

学 位 論 文 題 名

うね追従制御のための作物列検出法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、環境負荷低減のために化学農薬に代わる物理的防除・除草法への期待が高まっているが、これに応えるには、根際や株間まで処理する高精度で省力的な作業機が必要である。中耕、除草、間引きなどの栽培管理作業では、作業部位を正確にうねに合わせるために、運転者は多くの時間を後方の作業機位置を監視しながら運転しており、さらなる高精度化は運転者に過大な負担を強いるものとなる。本研究では、トラクタ自律走行や作業機自体の自動うね合わせなど、栽培管理作業におけるうね追従制御システムへの適用が可能な作物列検出センサを開発することを目的とし、生育初期段階の脆弱な作物や欠株への対応を考慮して、作物を列として光学的に検出する方法について検討する。第 1 章では以上のような研究背景と研究目的を述べている。

1. 作物列検出法

本研究の作物列検出手法は、前方の作物列を見下ろすカメラの全視野を遠視野と近視野に分割し、それぞれの視野毎に画像輝度を縦方向に積算して作物部を抽出する独自の手法を採用している。第 2 章では、広範囲な外光条件や土壌色条件下でも安定した作物列検出を実現するため、ビデオカメラの RGB カラー信号を使用する手法を検討し、 G , R 積算輝度の間で $G-R$, あるいは G/R の演算を行うことにより、安定して作物部が抽出できることを明らかにした。したがって、抽出した作物部に対応する積算輝度演算値のピーク位置を遠近両視野で結んだ直線は作物列に相当するため、カメラに対する作物列のオフセットと方向角が実用的精度で検出でき、2 次元画像を 2 値化して作物列を検出する一般的な方法に比べて検出時間の大幅な短縮が可能と判断された。

2. 基本検出システムの検討

第 3 章では、本検出手法を用いて試作したハードウェア処理システムおよびソフトウェア処理システムについて、検出性能、特性などを定置実験により明らかにし、実用システムとしてどちらが適当かを比較検討した。

ハードウェア処理システムは、本検出手法の重要部である縦方向輝度積算をカラーラインセンサと回転ミラーでハードウェア的に行うことで高速処理を実現したものであり、低速な演算装置でも実用的な処理速度が得られるのが特徴である。ソフトウェア処理システムは、縦方向の輝度積算を含めたすべての処理をコンピュータ上のソフトウェアで行うものである。処理速度はハードウェア処理システムに劣るが、検出アルゴリズム変更の自由度が高いのが特徴である。

これら両システムの特徴に加えて、圃場における定置検出実験により、両システムの実用面から見た性能特性を比較検討した。両システムともに誤検出が約 20% 生じ、この点に対する対策が必要と判断された。検出誤差については、ハードウェア処理システムでは、オフセットと方向角

の誤差平均がそれぞれ 3.02～3.24 cm, 1.18～1.20° となり、カラーラインセンサの高性能化が必要と判断された。ソフトウェア処理システムでは、オフセットと方向角の誤差平均がそれぞれ 2.38～2.64 cm, 0.81～1.01° となり、実用値に近い値が得られた。ソフトウェア処理システムでの処理時間は約 100 ms/frame となり、ハードウェア処理システムより長い時間を要したが、高速な CPU を使用するなどにより処理速度をさらに向上させる余地はあり、ソフトウェア処理システムの方が有利な点が多いと結論できた。

3. 実用検出システムの開発と改良

第 4 章では、ソフトウェア処理システムの実用性能を検討するため、走行中のトラクタから撮影した連続画像を使用して作物列検出実験を行った。また、基本検出システムでの 1 列検出とともに、種々の作物条間への対応も考慮して、中央 2 列を同時検出する方法についても検討した。

1 列検出では、検出精度向上のため、遠視野、近視野の分割位置を変更した。検出実験の結果、オフセットと方向角の R.M.S. 検出誤差がそれぞれ 1.68～1.75 cm, 0.65～1.08° となり、良好な検出精度が得られ、誤検出もゼロとなった。また、1 画像当たりの検出時間は 5～6 ms となり、処理速度の点でも実用的な性能が得られた。

2 列検出でも視野の分割位置を変更し、目標となる 2 列を適切に選択するためのアルゴリズムを導入するなどの改良を施した。誤検出はゼロとなったが、オフセットと方向角の R.M.S. 検出誤差はそれぞれ 3.64～4.73 cm, 0.39～0.42° となり、特にオフセットの検出精度に課題が残った。これは、画像に映る作物列がハの字形に斜めになるためである。1 画像当たりの検出時間は 1 列検出と同等の 5～6 ms となり、処理速度の点では、十分に実用的な性能が得られた。

第 5 章では、2 列検出法で課題となった検出精度低下を解決するため、地上座標系画像を用いた検出手法を開発して、検出実験によりその効果を検討した。

地上座標系画像は作物列を真上から見たものに相当し、画像上の作物列が垂直に近くなるため、高精度検出が期待できる。画像の視野分割についても、5 視野に分割して最小 2 乗法により回帰直線を求め、さらなる検出精度の向上を図った。これらの改良の結果、オフセットと方向角の R.M.S. 誤差はそれぞれ 2.17～2.91 cm, 0.22～0.32° となった。また、演算量増加のため、検出時間は 20～30 ms/frame と改良前より長くなったが、十分に実用範囲内であった。

4. 自動うね合わせ除草機への応用

第 6 章では、改良した 2 列検出用作物列センサを除草機の自動うね合わせ制御に応用し、その効果を検討した。この除草機はうね間だけでなく株間除草にも対応して高精度のうね合わせを要求するが、本システムを作業機に付加することにより、運転者は前方のみを向いて操舵に専念できるようになる。

試作したシステムは、作業機と作物うねのオフセットを作物列センサで検出し、油圧シリンダにより作業機全体を横にスライド移動させてうね合わせする構造とした。圃場実験の結果、走行速度が遅いとき (0.42 m/s) には、うね合わせ精度の向上が確認されたが、走行速度が速くなるにしたがって、うね合わせ精度が悪化した。これは、油圧ポンプの流量不足による制御遅れが原因であり、作業内容に応じてスライド移動機構の可変速化などを行えば、速い走行速度においても実用的なうね合わせ精度が実現できると期待できた。

以上の結果より，本研究で開発した作物列検出法は実用的な精度と検出速度を有し，自動うね合わせ制御に使用することにより，うね合わせ精度の向上が可能であることが明らかとなった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 井 宗 宏

副 査 教 授 寺 尾 日出男

副 査 教 授 伊 藤 和 彦

副 査 助 教 授 端 俊 一

学 位 論 文 題 名

うね追従制御のための作物列検出法に関する研究

本論文は、図 91, 表 20, 引用文献 74 を含み、7 章からなる総頁数 181 の和文論文であり、他に参考論文 5 編が添えられている。

近年、化学農薬に代わる物理的防除・除草法への期待が高まり、根際や株間まで処理する高精度な作業機が求められている。また、現状の中耕除草作業などでは、正確なうね合わせのために、運転者は多大な時間を後方の作業機位置を監視しながら運転しており、運転者に過大な負担を強いている。本研究は、高精度・省力的な栽培管理作業を実現するためのうね追従制御システムに適用可能な作物列検出法の開発を目的としている。

(1) 作物列検出法の開発

生育初期の脆弱な作物に対応するため、作物を光学的に検出する方法を採用した。前方の作物列を見下ろすカメラの全視野を遠視野と近視野に分割し、それぞれの視野毎に RGB カラー信号の G, R 輝度を縦方向に積算して $G-R$ あるいは G/R の演算を行うことにより各視野における作物列の位置を検出し、カメラに対する目標作物列のオフセットと方向角を算出するという独自な方法を開発した。本手法は、広範囲な外光条件や土壌色条件下でも安定して作物列を検出することができ、画像を 2 値化して検出する一般的な方法に比べ、検出時間の大幅短縮が可能であることが認められた。

(2) 基本検出システムの検討

本検出法の主要部である縦方向輝度積算をカラーラインセンサと回転ミラーで行うハードウェア処理システムと、縦方向の輝度積算を含めたすべての処理をソフトウェアで行うソフトウェア処理システムを試作し、検出性能・特性を明らかにし、実用性を比較検討した。前者は高速処理が特徴であり、後者は自由度が高い検出アルゴリズムに特徴がある。

圃場における定置検出実験の結果、両システムともに誤検出が約 20% 生じ、これに対す

る対策が必要と認められた。検出誤差については、オフセットと方向角の誤差平均が、ハードウェア処理システムでは、それぞれ 3.02～3.24 cm, 1.18～1.20° であったのに対し、ソフトウェア処理システムでは、それぞれ 2.38～2.64 cm, 0.81～1.01° と、実用値に近い値が得られた。ソフトウェア処理システムでの処理時間は約 100 ms/回と長い時間を要したが、高速化の余地はあり、ソフトウェア処理システムの方が有利であると結論した。

(3) 実用検出システムの開発と改良

ソフトウェア処理システムの検出精度向上をはかるため、視野の分割位置を変更し、走行中のトラクタから撮影した連続画像により作物列検出実験を行い、実用性能を検討した。また、より実用的な中央 2 列を同時検出する方法についても検討した。

1 列検出では、誤検出も全くなく、オフセットと方向角の R.M.S. 検出誤差がそれぞれ 1.68～1.75 cm, 0.65～1.08° , 検出時間は 5～6 ms/回 と、実用的な性能が得られた。一方、2 列検出においては、誤検出はゼロ、検出時間 5～6 ms/回, R.M.S. 検出誤差の方向角 0.39～0.42° と良好であったが、オフセットのそれは 3.64～4.73 cm と課題が残った。

2 列検出での検出精度向上のため、地上座標系画像を用いた手法を開発し、視野を 5 分割して最小 2 乗法により回帰直線を求める方法とした結果、オフセットと方向角の R.M.S. 誤差はそれぞれ 2.17～2.91 cm, 0.22～0.32° となり、検出精度が向上した。演算量増加のため、検出時間は 20～30 ms/回と長くなったが、実用範囲内と認められた。

(4) 自動うね合わせ除草機への応用

改良した 2 列検出法を株間除草機の自動うね合わせ制御に応用し、その効果を検討した。試作システムは、検出したオフセットにより、油圧シリンダで作業機全体を横にスライド移動させてうね合わせをする構造とした。圃場実験の結果、走行速度が 0.42 m/s の時には、平均追従誤差 1.59～2.33 cm と良好な精度であったが、走行速度が速くなると、うね合わせ精度が悪化した。これは、油圧ポンプの流量不足が原因であり、流量を増大することにより、速い走行速度においても実用的なうね合わせ精度が実現できることを明らかにした。

以上の研究結果は、新たに開発した作物列検出法が実用的な精度と検出速度を有することを実証し、自動うね合わせ制御に使用することにより、うね合わせ精度の向上が可能であることを明らかにしたものであり、学術上応用上高く評価される。よって審査員一同は、岡本博史が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。