

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	非線形力学系に基づく半自律リーダー・フォロワシステムのインタフェース設計
Title(English)	
著者(和文)	岩野航平
Author(English)	Kohei Iwano
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12688号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:岡田 昌史,土方 亘,武田 行生,西田 佳史,三浦 智
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12688号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	岩野 航平		審査員主査： Chief Examiner	岡田 昌史

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

災害・採掘現場における安全や労働環境の改善のために油圧ショベルの無人化施工が行われているが従来手法では作業効率が大幅に低下する。完全自律系による掘削を志向する従来研究が行われているが、緊急時の知覚・対応や状況に応じたタスク判断には人の操作と自律制御で役割分担を行う半自律制御が有効である。また、柔軟に目標軌道に収束するベクトル場である軌道アトラクタを有する非線形力学系を自律制御系に用いることで柔軟な操作介入を含む人との協働タスクの実現が可能となる。一方で、従来の軌道アトラクタは一つの軌道を実現するため一つのタスクを対象としており掘削作業へのそのままの適用は難しい。掘削作業ではタスクの成否や進行具合、環境の変化に応じて離散的かつ連続的にタスクの実行内容を変更する必要がある。また、現場ごとに作業領域の状況が異なるためそれに応じて作業タスクの軌道の形状を変更していく必要がある。本論文では、多種多様な作業タスクの状況に応じた柔軟な切り替えが求められるという特色を有する作業として掘削作業を取り上げ、油圧ショベルの遠隔操作を容易にし、操作負担を軽減する手法としてリーダー・フォロワロボットと非線形力学系を用いた半自律遠隔操作システムを開発することを目的とし、半自律系で多種多様なタスク実行が可能となるように制御系の構成要素の設計を行う。

第 1 章「序論」では、油圧ショベルの無人化施工技術の現状、および、遠隔操縦における環境情報提示技術や自律制御技術について概観し、無人化施工の操作を容易にするための技術として半自律制御系が有効であることを述べ、提案する半自律リーダー・フォロワ系の概要を述べる。

第 2 章「半自律制御系のシステム構成の概要」では、リーダー・フォロワロボットとアドミッタンス制御による手動操作と非線形力学系による自律制御とで構成されている半自律リーダー・フォロワシステムの設計について述べた後、構成要素である人への力覚提示と手動操作を行うための可変アドミッタンスを提案し、無負荷時の軽快な動作と掘削不可能な障害物の力覚提示による知覚を両立し、状況に応じた可変アドミッタンス制御を実現すると共に、掘削機を想定したリーダー・フォロワ系で有効性を検証する。

第 3 章「半自律制御系の離散的なタスク選択の設計」では、軌道アトラクタを有する非線形力学系における離散的タスク選択を実現するために、アトラクタの淀みと分岐アトラクタを含む自律制御系の設計を行う。アトラクタの淀みは軌道上の 1 点に収束する吸い込みのベクトル場とし、リーダー・フォロワロボットでアトラクタ上で一時停止と再開を実現する。分岐を持つ掘削軌道を設計するとともに、これに引き込ませるアトラクタを有する非線形力学系を用いた自律制御器を設計し、淀みと組み合わせることで、操作力の方向によってアトラクタの軌道を選択し、作業内容を選択することを実験により検証する。

第 4 章「半自律掘削制御系における淀みの歪みに基づく離散的タスク選択の優先度の設計」では、第 3 章で提案した離散的タスク選択において人の操作負担を軽減し、操作ミスを減らすためにタスク優先度の設計を行う。淀みに歪みを付することで、操作方向の提示のベクトル場を設計すると共に人の操作履歴に基づいて、操作頻度によってタスクの優先度を変更する歪みのパラメータの学習則を設計する。提案した淀みの歪み、学習則を含む半自律制御系を実験装置に実装し、歪みによる操作負担の低減、操作方向の提示、操作頻度に基づくタスクの優先度の変更を実現できることを実験で検証する。

第 5 章「半自律制御系の連続的な掘削位置の変更の設計」では、掘削位置を変更し広範囲を掘削するために軌道アトラクタの連続的なタスク選択の設計を行う。半自律制御系に座標変換を加え、掘削開始位置の変更を含めた軌道の連続的な変形を実現した。アドミッタンス制御器 (タスク選択) と座標変換 (タスク形状の変形) を一つの操作インタフェースで行うために、人の操作特性に着目し座標変換のスケールの推定に動特性を埋め込んだ拡張カルマンフィルタを用いることで周波数特性による操作の分離を行う。

第 6 章「類似タスク区別のための非線形力学系次元拡張の設計」では、離散的タスク選択において、分岐タスクの軌道間に分岐点以外の交差や近接が存在する状況で分岐軌道アトラクタを設計するために、ロボットの状態空間を拡張する方法を提案する。これまでに提案したタスク選択に加えて新たにかき集めタスクの選択を組み込み、操作力の方向によって類似タスク間の選択ができることを実験の中で検証する。また、淀みの歪みを用いて人の操作を誘導し、操作力の方向に基づいて拡張次元成分を変化させることで、拡張次元成分の変動不足に起因するタスク選択ミスを回避する手法を提案する。

第 7 章「大域安定性を有するアトラクタの新たな設計手法」では、ダイレクトフィードバックと軌道のオンライン変形を実現する新たな軌道アトラクタの設計手法を提案する。実際の操作データに基づいて現場で即座に使用可能な軌道アトラクタを設計するために、大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系の計算手法を提案する。また、急峻な障害物回避と軌道全体のシフトを両立可能なアトラクタ軌道のオンライン変形を実現するために、軌道パラメータの逐次更新における変化量を基底関数の次元ごとに重み付けし、重み行列を人の操作入力信号のスペクトラムに基づいて決定することで、操作力の周波数に応じて軌道の変形の急峻さを変更できる手法を提案する。

第 8 章「結論」では本論文を総括し、本論文における成果と今後の課題および展望について述べる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（工学）
学生氏名： Student's Name	岩野 航平		審査員主査： Chief Examiner	岡田 昌史	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Unmanned construction of hydraulic excavators has been used to ensure worker safety and improve the working environment at mining sites, however conventional unmanned construction techniques reduce work efficiency. The purpose of this paper is to develop an interface of a semi-autonomous tele-operation system using a leader-follower robot and a nonlinear dynamical system for unmanned hydraulic excavators.

Chapter 1 outlines the current state of the art in unmanned construction of hydraulic excavators, and outlines the proposed semi-autonomous leader-follower system, as well as environmental information presentation and autonomous control techniques for remote control.

Chapter 2 describes the design of the semi-autonomous leader/follower system, which consists of a leader/follower robot, manual operation by admittance control, and autonomous control by a nonlinear dynamic system.

Chapter 3 proposes an autonomous control system including an attractor with stagnation and bifurcation to realize discrete task selection.

Chapter 4 designs task priorities to reduce human operation burden and operation errors in discrete task selection. By adding distortions to the stagnation, I design a vector field for presenting the direction of operation and a learning rule for the distortion parameter that changes the task priority according to the frequency of operation based on the human operation history.

Chapter 5 designs a continuous task selection for an orbit attractor to change the excavation position and excavate a wide area. Coordinate transformations are added to the semi-autonomous control system to achieve continuous deformation of the trajectory, including changes in the excavation start position.

Chapter 6 proposes a method to extend the robot's state space to design a bifurcation of the attractor in the discrete task selection proposed in Chapter 3 in situations where there are intersections or proximities other than branching points between trajectories of branching tasks.

Chapter 7 proposes a new attractor design method that ensures global stability and enables direct teaching and online deformation of trajectories.

Chapter 8 summarizes the thesis and discuss the results, future works, and prospects of the research.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).