

The Extended Path-generating Regulator for Control of Nonholonomic Mobile Robots

その他（別言語等）のタイトル	非ホロノミック移動ロボットの制御のための拡張経路生成形レギュレータ
著者	DAI Jun
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第372号
学位授与年月日	2015-03-23
URL	http://doi.org/10.15118/00005128

氏名	ダイ ジュン 代 軍
学位論文題目	The Extended Path-generating Regulator for Control of Nonholonomic Mobile Robots (非ホロノミック移動ロボットの制御のための拡張経路生成 形レギュレータ)
論文審査委員	主 査 准教授 花 島 直 彦 教 授 風 間 俊 治 教 授 寺 本 孝 司

論文内容の要旨

車両型移動ロボットはこの数十年間研究開発が進み、様々な分野に応用されている。その有望な応用の一つに、広大なエリアの環境調査がある。環境調査の用途では正確な位置座標および方位角の制御が必要であるが、一般の車両は非ホロノミック拘束を持つためそのような制御が難しいという側面がある。本研究は二輪車両型と四輪車両型の移動ロボットを対象とする。論文の前段では、経路生成形レギュレータ(以下 **PGR** と呼ぶ)を拡張し、二輪車輪型の移動ロボットを円/弧通路に追従させて走行させる手法について述べる。論文の後段では、四輪車両用 **PGR** を操舵角飽和がある場合にも適用できるように、原点への収束特性が分析することで得た新たな知見について論じる。

PGR は、運動制御の目的が達成できる経路関数群をあらかじめ用意しておき、移動ロボットはその経路関数一つに原点へ収束させるという手法である。**PGR** はその後、直線経路への追従問題に拡張された。ロボットの走行環境は道路、廊下および屋内であるが、その走行経路は多くの直線と円弧で構成される。そこで、**PGR** を円弧経路への追従問題に拡張することで、その適用範囲を広げることができる。ロボットの走行時、時間間隔がとても短い場合には、円弧を直線経路と見なすことができる。したがって、円弧上にその瞬間の局所座標を設定し、直線経路に沿う **PGR**

制御を逐次適用することで、円弧経路追従ができると考えられる。これを二輪車両型ロボットに適用しシミュレーションにより有効性を確認した。さらに、目標円弧への経路追従性を改善するために、可調整先読みという手法を提案した。改善したPGRの特性をMATLABでシミュレーションした結果、可調整先読みを行うことで、目標円弧追従特性が向上し、外乱に対しても強い特性を持っていることを示した。

次に、四輪車両型PGRの操舵角飽和問題について、原点への収束特性について解析した。PGRは前輪操舵後輪駆動の四輪車両型移動ロボット用に拡張され、さらに、制御則に内在する特異点問題を、フィードバックゲイン切替によって回避する方法が提案されている。しかし、この方法の下では、フィードバックゲインを切り替えて、ロボットが走行を再開する際に、操舵角の指令値は $\pm\pi/2[\text{rad}]$ になる。この時、指令値がロボットの最大操舵角を超過するため、操舵角が飽和し、ロボットは最小旋回円に沿って走行することになる。この論文では、操舵角飽和状態のロボットの収束特性を考察した。その結果、最小旋回円上の特異点の数と収束特性に強く関係があることを示す、特異点の数は最小の旋回円の中心位置に依存する。異なる位置での収束特性は領域を分けることによって明確にされる。最後に、特定領域の収束特性を改善するために、新たなフィードバックゲイン切替方法を提案した。さらにシミュレーションと実験結果に基づいて、収束特性の改善を確認した。

ABSTRACT

Nonholonomic mobile robots, which have been developed for several decades, have been applied widely in various fields. One promising application is environmental surveys of vast areas, which require precise location and orientation control. In this research, the two-wheeled and four-wheeled mobile robots are objects of study. The path-generating regulator (PGR) was extended to track the circle/arc passage and converge to the origin with steering angle saturation.

The PGR, which is a control method for robots so as to orient its heading toward the tangential direction of one of the curves belonging to the family of path functions, is applied to navigation problem for two-wheeled robot originally. Driving environments for robots are usually roads, streets, passages, and indoor. These tracks can be seen as consist of straight lines and arcs. In the case of small interval, arc can be regarded as straight line approximately, therefore we extended the PGR to drive the robot move along circle/arc passage based on the theory that PGR along straight passage. In addition, the adjustable look-ahead method is proposed to improve the robot trajectory convergence property to the

target circle/arc. The effectiveness is proved through MATLAB simulations on both the comparisons with the PGR and the improved PGR with adjustable look-ahead method. The results of numerical simulations show that the adjustable look-ahead method has better convergence property and stronger capacity of resisting disturbance.

Another focus of this work analyzes the influence of steering angle saturation to the convergent property in the PGR under the feedback gain switching strategy for car-like robots. The PGR has been extended to car-like robots. Moreover, its convergent region has been expanded by the feedback gain switching strategy. However, under this strategy, when the robot restarts after the feedback gain switches, the command of the steering angle tends to be close to $\pm\pi/2$ rad, which might exceed the maximum steering angle. This phenomenon causes steering angle saturation. The robot then drives along the minimum turning circle. In this paper, the convergent property of the robot under steering angle saturation is investigated. Results show that the convergent property is related strongly to the number of singular points, which depends on the center location of the minimum turning circle. The convergent properties at different locations are clarified through region division. An extended feedback gain switching strategy method is proposed to change the convergent property in the specific region. Based on simulation and experiment results, we summarize the convergent property related to the region and verify the proposed method.

論文審査結果の要旨

車両型移動ロボットの制御は、過去数十年の研究開発の歴史があり、近年では自動運転や自動非常ブレーキなどが市販の自動車に実装されるまでになってきている。移動ロボットの走行制御問題は、指定された経路に追従する問題と目標地点に収束させて停車する問題に大きく分けられる。これらの問題について最近、経路生成形レギュレータという手法が提案され、実車実験によりその有効性が示されている。この手法は、制御対象のモデルをチェーンドシステムに変換する必要がないなどの特長を有している。

この論文は、経路生成形レギュレータの適用範囲を広げるために、大きく2つの問題を扱っている。まず一つ目は、四輪車両型の移動ロボットに経路生成形レギュレータを適用した際の操舵角飽和问题の解析である。これまでに、目標地点に収束させる経路生成形レギュレータの制御則に内在する特異点問題を、フィードバックゲイン切り替えによって回避する方法が提案されている。しかし、この方法の下で

は、フィードバックゲインを切り替えて、ロボットが走行を再開する際に、操舵角の指令値は $\pm\pi/2$ [rad]になる。この時、指令値がロボットの最大操舵角を超過するため、操舵角が飽和し、ロボットは最小旋回円に沿って走行することになる。この論文では、操舵角飽和状態のロボットの収束特性を考察した。その結果、最小旋回円上の特異点の数と収束特性に強く関係があることを明らかにしている。さらに特異点の数が最小の旋回円の中心位置に依存することも見だし、収束特性による原点付近の領域分割も示している。

二つ目は、二輪車輪型の移動ロボットを円弧通路に追従させる手法の提案である。車輪型移動ロボットの走行経路は、直線と円弧、そしてその間の緩和曲線で構成される。これまで、直線経路に対する制御法は提案されていた。円弧経路において微小区間をとると線分に近似できることから、円弧上にその瞬間の局所座標を設定し、直線経路に沿う制御法を逐次適用して、円弧経路追従ができると考えられる。これを二輪車両型ロボットに適用しシミュレーションにより有効性を確認している。さらに、追従特性を改善するために、可調整先読み法を提案し、シミュレーションによりその効果を確認している。

以上より、この論文では経路生成レギュレータという移動ロボットの走行制御手法において、操舵角飽和という現実的な問題について新たな知見を見だし、円弧経路追従法を提案し効果を示していることから、博士（工学）の学位論文に値すると判断する。