

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03082

研究課題名(和文)路面情報に基づく車輪・作業機制御によるトラクタの転倒防止システムの開発

研究課題名(英文)Development of a tractor rollover prevention system by controlling wheel and work equipment based on road surface information f

研究代表者

井上 英二 (INOUE, EIJI)

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：00184739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トラクタの転倒事故の低減を図るため、ジンバル搭載型ステレオビジョンカメラより計測・再構築された路面の3次元情報を入力とした時のトラクタの挙動を予測可能な力学モデルの構築を行った。

さらに、転倒リスクが高い傾斜路面走行時の機体の安定性をより詳細に評価するために、マルチボディダイナミクス解析を用いてトラクタの走行モデルを構築し、路面傾斜角と転倒に至らしめるロール角速度の関係を定式化することで、乗用トラクタの転倒危険度の評価指標を提案した。最後に模型車両を用いて、転倒評価指標に基づくステアリング制御により転倒回避を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

死亡事故が多いトラクタの転倒防止・回避には、実走行現場における路面の傾斜・起伏の情報の把握が必要不可欠であり、リアルタイムに計測された路面情報に基づく機体の挙動予測モデルから転倒を回避する制御システムに関する研究報告は少ない。

本研究は、実際の走行路面の3次元的な幾何学情報に基づくトラクタの挙動予測モデルから車輪や作業機を制御し、転倒そのものを回避する制御システムの構築を目指すもので、トラクタの転倒・転落事故の飛躍的な低減に高く貢献できる学術的課題である。また、農作業中の死亡・重大事故の低減化だけでなく、今後のロボット農機の安全性向上においても大きく寄与することから、その研究意義は極めて高い。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to reduce the tractor rollover accidents, we developed a prediction model of tractor behavior. Reconstructed 3-D road profiles data obtained by the stereo-vision camera installed a gimbal system were input to the simulation. Furthermore, in order to evaluate the rollover stability of tractor when traveling on a sloped road, we developed a tractor driving model using a multibody dynamics analysis, and examined the rollover index by formulating the relationship between the road slope angle and the roll angular velocity of a tractor. Finally, using a model experiment tractor, we demonstrated the rollover prevention by steering control based on the rollover index.

研究分野：農業機械学

キーワード：トラクタ力学モデル 転倒・転落事故防止 3次元路面再構成 マルチボディダイナミクス 転倒安全指数 ステアリング制御 ステレオビジョン 拡張カルマンフィルタ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

農作業中の死亡事故は危険な作業を伴う建設業と比較してもその発生割合は約2倍も高く、近年の就業者数の減少を鑑みると発生率としては増加傾向にある。農作業死亡事故全体の約7割を占めるのが機械作業に関わるもので、その半数が農用車両の転倒・転落が原因とされることから、農業機械の転倒・転落事故の低減化は喫緊の課題となっている。国内外における農業機械、特にトラクタの安全性や乗り心地に関する研究は数多く報告されているが、その多くは既知の凹凸形状の障害物や傾斜面を入力とした機体の振動解析や転倒危険性の評価および慣性センサによる機体傾斜角に基づく転倒の検知による迅速な通報システムの開発などであり、転倒そのものの防止や回避に主眼をおいた研究は少ない。

転倒そのものの転倒防止や回避には、実走行現場における路面の傾斜・起伏の情報の把握が必要不可欠であり、リアルタイムに計測された路面情報に基づく機体の挙動予測モデルから転倒を回避する制御システムの開発は皆無である。

本申請研究では、実際の走行路面の3次元的な幾何学情報に基づくトラクタの挙動予測モデルから車輪や作業機を制御することで、転倒そのものを回避する制御システムの構築を目指す。

2. 研究の目的

農作業死亡事故における事故要因のトップがトラクタの転倒・転落であり、農作業死亡事故の低減化にはトラクタの転倒・転落を防止することが最も効果的である。また、死亡までは至らずとも農業機械の転倒・転落事故は作業者の重傷や機械にも重大なダメージを負うため、高齢者の場合そのまま離農に繋がる場合も多く、事故そのものを防止する技術が極めて重要である。

国内外におけるトラクタの安全性や乗り心地に関する研究は数多く報告されているが、その多くは、(1)既知の凹凸や等間隔に配置された突起物および路面の粗さを規定した国際ラフネス指数に基づく路面プロファイルを入力とした機体の振動解析や乗り心地の評価といった機体振動に着目した研究、(2)上記の既知の路面入力を与えた場合の機体の傾斜角の計算に基づいた転倒危険性の評価等の既知の路面入力に基づく機体の挙動解析である。また、実走行における未知の路面状況下での転倒防止に関する研究としては、(3)慣性センサから計測された現在の機体の傾斜角および振動情報に基づく転倒に対する機体安全性の評価があげられるが、あくまでも現在の路面入力に起因した機体挙動の予測に留まる。

本研究では、トラクタの転倒事故の低減化を図るため、トラクタが作業・走行する路面の3次元情報の把握と3次元路面情報を入力としたトラクタの挙動を予測するとともに、転倒に対する安定性を確保する制御システムについて検討を行う。

3. 研究の方法

(1)トラクタの前面に設置したステレオカメラから路面の3次元情報の再構築を行った。起伏走行路面を走行するトラクタの車載カメラ画像の計測精度には、カメラの取り付け角、機体振動、起伏を乗り越す際の重心移動が大きく影響を及ぼす。そこで、これらの影響因子を取り除くため、供試ステレオビジョンカメラに搭載可能なピッチ、ロール軸を制御する2軸型ジンバル(電動スタビライザー)を自作し、車載時の動的環境下においてもカメラの姿勢を一定に保つジンバルシステムを開発した。さらに、再構成された路面の起伏情報をトラクタの3次元力学モデルの入力値として機体のロール挙動を解析し、実走行時の計測値と比較を行った。

(2)走行中の作業機の位置変化がトラクタの挙動に与える影響と安全性向上への可能性の検討を目的として、既往のトラクタの力学モデルを基に作業機の位置変化を伴うトラクタの挙動予測モデルを導出した。本モデルより作業機の重心位置と慣性モーメントの変化を考慮した作業機の上下動を伴うトラクタの機体振動を解析し、検討を行った。さらに、拡張カルマンフィルタを用いたフィルタリングを行い、既存のモデルによる予測と実際のセンサからの観測値の間でフィルタリング処理により、予測精度の向上を図った。

(3)傾斜路面の走行時に起伏の乗り越しや脱輪に伴う横転倒であることから、これらの現象の定量的な評価のためには、走行路面の傾斜角度や障害物および脱輪の形状などを詳細に変更しながら解析を行う必要がある。そこで、乗用トラクタの転倒・転落のメカニズムを明らかにするため、マルチボディダイナミクスによる乗用トラクタの転倒解析および転倒危険度の評価指標を検討するとともに、本解析手法とステアリング制御を組み合わせ転倒防止システムについて模型車両を用いて有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 自作したステレオビジョンカメラに搭載可能なピッチ、ロール軸を制御する2軸型ジンバルを図1に示す。本システムをトラクタの前方に設置して、路面の再構築を行った。図2に路面に対する角度20°および90°の場合での再構成結果を示す。路面に対して90°にカメラの姿勢を保持する場合は最も再構成誤差が小さくなるが、姿勢角度は10°~20°の範囲で設定するのが実用的である。そこで、路面の再構成精度が比較的低い10度、20度のカメラ設置条件で挙動予測精度の向上を図るため、機体挙動の予測結果と、ジンバル内蔵の慣性センサからの情報を観測値として拡張カルマンフィルタによるフィルタリングの適応を試みた。

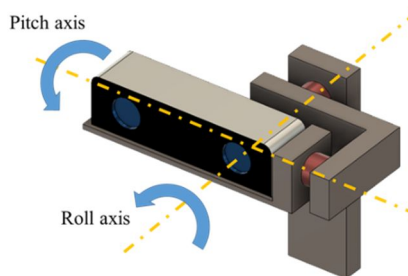


図1 自作ジンバル搭載ステレオカメラ

(2) 作業機位置を考慮した力学モデルの構築をするため、作業機の昇降における軌跡を測定し、その軌跡を楕円として近似して作業機角度から重心位置と慣性モーメントを算出し、モデルのパラメータを決定した。実際のトラクタの挙動予測では、ステレオカメラやLidar等のビジョンセンサから得られた路面情報を入力として逐次機体の挙動を解析する必要がある。ビジョンセンサの計測精度や解析モデルに考慮されていない影響によっては予測精度の低下を招く。そこで、トラクタ本体には慣性センサを導入することを前提として、慣性センサのデータを用いたカルマンフィルタによる予測精度の向上を図った。

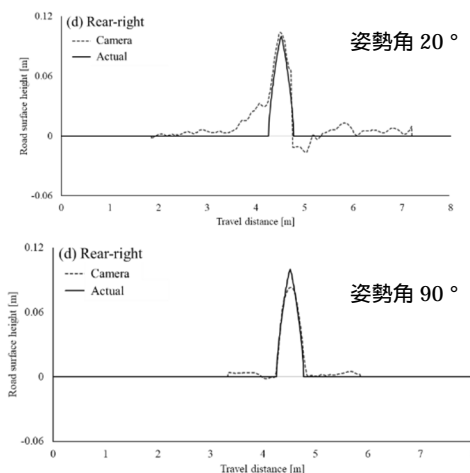


図2 路面再構成結果

取り付け角20°におけるビジョンセンサから取得した路面を入力として機体挙動の予測を行うとともに、ジンバルに搭載されている慣性センサから得られるピッチング、ローリング角速度の実測値を用いてフィルタリングを行った。フィルタリングの初期値としてモデルの分散を0.64、観測値の分散を0.0076と設定した。シミュレーションは実装を仮定して路面を2mごとに分割し、2mシミュレーションを行った後フィルタリングを行い次のシミュレーションの初期値として使用することを繰り返し行い、フィルタリングをせずにシミュレーションしたものと比較した。図3にピッチング角速度の実測値と、ビジョンセンサ取り付け角20°の路面情報を用いた際のフィルタリングを行った結果を示す。図より、フィルタリングによって、路面の再構成精度が低い場合においても概ね実測値に一致していることが分かる。

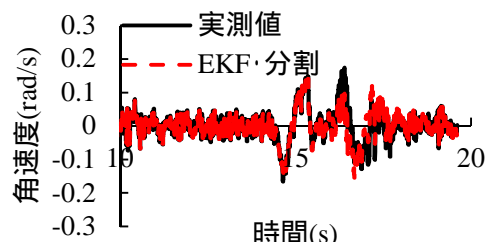


図3 フィルタリング結果(ピッチ角速度)

(3) 乗用トラクタの転倒・転落のメカニズムを明らかにするため、マルチボディダイナミクスによる乗用トラクタの転倒解析および転倒危険度の評価指標を検討するとともに、ステアリング制御を組み合わせ転倒防止システムについてモデル車両を用いて有効性を検証した。本研究では簡単のため、マルチボディダイナミクス解析において機体本体を直方体、タイヤを円柱剛体としてモデル化した(図4)。解析では左右片輪のみ凹凸を乗り越す路面の走行を想定した。その際、機体の進行方向を回転の軸として路面に与える傾斜を路面傾斜角 θ [deg]、凹凸高さ h [cm]、機体の走行速度 v [m/s]を条件パラメータとして設定した。解析によって出力されるロール角速度の時系列データのうち凹凸乗り越しに伴うロール角速度の最大値を出力した。段差乗り越し時のロール角速度の最大値を実測データと解析データで出力し、速度ごとの変化の比較を図5に示す。速度の上昇に伴う最大ロール角速度の変化は実測と解析で同様の傾向を示していることが確認された。

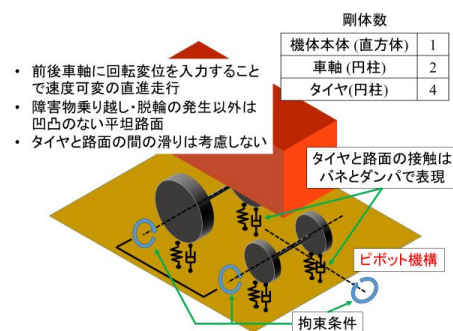


図4 乗用トラクタモデルの概要図

図6(上)に、横軸に h 、縦軸に v をとり、 $\theta=5$ deg で解析を行ったときの凹凸乗り越しに伴う最大ロール角速度のカラーマップを示す。図より、 v および h の上昇に従って最大ロール角速度が大きくなっていることがわかる。一方で高速域においては、速度上昇に伴って最大ロール角速度が一時的に減少するという結果を得た。この理由としては、速度が大きくなるにつれて前輪乗り越終了から後輪乗り越開始までの時間が短くなり、前輪乗り越に伴うロール回転の過渡振動が後輪の乗り越に伴うロール回転を打ち消すように働くためであることが考えられる。また、カラーマップ右上部で最大ロール角速度が急激に上昇している理由としては、 h 、 v が共に大きくなることで、後輪タイヤの凹凸乗り越しに伴う機体の回転により乗り越し側の前輪タイヤが路面から離脱するためであると考えられる。つまり、斜面山側の前後両輪が路面から離脱する状態が発生しており、機体の転倒のリスクが大幅に上昇することを示唆している。図6(下)は、横軸に h 、縦軸に θ をとり、 $v=1.5$ m/s で解析を行ったときの凹凸乗り越しに伴う最大ロール角速度のカラーマップを示す。縦軸方向に関して、 θ の増大に伴う最大ロール角速度の上昇はほとんど見られなかった。一方で、カラーマップ上の茶色で示してある部分は解析で転倒が起きた条件を示しているが、 θ が大きくなるとより小さい h 、つまりより小さいロール角速度で転倒が生じており、 θ と転倒に至らしめるロール角速度の間にはほぼ線形関係があることが確認された。

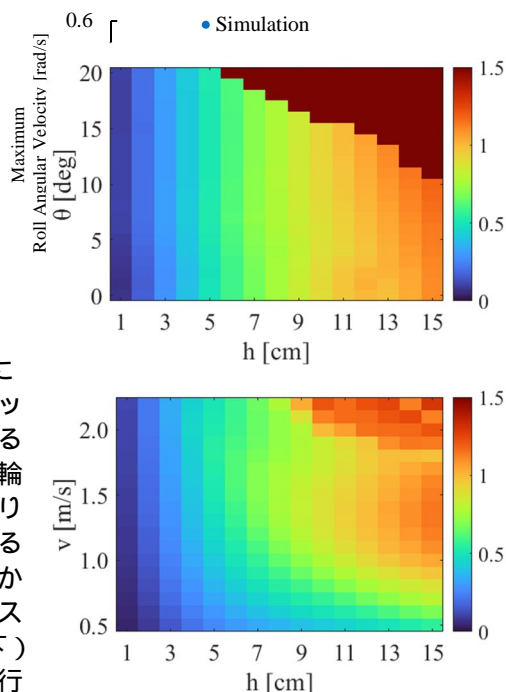


図6 凹凸乗り越しを伴う解析のカラーマップ

(4) 最後に模型車両を用いたステアリング制御による転倒回避について検討した。静的転倒角と現在の機体角度における臨界角速度 $\dot{\theta}_{cri}$ を組み合わせたものを転倒評価指標 SI とし、評価・検討した。臨界角速度 $\dot{\theta}_{cri}$ を(1)式、転倒評価指標 SI を(2)式に示す。転倒評価指標が0に近くなるほど転倒の危険性を潜在的にはらんでいる。式には角度が含まれるが、角度の算出は角速度データの積分値としている。

$$\dot{\theta}_{cri} = \sqrt{\frac{2mgr_x(1-\cos(\theta_{cri}-\theta))}{I_x+m r_x^2}} \quad (1), \quad SI = \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{cri}}\right) \left\{1 - \left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_{cri}}\right)^2\right\} \quad (2)$$

転倒評価指標を用いて、模型車両の転倒回避制御を試みた。転倒評価指標が0を下回った時点で、『転倒する』と判断し、前輪のステアリング制御を行う。車体が右に傾いている場合、右にステアリング制御を行い、左に傾いている場合、左にステアリング制御を行うプログラムを作成した。本研究では、ステアリング制御による転倒回避の可能性を模索するため複雑な自動制御は行わず、単純にステアリング角度を15度、30度、45度となるように制御した。表1に制御無しの条件では転倒が発生した走行条件について、ステアリング制御を行った場合での転倒確率を示す。ステアリング制御角度が大きいほどより転倒を回避できることがわかった。ステアリング制御を行うことで転倒方向とは逆向きに遠心力が発生し、転倒を回避していると考えられる。

表1 ステアリング制御と転倒率

		傾斜6度	傾斜9度
		転倒確率	
ステアリング制御 角度15度	0.254m/s	70%	100%
	0.333m/s	90%	100%
ステアリング制御 角度30度	0.254m/s	0%	100%
	0.333m/s	0%	100%
ステアリング制御 角度45度	0.254m/s	0%	80%
	0.333m/s	0%	90%

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 S.SHIN, M.MITSUOKA, E.INOUE, T.OKAYASU, Y.HIRAI, M.MATSUI, J.CHOE	4. 巻 82
2. 論文標題 Prediction of Tractor Behavior Based on Reconstructed Terrain Profiles Using Stereo-vision Camera	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers	6. 最初と最後の頁 480-488
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 秋宗宏政、光岡宗司、井上英二、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 作業機の昇降を考慮したトラクタ挙動予測シミュレーションに関する研究
3. 学会等名 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

1. 発表者名 山田剛巳、井上英二、光岡宗司、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 乗用トラクタの作業機位置が機体の動特性に与える影響
3. 学会等名 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soyoung Shin、井上英二、光岡宗司、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 Evaluation of behavior simulation of a tractor traveling on a ground reconstructed with a stereo-vision camera
3. 学会等名 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

1. 発表者名 山田剛巳、井上英二、光岡宗司、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 乗用トラクタの作業機位置による周波数応答の実験的解析
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soyoung Shin、井上英二、光岡宗司、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 Stereo-camera installation configuration to improve accuracy of 3D ground reconstruction for tractor rollover prediction
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	松井 正実 (MATSUI MASAMI) (10603425)	宇都宮大学・農学部・教授 (12201)	
研究分担者	光岡 宗司 (MITSUOKA MUNESHI) (60437770)	琉球大学・農学部・准教授 (18001)	

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
---------	---------