety and ergonomics in human-robot interactive agricultural operations. In *Biosystems Engineering* (Vol. 200, pp. 55–72). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.009>
- Chen, J. Y. C., Haas, E. C., & Barnes, M. J. (2007). Human performance issues and user interface design for teleoperated robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 37(6), 1231–1245.
<https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905819>
- Cox, J., & Wong, K. C. (2019). Predictive feedback augmentation for manual control of an unmanned aerial vehicle with latency. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 11. <https://doi.org/10.1177/1756829319869645>
- Dumitrache, I., Caramihai, S. I., Sacala, I. S., & Moisescu, M. A. (2017). A Cyber Physical Systems Approach for Agricultural Enterprise and Sustainable Agriculture. *Proceedings - 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer, CSCS 2017*, 477–484. <https://doi.org/10.1109/CSCS.2017.74>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. In *IEEE*

Access (Vol. 7, pp. 156237–156271). Institute of Electrical and Electronics

Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703>

Ishibashi, R., Yamamoto, H., Kawamura, K., Moriyama, T., Ospina, R., Okamoto, H., &

Noguchi, N. (2021). Experiment of Integrated Technologies in Robotics, Network,

and Computing for Smart Agriculture. *IEICE Transactions on Communications*.

Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K., & Terao, H. (2001). Field Mobile Robot navigated by

RTK-GPS and FOG and FOG (Part 2) : Autonomous operation by applying

navigation map. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 63(5).

https://doi.org/10.11357/jsam1937.63.5_80

Liu, X., & Goldsmith, A. (2001). Effects of Communication Delay on String Stability in

Vehicle Platoons. *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings*, 625–

630.

Lohan, S. K., Narang, M. K., Singh, M., Singh, D., Sidhu, H. S., Singh, S., Dixit, A. K.,

& Karkee, M. (2022). Design and development of remote-control system for two-

wheel paddy transplanter. *Journal of Field Robotics*, 39(3), 177–187.

<https://doi.org/10.1002/rob.22045>

- Lu, W., Li, J., Qin, H., Shu, L., & Song, A. (2023). On Dual-Mode Driving Control Method for a Novel Unmanned Tractor With High Safety and Reliability. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 10(1), 254–271.
<https://doi.org/10.1109/jas.2023.123072>
- Marinoudi, V., Sørensen, C. G., Pearson, S., & Bochtis, D. (2019). Robotics and labour in agriculture. A context consideration. *Biosystems Engineering*, 184, 111–121.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013>
- M.F.Land, & D.N.Lee. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369, 742–744.
- Monden, K., & Nonaka, K. (n.d.). *Path Tracking Control for Non-holonomic Vehicles Using Time-state Control Form Considering Time Delay* (Vol. 48, Issue 1).
- Moniruzzaman, M. D., Rassau, A., Chai, D., & Islam, S. M. S. (2022). Teleoperation methods and enhancement techniques for mobile robots: A comprehensive survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 150.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103973>
- Murakami, N., Ito, A., Will, J. D., Steffen, M., Inoue, K., Kita, K., & Miyaura, S. (2008). Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 63(1), 81–88.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.015>

Murphy, K. N. (1994). ANALYSIS OF ROBOTIC VEHICLE STEERING AND CONTROLLER DELAY. *Fifth International Symposium on Robotics and Manufacturing*.

N. Noguchi, M. Kise, K. IshiiK, & H. Terao. (2002). Field Automation Using Robot Tractor. *Automation Technology for Off-Road Equipment*, 239–245.

Nielsen, C. W., Goodrich, M. A., & Ricks, R. W. (2007). Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5), 927–941. <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.907479>

Oksanen, T. (2015). Laser scanner based collision prevention system for autonomous agricultural tractor. In *Agronomy Research* (Vol. 13, Issue 1).

Sristi.S, Morita.T, Ricardo.O, & Noguchi.N. (2022). A vision-based navigation system for an agricultural autonomous tractor. *7th IFAC Conference Sensing, Control and Automation for Agriculture*.

Wang, T., Chen, B., Zhang, Z., Li, H., & Zhang, M. (2022). Applications of machine vision in agricultural robot navigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107085>

Xia, Y. (2015). Cloud control systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2(2), 134–142. <https://doi.org/10.1109/JAS.2015.7081652>

Yang, L., & Noguchi, N. (2012). Human detection for a robot tractor using omnidirectional stereo vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 89, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.08.011>

Yang, L., & Noguchi, N. (2014). An Active Safety System Using Two Laser Scanners for a Robot Tractor. *IFAC Proceedings Volumes*, 47, 11577–11582.

農林水産省. (2022). 2020年農林業センサス.