

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	ZHU JIAJUN
論文題目	Object Detection in Paddy Field for Robotic Combine Harvester Based on Semantic Segmentation (セマンティックセグメンテーションに基づくロボットコンバインのための物体検出)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、農用トラクタやコンバインなどの農業車両では、自動で効率的な農作業を行うために自動操舵システムや自動運転システムの利用が可能となっている。しかし、これらのシステムを安全に運用するには、依然として人間による監視が必要である。ロボット農機による完全な自動作業を実現するには、物体を検出するセンサ性能が、人間と同等かそれを上回る必要がある。また、リアルタイムでの物体検出が可能な処理速度を有する検出アルゴリズムが必要である。</p> <p>本研究では、ロボットコンバインによる安全で高精度な作業実現に向けて、セマンティックセグメンテーション(SS)手法を適用して、収穫時期の水田における物体を、未刈取りの稲、その中の倒伏した稲、刈取り跡、畦、人、コンバイン、およびそれ以外の背景の7つのクラスに分類して検出する精度と予測速度の向上を行った。</p> <p>本論文は6章で構成され、第1章では、本研究の背景と目的を述べた後、第2章で供試したロボットコンバインと実験装置の概要について述べている。第3章では、水田における物体検出に利用した深層学習ベースの SS 手法であるイメージカスケードネットワーク(ICNet)を用いた物体検出について報告している。異なる6つのICNetモデルと1つの完全畳み込みネットワーク(FCN)モデルを提案し、トレーニングとテストを行った。その結果、ICNet-VGG11が、水田画像のセグメンテーションにおいて、ピクセル精度、クラス平均精度、および mean IoUが最も高い性能を示した。しかし、畦の検出はコンバインと畦が近い場合にのみ検出が可能であり、未刈取りの稲と倒伏した稲の検出精度は低いものであった。それにもかかわらず、このモデルは、コンバイン収穫にとって必要な倒伏した稲の存在を高い確率で検出が可能であった。したがって、SS手法は倒伏した稲の検出に関して精度と予測速度の改善が必要であったが、未刈取りの稲、倒伏した稲、稲の刈取り跡、畦、人、コンバインの検出には有用であった。</p> <p>第4章では、SS手法の精度と予測速度を向上させるため、新しいSSモデルであるロボットコンバインネットワーク(TRCNet)が設計された。TRCNetの設計では、空間情報の抽出が弱まる一方、コンテキスト情報の抽出が強化された。予測速度の向上のため、5つの異なる軽量なCNNをTRCNetのバックボーンとして適用した。次に、TensorRTを使用して、リアルタイム検出のためのすべてのモデルの予測速度を高速化した。実験では各モデルの検出精度と予測速度を評価し、メモリ容量や処理能力に制限のある車載用エンベディッドプラットフォームとしてJetson TX2を用いてテストした。最も高いmean IoUを示したモデルはTRCNet-MobileNetV3-Small×4であった。一部のクラスでは相対的に高いIoUを達成したが、他のクラスに関しては距離が離れていることによる誤検出によりIoUは低かった。検出エリアの閾値として1000ピクセルを設定し</p>			

て倒伏した稲の検出精度を高めた結果、IoUが0.914以上で倒伏した稲を検出できた。本実験では、TRCNet は ICNet よりもセグメンテーションの精度と予測速度が高く、最速のモデルではリアルタイム検出に十分な47.48 FPSを達成した。

第3章と第4章のモデルトレーニングでは、ラベル付きデータに遠く離れた物体が含まれていた。トレーニングデータとして、これらの遠方に写った物体を正確に分割してラベル付けすることが難しく、特に未刈取りの稲と倒伏した稲を正確に分割することは困難であった。この問題に対処するために、遠方の物体は背景クラスとしてラベル付けされたが、これでは近くの物体の誤検出につながる可能性がある。このため、第5章ではデプスカメラを使用して、トレーニング用に近くのオブジェクトのみを抽出して用いた。この方法により、遠くの物体の影響が排除され、ラベル付け速度が向上し、結果としてトレーニングデータの品質が向上し、データ量が増加した。水田内の物体を検出するための SS モデルとして、ディープデュアル解像度ネットワーク (DDRNet) を用い、さらに予測速度を向上するため、Up-DDRNetにアップグレードしたネットワークを用いた。提案した SS モデルのトレーニングとテストのために、オリジナルと距離でフィルター処理された2つの異なるデータセットを作成した。これにより、高品質かつ大量のトレーニングデータが提供され、SSモデルの精度が向上した。テストされたモデルの中で、Up-DDRNet-re1が精度と予測速度に関して最も高いパフォーマンスを発揮し、Jetson TX2 でのリアルタイム検出を可能にした。ただし、畦クラスでは誤検出によりIoU が低くなり、倒伏した稲のクラスと未刈取りの稲クラスではクラス間の類似性によりIoU が低くなった。これには、検出エリアの異なる閾値を設定することで、畦、人、倒伏稲の有無の検出精度の改善を行った。

第6章では、セマンティックセグメンテーションによる収穫時期の水田における未刈取りの稲、倒伏した稲、刈取り跡、畦、人、コンバイン、およびそれ以外の背景の分割は高い精度で実時間処理が可能であることを述べ、今後の将来展望についても触れ、本論文を総括している。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

今後日本だけでなく世界の農業において、利用が期待されるロボット農機や自動運転技術には、作業能率の向上と安全確保のため、作業環境下での様々な物体検出をリアルタイムで行うことが必要である。本論文は、稲収穫作業を行うロボットコンバインを対象にして、水田内でロボット周囲の物体を分類するセマンティックセグメンテーションモデルを提案し、車載を前提としたプラットフォームでも高い精度でリアルタイム処理を実現している。評価できる点は、以下の通りである。

1. 水田内の稲収穫環境において物体を検出し、未刈取りの稲、倒伏した稲、稲の刈り跡、畦、人、コンバイン、およびそれ以外とする7つのクラスに分類すると共に、その検出性能を明らかにした。
2. 未刈取りの稲と倒伏した稲を識別する検出精度を向上させるため、デプスカメラを用い、距離情報の利用によって大幅に倒伏した稲の検出精度が向上した。
3. 提案した深層学習モデルが、メモリ容量や処理能力に制限のある車載用エンベディッドプラットフォームでもリアルタイムかつ十分な精度で7つのクラスに分類できることを示し、その有用性を明らかにした。

以上のように、提案した深層学習モデルを用いることで稲収穫時にロボットコンバインによる未刈取り稲、倒伏した稲、稲の刈り跡、畦、人などの物体検出が可能となり、ロボット農機の安全性の確保と農作業の精度向上に貢献できることから、フィールドロボティクス、農業システム工学、生物センシング工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和5年6月20日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）