

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06323

研究課題名(和文) 熟練者の農業機械操作、作業状態判断の経験・暗黙知の数值化とスマート農機への利活用

研究課題名(英文) Quantification of tacit knowledge of machine operation and discrimination of operational conditions by skilled farmers

研究代表者

光岡 宗司 (Mitsuoka, Muneshi)

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：60437770

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)：本研究では、農業機械の作業中の振動時系列情報のみから作業特徴量を抽出し、作業状態を数值化することを最終的な目標に、振動時系列データに基づく作業状態の違いの把握に寄与する特徴量の抽出および機械学習による作業条件の分類を試みた。

その結果、機体の剛性が高い部位に設置した慣性センサー(3軸並進加速度および回転角速度)から得られる時系列データが最も機械の稼働状態を把握する上で有用であった。さらに、トラクタのロータリ耕うん作業を対象に、異なる作業条件および圃場条件を組み合わせた16パターン条件を設定し、計測された振動時系列データを用いた機械学習の結果、約95%の精度で判別可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に熟練作業者ほど圃場の土壌や作物の状態、機械から伝わる振動・騒音および作業精度等の情報から作業状態を総合的に判断して操作を行っている。また、作業中に機体を通じて作業者に暴露される力覚データは機械の状態を作業者に知覚させる重要な情報であり、機械の不具合や異常検知における判断・意思決定に大きく影響を及ぼす。

そこで本研究では、計測された多変数データを用いた異常の早期検出手法を開発することで作業適期中の機械の故障による経済的損失の低減、メンテナンス性や使用耐久年数および機械の安全性の向上に極めて高い寄与が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the objective is to extract features that can be used to understand the working conditions of agricultural machinery only from vibration time-series data during operation, and to quantify these conditions. To this end, I attempted to extract features that contribute to understanding differences in work conditions based on vibration time-series data and to classify work conditions by machine learning.

As a result, time-series data obtained from inertial sensors (3-axis translational acceleration and 3-axis rotational angular velocity) installed in a rigid part of the machine were the most useful in understanding the operating conditions of the machine. In addition, machine learning using the measured vibration time-series data for 16 patterns of different work and field conditions for tractor rotary tillage operations showed that the machine was able to discriminate with an accuracy of about 95%.

研究分野：農業情報工学

キーワード：農業機械の作業情報 複数時系列データ 特徴量抽出 機械学習 機械の異常検出 作業状態の分類

### 1. 研究開始当初の背景

日本の農業就業者の平均年齢は約 66 歳で、6 割が 65 歳以上と高齢化が進行しており、今後若い担い手の増加が見込めない場合、10 数年後には深刻な労働力不足に直面すると言われている。このような状況下、「ロボット新戦略」(日本経済再生本部 2015)において農業のロボット化・自動化は重要産業と位置付けられ、近年圃場内での自動走行システムの市販化がはじまり、遠隔監視での無人システム実現の目標(農林水産省 2016)は達成しつつある。一方で、現在国内外で研究開発が進む農業ロボットや自動運転システムの多くが平野部の大規模な圃場での作業が対象で、要求性能としては大規模な圃場における直進作業性と作業経路計画・選択が主眼となっている。今後、農業ロボットや自動運転システムの更なる性能向上や新規営農者におけるスマート農機の有効活用のためには、作業時の土壌や作物の生育状況等の圃場環境情報から直進性や作業経路選択以外に要求される作業精度および作業性能を満たす最適な機械の操作量を制御するシステムの構築は極めて重要となる。

一般に、農業における機械作業では、耕うん・整地、施肥・播種、管理・防除、収穫のように各作業が大きく異なる上、同じ作業であっても作物や圃場環境に応じた操作が求められることから、作業精度・効率はオペレータの熟練度に大きく影響される。また、作業の適期性が求められる農業においては、作業適期中の機械の故障は大きな経済的損失を生むことになる上、機械の使用耐久年数の向上の面からも機械のメンテナンス、不具合や異常に対する知識は農家にとって極めて重要である。そのため、農業ロボットのみならず従来の人による操作を要する機械においても更なる高機能化、高性能化のためには、熟練作業者の“経験知”、“暗黙知”を見える化する運転・操作パターンおよび作業状態の特徴抽出は、今後の農業作業システム、スマート農業分野において極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、「農業機械から測定される作業情報の時系列データ群から作業者の運転・操作パターンおよび作業状態の特徴抽出およびの数値化」を行うことである。近年、農業機械においてもロボット化・自動化に関する開発・研究が国内外で積極的に行われているが、現在の農業ロボットや自動運転・操作技術では、基本的には作業経路の決定と経路に沿った直進走行、複数台の協調作業といった作業効率の向上に主眼がおかれている。一方、一般的に熟練作業者ほど圃場の土壌や作物の状態、機械から伝わる振動・騒音および作業の仕上がり具合などの情報から作業状態を総合的に判断して操作を行っている。また、作業中に機体を通じて作業者に暴露される加速度、角速度等の力覚データは機械の状態を作業者に知覚させる重要な情報であり、機械のメンテナンス時期の検討、不具合や異常の検知における判断・意思決定に大きく影響を及ぼす。そこで本研究では、さらに、計測された多変数データを用いた異常検出手法の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) トラクタ耕うん作業時の振動時系列データの計測と作業状態の分類

異なる土壌条件とトラクタの操作条件を組み合わせることで 16 パターンの異なる作業条件下におけるロータリ耕うん時の機体および作業機の振動時系列の計測を行った。さらに、計測された振動データから特徴量を抽出し、機械学習により 16 パターンの異なる作業条件の判別を行った。

実験では 15 馬力の小型トラクタを供試した。爪の回転方向は一般的な正転ロータリとした。作業時の振動データの計測には、(株)スポーツセンシング社製の DSP ワイヤレス 9 軸モーションセンサ(SS-MS-SMA5G3)を採用した。本センサを座席下の剛性フレームおよびロータリ上部のフレームに取り付け(図 1)、サンプリング周波数 200Hz で 3 軸の並進加速度を計測した。トラクタの操作条件はエンジン回転数を 2400rpm で固定し、PTO 回転数を 551rpm と 967rpm の 2 条件、土壌の含水率を 10.2%、11.9%、13.2%、16.2% の 4 条件、耕うん回転は 1 回耕と 2 回耕とし、同一経路を耕うんした。以上の条件を組み合わせ計 16 条件で実験を行った(表 1)。



図 1 センサ取り付け位置

表 1 実験条件

操作内容	土壌条件	
	含水率	耕うん回数
551rpm	10.2%	1 回耕
	11.9%	
967rpm	13.2%	2 回耕
	16.2%	

(2) 振動時系列データに基づく異常検知

機体の稼働状況の変化から正常な状態とは異なる機械の異常の検知を行った。実験では、トラクタ、田植機、自脱コンバインの振動時系列データを計測した。また、自脱コンバインについては、走行部のゴム履帯を異なる3つの張りの条件で走行し、機体の並進加速度及び回転角速度を測定した。測定したデータを用いて K 最近傍法、マハラノビス距離による異常判定を行い、二つの手法の比較を行った。

実験(2) - 1: 自脱型コンバイン、トラクタ、田植機を供試機として用いた。コンバインおよび田植機では前方トラックフレーム上、トラクタでは前方エンジン上部にワイヤレス9軸モーションセンサを取り付けた。サンプリング周波数は200Hzで3軸の並進加速度および3軸回りの角速度を測定した。トラクタでは、作業機としてプラウ、ディスクロータ、サブソイラを用いてそれぞれ測定を行った。

実験(2) - 2: 異常データを意図的に収集するため、コンバインのゴム履帯の張りを適切な状態(条件1)、左側履帯のみを緩めた場合(条件2)、両側の履帯を緩めた場合(条件3)での剛性路面の走行実験を行った。

4. 研究成果

(1) トラクタ耕うん作業時の振動時系列データの計測と作業状態の分類

特徴量の抽出および学習データの前処理として、計測した並進の3軸加速度 $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ から合成加速度 $a(t)$ を以下の式に基づき算出する。

$$a(t) = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2} \quad (1)$$

分類学習における教師データ数を確保するため、一つの耕うん条件における合成加速度時系列データを7つの部分時系列に分け、それぞれの部分時系列について特徴量抽出を行った。特徴量の抽出に関しては、既往の研究(真部ら, 2015)を参考に合成加速度時系列データより一般的な統計量と時系列の振動特性に関するものをそれぞれ算出し、多次元ベクトルとして構成する。一般的な統計量として、平均値 $\bar{a}$ 、中央値 $\tilde{a}$ 、総和値 $S_a$ 、最大値 $a_{max}$ 、標準偏差 $\sigma_a$ を採用した。時系列の振動特性に関する特徴量として、高速フーリエ変換後のスペクトルの平均周波数 $\bar{f}$ および自己回帰モデルの自己回帰係数 $\phi_1, \phi_2$ を採用した。自己回帰モデルのモデル係数推定には、Yule-Walker法を用いモデルの次数は2とした。以上の6つの特徴量をトラクタ機体および作業機に設置したセンサから得られる合成加速度より算出することで、最終的に16次元の特徴ベクトルを得る。上記の16次元の特徴ベクトルを入力として、表1に基づく16の作業パターンの分類学習を行った。分類学習には Matlab 2021a (Mathworks社)を用いて、k近傍法、決定木、線形判別分析、SVM、アンサンブル学習の5つの分類学習器を採用して行い、その精度を比較した。各学習手法において必要なパラメータおよび解析条件を表2に示す。

表3に各耕うん条件での作業速度を示す。土壌含水率の増加に伴い耕うん時の作業速度は低下した。これは、土壌含水率が増加するにつれて、耕うん抵抗が増加するためである。また、1回耕より2回耕において作業速度が低下した。これは、2回耕では、土が軟らかくなり、走行時のタイヤの沈下やスリップによる影響と考えられる。

表2 分類学習器の設定

	手法	各種設定
(1)	KNN	k=1,5,10,100
(2)	CART	分岐基準=Gini 係数
		分割数=4,20,100
(3)	LDA	線形判別
(4)	SVM	カーネル Gauss 関数
		スケール=0.61,2.4,9.8
(5)	EL	部分空間判別

表3 作業条件と耕うん速度

		PTO 回転数	
含水率	耕うん回数	551rpm	967rpm
10.2%	1回耕	0.177	0.177
	2回耕	0.174	0.175
11.9%	1回耕	0.165	0.164
	2回耕	0.156	0.162
13.2%	1回耕	0.166	0.172
	2回耕	0.160	0.171
16.2%	1回耕	0.150	0.152
	2回耕	0.144	0.156

図2に座席下の加速度データを示す。作業条件はPTO回転数551rpm、耕うん回数1回耕である。含水率10.2%と含水率16.2%での加速度波形には明瞭な差異は確認されない。次に図3に周波数解析の結果を示す。時系列波形とは異なり、周波数では含水率の違いによるスペクトルの差異が確認された。本研究では、加速度センサを運転席下とロータリフレーム上の2箇所に取り付けた。そこで、センサの取り付け位置と個数(特徴量の数)が分類精度に与える影響を確認するため、運転席下の計測データのみの場合(条件A:8特徴量)、ロータリ上部のみ場合(条件

B：8 特徴量）および両方のデータ採用した場合（条件 C：16 特徴量）における分類学習を行った。その結果を表 4 に示す。なお，KNN の結果は最も精度が高かった K=1，CART は分割数=20，SVM はカーネルスケール=4.5 で解析した結果である。

1 つセンサのみ用いた場合の分類精度は 座席下だけにのみ取り付けられた場合では，最高で 75.9%（LDA），最低で 56.3%（CART），ロータリフレーム上にのみ取り付けられた場合では，最高で 78.6%（LDA），最低で 66.1%（CART）であった。どちらも LDA の識別精度が最も高く，CART の識別精度が最も低くなった。センサを 2 つ用いた場合の分類精度は，最高で 95.5%（EL），最低で 75.9%（CART）であった。センサを 2 つ用いた場合，どの分類手法を用いた場合においても分類精度は向上し，最も精度の低い CART においてのみ 75.9%と唯一 80%以下の精度となった。

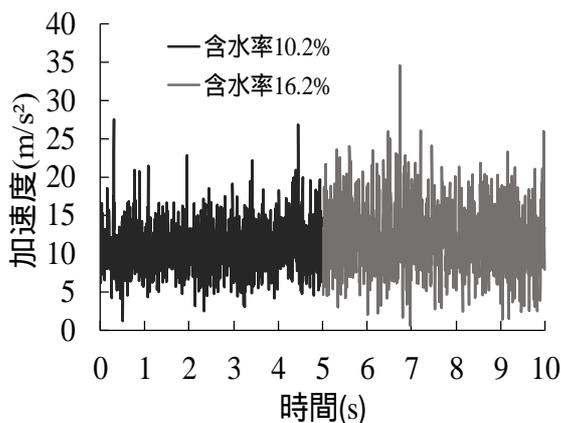


図 2 合成加速度（機体側）

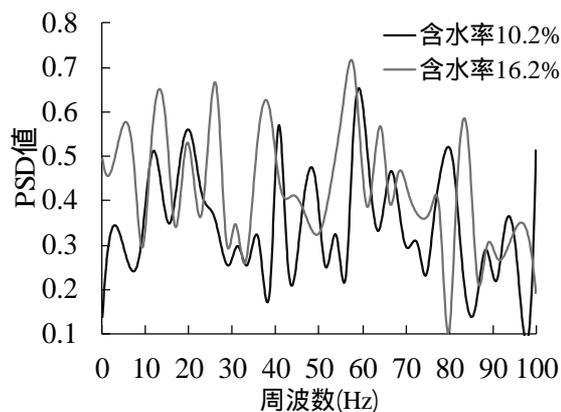


図 3 周波数解析結果

表 4 分類学習結果

分類手法	A	B	C
KNN(k=1)	66.1%	75.9%	88.4%
CART(分割数 20)	56.3%	66.1%	75.9%
LDA	75.9%	78.6%	91.1%
SVM(カーネルスケール 4.9)	67.9%	75.9%	89.3%
EL	75.0%	76.8%	95.5%

A:座席下のセンサのみ

B:ロータリフレーム上のセンサのみ

C:両方のセンサ

## (2) 振動時系列データに基づく異常検知

本研究では，並進 3 軸加速度および 3 軸周りの角速度の計測データを用いて，マハラノビス距離，K 最近傍法（井出，2007，2009）による異常の検知を行った。まず，正常時データを 3000 点（15s），異常検知対象となる異常時データ 500 点（2.5s）を抽出し，それぞれのマハラノビス距離の累積度数および最大値を算出した。その結果を表 5 に示す。マハラノビス距離として定義された異常度はホテリングの  $T^2$  法が成り立つことが知られている。つまり，データ数  $N$  変数の数  $M$  の場合，正常時のデータ群についてのマハラノビス距離は近似的に自由度  $M$ ，スケール因子 1 のカイ 2 乗分布に従う。例として，サブソイラ作業時の結果を図 4 に示す。誤報率を 5% 場合のマハラノビス距離はおよそ 2~3 の範囲に含まれ，1% の場合は機械や作業によって多少ばらつきがあり 2.5~5 程度の範囲となった。また，マハラノビス距離の最大値はトラクタのディスクロータ時の 8.44 であった。また，サブソイラでの心土破碎作業時測定時にサブソイラを土中から引き抜く際に，前輪の浮き上がりが発生した。前輪浮き上がりを異常状態とみなし，その前後のデータを用いた解析の結果，マハラノビス距離の最大

表5 実験(2)-1 で得られたデータから算出したマハラノビス距離の累積度数と最大値

マハラノビス距離における累積度数	コンバイン(脱穀部)	コンバイン(トラックフレーム部)	トラクタ(プラウ)	トラクタ(ディスクロータ)	トラクタ(サブソイラ)	田植機
累積度数95%	2.42	2.3	2.03	2.83	2.25	2.43
累積度数99%	3.41	4.21	2.67	4.78	3.8	3.41
マハラノビス距離最大値	5.55	6.2	4.21	8.44	7.1	5.1

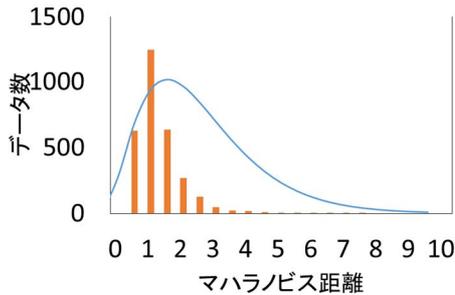


図4 サブソイラを用いたトラクタにおける正常作業時のマハラノビス距離

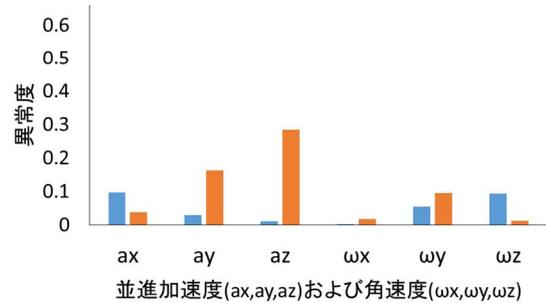


図5 サブソイラ作業時のk最近傍法による異常度の比較

値(浮き上がりが起こった発生時)は58.5と正常時の比べ極めて高い値となった。

以上の結果から、農業機械の振動時系列データから算出したマハラノビス距離が概ね10を超える場合、異常とみなせる。次に、正常時のデータ群および前輪浮き上がり時のデータ群に対してk最近傍法を用いた異常度の算出を行い、その結果を図5に示す。正常時においても0.1程度の異常度の値を示していることから何れかの変数でこれを超える大きな値を示せば、その変数に関連する異常が発生している可能性が高いことになる。前輪浮き上がり時では、上下加速度(az)の値が約0.3と正常時の最大値の3倍の値を示した。これはセンサをエンジン上部に取り付けたため前輪が浮き上がる際に後輪を中心とした円運動の影響を大きく受け異常度が高くなったと考えられる。本研究では、最近傍kの値は2に設定したが、変数の数やデータの種類によっては適切なkの値を理論的に決定する方法については、検討の必要がある。

次に、実験(2)-2において計測されたデータを用いてマハラノビス距離を算出した。正常時および異常時のデータは500点(2.5s)で区切って計算を行った。それぞれのマハラノビス距離の累積度数および最大値を表6に、k最近傍法による異常検出の解析結果を図6にそれぞれ示す。表6より、条件2,3ともに累積度数95%,99%,最大値において条件1よりも大きく、分布が少し広い結果となった。また、図6より、正常である条件1の異常度は他の2条件に比べ、顕著に小さな値となった。全体的に両側の履帯を緩めた条件3よりも片側履帯を緩めた条件2の方が大きな異常度を示した。これは片側だけを緩めた場合、左右で走行抵抗の差が大きくなりロールやヨーイングの挙動に影響を受けるためであると推測される。

表6 実験(2)-2 で得られたデータから算出したマハラノビス距離の累積度数と最大値

	(I)	(II)	(III)
累積度数95%となるマハラノビス距離(平均値)	1.92	2.64	4.45
累積度数99%となるマハラノビス距離(平均値)	2.62	3.26	5.5
マハラノビス距離最大値	3.54	4.3	7.32

- : 履帯の張りが適切な状態
- : 左側の履帯のみを緩めた状態
- : 両側の履帯を緩めた状態

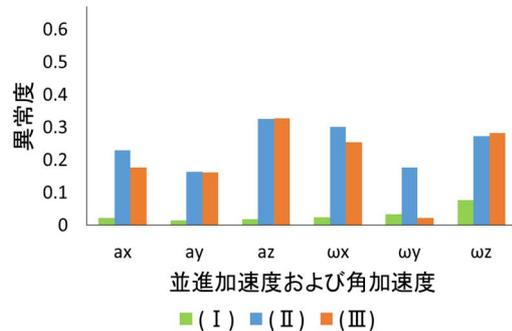


図6 履帯の張り変更時のk最近傍法による異常度の比較

参考文献

井出剛, 2007. 近傍保存原理による異常検知. 2007 年情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2007)  
 井出剛, 2009. グラフの学習による相関異常の検出, データマイニングと統計数理研究会(第9回)  
 真部雄介, 松寄晃司, 菅原研次, 2015. 複数の歩行状態に対応した加速度センサに基づく人物識別. 日本知能情報ファジィ学会誌 27(5), 711~722

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. Phon, E. Inoue, M. Mitsuoka, T. Okayasu, Y. Hirai	4. 巻 85
2. 論文標題 Detection of Target Reference Points of a Hand Tractor based on Transfer Path Analysis Technique	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 170-179
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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 諸隈賢吾、光岡宗司、井上英二、岡安崇史、平井康丸
2. 発表標題 機械学習による耕うん作業時の振動時系列データに基づく作業状態把握に関する研究
3. 学会等名 第79回農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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