半自律系における類似タスク区別のための非線形力学系次元拡張

Dimensional Extension of Nonlinear Dynamics for Similar Task Differentiation in Semi-autonomous Control

○正 岩野 航平(東工大) 正 岡田 昌史(東工大)

Kohei IWANO, Tokyo Institute of Technology, iwano.k.ac@m.titech.ac.jp Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology

The conventional remote operations of an excavator have low work efficiency compared with direct operations. To overcome this problem, we have developed a semi-autonomous control system that consists of autonomy (dynamical system with attractor) and human action (by admittance control). Furthermore, we have designed discrete task selection in the semi-autonomous leader–follower system using a nonlinear dynamical system with bifurcated trajectory attractor, however, it was difficult to achieve task trajectory intersection and proximity. In this paper, we design a semi-autonomous control system that avoids the intersection from similar tasks. The proposed system is experimentally verified using a leader–follower excavation robot.

Key Words: Leader–Follower, Excavation Robot, Teleoperation, Semi-autonomy, Physical human-robot interaction

1 はじめに

災害現場や採掘現場において油圧ショベルの無人化施工が行わ れている.しかし,従来の油圧ショベルの無人化施工では直接操 作時と比較して,作業効率が5割程度まで低下することが知られ ている[1].これまでに無人化施工の作業効率向上のために,映 像情報[2]や振動情報[3],力覚情報[4]に着目して作業者の環境 認識向上に関する研究が行われてきた.しかし,操作者に提示す る映像をより高画質にし,カメラの台数を増やすと,伝送する通 信遅延が大きくなり,「映像提示の質と量」と「情報伝送遅延時 間」の間に時間的なトレードオフが発生する.また,力覚提示に おいて,土木作業現場における過酷な作業が想定される油圧ショ ベルに対して,破損しやすいセンサ類を多く取り付けることは好 ましくない.

これまでに我々は掘削作業の遠隔操作に焦点を当て、油圧ショ ベルの半自律リーダ・フォロワシステムの設計を行ってきた [5]. 半自律リーダ・フォロワシステムは、自律制御のための軌道アト ラクタと人操作のためのアドミッタンス制御で構成されている. この手法は、作業の自律化による操作者の負担軽減と緊急時にお ける人の介入を両立しており、また、フォロワの状態をリーダを 通して把握できるようにすることで伝送する情報を減らすことを ねらっている. ここでの作業として土壌の掘削と積込を繰り返す タスクを想定しており,操作者は遠隔地の遠隔操作室から通信に よって油圧ショベルを操作する.油圧ショベルは自律制御系に基 づいて動作しており、掘削や旋回の基本的な動作はこれによって 実現される.操作者にはリーダを通した力覚提示と映像提示があ り,操作者はリーダに操作力を加えることにより自律制御系への 操作介入を行う.参考文献 [5] では,半自律リーダ・フォロワシ ステムのための可変アドミッタンス制御器の設計を行った.参考 文献 [6] では、アトラクタの淀みと分岐に基づくタスク選択を実 現する半自律制御系を提案した. 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て設計され、アトラク タ上での一時停止と再開を実現した.また,分岐点を持つ掘削軌 道に対してアトラクタを設計し、 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、タスクを選択する ことを実現した.

これまでの研究 [6] において実験に用いてきた分岐軌道アトラ クタでは、タスク分岐点以外での交差や近接がある場合、意図し ない軌道の移りにより所望のタスクが得られないといった問題が 発生する.また、軌道が類似するタスクの区別は難しく、分岐点 での選択が困難となる.実際、油圧ショベルでは頻繁に行われる 掘削作業と土砂をかき集める作業は、目的は異なるが軌道は類 似する.そこで本研究では,非線形力学系の次元拡張を用いた類 似タスクの選択を実現する半自律制御系の設計を行い,リーダ・ フォロワシステムに提案手法を実装しその評価を行う.

2 半自律制御系の設計

2.1 離散的タスク選択を含む半自律制御系の構成

本研究における半自律リーダ・フォロワシステムの制御系を Fig.1 に示す.リーダとフォロワの各関節は,速度ベースの PI 制 御器 (位置ベースの PD 制御器) によって制御されており,目標 速度は自律制御器とアドミッタンス制御器によって生成される. 添字の $l \geq f$ はそれぞれリーダとフォロワを表しており,それぞ れのロボットは一般的な油圧ショベルと同様に4自由度を有する 空間マニピュレータである. $x = \begin{bmatrix} \theta & x & y & \phi \end{bmatrix}^T$ はロボット の状態を表し, θ は旋回角度, $x \geq y$ はバケットの根本の位置, ϕ はバケットの姿勢を表す. \dot{x}^{auto} , $\dot{x}^{ad} \in \mathbb{R}^4$ は,それぞれ自律制 御器,アドミッタンス制御器 Gから生成された目標速度を表す.



Fig.1 Block diagram of the leader-follower semiautonomous control system

半自律リーダ・フォロワシステムには、自律制御器とアドミッ タンス制御器(人の操作)が含まれる.人の操作がなければ、リー ダ、およびフォロワは自律制御器に従って動く.自律制御器に対 する人の操作は、アドミッタンス制御を使用して計算される.ま た、アドミッタンス制御器により、操作者は環境外力やリーダ、 フォロワ間の位置誤差等の環境情報を認識することができる.こ のシステムにより、緊急操作やタスクの選択が必要な場合にのみ、 自律制御器に対して人が操作介入することが可能になる.

操作者による軌道の選択を実現する自律制御系の速度ベクトル 場の構成を Fig.2 に示す. 自律制御系の速度ベクトル場は分岐を 有する掘削軌道アトラクタと淀みで構成されている. 自律制御系 によって生成される目標速度 \dot{x}^{auto} はアトラクタの項 $w_s v_{at} \in \mathbb{R}^4$ と淀みの項 $v_s \in \mathbb{R}^4$ を含み

$$\dot{\boldsymbol{x}}^{auto} = w_s \boldsymbol{v}_{at} + \boldsymbol{v}_s \tag{1}$$

と設定した. *w_s* ∈ ℝ は淀みとの距離に応じてアトラクタの強さ を変更する関数で,

$$w_s = \prod_{k=1}^{K} \left\{ \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\|W(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{s,k})\|^3}{c}\right) \right\}$$
(2)

とし、淀みの周辺で0に近い値を取り、それ以外の領域では1に 近い値を取る. $c \in \mathbb{R}$ はアトラクタを弱める領域の広さを決定す る独立したパラメータである. K は淀みの数を表し、 $x_{s,k}$ は k番目の淀みの位置を表している. $W \in \mathbb{R}^{4\times4}$ は成分間のスケール 調整のための重み行列である. 掘削軌道アトラクタの速度ベクト ル場に w_s を乗じることで Fig.2(a) に示すように淀み周辺でのア トラクタの速度は小さくなる. 淀みは Fig.2(b) に示すある 1 点 へと収束する吸い込みのベクトル場として定義され、アトラクタ 上でロボットを一時停止させる役割を持つ. 淀みで停止している ロボットにいずれかの分岐軌道の方向の操作力を加えることで、 リーダとフォロワは淀みから抜け出し選択された軌道に沿って動 く. このように分岐アトラクタと淀みによって操作者はアトラク タに埋め込まれたタスクを選択する.



Fig.2 Configuration of the vector field of the autonomous control system

2.2 類似タスク選択のための力学系次元拡張

2.1 節に示した離散的タスク選択において、アトラクタによる 目標速度は現在のロボットの状態から計算されるため、分岐タス クを設計する際に軌道が分岐点以外で交差しないことが求めら れる.また、交差せずとも、2つのタスク軌道が近接している場 合、ロボットの状態変数の微小な変化でベクトル場の値を大きく 変更しなければならず、ベクトル場の関数近似が困難となる.し たがって、Fig.3(a)に示すような軌道の交差や近接が発生する類 似したタスク間のタスク選択は難しい.岡田らは軌道アトラクタ を用いた二足歩行ロボットの動的制御において発生する歩行軌道 の近接を力学系の次元拡張によって回避する手法を提案した [7]. 本研究でも同様にロボットの状態空間を次元拡張し、拡張した状 態空間上で分岐アトラクタの軌道を定義することで、分岐点以外 における軌道の交差と近接を回避する.拡張次元の状態変数を $x_e \in \mathbb{R}^N$ とし、状態変数を

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^T & \boldsymbol{x}_e^T \end{bmatrix}^T \tag{3}$$

と拡張する. ここで, N は拡張次元の状態変数の数である. Fig.3(a)の Task 2の軌道を Fig.3(b)に示すように次元拡張した 状態変数 ξ 方向に連続的に変形させることで, Task 1 と Task 2 の分岐点での接続を保ったままそれ以外の軌道の交差や近接を回 避する. Fig.3(b)の軌道をアトラクタとする非線形力学系の設計 例($\xi = 0, 0.5, 1$ の平面上でのベクトル場)を Fig.4 に示す. 灰 色に塗っている部分が関数近似の際にベクトル場が定義されてい る領域である. いずれの平面上でも定義した軌道上に収束するよ うにベクトル場が計算されており, $\xi = 0$ の平面上では Task 1, $\xi = 1$ の平面上では Task 2 の軌道上にロボットの動作が収束す ることが分かる. また,中間である $\xi = 0.5$ の平面では Task 1 と 2 の中間的な軌道に収束するベクトル場が得られている. アトラクタを有する非線形力学系では、状態変数のうちの一 成分を変化させるとそれに連動して他の成分も変化する. そのた め、現実の状態空間 x において操作者が Task 1 よりも Task 2 の軌道に近い方向にロボットを操作すると、x の変化に伴って ξ も変化し、Task 2 の軌道に収束する. このように、拡張次元を 導入した分岐アトラクタにおいても現実の状態空間における人の 操作入力(θ, x, y, ϕ 方向の4自由度)のみで拡張した成分を変動 させ、タスク選択することが可能となる.



a) Bifurcated trajectory with (b) Dimensional extension of the state space intersections other than bifurcation

Fig.3 Dimensional extension to transform two tasks with similar trajectories into different one



Fig.4 Designed vector field for similar trajectories in the extended state-space

2.3 掘削作業のための離散的分岐を有する軌道アトラクタ

本研究において想定する掘削作業では、掘削動作が失敗したと きには掘削を再度行い、成功した場合は旋回動作(土砂の積み込 み)を行う.加えて、土砂を積み込んだダンプカーが土砂を別の 場所に運搬している時間に、掘削する土砂をかき集めておく作業 を行うことを想定し、土砂をかき集める動作を離散的タスクとし て組み込む.離散的分岐を有する軌道アトラクタに組み込むタス ク軌道を Fig.5 に示す.Fig.5(a)の土砂をかき集める動作では、 バケットを返して土砂をすくい上げる動きをしていない点が異な るが、Fig.5(b)の掘削動作と類似しているため、拡張次元 ξ を導 入し、土砂をかき集める動作では $\xi = 1$ で作業を行い、それ以外 の掘削動作や旋回動作では $\xi = 0$ で作業を行うように軌道を設計 した.Fig.5 において軌道を表す実線の色が ξ の値を表し、 $\xi = 0$ を赤色、 $\xi = 1$ を青色で示している.Fig.5(a)に示されている点 S は始点を表しており、掘削の開始位置にある点 B1 は分岐点 1、 掘削の終了位置にある点 B2 は分岐点 2 を表している.

No. 22-2 Proceedings of the 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Sapporo, Japan, June 1-4, 2022



Fig.5 Excavator trajectory for gathering up, digging and turning

離散的分岐を有する軌道アトラクタによる半自律制御系は擬 似的な離散事象システムとみなすことができ,Fig.5の分岐アト ラクタを用いた半自律制御系の状態遷移図をFig.6に示すよう に表現することができる.制御開始後,ロボットは最初に分岐 点1(Fig.5の点B1)で一時停止する.分岐点1において操作者 がロボットを下に押すと,ロボットは掘削動作を行い,分岐点2 (Fig.5の点B2)に向かう.一方,操作者がロボットを奥に押す と拡張次元 ξが増加し,土砂をかき集める動作を行い,再度分岐 点1に戻る.掘削動作後の分岐点2では積み込み動作を行うか 否かの選択を行う.ロボットを上に押せば積み込みを行わずにそ のまま分岐点1に戻るが,旋回方向に押すと積み込み位置まで旋 回し,土砂を積み込んだ後に分岐点1に戻る.



Fig.6 State transition diagram of the semi-autonomous system

3 実験検証

3.1 実験環境

提案手法の実験検証に用いた掘削作業用リーダ・フォロワシス テムと周囲の実験環境の全体像を Fig.7(a) に示す.リーダ,フォ ロワには参考文献 [8] において実験に用いられたロボットを用い た.リーダでは Fig.7(b) に示すように旋回関節の代わりにロボッ トの土台部分に取り付けられたディスプレイにフォロワの旋回角 度や積込位置やアトラクタ軌道を表示し,機械と情報を融合した 設計を行うことで機構の自由度を減らしている.操作者は正面の ディスプレイに映し出されたフォロワのコックピットの位置に取 り付けられた方メラ映像 (Fig.7(c)) と,リーダロボットの下に水 平に取り付けられた底面ディスプレイに映し出されたフォロワロ ボットの旋回情報のアニメーション (Fig.7(d)) を見ながら右手 でリーダロボットのハンドルを握り,力センサへと人操作力を加 える.Fig.7(d) に示す旋回情報のアニメーションには,リーダロ ボットのアームの底面への射影 (灰色の矩形) とバケットの底面 への射影 (黄色の矩形),フォロワロボットの旋回情報を表し固定 されたリーダロボットに対して相対的に回転する円筒座標系 (黒 色実線),土砂のかき集めを行うアトラクタ軌道 (青色実線),掘 削を行うアトラクタ軌道 (赤色実線),掘削の後に旋回を行うアト ラクタ軌道 (緑色実線),掘削開始位置と分岐点の淀みの位置 (緑 色の円),アトラクタ軌道上の土壌積込位置 (橙色の円)が表示さ れている.掘削用の土壌の砂利には直径が 4~7 mm の大きさで ある矢作砂を用いた.



Fig.7 Experimental setup

3.2 次元拡張した分岐アトラクタの検証

2.3 節にて設計した、拡張次元を用いた分岐掘削軌道アトラク タを実装した半自律制御系をリーダ・フォロワシステムに実装し 実験検証を行った.実験におけるロボットの動作の様子を Fig.8 に示す.また、ロボットの状態変数 ξ と θ, x, y, ϕ 各成分の操作力 $f_{ heta}, f_x, f_y, au_{\phi}$ を Fig.8 に示す.Fig.8(a-2) において,ロボットは 分岐点1で一時停止しており, x 方向正, y 方向正の向きに操作 力を加えることで、操作者は土砂をかき集めるタスクを選択して いる.操作力印加後に ξ が増加して 1 に到達し, Fig.8(a-3) (a-6) で土砂をかき集める動作を実行している. Fig.8(b-2),(c-2)では, x方向正, y方向負の向きに操作力を加えており、このとき ξ は 増加せずそのまま掘削動作を実行している. Fig.5, Fig.6 におい て設計した操作方向とのずれの原因として、関数近似の誤差や重 力の影響が考えられる. また, Fig.8(b-5),(c-5) では, ロボット は分岐点2で一時停止しており, (b-5)ではx方向負, y方向正 の向きに操作力を加えた結果ロボットは旋回せずに分岐点1に復 |帰している.(c-5) では旋回方向に操作力を加えた結果ロボット

No. 22-2 Proceedings of the 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Sapporo, Japan, June 1-4, 2022



Fig.8 Time lapse of the robot motion

は旋回し積み込み動作を行った後,分岐点1に復帰している.こ れらの結果から提案手法によって類似タスク間の操作力の方向に よるタスク選択が実現できたことが理解できる.

4 おわりに

本研究では,遠隔操作による掘削作業の効率向上のための半自 律操作インタフェースにおける,非線形力学系の次元拡張を用い た類似タスクの選択を実現する半自律制御系を実現した.以下に 成果を示す.

- 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した。
- これまでに提案した半自律掘削制御系における旋回と復帰のタスク選択に加えて、新たに掘削とかき集めの間の類似タスクの選択を組み込み、リーダ・フォロワロボットに実装し、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、および、2つのタスク分岐を1つの非線形力学系の中で実現できることを実験の中で検証した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21J23037 の助成を受けた.

参考文献

- [1] 伊藤禎宣, 坂野雄一, 藤野健一, 安藤広志: "無人化施工において遠隔 操作の映像環境が作業効率へ与える影響について", 土木学会論文集 F3(土木情報学), vol.73, no.1, pp.15–24, 2017.
- [2] 佐藤貴亮,藤井浩光, Alessandro Moro, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実,山下淳, 淺間一: "無人化施工用俯瞰映像提示システムの開 発",日本機械学会論文集, vol.81, no.823, pp.1–13, 2015.
- [3] 山田宏尚: "建設機械の遠隔操作のためのインターフェース", 日本ロボット学会誌, vol.33, no.6, pp.400-403, 2015.
- [4] 平林丈嗣: "水中油圧ショベルのためのヒューマンマシンインタフェース", 日本ロボット学会誌, vol.33, no.6, pp.412–415, 2015.
- [5] 岩野航平,岡本裕,舛屋賢,岡田昌史:"マスタスレーブ系での可変ア ドミッタンスによる力覚伝達と掘削作業への応用",ロボティクス・ メカトロニクス講演会講演概要集,vol.2019, pp.1P2-E06, 2019.
- [6] Masafumi Okada and Kohei Iwano:"Human interface design for semi-autonomous control of leader-follower excavator based on variable admittance and stagnation/trajectory bifurcation of nonlinear dynamics", Mechanical Engineering Journal, vol.8, no.6, pp. 21-00127, 2021.
- [7] 岡田昌史, 渡辺将旭, 長谷川将臣:"軌道アトラクタに基づいた動的姿勢制御と力学系次元拡張", 日本機械学会論文集C編, vol.79, no.804, pp.2854-2863, 2013.
- [8] 岩野航平,岡田昌史:"低自由度リーダロボットを用いた非線形力学系 における軌道の淀み・分岐・変形に基づく半自律リーダ・フォロワ掘 削システムのインタフェース設計",ロボティクス・メカトロニクス 講演会講演概要集,vol.2021, pp.2P1-A06, 2021.