

学 位 論 文 題 名

農用自律移動ロボットのナビゲーションに関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は未来型農業を展望する上で不可欠な農用自律移動ロボットに最適なナビゲーションシステムを開発することを目的とした。農用車両は使用される環境が主に屋外のオフロードであることから、運動の非線形性が著しく、工業分野で使用される線形化手法をそのまま適用することはできない。そこで第1に、ニューラルネットワーク（NN）を用いて非線形なまま車両運動を記述し、制御対象となる車両運動のモデルリングを行った。第2に、結果の検証と農用車両を智能化する条件を検討する実験車両を試作した。第3に、農用車両の運動制御に不可欠な位置・方位計測法を考案し、その有効性を検討した。第4に、農用車両の走行制御法を考案し、その有効性を検証した。以上の結果から、農用移動ロボットとして運動系、知覚系、制御系の具備する諸条件を提示した。

車両運動のモデリング

非線形動力学モデルに適用可能なNNを使用することで車両運動を非線形なまま記述する2つの順モデルを考案し、それぞれをオフラインモデル、オンラインモデルと呼称した。オフラインモデルは初期状態量を与えるだけで、出力の再帰的な入力と各時刻の操作量から、1秒後の状態量を出力するモデルである。本モデルは予め与えられた走行スケジュールにより走行が可能であり、車両運動を記述するシミュレータとして使用できる。一方、オンラインモデルは各時刻の状態量と操作量を与えることで、1秒後の状態量を出力するモデルである。後者は各時刻毎の状態量が入力されるので、NNの学習機能を活用して走行路面の時間的・空間的変動にも適応可能である。それぞれのモデル精度の比較評価を行った結果、オフラインモデルは学習に使用した走行パターンに対して、y方向速度3.4cm/s、ヨーレート0.035rad/sの最大誤差で、また、学習していない走行パターンに対しても4.6cm/s、0.030rad/sの最大誤差で記述が可能であった。また、オフラインモデルは重畳誤差により、22秒間走行時の終端にて80cmの誤差を生じたのに対し、オンラインモデルは36cmの重畳誤差に抑制されることを確認し、本モデルの逐次学習効果を確認した。

さらに、NNを用いた運動モデルの有効性を検討するため、線形化手法を用いた物理モデルとの精度比較を行った。両者の差は特に非線形性の著しい大舵角領域に現れ、物理モデルはy方向速度に対して最大4.3cm/sの誤差であるのに対し、NN車両運動モデルは最大2.7cm/sとなった。これはNN車両運動モデルは横滑りを考慮されていない物理モデルよりも忠実に車両運動の記述が可能であることを意味する。

以上の結果から、農用車両をロボット化する上でその運動を非線形で取り扱うことの優位性を実証した。また、車両運動を時変システムとしてモデル化する手法も確立できた。

実験車両の試作

試作車両の仕様および機能を検証するための自動走行実験を行い、車両シミュレータの作成を行った。その結果、試作車両は予め計画された操舵時系列から予想される走行経路を走行でき、各センサ、アクチュエータ類は正常に動作することを確認した。また、自動走行によっ

て得られたデータから作成した車両シミュレータは、人為操作に見られる実舵角変動がなく、 y 方向速度、ヨーレートそれぞれのR.M.S.誤差が学習データは1.08cm/s, 0.04rad/s, 未学習データは1.06cm/s, 0.013rad/sと、人為操作時と比較して高精度な車両シミュレータの作成が可能となった。

以上の結果から、農用車両をロボット化する最小限必要な運動機能および条件を提示した。

位置・方位計測システムの開発

農用移動ロボットのナビゲーションを行う上で不可欠な位置・方位計測システムを開発した。

方位計測システムに使用した磁気方位センサ（GDS）は周辺磁気環境の影響を受けやすく、また、従来の傾斜補正法がそのままでは車両に適用できないという問題がある。そこで、NNを使用した補正法（GDSネットワーク）を考案し、静止状態で方位計測・傾斜補正を行った結果、従来の傾斜補正法では最大二乗誤差が 92.7° 、R.M.S.誤差が 5.7° であったのに対し、傾斜補正ネットワークを使用することで 6.4° 、 1.0° とそれぞれ6.9%、17.5%になり、GDSネットワークの傾斜補正効果を確認した。また、約 5° 程度の傾斜地において自律走行実験を行った結果、GDSネットワークを使用しない場合は最大 20° の方位誤差が生じたのに対し、使用時は最大 2° の方位誤差で走行可能なことが明らかとなり、GDSネットワークを使用した方位計測法の優位性を実証した。

位置計測システムは、画像処理にもとづいた両眼立体視法を使用した方式を採用した。画像認識精度と計測速度が両立することを目的に色度変換行列、NNを使用した画像認識法を考案し、その有効性を検討した。その結果、両者とも約150m離れたマーカの認識が可能であった。また、静止点計測精度を測定した結果、100m $\times$ 40mの範囲で最大誤差37cm、60m $\times$ 40mの範囲では最大誤差13cm以内で計測可能であることを確認した。さらに、制御則にファジィ制御を用いた幅寄せ走行を行った結果、走行距離約10mで目標の幅寄せ幅2.5mに追従可能であることが明らかとなり、屋外環境下の位置計測に対する本手法の有効性が検証できた。

以上の結果から、農用移動ロボットに必要な高精度な知覚システムの構築が可能となった。

車両運動の非線形制御

位置・方位計測システムによって得られた情報をもとに、非線形な車両運動を制御するニューロコントローラを考案し、その有効性の検討を行った。

ニューロコントローラと車両シミュレータを用いた5種の目標経路に対する追従制御シミュレーションを行い、PID制御との追従精度比較を行うことで追従制御に対する有効性を検討した。その結果、車線変更走行に問題が見られたものの、PID制御は最大誤差14.8cmであるのに対し、2.6cmの誤差で追従可能であった。また、試作車両を用いた追従制御実験を行った結果、直線走行のようなほとんど操舵を必要としない走行で特に差異は認められなかった。一方、操舵を必要とする車線変更走行では、PID制御は最大誤差30.8cmであったのに対し、ニューロコントローラは17.3cmと最大誤差を44%程度に抑制することが可能となった。この事実から、非線形性の著しい走行に対するニューロコントローラの有効性が検証できた。

さらに、ニューロコントローラに自己修正機能を付加することで、適応制御への可能性を検討した。走行中の路面特性が変化する直角旋回走行シミュレーションを行った結果、オフラインコントローラはR.M.S.誤差が12.21cmであったのに対し、オンラインコントローラは2.86cmと、その誤差を23%に抑制することが可能であった。

以上の結果から、農用移動ロボットの時変系・非線形系に対する非線形適応制御器の設計に必要な諸データを提示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 寺 尾 日出男

副 査 教 授 高 井 宗 宏

副 査 教 授 伊 藤 和 彦

副 査 助教授 近江谷 和 彦

学 位 論 文 題 名

農用自律移動ロボットのナビゲーションに関する研究

本論文は総頁数163, 図112, 表24, 引用文献105を含む6章からなり, 他に参考文献6編が添えられている。

本研究は未来型農業を展望する上で不可欠な農用自律移動ロボットに最適なナビゲーションシステムの開発である。農用車両は使用される環境が主に屋外のオフロードであることから, 運動の非線形性が著しく, 線形化手法をそのまま適用することはできない。そこでニューラルネットワーク (NN) を用いて非線形なまま車両運動を記述し, 制御対象となる車両運動のモデルリングを行い, 次に, 結果の検証と農用車両を知能化する条件を検討する実験車両と車両の運動制御に不可欠な位置・方位計測法を開発し, 最後に, 車両の走行制御法を考案してその有効性を検証したものである。

車両運動のモデリング

非線形動力学モデルに適用可能なNNを使用し, 車両運動を非線形記述する2つの順モデルを考案し, それぞれをオフラインモデル, オンラインモデルと呼称した。オフラインモデルは初期状態量を与えるだけで, 出力の再帰的な入力と各時刻の操作量から, 1秒後の状態量を出力するモデルである。これは予め与えられた走行スケジュールにより走行が可能であり, 車両運動を記述するシミュレータとして使用できる。一方, オンラインモデルは各時刻の状態量と操作量を与えることで, 1秒後の状態量を出力するモデルである。後者は各時刻毎の状態量が入力されるので, NNの学習機能を活用して走行路面の時間的・空間的変動にも適応可能である。各モデル精度の比較評価を行った結果, オフラインモデルは学習に使用した走行パターンに対して, y方向速度3.4cm/s, ヨーレート0.035rad/sの最大誤差で, また, 未学習走行パターンに対しても4.6cm/s, 0.030rad/sの最大誤差で記述が可能であった。さらに, オフラインモデルは重畳誤差により, 22秒間走行時の終端にて80cmの誤差を生じたのに対し, オンラインモデルは36cmの重畳誤差に抑制されることを確認し, 本モデルの逐次学習効果を確認した。

NNを用いた運動モデルの有効性を検討するため, 線形化された物理モデルとの精度比較を行った。両者の差は特に非線形性の著しい大舵角領域に現れ, NN車両運動モデルは最大2.7cm/sとなった。これはNN車両運動モデルは横滑りを考慮されていない物理モデルよりも忠実に車両運動の記述が可能であった。

実験車両の試作

試作車両の仕様および機能を検証するための自動走行実験を行い, 車両シミュレータを作成した。その結果, 試作車両は予め計画された操舵時系列から予想される経路を走行でき, 各セ

ンサ、アクチュエータ類は正常に動作することを確認した。また、自動走行によって得られたデータから作成した車両シミュレータは、人為操作に見られる実舵角変動がなく、y方向速度、ヨーレートそれぞれのR.M.S誤差が学習データは1.08cm/s, 0.04rad/s, 未学習データは1.06cm/s, 0.013rad/sと、人為操作時と比較して高精度な車両シミュレータの作成が可能となった。

位置・方位計測システムの開発

方位計測システムに使用した地磁気方位センサ（GDS）は周辺磁気環境の影響を受けやすく、また、従来の傾斜補正法がそのままでは車両に適用できない。そこで、NNを使用した補正法（GDSネットワーク）を考案し、静止状態で方位計測・傾斜補正を行った結果、従来の傾斜補正法では最大二乗誤差が 92.7° 、R.M.S誤差が 5.7° であったのに対し、傾斜補正ネットワークを使用することで 6.4° 、 1.0° とそれぞれ6.9%、17.5%になり、GDSネットワークの傾斜補正効果を確認した。また、約 5° 程度の傾斜地において自律走行を行った結果、GDSネットワークを使用しない場合は最大 20° の方位誤差が生じたのに対し、使用時は最大 2° の方位誤差で走行可能なことが明らかとなり、GDSネットワークによる方位計測法の優位性を実証した。

位置計測システムは、画像処理にもとづいた両眼立体視法を使用した方式を採用した。画像認識精度と計測速度が両立することを目的に色度変換行列、NNを使用した画像認識法を考案した。その結果、両者とも約150m離れたマーカの認識が可能であった。また、静止点計測精度を測定した結果、100m×40mの範囲で最大誤差37cm、60m×40mの範囲では最大誤差13cm以内で計測できた。さらに、操舵制御則にファジィ制御を用いた幅寄せ走行を行った結果、走行距離約10mで目標の幅寄せ幅2.5mの案路に追従可能であり、屋外環境下の位置計測に対する本手法の有用性が確認できた。

車両運動の非線形制御

位置・方位計測システムからの情報をもとに、非線形な車両運動を制御するニューロコントローラを考案した。ニューロコントローラと車両シミュレータを用いた5種類の目標経路に対する追従制御シミュレーションを行い、PID制御法と追従精度の比較を行った。その結果、PID制御法は最大誤差14.8cmであるのに対し、ニューロコントローラは2.6cmの誤差であった。また、試作車両による追従制御実験では、直線的な走行時で特に差異は認められなかった。一方、車線変更させた走行時では、PID制御法は最大誤差30.8cmであったのに対し、ニューロコントローラは17.3cmと最大誤差を44%程度に抑制することが可能となった。この事実から、非線形性の著しい走行に対するニューロコントローラの有効性が検証できた。

さらに、ニューロコントローラに自己修正機能を付加して適応制御への可能性を検討したところ、走行中の路面特性が変化する直角旋回走行シミュレーション時で、オフラインコントローラはR.M.S誤差が12.21cmであったのに対し、オンラインコントローラは2.86cmとその誤差を23%に抑制することが可能であったとしている。

以上のように、農用移動ロボットとしての運動系、知覚系、制御系の必要条件を提示した本研究成果は、省力・省人化を目指す次世代農業機械の開発研究に不可欠なものであり、学術的にも高く評価できる。よって審査員一同は、最終試験の結果と併せて、本論文の提出者石井一暢は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格あるものと認定した。