

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14551

研究課題名（和文）車輪式農用車両の傾斜地における横滑り発生機構の解明と動的横滑り防止制御

研究課題名（英文）Research on sliding model and anti-sliding control of wheel-type vehicles for agriculture in mountain region

研究代表者

楊 亮亮（YANG, LIANGLIANG）

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：90773739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：日本では中山間傾斜地の割合は非常に高く、日本面積の7割を占める。近年、平地での自動操舵のスマート農業技術は急ピッチに進んでいる。しかし、傾斜地では平地と比べ、精度が落ちる場合がある。耕耘する際に精度が落ちる場合には大きな影響はないが、作物がある中間管理の際には作物に傷を付ける恐れがある。玉ねぎなどの密度が高い作物の場合、傾斜地での走行精度の向上が実現できれば行間間隔を縮小することができ、有効植付株数を増やすこともできるため、経済的な効果が大きいと考えられる。本研究は傾斜地で精度を低下した原因を実験的に分析し、傾斜地での補正制御法を提案した。実験では平地と同じレベルの精度を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では中山間傾斜地の割合は日本面積の7割を占める。現時点の自動操舵技術は傾斜地での作業精度は平地と比べ、低下する場合がある。傾斜地での走行精度の向上が実現できれば行間間隔を縮小することができ、有効植付株数を増やすこともできるため、経済的な効果が大きいと考えられる。本研究は傾斜地で精度を低下した原因を分析し、傾斜地での補正制御法を提案し、実験では平地と同じレベルの精度を実現した。

研究成果の概要（英文）：In Japan, 70% of the area of Japan are in the mountain regions. Smart agricultural technology for automatic steering on flat fields has been rapidly advancing. However, the auto steering accuracy is lower on slope fields than on flat fields. There is no significant effect when the accuracy drops such as for plowing, but there is a risk of damaging the crop during mid-management with there are crops in the fields. In the case of dense crops such as onions, if the running accuracy on slopes can be improved, the space between crop lines can be reduced, and the number of effective planted area can be increased, which is considered to have a great economic effect. In this study, we experimentally analyzed the cause of the decrease of accuracy on slopes and proposed a correction control method to improve the accuracy. In the experiment, the same level of accuracy was achieved as on flat fields.

研究分野：農業工学

キーワード：自動操舵 傾斜地 IMU GNSS

1. 研究開始当初の背景

現在の自動操舵システムは平地での使用を前提として開発した。傾斜地における GPS 受信機アンテナの傾斜を補正するため慣性計測装置(IMU)を使用して行ったが、今までの研究において、傾斜地で必ず発生する横滑りの防止を達成するに至っていない。熟練運転手は運転時に滑り始める前に圃場の状況を予測し、滑る前にハンドルを予め切ることがある。自動操舵システムは横滑り止め制御がないので、傾斜地では精度が大きく劣化する。作物列間の除草、防除、ビート収穫などの高精度作業には使用上問題がある。

2. 研究の目的

傾斜地で自動走行時の精度が低下する原因を明確にする必要がある。二つの原因が考えられる。原因1は、斜面では重力によって斜面下方向に分力が発生し、斜面下方向の車輪の荷重が大きくなる。荷重が大きい方の車輪は走行時の摩擦抵抗も大きくなる。その結果、車体が徐々に斜面下方向にずれる。原因2は車両の後輪を旋回中心と考えると、重力の分力は旋回トルクを発生させ、このトルクの影響で、操舵角度が0度だとしても、車体は斜面下方向に進んでしまう。本研究の目的はこの二つの原因を明確にすると傾斜地で傾斜予防制御手法を実現する。

3. 研究の方法

前節考えられた傾斜地走行精度に影響する原因を明確にするため、平地でトラクタの片側(図1)だけに25kgの砂パックを2個載せたときと10個を載せたときのそれぞれで片側荷重定常円旋回の実験を実施した。原因1の影響が大きいとすれば、旋回の軌跡は円状にならず、荷重が大きい際にずれが大きく生じる。その反面、もし影響が小さいとすれば、旋回の軌跡は無荷重の状態と同じく円状に近くなる。



図1 片側荷重定常円旋回の様子

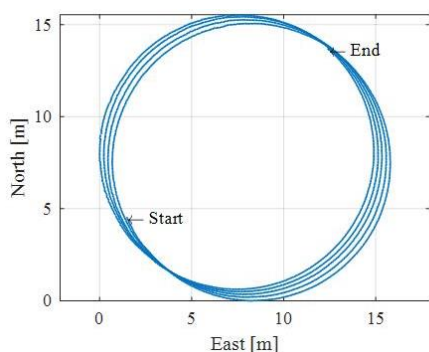


図2 片側荷重 50 kg 定常円旋回の軌跡

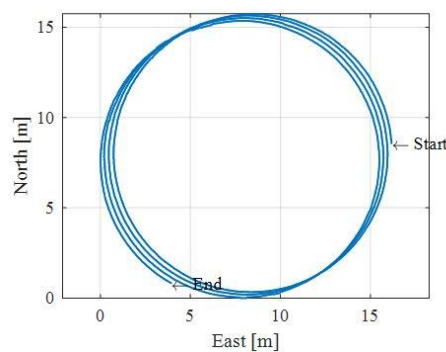


図3 片側荷重 250 kg 定常円旋回の軌跡

図2と図3を比較すると、荷重が小さい状態(50kg)では、走行軌跡は円状に近いように見える。片側の荷重が大きい状態(250kg)でも図2と近い円状の軌跡となっている。この実験結果から、原因1の影響は小さいと考えられる。原因2の影響を調べるため、傾斜地で定常円旋回の走行実験を実施した。図4は実験のイメージ図である。図5は実際の様子である。

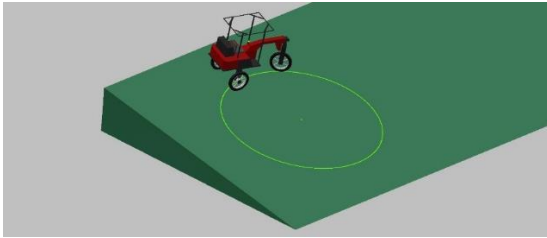


図 4 傾斜地での定常円旋回のイメージ図

図 5 傾斜地定常円旋回の実験の様子

図 6 は走行した軌跡の 2D と 3D 表示図である。図 6 では Start から End まで 3 周旋回をする
と、約 3 メートルのずれが発生したことを確認できた。図 7 を見ると、Start 位置は高いところ
であるため、走行開始後、低い側に徐々にずれが発生したことを確認できた。

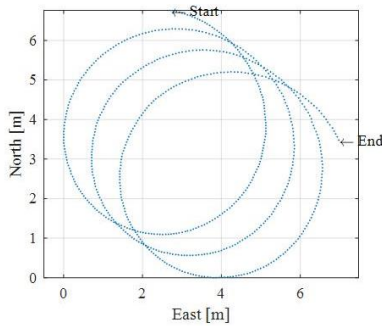


図 6 傾斜地での定常円旋回-2D

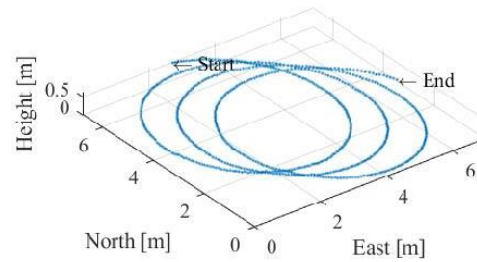


図 7 傾斜地での定常円旋回-3D

傾斜地での走行時に発生するトラクタの横滑りを防ぐため、二つの方法が考えられる。

(1) 車輪タイヤ幅を増やし、重力から発生した旋回トルクと抵抗できる摩擦力を増加させる。
従って、ダブルタイヤやクローラを使用することが有効である。

(2) 操舵車輪を傾斜上方向に向け、エンジンから出力した駆動力を操舵車輪に経由し、重力が
発生した旋回トルクと抵抗できるトルクを強制的に発生させることで、車両方向は走行経路と
並行とはならないが、走行軌跡は走行経路と並行になるように補正する。

この二つの方法を比べると、方法 (1) は特別な制御法がなくても、平地と同じ制御システム
を使える。しかし、ダブルタイヤの増設やクローラの交換などのコストがかかる。従って、本研
究では方法 (2) で挑戦する。制御アルゴリズムは少し複雑になるが、ハードウェアを変更する
必要がないというメリットがある。従来の自動操舵制御システムの操舵角の算出方法は、図 8 に
示すように GNSS 受信機と方位センサからの位置と方位情報を基に目標経路からの横方向誤差
と方位誤差を計算する。PID フィードバック制御法 (式(1)) を行うのが一般的である。

$$\psi = -(k_i \cdot \delta\theta + k_t \cdot d) \quad (1)$$

ただし、 ψ は操舵角、 d は GNSS 受信機測量した現在位置と目標経路間の横方向誤差、 $\delta\theta$ は現在
の車両方向と目標経路間の方位誤差、 k_i と k_t は制御時に使用するゲインである。

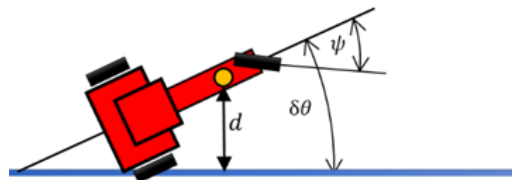


図 8 操舵ステアリング角と目標経路

この制御手法を使用し、平地では図 9 のような高精度自動走行が実現できたが傾斜地では、図
10 のように走行精度が低下する。図 10 から見ると、平均値は-0.024m になり、往復を考えると
0.05m の誤差になることから、傾斜地での横滑りの影響を確認できた。

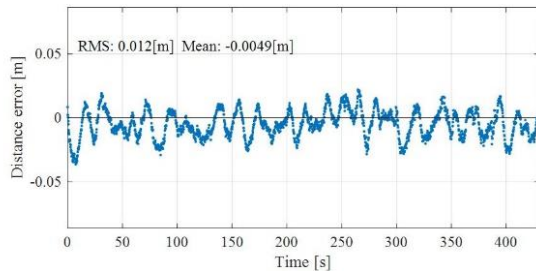


図 9 平地の走行精度

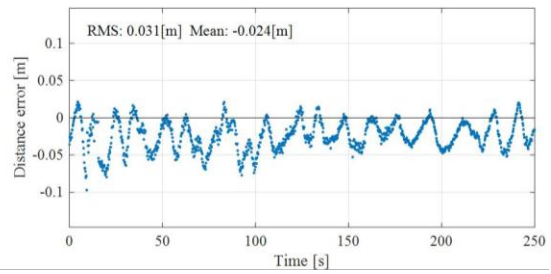


図 10 傾斜地の走行精度

傾斜地の横滑りを補正するため、自動走行時には車両の傾き（IMU で計測したロール角度）に応じて式（2）を使い操舵角度の補正量を調節する方法を提案した。

$$\psi_2 = k_3 \cdot \alpha + k_{4\alpha} \cdot \psi_1, \quad (k_{4\alpha} = 0.9, \text{ if } \alpha \cdot \psi_1 > 0, \text{ else } k_{4\alpha} = 1.1) \quad (2)$$

ただし、 ψ_2 は傾斜補正後の操舵角、 α はロール角度、 ψ_1 は従来型の操舵角算出法（式(1)）で算出された操舵角、 k_3 はロール角度に比例する制御定数（負の値）、 $k_{4\alpha}$ は α と ψ_1 に比例する定数である。ロール角度と操舵角度が同じ符号の場合は操舵角を平地より小さくすることが必要なので、 $k_{4\alpha} < 1$ （例 0.9）と設定する。一方、ロール角度と操舵角度の符号が異なる場合は操舵角を平地より大きくする必要があるので $k_{4\alpha} > 1$ （例 1.1）と設定する。

4. 研究成果

提案した制御手法を検証するため、以下三つの実験を行った。実験 1 はアスファルト舗装した斜面で実施した（図 11）。図 12 に傾斜補正自動走行精度を表示している。この図と平地（図 9）を比較すると、RMS 値と平均値はほぼ同じレベルになっている。傾斜地でも、経路中心からずれることなく自動走行できた。



図 11 傾斜地自動走行様子

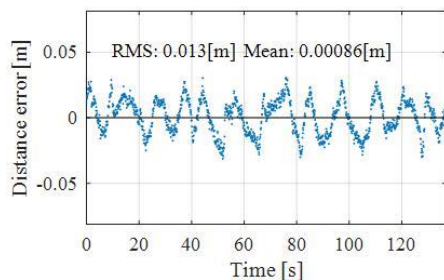


図 12 傾斜地補正自動走行精度

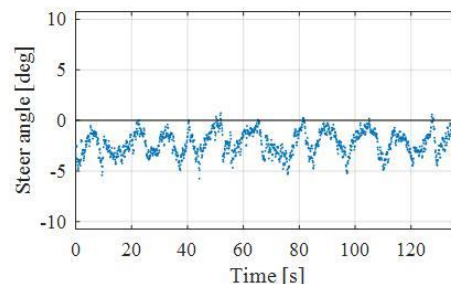


図 13 傾斜地補正自動走行時の操舵角

実験 2 は津別町の玉葱を移植する（図 14）際に実施した。図 15 は玉葱移植時の走行精度を示している。この図から、平均値は-0.0023mとなり、ゼロに近いので、横滑りが発生していないことが確認できた。RMS 値は 0.03m となる。アスファルト舗装路面より誤差が大きくなった原因は柔軟土上で車体の揺れが生じた誤差と考えられる。

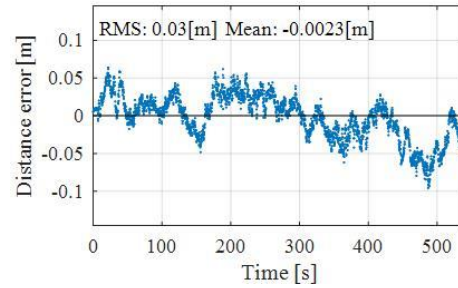


図 14 玉葱移植時傾斜地補正自動走行の様子 図 15 玉葱移植時傾斜補正自動走行精度

実験 3 は圧雪状態の斜面での実験を行った (図 16)。図 17 に傾斜補正自動走行精度を示している。この図から、平均値は-0.00085mとなり、ゼロに近い値のため、横滑りが発生していないことが確認できた。玉ねぎ移植時の走行精度とおおよそ同じ程度の値を示す。誤差が大きくなった原因は圧雪路面でスリップしやすい路面環境であることや路面上の雪により車体の揺れが生じたことが考えられる。



図 16 圧雪路面の傾斜補正自動走行の様子

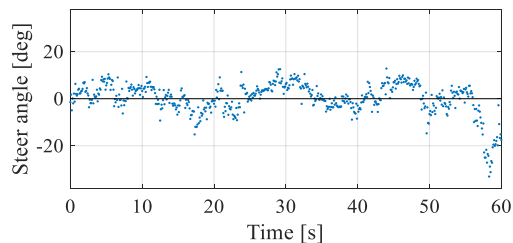
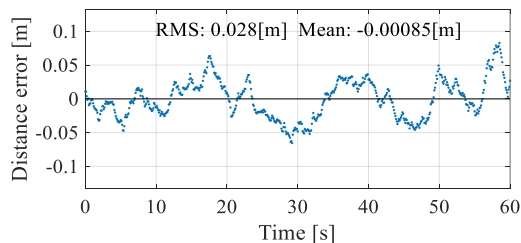


図 17 圧雪路面の傾斜補正自動走行精度 図 18 圧雪路面の傾斜補正自動時の操舵角

本報告は傾斜地で自動走行する際に精度が低下した原因を実験で検証した。その原因は斜面下方向に操舵する際、重力は旋回を加速させるトルクを発生させ、トラクタの車体は平地よりも大きく回転した。一方、斜面上方向に操舵する際に重力は旋回に抵抗するトルクを発生させ、トラクタの車体は平地より小さい回転になった。その結果、車体が徐々に斜面下方向へ進行する。今回は傾斜角度 (ロール角) を利用した補正制御方法を提案した。操舵輪は常に斜面上方向を向き、トラクタのエンジンからの動力がタイヤを經由し斜面を登るトルクと重力から発生したトルクが釣り合い、車体が滑らないように前進できる。本研究提案した制御法の実験結果により、傾斜地でも平地と同じ精度を出すことが可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yang Liangliang, Guo Hao, Yang Shuming, Hoshino Yohei, Suzuki Soichiro, Gao Dehua, Cao Ying, Kitami Institute of Technology 165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan, Ningxia University, Yinchuan, China	4. 巻 13
2. 論文標題 Generation of a High-Precision Digital Elevation Model for Fields in Mountain Regions Using RTK-GPS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 671 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2019.p0671	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 進藤隆史, 尾崎広崇, 楊 亮亮, 星野洋平, 曹 羸
2. 発表標題 AI を用いた植物種判別法による除草作業自動化の研究
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 中山慎也, 楊 亮亮, 星野洋平
2. 発表標題 傾斜地自動走行精度向上する研究について
3. 学会等名 2019年 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会 合同国際大会
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 中山 慎也, 楊 亮亮, 星野 洋平, 曹 羸
2. 発表標題 遠隔操縦・自律制御試験用小型トラクターの構築とGPS自動操舵軌跡記録と軌道復元
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 方位センサー依存しない自動操舵システム	発明者 楊亮亮、星野洋平	権利者 北見工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-210059	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------