

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06319

研究課題名(和文)電気トラクタ自動トラブル回避システムに必要な走行異常予測アルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Prediction algorithm of operation abnormality for automatic trouble avoidance system of electric tractor

研究代表者

上加 裕子 (Ueka, Yuko)

愛媛大学・農学研究科・准教授

研究者番号：00527103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、農業機械の自動トラブル回避システムを構築するため、各構成ユニットをそれぞれ独立モータで駆動することで、消費電力を直接計測できるようにした電動トラクタを開発した。消費電力データの変化から走行負荷や作業負荷の変化を検知することができ、タイヤのスリップなどの過少負荷状態も消費電力データから予測できる可能性が確認できた。加えて、コンバインの風選別部の消費電力データを異常検知、変化点検知の解析手法により分析することで作業状態を把握できた。今後は、事故の予測検知や、各種電動農機の作業状態をモニタリングする技術としての展開を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電動化の特性を發揮し、モータ消費電力データから機械負荷異常領域への変化点を抽出し、外乱の多い農業機械の自動制御システムへ応用利用するためのアルゴリズムを構築しようとする点にある。また、コンバインのような複数の作業機能を有する農業機械に展開することで、作業精度が向上するとともに、対象作物多様化のニーズにも資するものと考えている。電動農業機械については、国際会議などでも近年議論されるようにはなったが、実用化に至っているのは小型機械ばかりである。トラクタ・コンバインなどの主力農業機械の電動化に向けて、本研究成果は、効率的な動力分配可能な新しい機構や制御システムの創造に寄与するものとなる。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to construct an automatic trouble avoidance system for agricultural machinery, an electric tractor that can directly measure power consumption by operating each configuration unit with independent motors was developed. The changes in travel load and workload can be detected from the changes in power consumption data, and the possibility of predicting from power consumption data of underload conditions such as tire slippage has been confirmed. In addition, the work condition by analyzing the power consumption data of wind winnowing unit of the combine harvester using the analysis method of anomaly detection and change detection was found. In the future, this technology for predicting accidents and monitoring the working conditions of various types of electric agricultural machinery is going to be developed.

研究分野：農業環境工学および農業情報工学

キーワード：電動農機 異常検知 自動化

1. 研究開始当初の背景

農業機械のような特殊自動車に対しても厳しい排ガス規制が実施され、クリーンエネルギー化は必須である。また、農業従事者の高齢化や女性就農者の増加に伴い、農業機械の快適性・操作性向上が期待される。これら課題に対する技術として農業機械の電動化は有効である。

今後は、農業機械の自動化、ロボット化が加速し、機械が状況を検知し、トラブル予測・回避する技術開発も必要である。機械負荷とエネルギー消費には強い相関関係があることから、本研究は、農業機械の作業ユニットごとに電動化し、そのエネルギー消費データから機械負荷を予測する技術開発を進め、必要な制御パラメータを抽出し自動トラブル回避システムの構築を目指す。

2. 研究の目的

本研究目的は、農業機械の自動トラブル回避システムの構築を目指し、エネルギー消費情報を制御パラメータとした機械負荷予測モデルの構築である。

エネルギー消費情報をオンサイトで把握する技術として、エンジン式農業機械よりも電動式農業機械の方が、その特性を十分に発揮することができる。研究代表者はこれまで農業機械の電動化に関する研究を進め、各構成ユニット（各車輪、作業機）をそれぞれ独立モータで駆動可能な電気トラクタを開発しており、構成ユニットごとの消費電力を直接計測できるようになっている。加えてコンバインの風選別部の作業精度についても、機内穀粒流入量の変動に伴う選別ファンの負荷状況から選別状況を検知するための解析手法を検討した。

3. 研究の方法

3-1 電動トラクタの走行負荷に応じた消費電力計測

電気トラクタ 2 号機はスロットルレバーで走行速度を設定する。実験条件としてスロットルレバー開度を 5 段階とし実験を行った。スロットルレバー開度割合とコンクリート平路面走行時の速度は、0.25 の時 0.2m/s、0.33 の時 0.3m/s、0.5 の時 0.6m/s、0.67 の時 1.0m/s、1 の時 1.3m/s となった。（以下 1 速～5 速と記す。）

(1) 平路面走行時

平路面走行時、路面条件を変えた時の消費電力データとタイヤ回転数の計測を行った。路面条件は愛媛大学農学部内のコンクリート路面 4m、アスファルト路面 2m、水を上げた鉄板面 2.5m の条件で計測を行った。2～5 速で計測を行った。

(2) 傾斜面走行時

車両に勾配抵抗をかけた時の消費電力データとタイヤ回転数の計測を行った。路面条件は愛媛大学農学部内のアスファルト路面傾斜路面で計測を行った。

(3) 旋回走行時

旋回半径を変えた時の消費電力データとタイヤ回転数の計測を行った。計測は愛媛大学農学部内のコンクリート、アスファルト路面、土路面で行った。走行速度は 1～3 速とし、旋回半径は 2m、1.5m、1m の時計回り、反時計回りで計測を行った。

3-2. 風選別実験

(1) 供試材料および試験装置

供試材料には、ナタネを用いた。電動風選別部と穀物供給部からなる試験装置を用いた。穀物

供給部は穀物を一定の速度で輸送できるベルトコンベアが使われており、その速度を調整することで供給量を 20 g/s から 160 g/s まで 20 ずつ増やした。試験装置内の風上、風下で風速、風圧を測定し、ファンの電流を計測した。

(2) 実験装置の選別特性

風上での風速を、5.45、5.25 m/s の 2 条件とし、供給量ごとの選別状態を計測した。各回収口で回収された穀粒量を計測し、本実験では 2 番口の回収割合が 15 % 以上で選別ロス発生とした。風速 5.45 m/s では供給量が 40 g/s 以下、風速 5.25 m/s では供給量 100 g/s 以下で選別ロスが発生した。

(3) 供給量変化による風選別実験

穀粒の供給量 0 g/s (無負荷) からスタートし、30 秒後に 160 g/s で供給を開始した。さらに 10 秒後、供給量を変化させた。これを 1 セット (例えば、0→160→140 g/s) とし、全 7 セットを各 12 回ずつ行った。その時の電流、風速、風圧を計測した。

4. 研究成果

4-1 電動トラクタの走行負荷に応じた消費電力計測

(1) 平路面走行時

4 速時にアスファルト路面から鉄板面へ変化した時のタイヤ回転数と電流の時系列データを図 1 に示す。始動直後に電流は大きなピーク値 (以下、始動電流) を確認できる。その後は、同一路面では、ほぼ一定の電流値を示し、アスファルト路面から鉄板面に移動した際に走行抵抗が小さくなり、電流値が下がることが確認できた。タイヤ回転数は無負荷時と同様にレバー開度が上がると上昇した。電流は転がり抵抗係数の小さいコンクリートと鉄板では、ほぼ一定値となったが、大きいアスファルトでは線形的に上昇した。すべりやすい路面では、速度上昇による損失トルクは増加せず、電流がほぼ一定になることが分かった。アスファルト路面と鉄板面の平均電流の差は、低速であるほど小さく、高速であるほど大きくなった。高速時にはこの変化がすべりなどの危険につながる可能性がある。つまり、時系列データより、このすべりの変位点を明らかにするとともに、電流差の安全閾値を明らかにすることですべりによる危険検知につながる。

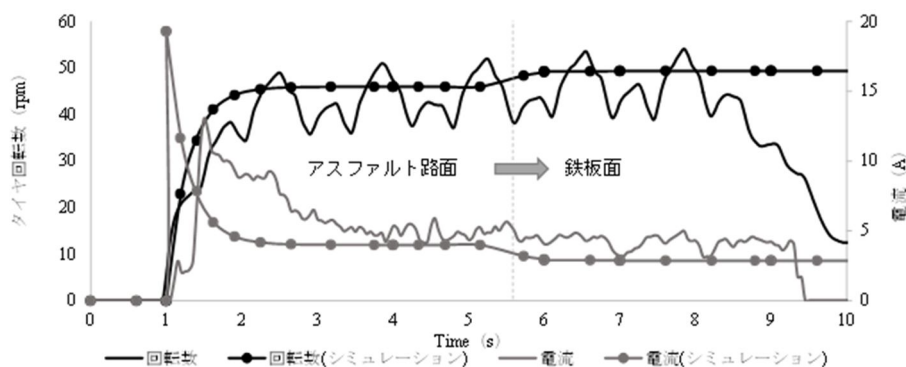


図 1 平路面走行時系列データ (4 速)

(2) 傾斜面走行時

時系列データ (図 2) を見てみると、傾斜角が小さくなるにつれて電流は小さくなりタイヤ回転数は大きくなった。

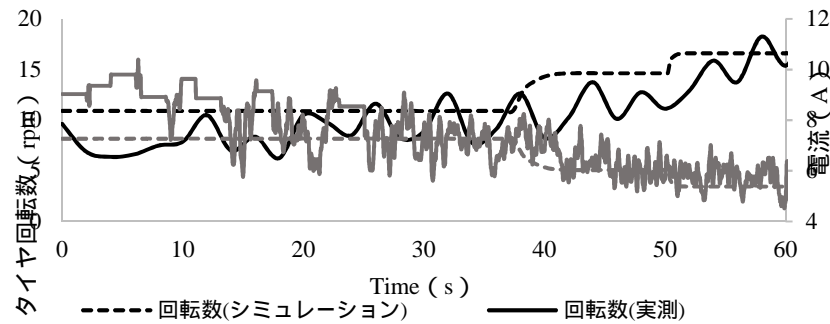


図2 傾斜面走行時系列データ(2速)

(3) 旋回走行時

実験結果は図3に示す。旋回によって内輪に旋回抵抗がかかることによって、タイヤ回転数は内輪の方が低く、逆に電流は内輪の方が高くなることが確認できた。内輪への旋回抵抗が大きくなることで、タイヤ回転数がさらに小さく、電流がさらに大きくなる様な傾向が確認できた。他の路面条件でも同様の傾向になった。この結果から、両輪の電力差の閾値を決定できれば、横転など危険回避予測回避につながる。

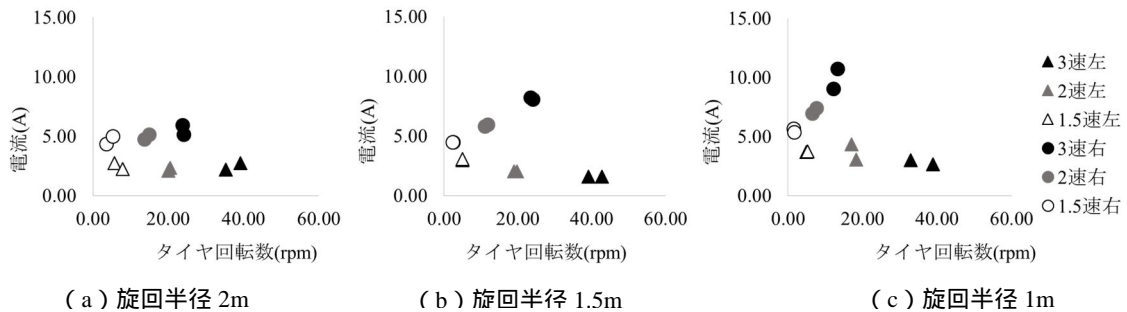


図3 旋回走行時実験結果

4-2 風選別精度検知

(1) 電流データの異常検知, 変化点検知とデータの前処理

本研究では異常検知手法として「状態空間モデル」、変化点検知手法として「特異スペクトル変換法」を用いた。

異常検知及び変化点検知結果を図4, 5に示す。それぞれの検知手法で、供給速度が160 g/sから60 g/sに変化する点で異常度及び変化度の極大値が検出されていることが分かる。他の条件においても同様に検出された。

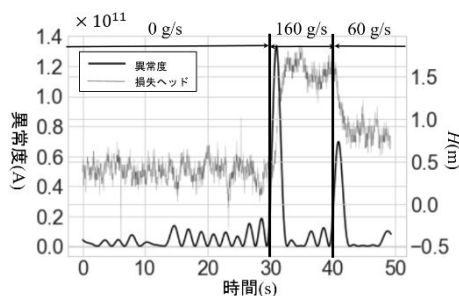


図4 状態空間モデルを用いた異常検知結果

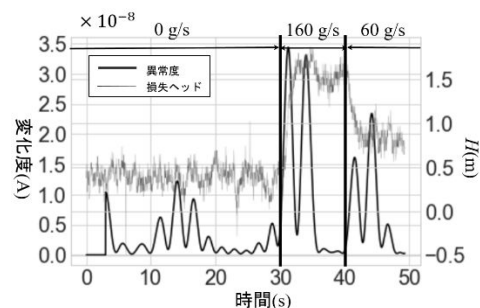


図5 特異スペクトル変換法を用いた変化点検知結果

(2) 選別精度の判別

選別ロス発生時の供給量に変化させ、選別ロスが発生した群(選別ロス有)とそれ以外の群(選別ロス無)で、マハラノビス距離による判別分析を実施した。12回の試験で抽出された風速 5.45 m/s の状態空間モデルの異常度の分布を図 6、特異スペクトル変換法の変化度の分布を図 7 に示す。

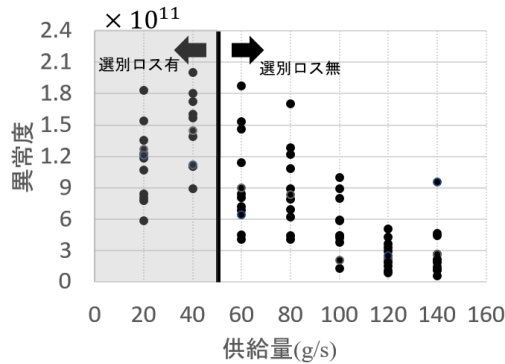


図 10 状態空間モデルの異常度

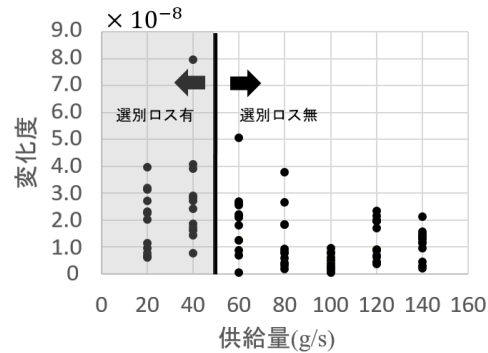


図 11 特異スペクトル変換法の変化度

(3) 交差検証

状態空間モデル(異常度)を用いた判別分析による交差検証を行った結果(表 1)、各設定風速条件での選別ロス有無の判定の正解率が 80%以上となった。2つの風速条件を合わせて分析した結果、正解率が最大で 12%低下した。

特異スペクトル変換法(変化度)を用いた判別分析による交差検証を行った結果(表 2)、正解率は 80%を下回った。

表 1 状態空間モデル(異常度)を変数にした判別分析の交差検証結果

| 変数 | 5.45m/s | 5.25m/s | 5.45m/s, 5.25m/s |
|---------------------|---------|---------|------------------|
| E | 85% | 95% | 79% |
| ΔI | 84% | 97% | 84% |
| ΔH | 89% | 95% | 77% |
| $E+\Delta H$ | 88% | 99% | 82% |
| $\Delta H+\Delta I$ | 90% | 99% | 89% |

表 2 特異スペクトル変換法(変化度)を変数にした判別分析の交差検証結果

| 変数 | 5.45m/s | 5.25m/s | 5.45m/s, 5.25m/s |
|---------------------|---------|---------|------------------|
| E | 69% | 62% | 57% |
| ΔI | 81% | 64% | 72% |
| ΔH | 68% | 54% | 62% |
| $E+\Delta H$ | 69% | 63% | 65% |
| $\Delta H+\Delta I$ | 79% | 68% | 70% |

4-3 まとめ

電気トラクタの消費電力データの変化から走行負荷や作業負荷の変化を検知することができ、タイヤのスリップなどの過少負荷状態も消費電力データから予測できる可能性が確認できた。また、タイヤ回転数、電流ともに定性・定量的に再現することができ、今後は、本研究で構築したモデルを用いて、より危険な条件設定下で事故の予測シミュレーションモデルの構築を目指す。また、コンバインの選別精度検知で用いた異常検知、変化点検知の解析手法により、負荷電流データを分析することで作業状態を把握できたことから、各種電動農機の作業状態をモニタリングする技術としての展開を目指す。

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 廣田大地・上加裕子・有馬誠一・土居義典 | 4. 巻 129 |
| 2. 論文標題 コンバインAI制御システム確立にむけた基礎研究 電動往復刈刃機構の切断動力と作物量の相関モデル | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 関西農業食料工学会会報 | 6. 最初と最後の頁 61-62 |
| 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 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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田大地・上加裕子・有馬誠一・土居義典 |
| 2. 発表標題 コンバインAI制御システム確立にむけた基礎研究 電動往復刈刃機構の切断動力と作物量の相関モデル |
| 3. 学会等名 農業食料工学会関西支部第144回例会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 内山直人, 上加裕子, 廣田大地, 中矢龍太郎, 有馬誠一, 土居義典 |
| 2. 発表標題 農業機械電動化による低負荷から高負荷作業時の消費電力変化特性 |
| 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 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中矢龍太郎, 上加裕子, 内山直人, 廣田大地, 有馬誠一 |
| 2. 発表標題 汎用コンバインEV選別システム開発に向けた基礎研究 |
| 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 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣田大地, 上加裕子, 内山直人, 中矢龍太郎, 有馬誠一 |
| 2. 発表標題 コンバイン制御パラメータ確立にむけた刈取部切断力と作物情報のモデリング |
| 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 |

〔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) | |

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 |
|---------|---------|