

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
Type(English)	Doctoral Thesis

令和5年度
工学院 機械系 機械コース 博士論文

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

指導教員 岡田 昌史 教授
土方 亘 准教授

東京工業大学 工学院
機械系 機械コース
岩野 航平

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	本論文の目的および研究概要	6
1.3	本論文の構成	8
第 2 章	半自律制御系のシステム構成の概要	11
2.1	はじめに	11
2.2	システム全体の構成	11
2.3	リーダー・フォロワ系の構成に関する従来研究	13
2.4	アドミッタンス制御に関する従来研究	13
2.5	アドミッタンス制御による環境知覚と手動操作	14
2.6	実験環境とリーダー・フォロワロボット	18
2.7	検証実験	21
2.7.1	実験内容	21
2.7.2	環境外力が無いとみなせる状況（空中）での動作の検証	22
2.7.3	環境外力が小さい状況（小粒砂利の掘削）での動作の検証	23
2.7.4	環境外力が中程度の状況（大粒砂利の掘削）での動作の検証	24
2.7.5	環境外力が大きい状況（板への押し付け）での動作の検証	25
2.7.6	実験結果の考察	25
2.8	おわりに	26
第 3 章	半自律制御系の離散的なタスク選択の設計	27
3.1	はじめに	27
3.2	離散的なアトラクタ軌道の分岐の設計	28
3.2.1	自律制御系の構成	28
3.2.2	アトラクタの淀みの速度ベクトル場の設計	31



3.2.3	淀み周辺でのアトラクタの強さの設計	32
3.2.4	掘削作業のための離散的分岐を有するアトラクタの軌道の設計	32
3.3	改良されたリーダロボットを含む実験環境	33
3.3.1	はじめに	33
3.3.2	リーダロボットの機構設計	33
3.3.3	リーダロボットの試作	34
3.3.4	リーダ・フォロワロボットの状態の変換	36
3.3.5	実験環境	36
3.4	離散的なアトラクタ軌道の分岐の実験検証	39
3.5	おわりに	40
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	42
4.1	はじめに	42
4.2	淀みの歪みの設計	43
4.2.1	淀みの歪みのベクトル場の設計	43
4.2.2	淀みの歪みの形状の設計	44
4.2.3	歪みのパラメータの学習則の設計	46
4.3	実験検証	47
4.3.1	淀みの歪みの学習則の検証	47
4.3.2	淀みの歪みの操作性の検証	48
4.4	おわりに	49
第 5 章	半自律制御系の連続的な掘削位置の変更の設計	51
5.1	はじめに	51
5.2	連続的なアトラクタ軌道の変形の設計	52
5.3	拡張カルマンフィルタを用いた軌道変形量の推定と操作分離の設計	53
5.4	連続的なアトラクタ軌道の変形と操作分離の検証	58
5.5	おわりに	59
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	61
6.1	類似タスク間の離散的タスク選択	61
6.1.1	はじめに	61
6.1.2	類似タスク選択のための力学系次元拡張	61
6.1.3	掘削作業のための離散的分岐を有する軌道アトラクタ	63
6.1.4	次元拡張した分岐アトラクタの実験検証	64



6.2	淀みの歪みに基づく人の操作誘導と類似タスク区別	66
6.2.1	類似タスク区別の課題点	66
6.2.2	拡張次元を含む人の操作の誘導のための淀みの歪みの改良	68
6.2.3	淀みの歪みによる操作の誘導の実験検証	69
6.2.4	淀みの歪みを用いた類似タスクの選択と軌道の変形の検証	71
6.3	おわりに	71
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	74
7.1	はじめに	74
7.2	大域的に安定な軌道アトラクタの設計	75
7.3	周波数分離を行う軌道変形のための逐次更新	77
7.3.1	軌道の逐次更新	77
7.3.2	人の入力のスเปクトル解析による ΔW の計算	78
7.4	シミュレーションによる提案手法と RLS の比較	80
7.5	メンバーシップ関数を変更した場合の変形挙動のシミュレーションによる検証	82
7.6	実験機を用いた大域安定なアトラクタの軌道変形の提案手法の検証	83
7.7	おわりに	84
第8章	結論	89
8.1	研究の成果	89
8.2	今後の課題	92
参考文献		94
謝辞		100



図目次

1.1	Semi-autonomous teleoperation system	5
1.2	Two types of physical human-robot interactions at the task level: task selection and task trajectory deformation	8
2.1	Block diagram of the Leader-Follower semi-autonomous control system .	12
2.2	Coordinate transformation in admittance model	15
2.3	Design parameters of variable admittance	17
2.4	Experimental setup in Chapter 2	19
2.5	Prototype of leader-follower excavation system. It has the same configuration as a hydraulic excavator. A force/torque sensor is mounted on the grip of the leader robot.	19
2.6	Reduction of grip rotation by a belt-pulley mechanism. This mechanism allows the operator to operate the bucket with a smaller wrist motion. The grip rotation is reduced approximately one-third of the bucket rotation.	20
2.7	Work space of leader follower robot	21
2.8	Soil conditions	21
2.9	Experiment 1:Free motion	22
2.10	Absolute value of position difference between Leader and Follower	22
2.11	Absolute value of operating force	22
2.12	Experiment 2:Digging sand:	23
2.13	Absolute value of position difference between Leader and Follower	23
2.14	Absolute value of operating force	23
2.15	Experiment 3:Digging crushed stone	24
2.16	Absolute value of position difference between Leader and Follower	24
2.17	Absolute value of operating force	24
2.18	Experiment 4:Pressing against a metal plate	25



2.19	Absolute value of position difference between Leader and Follower	25
2.20	Absolute value of operating force	25
3.1	Configuration of the vector field of the autonomous control system	29
3.2	Design of attractor	30
3.3	Design of stagnation	31
3.4	Strength of attractor around stagnation	32
3.5	Excavator trajectory for digging and turning	33
3.6	Mechanism of the leader robot	34
3.7	Leader robot	35
3.8	Transformation of state between leader and follower	37
3.9	Experimental setup	38
3.10	Follower robot's position parameters	39
3.11	Robot motion in the experiment of task selection	40
3.12	Positions and operational force in the experiment of task selection	41
4.1	Design of distorted stagnation vector fields	44
4.2	Design example of 4D distorted stagnation shape	45
4.3	Calculation of the azimuthal equidistant projection method on a 3D sphere	46
4.4	Operational force when selecting a branching trajectory	49
4.5	Direction of operation when selecting a bifurcated orbit (turning trajectory)	49
5.1	Coordinates transformation for excavation work	54
5.2	Robot motion in the experiment of trajectory deformation	59
5.3	Operational force and scale in the experiment of trajectory deformation .	60
6.1	Dimensional extension to transform two tasks with similar trajectories into different one	63
6.2	Designed vector field for similar trajectories in the extended state-space .	64
6.3	Simulated result of designed vector field for similar trajectories in the extended state space	65
6.4	Excavator trajectory for gathering up, digging and turning	66
6.5	State transition diagram of the semi-autonomous system	66
6.6	Time lapse of the robot motion	67
6.7	Example of 5D distorted stagnation spherical shape design	68



6.8	Decomposition of the vector field of stagnation distortion. The vector field of stagnation distortion can be decomposed into directional induction and sucking into the center.	69
6.9	Simulation of the contribution of stagnation distortion to the change in extended dimension	70
6.10	Verification of guiding human operation by distorted stagnation	70
6.11	Robot motion in the experimental verification	73
7.1	Design of globally stable attractor	77
7.2	Variation of coefficients when a new data point is added in the functional approximation of a trigonometric polynomial	80
7.3	Membership function design	81
7.4	Simulation results with high-frequency signal input	82
7.5	Simulation results with low-frequency signal input	82
7.6	Simulation results when applying a low-frequency manipulation input intended to shift the entire trajectory	85
7.7	Simulation results when high-frequency operation input intended to avoid obstacles is applied	86
7.8	Teaching trajectory acquired from manual operation	87
7.9	Experimental result of trajectory deformation intended to avoid obstacles	87
7.10	Experimental result of trajectory deformation intended to shift the entire digging trajectory in the turning direction	88
7.11	Experimental result of trajectory deformation intended to deepen the excavation trajectory in the vertical direction	88



表目次

2.1	Value of parameters	17
2.2	Link length	20
2.3	Work space of each joint	20
3.1	Work space of each joint of the leader	35
3.2	Link length of the leader robot	35
3.3	Link length of the follower robot	39
3.4	Work space of each joint of the follower	39
4.1	Changes in stagnation distortion parameters before and after the learning	48



第 1 章

序論

1.1 研究背景

災害現場や採掘現場における作業者の安全確保や、遠隔地にある採掘現場への長距離移動を伴う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。1993 年の雲仙普賢岳噴火の復旧工事を皮切りに油圧ショベルの無人化施工は積極的に用いられるようになった。この当時の無人化施工では、現場全体を撮影する固定カメラ、運転席搭載の車載カメラ、二つの視点を補う移動カメラ 3 台によって環境情報の提示がなされ、操作命令はジョイスティック型のリモートコントローラで行われた [1]。しかし、この手法では直接操作時と比較して作業効率が著しく低下する [2]。この原因としてはヒューマンインタフェースの相違や操作情報、環境・感覚情報の通信遅延、伝達される感覚情報の相違等が挙げられる [3]。すなわち、自己の状態や周囲の環境を正しく認識することの難しさが無人化施工の難易度を高くしていると言える。

これまでに、油圧ショベルの無人化施工の作業効率向上のために作業者の環境認識を向上させる研究が行われてきた。なお、本論文では実環境下において実際に作業を行うロボットをフォロー、遠隔地から人が操作するデバイスをリーダと呼ぶ。映像提示に関して、佐藤らは掘削機に取り付けたカメラの映像を組み合わせて俯瞰映像を提示する手法の研究 [4] を行った。北條らは複数のカメラ映像を用いて俯瞰視点を提供する技術の開発と評価を行い、3D モデルと全方位画像を重ね合わせることで、通信トラフィックを減少させる方法を用いた [5]。Sato らは遠隔操作される災害対応ロボットのマルチディスプレイシステムにおける視線パターン分析に焦点を当て、作業状態に応じた各カメラ視点の有効性の程度を調査し、異なる作業状態ごとに特定の視点映像がより良い時間効率につながることを報告した [6]。さらに、永谷らは有線給電式マルチロータ機を用いて設機械周囲の任意視点からの映像情報を提示する手法の研究 [7] を行った。山田らは VR 技術を利用して操作者に搭乗時のような臨場感をもって運転支援するヒューマンインタフェースの研究 [8] を行った。伊藤らは両眼立体 3D かつ 4K 解像度の



大型単画面の非圧縮映像を操作者に提示する研究 [3] を行い、2D かつ低解像度の小型多画面の複数視点圧縮映像を提示する従来手法と比較した。Ito らは遠隔操作された油圧ショベルとシミュレータの両方を操作するためのクロスプラットフォームシステムを開発し、ヘッドマウントディスプレイを用いて実際の油圧ショベルの操作席に座っている感覚を再現するインターフェースを含むシステムの検証を行った [9]。さらに Kamezaki らは複数の環境カメラを自律的に制御する方法を提案し、作業状況に基づいて撮影対象と撮影方法（画角やカメラの向き）を変更し、仮想現実シミュレーションにおいてミスを減らし、主観的な使いやすさと時間効率を向上したと報告した [10]。佐藤らは油圧ショベルを用いた遠隔操縦における側面カメラ映像提示における最適なカメラ配置に関する実験を行い、作業効率とカメラ画角の関係を調査した [11]。Moteki らは油圧ショベルの効率的な無人化施工において必要な視覚情報の量と力覚情報の必要性について議論し、視覚情報の量を増やすことが効率向上に効果的であることを確認し、熟練オペレータの多くが遠隔地での掘削では力覚情報の必要性を感じていることを報告した [12]。しかし、映像提示において操作者に提示する映像情報の画質をより高画質にしたりカメラの台数をさらに増やしたりと提示する情報量を増やそうとすると、その映像情報を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」の間に時間に関するトレードオフが存在する。

また、力覚提示に関して、鷹巣はフォロワと幾何学的に相似なリーダを用いてリーダ・フォロワシステムを構成し、操作者への力覚提示に関する基礎的な実験を行い、人間工学の知見に基づいて操作系を設計する必要性を示唆した [13]。吉灘らは重量物ハンドリングマニピュレータを対象としてリーダ・フォロワシステムを構成し、試作機の位置追従性、力伝達性、組立作業性、操作の習熟性、操作疲労度について評価を行った [14]。加藤らは建築ロボットを対象として、ジョイスティックをリーダとした上でフォロワの油圧シリンダ内の圧力情報からリーダに力覚提示を行うリーダ・フォロワシステムを開発し、提案システムの有効性を示すために力覚提示実験を行い、操作反力を操作者へ良好に伝達できることを確認した [15]。平林らは水中油圧ショベルを対象としてリーダフォロワシステムを構成し、油圧ショベルに取り付けた力覚センサの情報を用いることで力覚提示を行い、力覚提示によって無人化施工における作業効率が向上することを報告した [16]。荒木らは災害対応油圧駆動ロボットを対象とし、油圧シリンダ内のシリンダ圧と機体に装着した加速度センサの加速度情報から推定したフォロワロボットの先端負荷力を操作者に提示する研究を行い、ロボットアームの先端が対象物と接触する瞬間の衝撃力を力覚として提示する方法を示した [17]。しかし、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。

映像、力覚の提示以外に、古屋らは 3D 映像に加えて、機体の振動や姿勢を伝える体感装置付き運転席を用いた「次世代無人化施工システム」の開発と検証実験 [18] を行った。永野らは



筐体で生じた高周波振動を人間の感覚範囲へと変調し、衝突や接触材料の特性を伝える効果的な触覚情報に変換し、手首に装着したデバイスを介して操作者に触覚伝達する建設ロボットの遠隔操縦支援システムを提案した [19]. Yusof らは聴覚フィードバックを用いてリーダ・フォロワシステムにおける不十分な力覚提示情報を補正した [20].

遠隔操作のための操作インターフェースとして、Ishikawa らは時間変動の遅延と連続したパケット損失がある状況でも機能する建設機械の遠隔制御システムを開発し、その有効性を実験的に検証した [21]. 渡辺らは、Control-Area-Network(CAN) を使用し機械に接続して通信の安定性を確保し、搭乗操作、遠隔操作、外部制御操作の 3 つから操作方法を選択可能な建設機械の遠隔操作システムを開発し、試作システムの評価を行い、十分な操作性があることを確認した [22].

建設機械の自律制御を志向する研究として、Son らは動的運動プリミティブ (DMP) を使用して軌道を学習することで、人間の専門家の戦略を模倣し、実践における堅牢性と安全性を維持しながら、複雑でモデル化できない土壌の効率的な掘削を最適化するための産業用自動ロボット掘削機向けの新しい掘削軌道計画フレームワークを提案した [23]. Huh らは油圧ショベルの掘削軌道計画のための深層学習を用いた自律掘削システムを開発し長短期記憶アルゴリズムを適用することで、地形の 3 次元形状を表現し、地中障害物との衝突を防止する衝突回避アルゴリズムを備えた、新たな自動化掘削技術を提案している [24]. Sandzimier らは土とショベルバケットの複雑な相互作用をリアルタイムで制御するために、非線形で非パラメトリックな統計モデルであるガウス過程モデルを用いたデータ駆動型の制御方法を開発し、ショベル型ロボットに実装することで、バケットの目標充填率を低い分散で達成することが可能であることを示した [25]. Lee らは油圧ショベルの制約を満たしつつ、リアルタイムでの軌道再計画が可能な最適化ベースの軌道計画のための統合フレームワークを提案し、シミュレーション環境でその有効性を検証した [26]. 統合フレームワークは、掘削量とエネルギー最小化を考慮して全体のグローバル軌道を計算するグローバルプランナーとグローバル軌道を追跡し、動的実現可能性、物理的制約および干渉認識を満たすようなローカルプランナーで構成されている。Rasul らは自動掘削のために 3 次元地形、表面の反射率 (地面の材質)、地面力指数 (地面の硬さや粘り気) を含む 5D マップの生成手法を提案し、ミニショベルを使用した実験テストを行い、提案手法の有効性を検証した [27]. Egli らは油圧ショベルのアーム制御を自動化するためのデータ駆動型アプローチを提案し、非線形な油圧系とリンク系の力学系を表現するための一般的なモデルを含む油圧ショベルの姿勢追従のためのニューラルネットワークベースの制御ポリシーを実機に直接適用することで、正確で安定した姿勢追従を実現できることを示した [28]. また Egli らは異なる土壌特性に対して、土壌パラメータの明示的な事前知識なしに、自己の運動の結果のみの観察からオンラインで適応可能な油圧ショベル用の掘削制御系を開発し、シミュレーションでの強化学習によるトレーニングと実機でのテストを通じて、その



有効性を実証した [29]. Zhu らは多様なサイズや形状が混在し視覚的な遮蔽があるためモデル化が難しい破碎された岩の掘削に対して、時系列データを取り扱うリカレントニューラルネットワークとモデル予測制御を用いて、複雑な地形での掘削作業を効率化するマルチモーダルなモデルベース強化学習手法を提案した [30]. Lu らは点群データから不規則な剛体オブジェクトの掘削軌道を計画するために強化学習を用いた手法を提案し、シミュレーションで訓練された制御方策が実世界で有効であることをショベル型ロボットを用いた実機検証で示した [31]. Osa らは強化学習を用いた掘削自動化における掘削タスクの特性を調査するために、深度画像を用いた発掘タスクの強化学習を行った [32]. 強化学習における新たな正則化手法の提案により、自動掘削のための強化学習のサンプル効率が向上し、掘削タスクにおいては複数の最適なアクションが存在することを明らかにした. Okamoto らはバケットの仕事と掘削量の関係から、バケットの作業負荷に基づいた掘削の動的モデルを設計し、掘削された土砂の重量を正確に制御する方法を提案した [33]. Hiltunen らは、建設現場情報の作成・管理を行う建設情報モデル (BIM) を用いた遠隔および自動掘削機の実験を通じて、建設プロセスのデジタル化における実用性と効率性を検証する研究を行い、人間の操作、遠隔操作、自動操作を用いた掘削タスクの実験結果の比較を行い、遠隔操作では正確な形を要求するタスクにおいて、直接操作に比べて効率が低下する傾向があり、自動操作においても設計された形に完全に一致する精度を達成するためには、さらなる最適化が必要であることが示唆されている [34].

自律制御と人の操作がともに協力しタスクを実行するシステムは Shared Control[35] や半自律制御系と呼ばれ、これまでに建設機械の制御を含む多くの産業分野での適用を目指した研究が行われており、自律制御の高い精度と人間の柔軟な判断を組み合わせることで、操作効率や信頼性を向上させることができる [36]–[38].

本論文では対象とする作業を掘削作業に限定した上で、上記の問題を解決し油圧ショベルの無人化施工の作業効率の向上を実現する手法として、リーダ・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が有効であると考えられる. 半自律遠隔操作システムの全体の構成を Fig.1.1 に示す. 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いる. 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. 本論文の主なコンセプトは、実世界においてリーダロボットがミニチュアフォロワロボットの役割を果たし、操作者が油圧ショベルを手を持って直接操作しているような操作感を実現することである. これを実現するために、アルゴリズムは可能な限りシンプルにし、追加のボタン操作を排し、if-then ルールを極力避ける必要がある. したがって、リーダロボットはフォロワロボットと同じ構成と自由度を持つものとし、握って操作する物理的インタフェースはバケットハンドルとする.

提案するシステムでは、人の操作が無ければリーダ・フォロワロボットは非線形力学系を用いた自律制御器に従って動作する. 一方で、自律制御での動作中に発生する異常や環境の変化



に制御を止めることなく柔軟に対応するためには、人の操作を含む半自律制御が有効であり、自律制御の安全性を高め、その限界を補うことができる。提案システムでは、基本的な動作による単純な作業は自律系が担い、操作者はロボットに手を軽く添えて力覚提示を受けるセンサと作業全体を見渡した意思決定の役割を担う形の分担を行う。そこで、操作者は設計されたアドミッタンス制御器によって力覚情報の環境知覚と操作介入を行う。これにより、ジョイスティックを用いた従来方法と比べてより少ない情報量での正確な環境認識と良好な操作性を実現することを示す。また、制御則に可変アドミッタンスモデルを用いた位置制御ベースのバイラテラル制御系の開発を行ったことでフォロー側に力センサを要しない力覚提示を実現する。

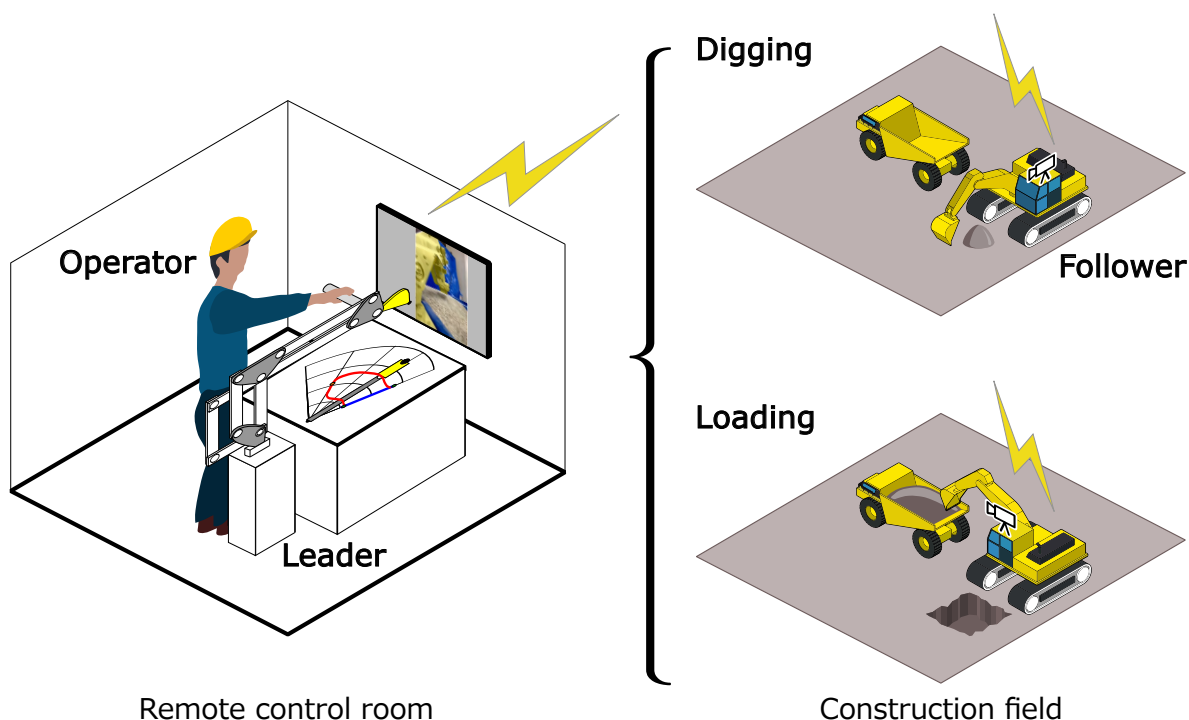


Fig.1.1 Semi-autonomous teleoperation system

提案するシステムでは、ロボットの現在の状態から非線形力学系を用いて目標速度を計算しているため、人の操作介入を容易に受け入れることができる。さらに、非線形力学系にはアトラクタとして目標軌道を埋め込んでおり安定な運動が生成される。一方で、従来のアトラクタベースの非線形力学系の問題点は、(1) ベクトル場に1つの軌道しか埋め込まれていないこと、(2) ベクトル場の再計算が必要であるため埋め込まれた軌道をオンラインで変更することが困難であることにある。これらの問題点は Fig.1.2 に示すように掘削作業にはタスク選択（例えば掘削後に旋回するか掘削をやり直すかの選択）やタスク形状の変形（例えば掘削する位置を前後左右上下に変更させる）が含まれる場合に致命的な問題となる。

1.2 本論文の目的および研究概要

本研究では、半自律制御系を用いたロボットの遠隔操縦を行う人間機械協調システムの設計論を確立するとともに、特に、鉱山や建設現場の掘削作業を対象として、作業者の安全確保と労働環境改善、作業効率改善への大きな貢献が期待される半自律遠隔掘削操縦システムを開発することを目的とする。本研究で開発する半自律遠隔掘削システムの具体的な設計要件を以下に示す。

1. 掘削作業のための遠隔制御系

基本的な動作を行い操作者の負担を軽減しつつ人の操作との親和性が高い自律制御系と、容易な環境把握と高い操作性を有する手動遠隔操作系を実現する。このとき、実世界のリーダロボットがフォロワロボットのミニチュアの役割を果たし、操作者が油圧ショベルを手を持って直接操作しているような操作感を実現する。

2. 操作介入の自由度の拡張

(a) 離散的なタスク選択

タスクの成否や施工計画に応じた操作者による次の実行タスク内容の離散的な切り替えを実現する。例えば、掘削成功時にはそのまま旋回し土砂の積み込みを行い、掘削失敗時には掘削をやり直すタスク選択を行う。アルゴリズムは可能な限りシンプルにし、追加のボタン操作を排し、タスク切り替えは物理的なインターフェースを介した直感的な操作によって行う。また、離散的なタスクの選択頻度に応じて、タスク間の遷移しやすさを変更する。加えて、分岐する2つの離散的なタスクが類似していても混同せずに意図通りにタスク選択できるようにする。

(b) タスクの実行位置の連続的な選択

施工の進行や現場の環境に応じた次のタスク実行位置の連続的な選択を実現する。例えば、掘削位置の変更を行い広範囲の掘削を行うことが可能となる。また、実行位置の連続的な選択と離散的なタスク選択を同一の操作インターフェースで行い、操作の分離を行う。

3. 半自律制御系のダイレクトティーチングとオンライン軌道変形

半自律制御系に埋め込むタスクの参照軌道をダイレクトティーチングにより現場で取得し、多様な現場に応じたタスク軌道を埋め込んだコントローラを即座に設計することを実現する。また、半自律制御系に組み込まれているタスク軌道を人の操作に応じてオンラインで変形できるようにする。オンライン変形ではタスク実行位置の移動と障害物回避の両方を実現するためになだらかな変形と急峻な変形を区別して操作できるようにする。この際、システムの安定性の評価を容易にするために自律制御系が常に大域的安定



性を有するようにする。

以上の設計要件を踏まえ、本研究では以下の内容を実施する。

1. 基本的な目標軌道への収束を担う自律制御系と人の操作介入を合わせた半自律制御系の設計を行う。自律制御系には人の操作介入との親和性が高いアトラクタを有する非線形力学系を用いる。また、力覚提示と手動操作の実現のために掘削作業のための遠隔操縦系を設計する。人の操作において求められる力覚提示による正確な環境認識と良好な操作性を実現するために、制御則に可変アドミッタンスモデルを用いた位置制御ベースのバイラテラル制御系の設計を行い、その評価を行う。
2. 離散的タスク選択の実現のためにアトラクタの淀みと分岐を導入する。Fig.1.2(a) に示すように、緑色の点で示されているアトラクタの淀みはアトラクタ軌道上の分岐点に配置されており、ロボットを一時停止させる。アトラクタの淀みはある 1 点への局所的な吸い込みのベクトル場で表され、操作者がリーダロボットを介して力を加えることで、淀みから抜け出して作業を再開する。このとき操作力の方向によって進むアトラクタ軌道（次の作業内容）を選択する事が可能となる。そこで、本論文ではアトラクタ上でロボットを一時停止させる淀みのベクトル場とタスクの分岐を有する分岐軌道アトラクタを設計し、半自律制御系における操作力の方向による離散的なタスク内容の選択を実現する。
3. 離散的タスク選択における優先度を実現するために淀みの歪みを導入する。離散的タスク選択において、操作性を向上させるためにタスクの選択頻度に応じてタスクの遷移しやすさを設定する。また、操作ミスを防ぐために正しい操作方向への誘導を行う。そこでアトラクタの淀みを歪ませることで、これらの機能を実現する。
4. タスク形状の変形の実現のために座標変換によるアトラクタ軌道の変形を導入する。Fig.1.2(b) に示すように、座標変換を用いてアトラクタの軌道を変形することで掘削開始位置を変更する。アトラクタは仮想空間上で設計され、座標変換により現実世界のバケットの位置と姿勢に変換される。本論文では、座標変換を用いたアトラクタ軌道の連続的な変形を実現する手法を提案する。
5. 軌道の変形は人の操作力に基づいて計算されるが、操作力はアドミッタンス制御（タスクの選択）の入力信号にも用いられており、両者の操作分離が必要となる。そこで、周波数分離により軌道の選択と軌道の変形の操作を分離する。軌道の変形は人の操作入力とその周波数特性に基づいて拡張カルマンフィルタ (EKF) を用いて推定する。本論文では、周波数分離を用いて軌道の選択と軌道の変形の操作を分離する手法を提案する。
6. 離散的タスク選択において、2つのタスク内容が類似しており軌道が交差や近接している場合、意図に反するタスク選択や実行中のタスク遷移が起こるため、類似したタスク



間のタスク選択は難しい。そこで、ロボットの状態空間を次元拡張し、軌道の交差を回避する。軌道アトラクタは拡張次元も含む空間上で設計されるため、現実空間上の操作によって拡張次元も変動し、類似タスクの切り替えを実現する。

7. アトラクタの設計の所要時間を削減し、現場でのティーチングや逐次軌道変形を可能とするために、アトラクタの新たな設計手法の開発を行う。従来のアトラクタは、実装前に力学系の安定性の確認に時間を要するため、現場で迅速にティーチングし即座に用いることができず、また、同様の理由より、オンラインでの軌道変形を行うことができなかった。そこで、本論文では、大域安定性を有するアトラクタの新たな設計手法を提案し、操作力に応じてアトラクタ軌道をオンライン変形する手法を提案する。

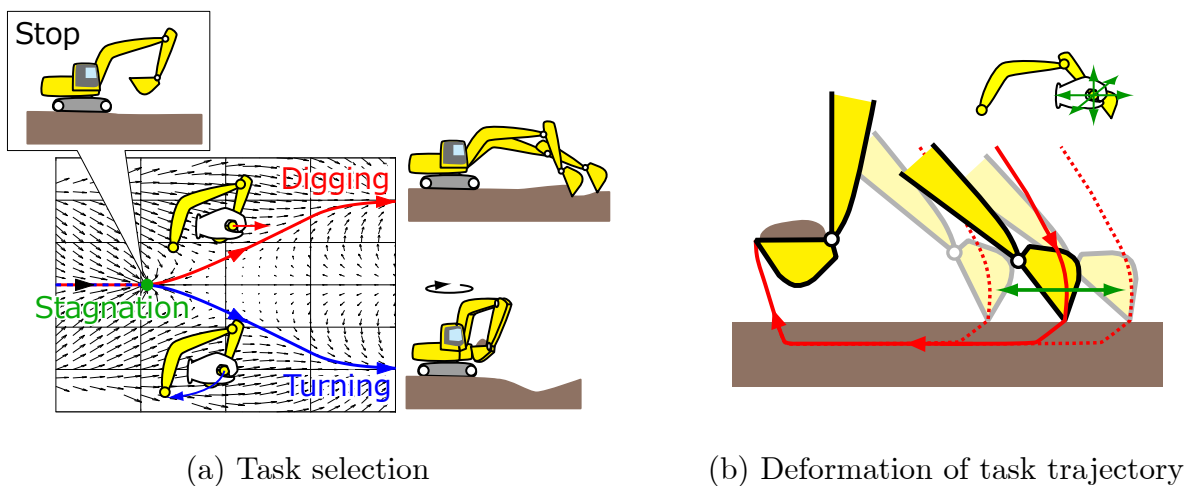


Fig.1.2 Two types of physical human-robot interactions at the task level: task selection and task trajectory deformation

1.3 本論文の構成

本論文は、全8章からなる。構成は以下のとおりである。

第2章「半自律制御系のシステム構成の概要」では、リーダ・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・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、アドミッタンスモデルの仮想剛性と仮想減衰係数をリーダフォロワの位置偏差の関数とし可変とすることで、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・フォロワロボット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の一時停止と再開を実現する。掘削、旋回のための分岐を持つ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、操作ミスが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、歪みによる操作負荷の低減、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。軌道の連続的な変形に加えて、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 1 つの操作インタフェースで行うために、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操作の周波数分離を行う。

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、第 3 章で提案した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、リーダー・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 つの非線形力学系で実現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意図に反したタスク遷移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、ダイレクトティーチング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。大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系を実際の操作データに基づいて設計するために、目標軌道を関数近似し、現在位置との最近傍点の探索により、軌道に収束する速度ベクトル場を計算する手法を提案する。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．



第 2 章

半自律制御系のシステム構成の概要

2.1 はじめに

前章では、本論文の目的が掘削作業を想定した油圧ショベルの遠隔操作における半自律制御系の設計であり、その実現のためにリーダー・フォロシステムと非線形力学系を用いることを説明した。本章では、まず、本論文における掘削用リーダー・フォロシステムの半自律制御系の全体の構成について説明する。次に、制御系の構成要素であるバイラテラル制御、アドミッタンス制御について、それぞれ詳細に説明する。最後に、本論文における提案システムで想定しているロボットの操作性について説明し、その操作性を実現するための可変アドミッタンスの変更アルゴリズムについて説明する。

2.2 システム全体の構成

本論文における半自律リーダー・フォロ系の制御系を Fig.2.1 に示す。リーダーとフォロの各関節は、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 と f はそれぞれリーダーとフォロを表しており、それぞれのロボットは一般的な油圧ショベルを想定し 4 自由度を有する空間マニピュレータである。 $\mathbf{x} = [\theta \ x \ y \ \phi]^T$ はロボットの状態を表し、 θ は旋回角度、 x と y はバケットの根本の位置、 ϕ はバケットの絶対角度を表す。 $\dot{\mathbf{x}}^{auto}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}^{ad} \in \mathbb{R}^4$ 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。 $\mathbf{s}_{ct} \in \mathbb{R}^3$ は座標変換による軌道の変形の倍率（ ϕ 以外の成分）を表す。 \mathbf{s}_{ct} を用いた座標変換については 5.2 節、軌道変形量の推定については 5.3 節にて述べる。

半自律リーダー・フォロシステムには、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、リーダー・フォロロボット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



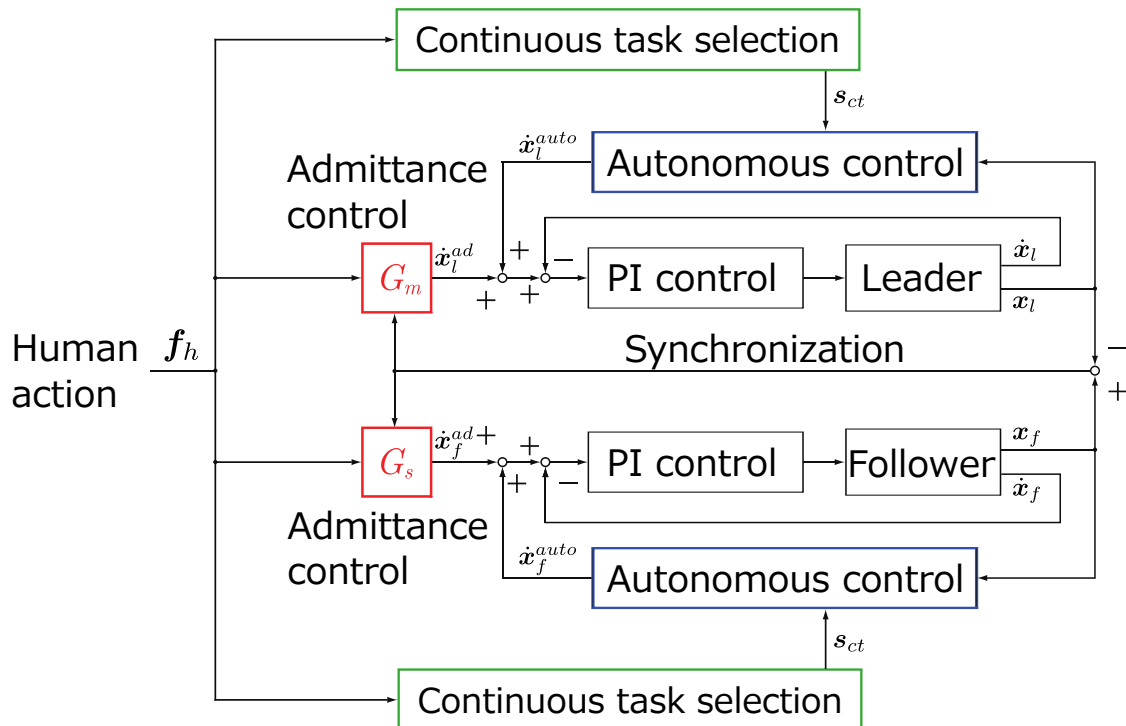


Fig.2.1 Block diagram of the Leader-Follower semi-autonomous control system

制御器により、操作者は環境外力やリーダー・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。

アドミッタンス制御器には可変アドミッタンス制御を用いる。これは、リーダーとフォロワの位置の同期による力覚提示と、操作力の拡大による軽快な操作性を実現する。自律制御系には軌道アトラクタを有する非線形力学系を用いる。これによりロボットの目標速度は現在の状態から計算され、目標軌道収束への時間的拘束を持たないという性質を持ち、アドミッタンス制御器による人の操作を許容する。また、本論文における軌道アトラクタはアトラクタの淀みと分岐を有している。アトラクタの淀みは、アトラクタの軌道上に配置される吸い込みのベクトル場で、これによりロボットはアトラクタの軌道上で一時停止し、操作者が分岐軌道の一方を選択し、タスク選択が可能となる。これらに加えて人の操作力に応じてアトラクタのタスク形状を連続的に変化させる要素を加える。これは Fig.2.1 の連続的タスク選択 (Continuous task selection) で表され、操作力から自律制御器の座標変換のパラメータである軌道の拡大のスケール s_{ct} を計算する。なお、このとき半自律制御系の目標速度計算に用いられるリーダーロボットの状態は 3.3.4 節にて後述するフォロワロボットの状態空間上に変換されたものを用い、出力される速度指令値も同様にスケール調整されたものとする。



2.3 リーダ・フォロワ系の構成に関する従来研究

ここでは、リーダー・フォロワシステムの構成について述べる。リーダー・フォロワマニピュレータの開発の歴史は長く、初めての機械式リーダー・フォロワマニピュレータは、1949年に米国のアルゴンヌ国立研究所で Goertz らによって開発された ANL Model M1 である。その後、1954年にリーダー・フォロワがサーボにより電氣的に結合する電気式リーダー・フォロワマニピュレータの第1号機 Model E1 が試作された。電気式リーダー・フォロワシステムにおいて操作者にフォロワ側の反力を伝えるための制御方法であるバイラテラル制御の基本的なものとして、対称型、力逆送型、力帰還型がある。対称型では、リーダー・フォロワ間で変位誤差サーボを行う。したがって、力センサを用いず容易に制御系が構築できる点、安定した動作を実現しやすい点で優れるが、リーダーの動特性の影響が消えず見かけの慣性が大きくなってしまい操作感が重く、かつ、フォロワ側の力を感じられないといった欠点がある。力逆送型は、フォロワ末端に力センサを付けることでフォロワ側での作業力をリーダーの駆動力として伝達することで操作者への力覚提示性能を高めている。しかし、リーダーの動特性の影響は小さくない。力帰還型は、リーダー側にも力センサを付けることで、リーダー側のダイナミクスの影響を小さくして、フォロワの作業力を感じられる。しかし、フォロワ側に力センサを装着できる状況は限られており、本論文のように掘削ロボットには、力センサを用いることはできない。このように、代表的なバイラテラル制御の方法には、一長一短があるため、1980年台後半頃から、新たなバイラテラル制御の方法が盛んに研究された。研究は主に、安定性 [39]、機構透明性（位置・力の再現性、操作性）[40]、通信遅延への対処 [41] 等に主眼を置いてなされてきた。しかし、[42] や [43] で述べられているように、異スケール間での理想応答をどう定義するのかについてはスケール効果の影響から議論があり、機構透明性に関しても、タスクの種類によってはリーダー側でフォロワの動特性を感じられた方が操作性が高い場合も存在し議論が必要である。本論文でも、理想応答として、「リーダー・フォロワ間の位置と力が一致していること」を考えるのではなく、あくまで、操作者の感じる操作性能や衝突などの異常検知ができる操作インタフェースを実現することが力学的整合性よりも優先される。

2.4 アドミッタンス制御に関する従来研究

産業用ロボット等に代表されるように、従来、安全確保のために作業中のロボットは人と隔離され、独立した環境で使用されてきた。しかし、近年では、ロボットが直接人や環境と接触作業を行うことも多く、ロボットの力機能と人間の技能を融合することで、人間の能力を拡張するパワーアシストロボットの研究等 [47] が行われている。ロボットが人や環境と相互にインタラクションを行う場合、一般的な力制御やインピーダンス制御といった制御手法も考えら



れうるが、力センサが利用可能で、ロボット関節の摩擦が大きい場合には、アドミッタンス制御が有効である [44]。リーダー・フォロワ系におけるバイラテラル制御にアドミッタンス制御を用いている研究として、小菅らによる仮想内部モデル追従制御型リーダー・フォロワ [45]、Peerらのアドミッタンス型ハプティクスインタフェースの研究 [46] が行われている。また、アドミッタンス制御において、アドミッタンスを可変とし、動特性のパラメータをリアルタイムに変更することにより、ロボットの操作の直感性を向上させる研究が盛んに行われており、代表的なものとして、現在速度と人による加速度入力の符号を比較することで人の加減速の意図を推測し、予め設定した加速度についての関数を用いて、仮想質量と仮想粘性係数の値を変更していくパワーアシストロボットの研究 [47] がある。本論文では、アドミッタンス制御に基づくバイラテラル制御において可変アドミッタンス制御を行い、それを掘削作業に適用している。

2.5 アドミッタンス制御による環境知覚と手動操作

自律制御系への人の操作介入はアドミッタンス制御器を用いて計算される。アドミッタンス制御器によって操作者は外力やリーダー・フォロワ間の位置偏差等の環境情報知覚することができる。自律制御系への操作介入は緊急時の操作やタスクの選択時に行われる。本節では本論文で用いる可変アドミッタンス制御について述べる。

まず、リーダーとフォロワの位置偏差の方向ベクトルに基づいて、リーダーとフォロワの座標系を座標変換し、変換後の座標系においてアドミッタンスモデルを考える。これは、リーダー・フォロワの可変アドミッタンスを成分ごとに変動させることで、環境外力方向の動特性のみを変化させることを目的としている。アドミッタンス制御における座標変換後の座標系 $\psi\xi\eta\zeta$ 座標は、フォロワの現在の座標を原点とし、 $\psi\xi\eta\zeta$ 座標における基底ベクトルをそれぞれ

$$e_\psi = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.1)$$

$$e_\xi = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{x_l - x_f}{\sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2}} \\ \frac{y_l - y_f}{\sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$e_\eta = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{y_l - y_f}{\sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2}} \\ \frac{-x_l + x_f}{\sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$e_\zeta = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (2.4)$$



と設定する. Fig.2.2 に示すように ξ 軸は, リーダとフォロワのバケット根本位置の xy 成分の偏差の方向を正と取り, ψ 軸は θ の基底ベクトルをそのまま使用し, ζ 軸は ϕ の基底ベクトルをそのまま使用する. η 軸の基底ベクトルは ξ 軸と xy 平面上で直交する. $\theta xy\phi$ 座標系から $\psi\xi\eta\zeta$ 座標系への座標変換行列 ${}^\xi R_x$ は

$${}^\xi R_x = [e_\psi \quad e_\xi \quad e_\eta \quad e_\zeta]^T \quad (2.5)$$

となり, $\theta xy\phi$ 座標系から $\psi\xi\eta\zeta$ 座標系への座標変換は,

$$\xi = {}^\xi R_x(x - x_f) \quad (2.6)$$

と計算する.

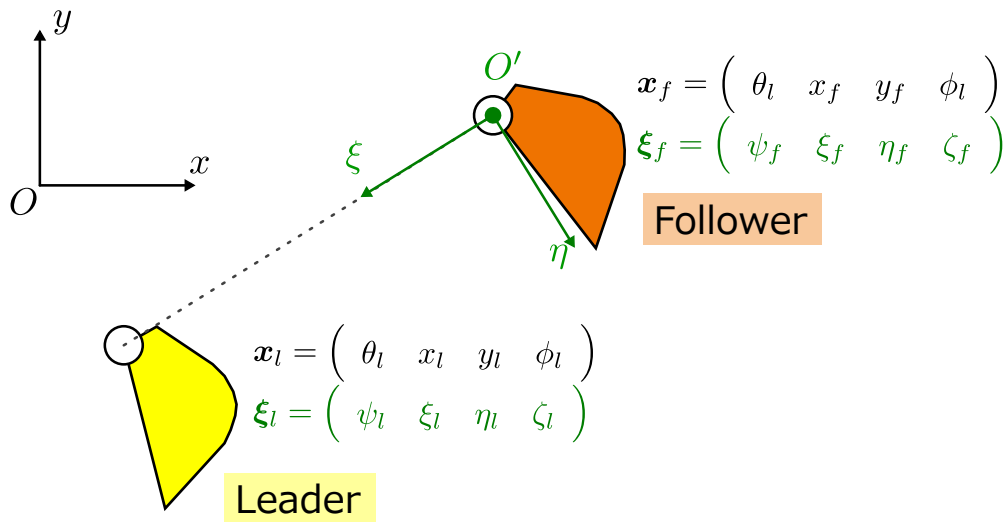


Fig.2.2 Coordinate transformation in admittance model

アドミッタンス制御におけるリーダ, フォロワそれぞれについての可変アドミッタンスモデルを $\psi\xi\eta\zeta$ 座標系における仮想的な運動方程式として

$${}^\xi R_x f_h = C_l(\xi_l) (\dot{\xi}_l^{ad} - \dot{\xi}_f) + K_l(\xi_l) (\xi_l - \xi_f) \quad (2.7)$$

$${}^\xi R_x f_h = C_f(\xi_f) (\dot{\xi}_f^{ad} - \dot{\xi}_l) + K_f(\xi_f) (\xi_f - \xi_l) \quad (2.8)$$

$$K_* = \text{diag}(K_{*,\psi}, K_{*,\xi}, K_{*,\eta}, K_{*,\zeta}) \quad (2.9)$$

$$C_* = \text{diag}(C_{*,\psi}, C_{*,\xi}, C_{*,\eta}, C_{*,\zeta}) \quad (2.10)$$

と設定した. このとき f_h はリーダロボットの力センサで計測された $\theta xy\phi$ 座標系での人操作力, ξ_l, ξ_f はリーダ・フォロワそれぞれの現在の位置情報, ξ_l^{ad}, ξ_f^{ad} はリーダ・フォロワそれぞれのアドミッタンスから計算される目標位置, $*$ は l もしくは f を表し, C_l, C_f はリーダ・フォロワそれぞれの仮想粘性係数, K_l, K_f はリーダ・フォロワそれぞれの仮想剛性を表す 4



次元の対角行列である。軽快な操作性を実現するために仮想質量はリーダー・フォロワともに0とした。このアドミッタンス方程式はリーダーとフォロワが互いにばねとダンパで接続されているような動特性を持つ。式(2.7), (2.8)のアドミッタンス方程式を $\dot{\xi}_l^{ad}$, $\dot{\xi}_f^{ad}$ について解くと、

$$\dot{\xi}_l^{ad} = \dot{\xi}_f + C_l^{-1} \xi R_x f_h - C_l^{-1} K_l (\xi_l - \xi_f) \quad (2.11)$$

$$\dot{\xi}_f^{ad} = \dot{\xi}_l + C_f^{-1} \xi R_x f_h - C_f^{-1} K_f (\xi_f - \xi_l) \quad (2.12)$$

が得られ $\xi \dot{R}_x = 0$ としてこれを座標変換しアドミッタンス制御による速度指令値を

$$\dot{x}_l^{ad} = \xi R_x^T \dot{\xi}_l^{ad} \quad (2.13)$$

$$\dot{x}_f^{ad} = \xi R_x^T \dot{\xi}_f^{ad} \quad (2.14)$$

と計算できる。

次に、可変アドミッタンスモデルによるリーダー・フォロワ系において実現したいリーダー・フォロワロボットの動特性について述べる。掘削作業における環境とロボットの関係を環境外力の大きさによって4つ(無, 小, 中, 大)に分類し、操作者にとってそれぞれの状況においてどのような動特性が理想的であるかを考える。「環境外力が無い状況」とは、「空中でリーダー・フォロワロボットを操作している状況」を意味する。このとき、ロボットを動かすのにそれほど大きな力を必要せず軽快に動き、フォロワからの力覚提示がほとんど無く操作できることが理想的であると考えられ、減衰係数も剛性も小さい、高アドミッタンスが良いと考えられる。「環境外力が小さい状況」とは、「比較的柔らかい土壌を難無く掘削している状況」を意味する。このときも、人に提示する力は小さくて良いので、高アドミッタンスが良いと考えられる。逆にアドミッタンスが低いと、フォロワ側の小さな外乱が過敏に操作者に伝わってしまう。したがって、環境外力が小さい土壌中では、高アドミッタンスの方が好ましい。「環境外力が中程度の状況」とは、「比較的硬い土壌で土壌抵抗力を人が感じながら掘削している状況」を意味する。このとき、軽快に掘削できるものの、バケットが引っかかった時には、引っかかっている力覚を操作者に伝達する必要がある、バケットと土壌の接触状態に応じて、高アドミッタンスと低アドミッタンスが切り替わることが良いと考えられる。最後に、環境外力が大きい状態は、「大きな岩石と接触している状況」を意味する。このときには、操作力が加わっても、フォロワが動かないので、リーダーも動くべきでない。動かせないような大きな岩石やブロックと接触している場合には、過大なトルクを出力し続けると、ショベル自体の破損や転倒の原因にもなりうる。そこで、リーダーに力覚提示を行う剛性、減衰係数の値がともに高い値である必要があり、低アドミッタンスである必要があると考えられる。したがって、提案手法においては、環境外力が小さい時に高アドミッタンス、環境外力が大きい時に低アドミッタンスとなるように可変アドミッタンスの関数を設計した。

式(2.7), (2.8)に示すアドミッタンス方程式の動特性の ξ 成分と ζ 成分は可変であり、 ξ の



関数で表される。仮想剛性を増減させる式を

$$K_{l,\xi}(\xi_l) = a_\xi \left(\frac{\tanh\left(\frac{b_\xi(\xi_m - c_\xi)}{2}\right) + 1}{2} \right) + d_\xi \tag{2.15}$$

$$K_{l,\zeta}(\zeta_l) = a_\zeta \left(\frac{\tanh\left(\frac{b_\zeta(\zeta_m - c_\zeta)}{2}\right) + 1}{2} \right) + d_\zeta \tag{2.16}$$

に示す。設計パラメータ a, b, c, d それぞれの値と、剛性増減式のグラフの形状の関係を Fig.2.3 に示す。 a は高剛性と低剛性の差を表すパラメータ、 b は低剛性から高剛性への切り替わりの急峻さを表すパラメータ、 c は切り替わり点の座標を表すパラメータ、 d は低剛性の値を表すパラメータである。

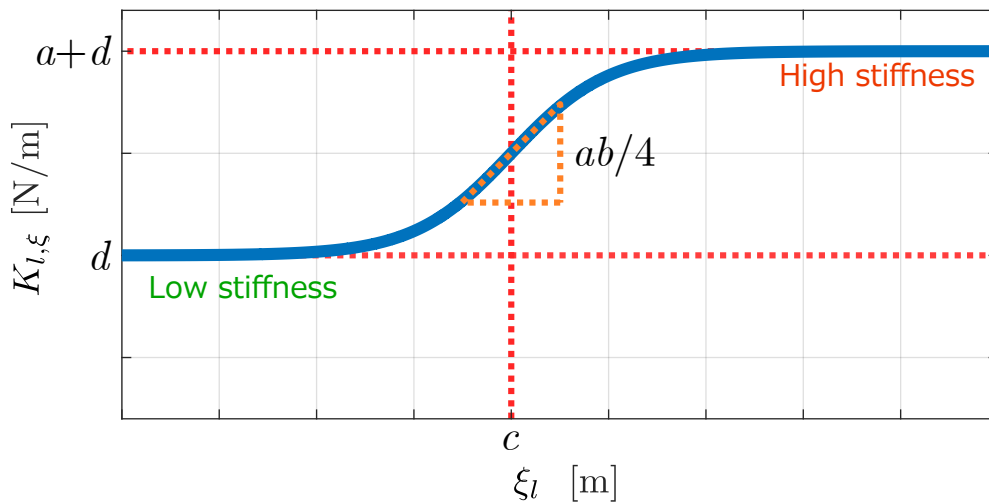


Fig.2.3 Design parameters of variable admittance

仮想減衰係数 $C_{l,\xi}(\xi_l)$ は $K_{l,\xi}(\xi_l)/C_{l,\xi}(\xi_l)$ を一定に保つように $K_{l,\xi}(\xi_l)$ と同様に増加させた。仮想剛性と仮想減衰係数の比率 $K_{l,\xi}(\xi_m)/C_{l,\xi}(\xi_l)$ は予備実験より $K_{l,\xi}(\xi_l)/C_{l,\xi}(\xi_l) = 1$ と設定することとした。 ζ 成分についても同様である。また、本論文の実験ではリーダーとフォロワの仮想剛性と仮想減衰係数は同じ値を用いた。 ξ 成分、 ζ 成分についてのそれぞれのアドミッタンス変更式のシグモイド関数の係数 a, b, c, d を Table.2.1 に示す。

Table.2.1 Value of parameters

	a	b	c	d
ξ direction	4.6×10^4	8.0×10^5	5.0×10^{-4}	4.0×10^3
ζ direction	3.5	1.0×10^3	1.7×10^{-3}	5.2



2.6 実験環境とリーダー・フォロワロボット

本節では、設計した制御系の有効性を検証するために作成した実験機のリーダー・フォロワロボットと周囲の実験環境について説明する。設計・製作を行った掘削作業用リーダー・フォロワと周囲の実験環境を Fig.2.4 に示す。リーダーロボットの外形を Fig.2.5(a) に、フォロワロボットの外形を Fig.2.5(b) に示す。実際の掘削ロボットは油圧で駆動するものが一般的であるが、今回の実験機は DC モーターで駆動する。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サイドビューを見ながら右手でリーダーのハンドルを握り、力センサへと人操作力を加え、計測した操作力から可変アドミッタンスモデルに基づいて計算された目標位置を逆運動学解析によって関節角度に変換し、リーダーロボットとフォロワロボットのモータは、モータドライバによって電圧制御による PD 制御によって目標関節角度へと追従する。サンプリングタイムは 3ms である。モータは、ブームの根本のみマクソンモータ製の 90W モータで、残りの旋回、アーム根本、バケット根本は、マクソンモータ製の 60W モータを用いた。また、モータの出力はベルトプーリ機構（減速比が旋回とブームの根本では 1/3 でアームとバケットでは 1/2）を介して減速比 1/100 の波動歯車装置の入力軸に伝達される。リーダー・フォロワともに 6 軸の力覚センサが組み込まれており、リーダーの力覚センサは、制御に用いるが、フォロワ側の力覚センサは実験検証用である。掘削用の大粒の砂利には、直径約 15 mm の青緑碎石を用い、容器には、横 1065 mm 縦 303 mm 奥 726 mm のコンテナを用いた。掘削用の小粒の砂利には、直径平均 2~4 mm の大きさである矢作砂を用い、容器には、横 500 mm 縦 300 mm 奥 250 mm の全面アクリル製のものを用いた。リーダーのハンドル部分では、バケットとハンドルの間のプーリベルト機構によって、2.56 倍の減速が行われており、この減速機構により、Fig.2.6 に示すように、操作者の手首に無理のない操作を可能とした。

リーダー・フォロワロボットのリンク長を Table.3.3 に、各関節の可動域を Table. 3.4 に示す。また、この実験機の可動域を Fig.2.7 に示す。実験機は、Fig.2.5(a), Fig.2.5(b) の時点の地面に垂直な状態を初期姿勢とし、この姿勢で初期位置決めを行い、Fig.2.7 で赤く示されている掘削開始位置まで起動と同時に自動で移動する。掘削開始位置 \mathbf{x}^{start} は、 $\mathbf{x}^{start} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.05 & 0 \end{bmatrix}$ である。Fig.2.7 のグレーの領域がバケット根本の可動域で、ピンクの領域がバケット先端の可動域で、平衡多様体の目標軌道やコンテナや土壌との位置関係から、十分広い可動を得ていることが分かる。

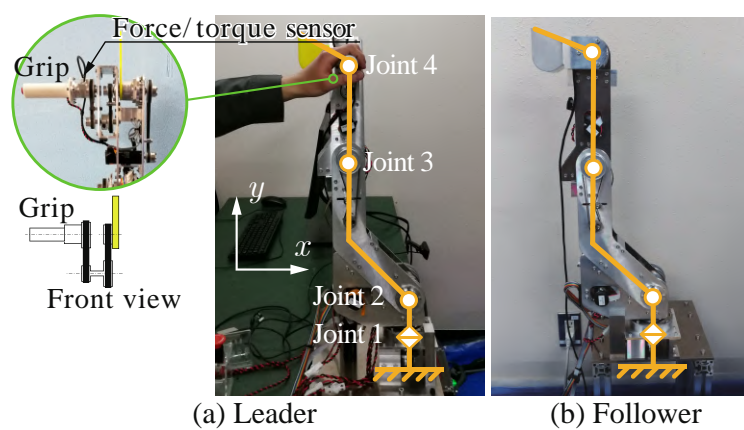




(a) Front view

(b) Side view

Fig.2.4 Experimental setup in Chapter 2



(a) Leader

(b) Follower

Fig.2.5 Prototype of leader-follower excavation system. It has the same configuration as a hydraulic excavator. A force/torque sensor is mounted on the grip of the leader robot.



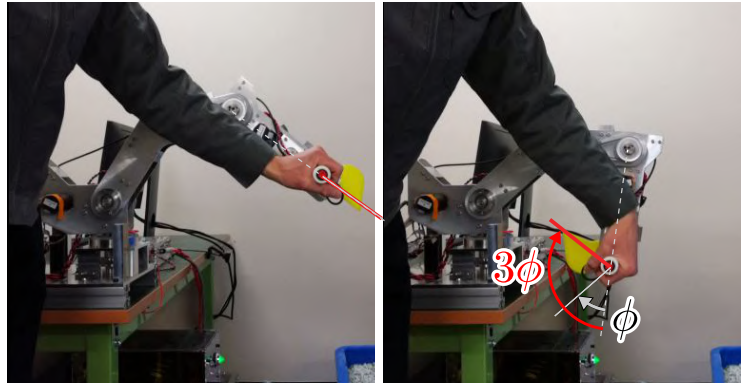


Fig.2.6 Reduction of grip rotation by a belt-pulley mechanism. This mechanism allows the operator to operate the bucket with a smaller wrist motion. The grip rotation is reduced approximately one-third of the bucket rotation.

Table.2.2 Link length

Leader boom	0.312 m
Leader arm	0.210 m
Leader bucket	0.116 m
Follower boom	0.312 m
Follower arm	0.210 m
Follower bucket	0.118 m

Table.2.3 Work space of each joint

Leader	Follower
$0^\circ \leq \theta_{1l} \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \theta_{1f} \leq 90^\circ$
$-52.38^\circ \leq \theta_{2l} \leq 112.62^\circ$	$-52.38^\circ \leq \theta_{2f} \leq 112.62^\circ$
$-147.62^\circ \leq \theta_{3l} \leq 22.62^\circ$	$-147.62^\circ \leq \theta_{3f} \leq 22.62^\circ$
$-120^\circ \leq \theta_{4l} \leq 60^\circ$	$-112^\circ \leq \theta_{4f} \leq 68^\circ$



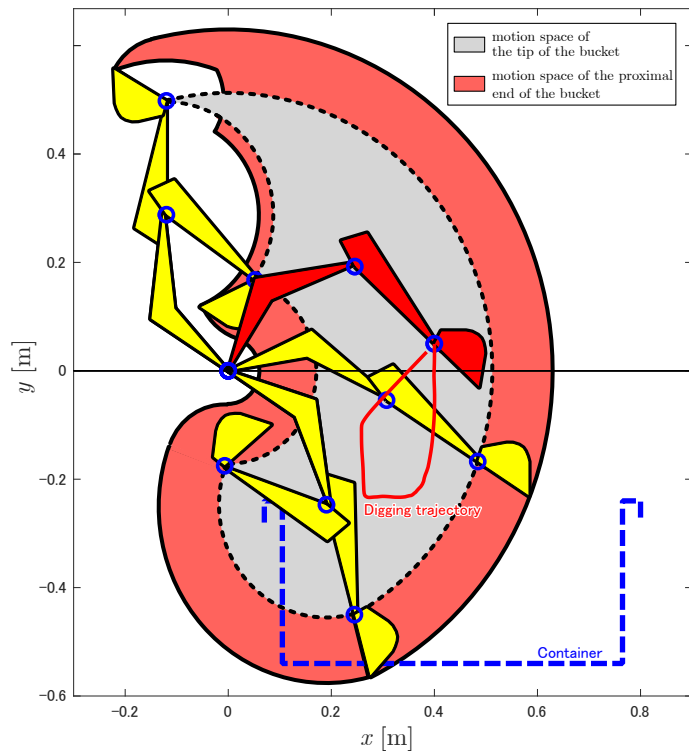


Fig.2.7 Work space of leader follower robot

2.7 検証実験

2.7.1 実験内容

先述した実験機のリーダ・フォロワロボットを用いて、設計したリーダ・フォロワ系の制御則の検証実験を行った。検証では、環境外力が無い（空中）、小さい（小粒砂利）、中程度（大粒砂利）、大きい（岩を想定した金属板）、それぞれの状況における動特性の妥当性を、時系列のリーダ・フォロワロボットの位置情報とそれぞれの力センサで取得した力情報を基に調べた。実験に用いた砂利と金属板を Fig.2.8 に示す。以下、各実験の結果を示し、その結果について説明し、最後に考察を述べる。



Fig.2.8 Soil conditions

2.7.2 環境外力が無いとみなせる状況（空中）での動作の検証

はじめに、平衡多様体による掘削軌道への引き込みを行わず、可変アドミッタンスモデルによる制御だけの状態で、環境外力がほとんど作用しない空中での動作についての実験を行った。実験時のリーダー・フォロワロボットの動きを Fig.2.9 に示す。空中で、上下前後に動かした際の操作性を検証した。Fig.2.10 にこのときのリーダー・フォロワの位置偏差の絶対値の時間変化、Fig.2.11 に人操作力の絶対値の時間変化を示す。Fig.2.10 において位置偏差が赤線で表した可変アドミッタンスの切り替わり点を超えていないことから、常に低アドミッタンスで軽快に操作できていることが分かる。

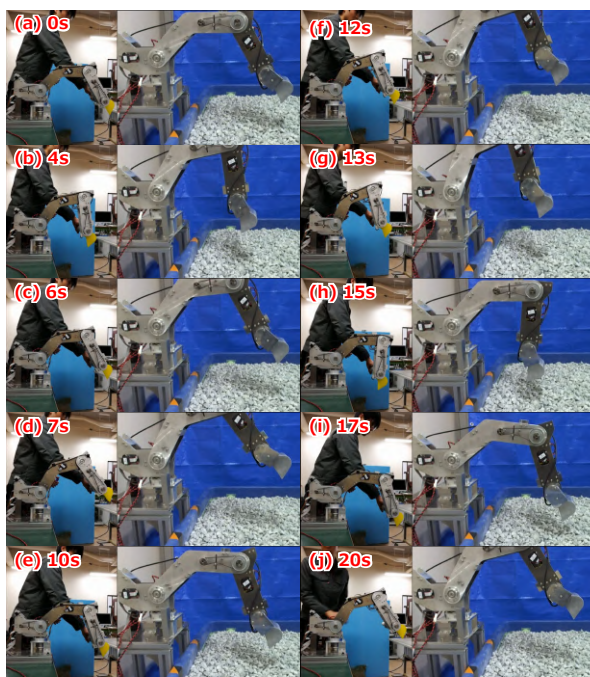


Fig.2.9 Experiment 1:Free motion

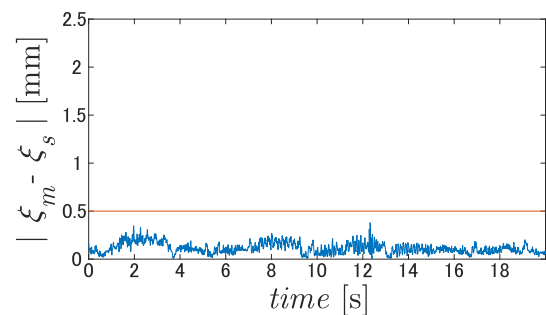


Fig.2.10 Absolute value of position difference between Leader and Follower

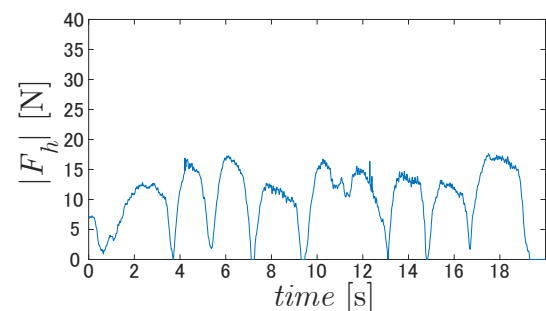


Fig.2.11 Absolute value of operating force



2.7.3 環境外力が小さい状況（小粒砂利の掘削）での動作の検証

次に、平衡多様体による掘削軌道への引き込みを行いながら、環境外力が小さいと考えられる小粒砂利の掘削についての実験を行った。実験時のリーダー・フォロワロボットの動きを Fig.2.12 に示した。Fig.2.13 にこのときのリーダー・フォロワの位置偏差の絶対値の時間変化、Fig.2.14 に人操作力の絶対値の時間変化を示した。Fig.2.13 において位置偏差が赤線で表した可変アドミッタンスの切り替わり点を超えている瞬間があり、その時には、人の操作力の値が大きくなっており、人が力覚提示を受けていることが分かる。

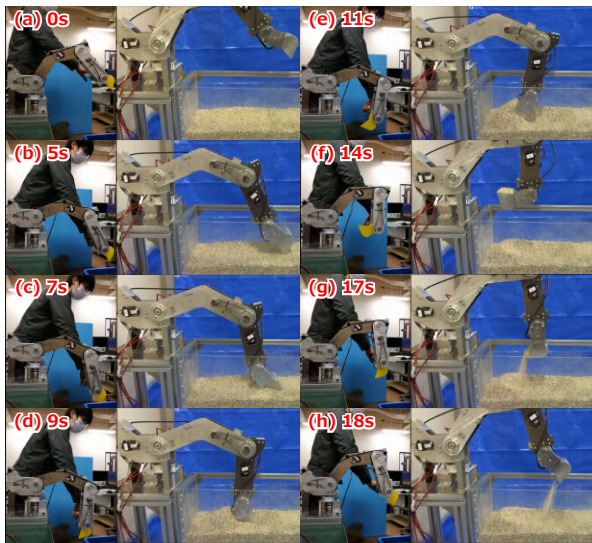


Fig.2.12 Experiment 2:Digging sand:

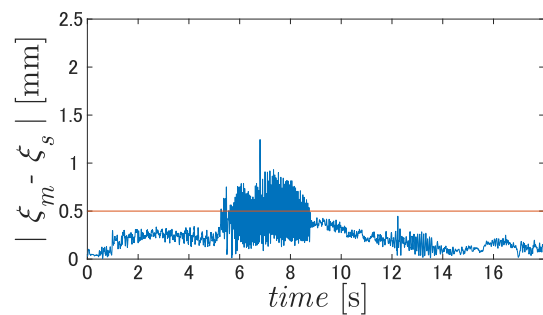


Fig.2.13 Absolute value of position difference between Leader and Follower

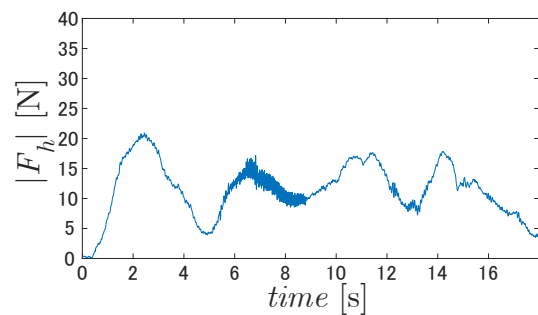


Fig.2.14 Absolute value of operating force

2.7.4 環境外力が中程度の状況（大粒砂利の掘削）での動作の検証

次に、平衡多様体による掘削軌道への引き込みを行いながら、環境外力が中程度の大きさであると考えられる大粒砂利の掘削についての実験を行った。実験時のリーダー・フォロワロボットの動きを Fig.2.15 に示した。Fig.2.16 にこのときのリーダー・フォロワの位置偏差の絶対値の時間変化、Fig.2.17 に人操作力の絶対値の時間変化を示した。Fig.2.16 において、小粒砂利の掘削の時と同様に位置偏差が赤線で表した可変アドミッタンスの切り替わり点を超えている瞬間があり、その大きさと時間が小粒砂利の状況を上回っており、Fig.2.17 より、小粒砂の状況より、大きな力覚提示を受けている事が分かる。



Fig.2.15 Experiment 3: Digging crushed stone

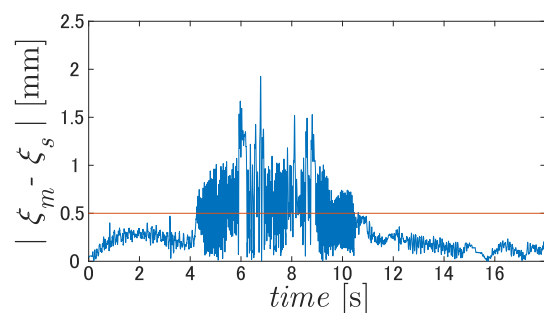


Fig.2.16 Absolute value of position difference between Leader and Follower

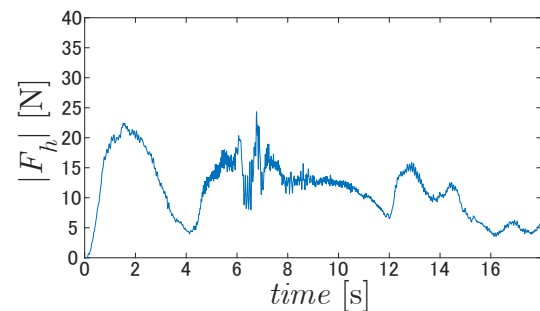


Fig.2.17 Absolute value of operating force



2.7.5 環境外力が大きい状況（板への押し付け）での動作の検証

最後に、平衡多様体による掘削軌道への引き込みを行わず、環境外力が大きい状況として、平衡多様体無しで金属板へのバケットの押し付けを行った。実験時のリーダー・フォロワロボットの動きを Fig.2.18 に示した。Fig.2.19 にこのときのリーダー・フォロワの位置偏差の絶対値の時間変化、Fig.2.20 に人操作力の絶対値の時間変化を示した。Fig.2.19 から MS 間の位置偏差が一定に収束し、力の増減にかかわらず静止していることが分かる。



Fig.2.18 Experiment 4:Pressing against a metal plate

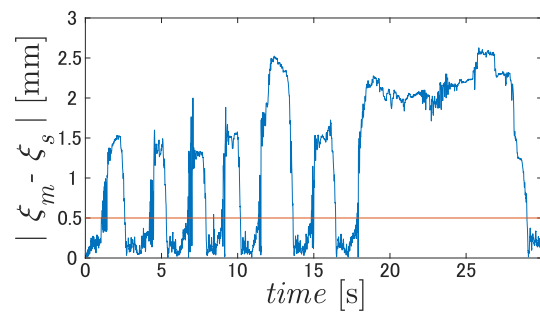


Fig.2.19 Absolute value of position difference between Leader and Follower

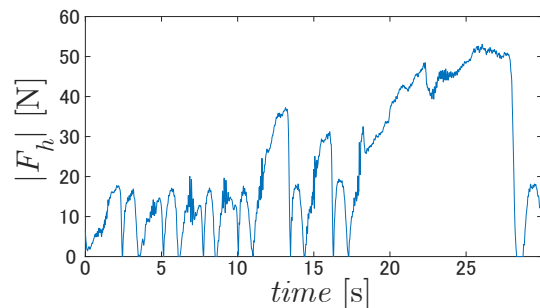


Fig.2.20 Absolute value of operating force

2.7.6 実験結果の考察

無負荷時には、常に高アドミッタンスの状態では、快適に操作を行うことが出来た。また、土壌からの環境作用力の大きさによって、力覚提示が変化することが確認できた。また、アド

ミッタンスを可変としたことで、金属板などの掘削不可能な物体と接触している力覚情報を操作者に伝えることが出来ている。

2.8 おわりに

本章において、提案手法の可変アドミッタンスによるリーダー・フォロワ制御系によって、以下のことを実現した。

- アドミッタンスモデルと平衡多様体を組み合わせたバイラテラル制御系を設計し、ロボットに実装した。
- アドミッタンスモデルの仮想剛性と仮想減衰係数をリーダー・フォロワの位置偏差の関数とし、可変とすることで状況に応じた可変アドミッタンス制御を実現した。
 - － 無負荷時の軽快な動作を実現した。
 - － 土壌の硬さの違いによって力覚提示を変化させることができた
 - － 掘削不可能な障害物の力覚提示による知覚を行うことができた。

また、本研究では、位置ベースのアドミッタンスモデルにより土壌との接触の力覚提示を行っているが、これには応答速度の限界が存在する。位置誤差に基づくリーダーフォロワロボットの力覚提示では、衝突の瞬間の撃力を正確に伝達することは難しい。なお本研究では対象としていないが、より繊細な接触状態の提示が求められる微細作業を対象とする場合には、高周波数帯域の応答速度により優れた加速度センサの使用が推奨される。



第 3 章

半自律制御系の離散的なタスク選択の設計

3.1 はじめに

本章では、アトラクタ軌道の分岐による離散的なタスク選択について詳細に説明する。アトラクタを有する非線形力学系では、現在の状態から次の時間ステップの目標速度を計算するため、その運動には時間的制約がなく、人の操作を含む外力による運動への介入が可能である。しかし、従来の方法で用いられてきた非線形力学系はロボットを目標軌道に収束させるベクトル場を表現するため、1つのタスクしか埋め込むことができない。一方で、掘削作業には、土砂の掘削が成功した場合にはダンプトラックへの積み込みを行い、失敗した場合にはそのまま掘削をやり直すといった作業の分岐がある。そのため、アトラクタを用いた半自律システムにおけるタスク選択を実現する必要がある。本論文では、非線形力学系（自律制御）に軌道の分岐と淀みを組み込み、掘削作業における人の操作によるタスク切り替えを実現する。アトラクタ軌道上の分岐点に、リーダー・フォロワロボットが停止するような点である淀みを設定し、操作者がリーダーロボットに力を加えることで次のタスクを選択する。

人間とロボットの物理的なインタラクションにおいて、力学系を用いて様々なタスクを切り替える半自律システムの関連研究がこれまでも行われており、Pistillo らは重み付けされた力学系の組み合わせに基づく直接教示とロボットの動作学習を提案し [50]、ロボットを完全に分離されたタスク領域に向けて物理的に誘導することで、学習したタスクを複数選択し、切り替えることを実現した。本手法は力学系によるタスク選択を実現するものであるが、タスクの軌跡が直接接続されておらず、切り替えに多くの操作量を要する。岡田らは二足歩行ロボットの周期運動と連続的な運動遷移を生成する運動空間のベクトル場による連続記号空間を設計した [56]。Khoramshahi らは、マルチタスク環境における物理的な人間とロボットの相互作用を通じて、ロボットが人間の意図に基づいて力学系を切り替えることを可能にする半自律制御



システムを提案した [52]. これらの手法は, ロボットが符号化されたタスク間を遷移することを可能にするが, 二足歩行ロボットや人間と協働するロボットなど単一のロボットでしか検証されていない. また, 複数の力学系を切り替えることは, 操作者の制御感覚を失わせる可能性があり, リーダ・フォロワシステムにとって致命的な問題である. そこで本論文では, 単一の力学系が連続的な分岐軌道を持つ離散的なタスク選択を行う半自律的なリーダフォロワシステムを提案する.

3.2 離散的なアトラクタ軌道の分岐の設計

3.2.1 自律制御系の構成

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.3.1 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 $\dot{\mathbf{x}}^{auto}$ はアトラクタの項 $w_s \mathbf{v}_{at} \in \mathbb{R}^4$ と淀みの項 $\mathbf{v}_{stg} \in \mathbb{R}^4$ を含み

$$\dot{\mathbf{x}}^{auto} = w_s \mathbf{v}_{at} + \mathbf{v}_s \quad (3.1)$$

と設定した. $w_s \in \mathbb{R}$ 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. Fig.3.1(a) に示され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.3.1(b) 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. アトラクタと淀みは仮想空間で設計され座標変換によってバケットの状態に変換される. 淀みは Fig.3.1(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. 淀みで一時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. このようにして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ことができる.



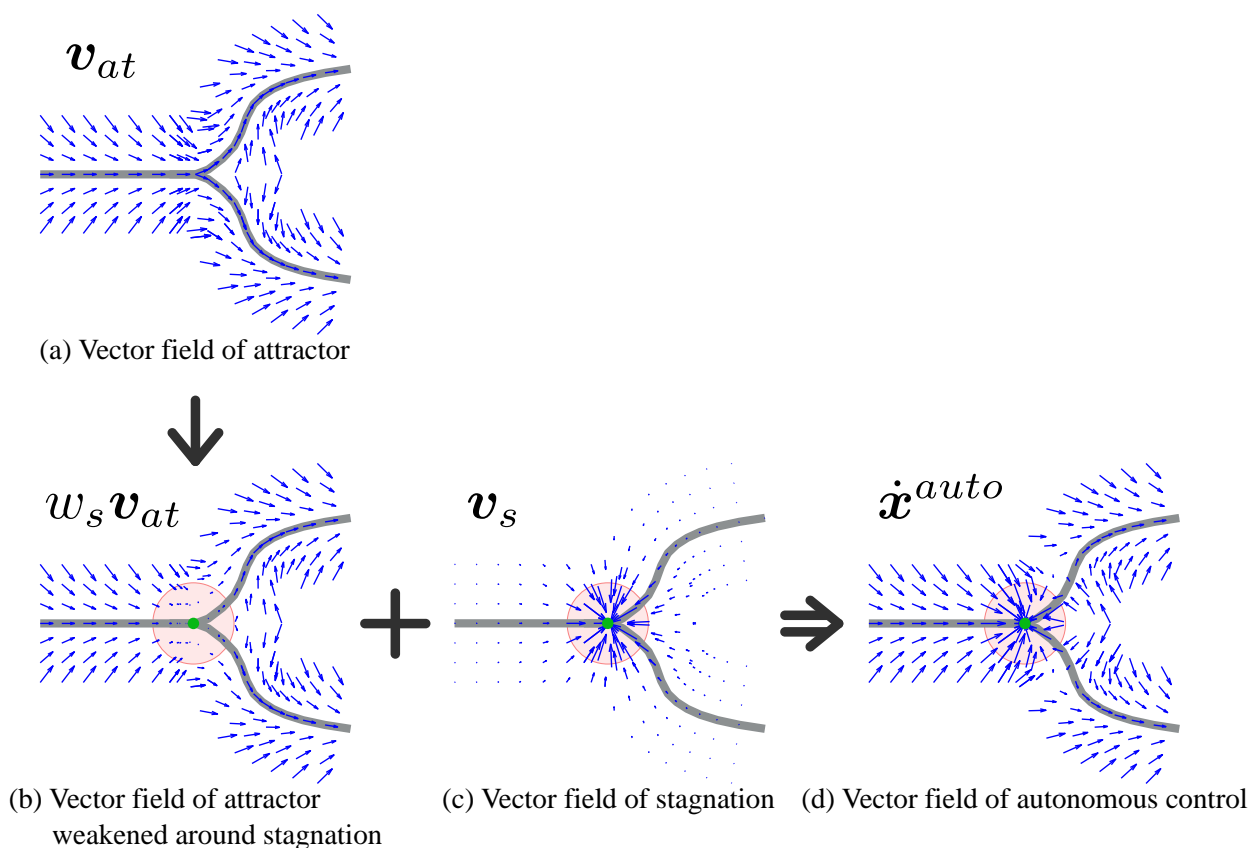


Fig.3.1 Configuration of the vector field of the autonomous control system

次に、提案する半自律制御系で用いられるアトラクタを有する非線形力学系の設計方法について述べる。アトラクタを有する非線形力学系の設計は、1) 軌道の設計、2) ベクトル場の設計、3) 多項式近似 の 3つのステップで行われる。

1) 分岐を有する掘削軌道の設計: アトラクタの軌道 Ξ を \bar{x} の状態空間上で Fig.3.2(a) に示すように設定する。

2) ベクトル場の設計: Fig.3.2(b) に示すように軌道 Ξ 付近に点群を分布させる。それらの点 $\mathbf{X}_j \in \mathbb{R}^4$ 上に、軌道に収束するような速度ベクトル $\mathbf{u}_j \in \mathbb{R}^4$ を設定する。このようにして多数の $(\mathbf{X}_j, \mathbf{u}_j)$ の集合が得られる。



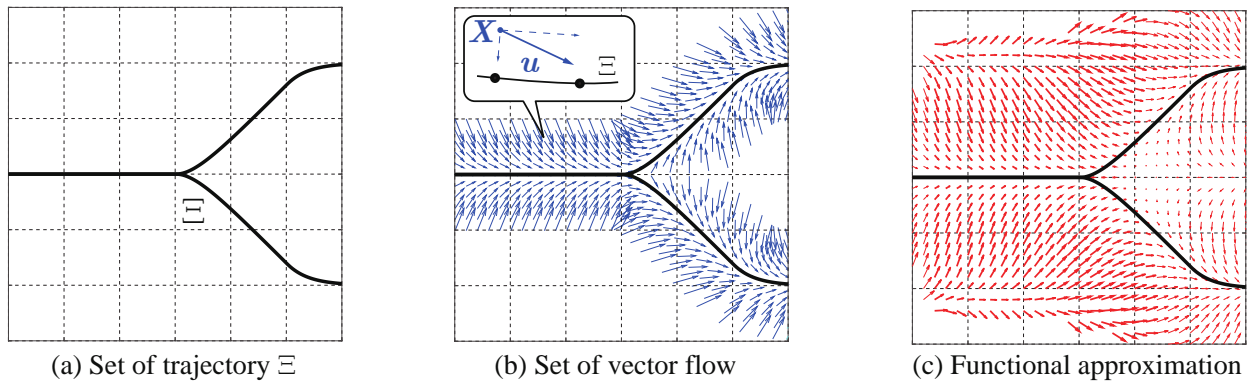


Fig.3.2 Design of attractor

3) 多項式近似によるコントローラの設計: 得られた $(\mathbf{X}_j, \mathbf{u}_j)$ をもとに, [56] と同様の方法で l 次の多項式近似によってコントローラを設計する. 計算されたベクトル場を Fig.3.2(c) に示す. コントローラは式 (3.2) によって表され,

$$\bar{\mathbf{v}}_{at}(\bar{\mathbf{x}}) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \mathbf{X} + \mathbf{a}_2 \mathbf{X}^2 + \dots + \mathbf{a}_\ell \mathbf{X}^\ell \quad (3.2)$$

$$\mathbf{V}_{at} = S \bar{\mathbf{V}}_{at}(\bar{\mathbf{x}}) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{V}_{at} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{at}^T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.4)$$

$$\bar{\mathbf{V}}_{at} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_{at}^T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.5)$$

\mathbf{X}^i は $\bar{\theta}^p \bar{x}^q \bar{y}^r \bar{\phi}^s$ からなり, p, q, r, s は $p+q+r+s=i$ である非負整数である. $\bar{\mathbf{v}}_{at}$ は仮想空間上で設計されたアトラクタの速度ベクトル場であり, 式 (3.3)~(3.5) に示すように同次座標系表現を用いて $\bar{\mathbf{v}}_{at}$ を現実世界での速度ベクトル場 \mathbf{v}_{at} に変換する. S は 5.2 節にて後述するスケーリングのための座標変換行列である. 式 (3.2) は

$$\bar{\mathbf{v}}_{at}(\bar{\mathbf{x}}) = \Theta \phi(\mathbf{X}) \quad (3.6)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 & \mathbf{a}_1 & \dots & \mathbf{a}_\ell \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\phi(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{X} & \mathbf{X}^2 & \dots & \mathbf{X}^\ell \end{bmatrix}^T \quad (3.8)$$

と表わせ, 係数行列 Θ は p 組の $(\mathbf{X}_j, \mathbf{u}_j)$ を用いて

$$\Theta = U \Phi^\# \quad (3.9)$$

$$U = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_p \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi(\mathbf{X}_1) & \phi(\mathbf{X}_2) & \dots & \phi(\mathbf{X}_p) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

と計算される. ここで, $\Phi^\#$ は $\Phi^T (\Phi \Phi^T)^{-1}$ で定義される擬似逆行列である. 本論文では $\ell = 6$ とした.



3.2.2 アトラクタの淀みの速度ベクトル場の設計

淀みはある1点 $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^4$ に収束する吸い込みのベクトル場として定義されており、式(4.1)~(3.15)によって定義される。

$$\bar{\mathbf{v}}_s(\bar{\mathbf{x}}) = - \sum_{k=1}^K \frac{(\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|^n)}{(\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|^m + b)} \frac{AW(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})}{\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|} \quad (3.12)$$

$$\bar{\mathbf{x}} = [\bar{\theta} \quad \bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{\phi}]^T \quad (3.13)$$

$$\mathbf{V}_s = S\bar{\mathbf{V}}_s(\bar{\mathbf{x}}) \quad (3.14)$$

$$\mathbf{V}_s = [\mathbf{v}_s^T \quad 1]^T, \bar{\mathbf{V}}_s = [\bar{\mathbf{v}}_s^T \quad 1]^T \quad (3.15)$$

ここで m と n は $m > n$ の正の整数であり、予備実験から $m = 6, n = 2$ とした。 $\bar{\mathbf{x}}$ は仮想空間での状態変数である。 K は淀みの数を表し、 $\bar{\mathbf{x}}_{s,k}$ は k 番目の淀みの仮想空間での位置を表している。 $W \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は成分間のスケール調整のための重み行列である。 $A \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ の値は吸い込みの強さを変更し、 $b \in \mathbb{R}$ は吸い込みの領域を定義する r_0 の値を変更する。 $\bar{\mathbf{v}}_s$ は仮想空間上での設計された淀みの速度ベクトル場である。式(4.2)と(3.15)に示すように同次座標系表現を用いて $\bar{\mathbf{v}}_s$ を現実世界での速度ベクトル場 \mathbf{v}_s に変換する。Fig.3.3は $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|$ (k 番目の淀み $\bar{\mathbf{x}}_{s,k}$ に対するロボットの重み付けされた相対距離)と k 番目の淀みによる速度ベクトルのノルム $\|\bar{\mathbf{v}}_{s,k}\|$ の関係を示している。 $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\| = 0$ のとき $\|\bar{\mathbf{v}}_{s,k}\| = 0$ となり、ロボットの運動が停止する。 $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|$ の増加にしたがって $\bar{\mathbf{x}}_{s,k}$ への吸い込みの強さを表す速度が変化し、 $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\| \rightarrow \infty$ のとき、 $\|\bar{\mathbf{v}}_{s,k}\| = 0$ なので淀みの遠方では吸い込みの影響は無視できる。

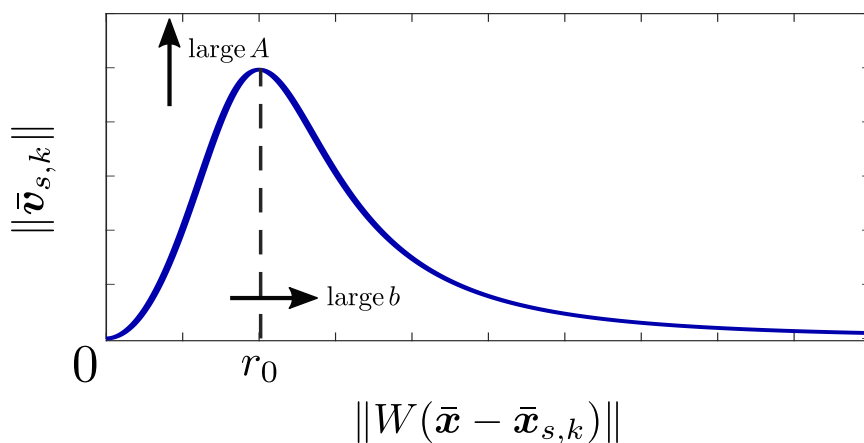


Fig.3.3 Design of stagnation



3.2.3 淀み周辺でのアトラクタの強さの設計

3.2.2 節で定義された吸い込みのベクトル場に加えて淀みの周辺でアトラクタの速度を弱めることで淀みにおける一時停止は実現される．淀み周辺でアトラクタを弱める関数 w_s を

$$w_s = \prod_{k=1}^K \left\{ \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|^3}{c} \right) \right\} \quad (3.16)$$

と設計した．式 (3.16) は式 (4.1) の関数のポテンシャルを正規化した式で， $c \in \mathbb{R}$ 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．Fig.3.4 は $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|$ (k 番目の淀み $\bar{\mathbf{x}}_{s,k}$ に対するロボットの重み付けされた相対距離) と k 番目の淀みによるアトラクタの強さ $w_{s,k}$ の関係を示している．淀みの周辺で $w_{s,k}$ は 0 に近い値を取り， $\|W(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_{s,k})\|$ の増加に伴って単調増加し 1 に収束する．

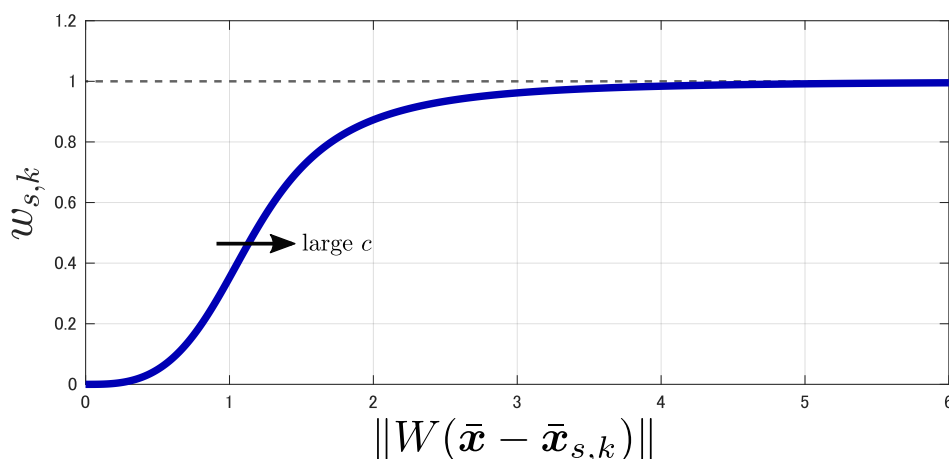


Fig.3.4 Strength of attractor around stagnation

3.2.4 掘削作業のための離散的な分岐を有するアトラクタの軌道の設計

本節では提案する半自律制御系において実際に用いる分岐掘削軌道を設計する．本論文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．このタスクの選択を実現するために設計した分岐掘削軌道を Fig.3.5 に示す．なお，この軌道は 5 章における実験のために設計したものであり，実際の軌道とは異なる．Fig.3.5(a) に示されている掘削動作の軌道は点 A を始点とし，点 B, C を通って初期姿勢に戻る．淀み点は緑色の点で表され，点 B（掘削の開始点）と点 C（軌道の分岐点）に配置されている．Fig.3.5(b) に示されている旋回動作の軌道は点 C を始点とし，旋回



後に土壌を積み込み，点 A において掘削軌道と合流する．操作者は点 C において，再度掘削するか，旋回積込をするかを選択する．この分岐軌道へのアトラクタを有する非線形力学系を 3.2.1 節に示した方法で設計し，自律制御系として用いた．

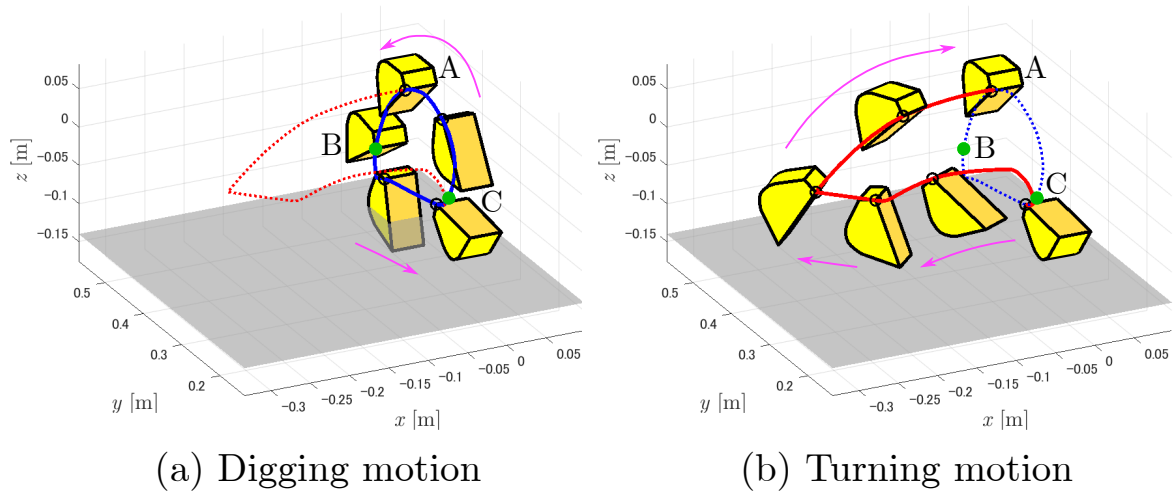


Fig.3.5 Excavator trajectory for digging and turning

3.3 改良されたリーダロボットを含む実験環境

3.3.1 はじめに

前節では，本論文におけるタスクの選択，タスク軌道の変形，両者の操作分離を実現する半自律リーダ・フォロシステムの制御系の詳細の説明をした．本節では，設計した制御系の有効性を検証するための実験機として改良されたリーダロボットと周囲の実験環境について説明する．

3.3.2 リーダロボットの機構設計

第 2 章において実験に用いてきたリーダ・フォロロボットでは，リーダロボットとして油圧ショベルと同様の機構を持つものを用いてきたが，油圧ショベルは掘削のために設計された機械であり，その構造が人の操作にも適しているとは言えない．これまでのリーダロボットは 4 自由度の空間アームであり旋回を行う．しかし，物理的に旋回を行う空間アームは操作者と接触し危害を及ぼす恐れがある．そのため，旋回自由度を映像で代替する低自由度リーダロボットの設計を行った．設計したリーダロボットの機構を Fig.3.6 に示す．リーダロボットでは旋回関節の代わりにリーダの土台部分に取り付けられたディスプレイに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す。加えて閉リンク機構、ベルトプリー機構によって2軸目、3軸目のアクチュエータをロボット下部に取り付けることで手先の軽量化を行った。 $J_1 \sim J_{10}$ は各関節の位置、 (X', Y') は J_8 を原点とした相対座標系 $x'y'$ における J_{10} の位置、 L_1, L_2 はそれぞれ $J_1 J_5, J_5 J_8$ の長さを表す。 θ_{1l}, θ_{2l} はそれぞれ $J_1 J_5, J_1 J_2$ の姿勢角を表し、 θ_{3l} は $J_1 J_5$ 上に取り付けた3軸目のアクチュエータの回転軸の $J_1 J_5$ に対する相対角度を表し、 (x_l, y_l) はバケットの根本 J_{10} の位置、 ϕ_l はバケットの姿勢を表す。バケットの根本 J_{10} の位置 (x_l, y_l) は順運動学から

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1l} \cos \theta_{1l} + L_{2l} \cos(\theta_{2l} - \pi) + X' \\ L_{1l} \sin \theta_{1l} + L_{2l} \sin(\theta_{2l} - \pi) - Y' \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

と計算でき、 $\theta_{1l} = 0, \theta_{3l} = 0$ のとき $\phi_l = 0$ とすると、

$$\phi_l = \theta_{1l} + \theta_{3l} \quad (3.18)$$

と計算できる。アニメーションとしてディスプレイに表示される仮想的な θ_l の値にはフォロワロボットの旋回量 θ_f をそのまま用いることとする。

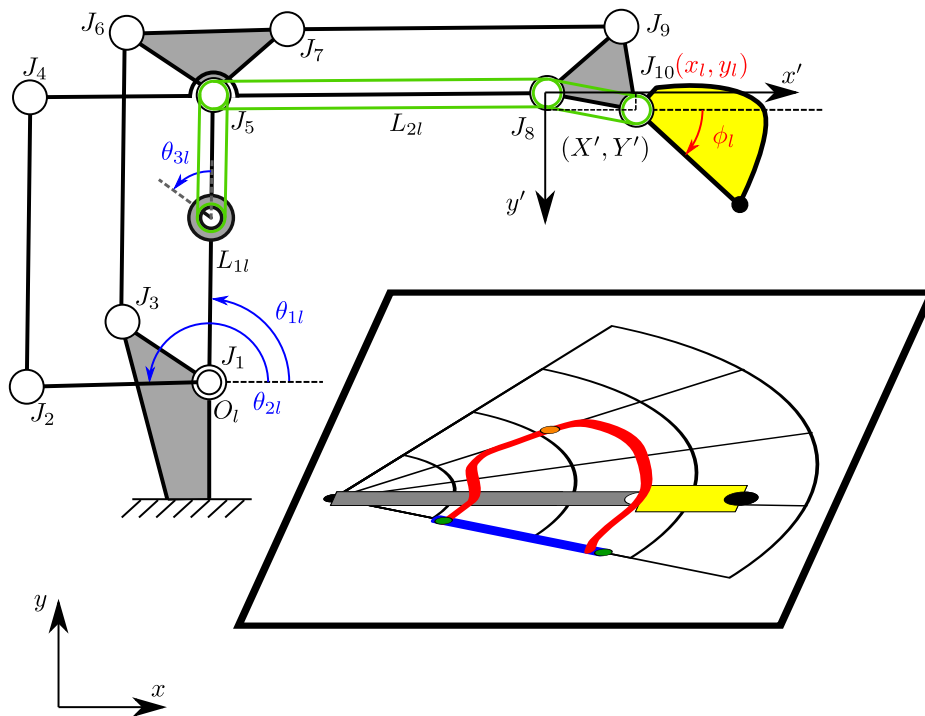


Fig.3.6 Mechanism of the leader robot

3.3.3 リーダロボットの試作

設計したリーダロボットを Fig.3.7 に示す。Fig.3.7(a), (b), (c) はそれぞれロボットの正面図、側面図、斜視図である。 $\theta_{1l}, \theta_{2l}, \phi_l$ を駆動するためにロボットにはマクソンモータ製の



40 W の DC モータが 3 つ取り付けられており、それぞれのモータの出力はカップリングを介して減速比 1/100 の波動歯車装置の入力軸に伝達される。 ϕ_l を駆動するモータの回転トルクはタイミングベルトを介してバケットとハンドルに伝達される。ハンドルには 6 軸の力センサが取り付けられており操作力を計測する。リーダのハンドル部分では、バケットとハンドルの間のプーリベルト機構によって、減速比 1/2 倍の減速が行われており、この減速機構により操作者の手首に無理のない操作を可能とする。ロボットのリンク長 L_{1l} , L_{2l} , X' , Y' の値を Table.3.2 に示す。関節角度 θ_{1l} , θ_{2l} , ϕ_l の可動域の 3DCAD による計算値を Table. 3.1 に示す。

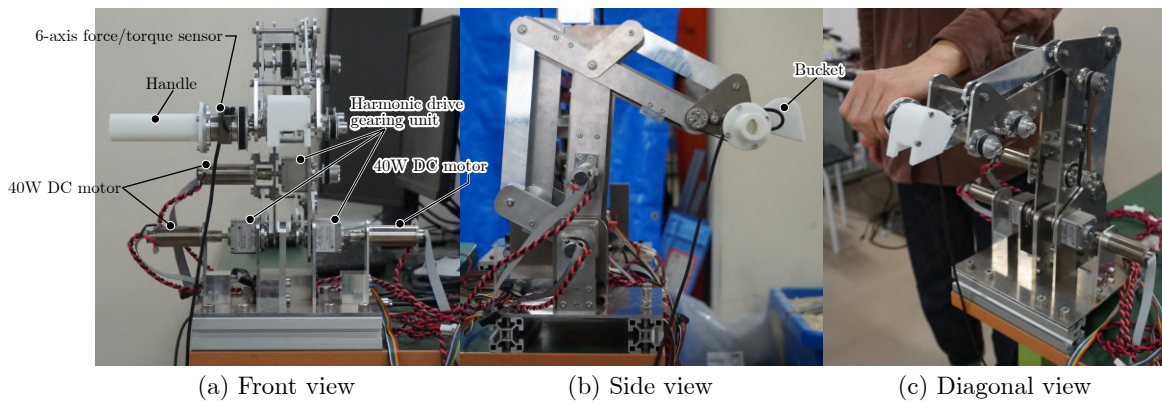


Fig.3.7 Leader robot

Table.3.1 Work space of each joint of the leader

$14.87^\circ \leq \theta_{1l} \leq 105.13^\circ$
$\theta_{2l} \leq 194.32^\circ$
$39.76^\circ \leq \theta_{2l} - \theta_{1l} \leq 141.75^\circ$
$-161.82^\circ \leq \phi_l \leq 43.83^\circ$

Table. 3.1 から作業空間におけるバケット根本 J_{10} の可動域を Fig.3.8(a) に赤い実線で示す。

Table.3.2 Link length of the leader robot

L_1	0.208 m
L_2	0.14 m
X'	$0.056 \cos \frac{\pi}{18}$ m
Y'	$0.056 \sin \frac{\pi}{18}$ m



3.3.4 リーダ・フォロワロボットの状態の変換

リーダロボットとフォロワロボットはリンク長が異なるため、アドミッタンス制御や自律制御系の速度指令値の計算において、リーダ・フォロワ間の状態の変換を行う必要がある。リーダロボットの状態は式 (3.19)~(3.22) を用いて、フォロワロボットの状態空間上に座標変換される。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_l = [x_l \quad y_l]^T, \hat{\boldsymbol{x}}_f = [x_f \quad y_f]^T \quad (3.19)$$

$$\boldsymbol{X}_l = [\hat{\boldsymbol{x}}_l^T \quad 1]^T, \boldsymbol{X}_f = [\hat{\boldsymbol{x}}_f^T \quad 1]^T \quad (3.20)$$

$$\boldsymbol{X}_f = T_{LF} S_{LF} \boldsymbol{X}_l \quad (3.21)$$

$$T_{LF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.23 \\ 0 & 1 & -0.075 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_{LF} = \begin{bmatrix} 2.0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

このとき式 (3.19) はロボットの状態の xy 成分で、式 (3.20) は式 (3.19) の同次座標表現で、式 (3.22) は平行移動の座標変換行列 T 、スケーリングの座標変換行列 S である。Fig.3.8 にはリーダ・フォロワロボットそれぞれの構造上の可動域を実線で示し、もう一方の可動域を座標変換したものを点線で示している。実線で囲まれた領域と点線で囲まれた領域の重なった部分（青く塗られている領域）をリーダ・フォロワロボットの制御上の可動域とし、 T と S の値はリーダロボットの構造上の可動域を広く用いることができ、フォロワロボットにおいて想定する掘削作業において用いる作業空間をカバーできるように設計した。フォロワロボットの状態空間上に座標変換されたリーダロボットの状態を目標速度の計算に用いる。Fig.3.8(a), (b) に示している2つの三角形は座標変換によって移動したもう一方の座標系における原点の位置であり、Fig.3.8(a) の青い三角形の位置は Fig.3.9(d) に示されている極座標系の原点の位置と一致している。

3.3.5 実験環境

設計・製作を行った掘削作業用リーダ・フォロワロボットと周囲の実験環境の全体像を Fig.3.9(a) に示す。フォロワロボットには第2章において設計・製作され実験に用いられたものを用い、リーダロボットには 3.3.2 節、3.3.3 節で述べた新たに設計されたロボットを用いた。リーダロボットの操作者視点で提示される映像情報の様子を Fig.3.9(b) に示す。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カメラ映像 (Fig.3.9(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.3.9(d)) を見ながら右手でリーダロ



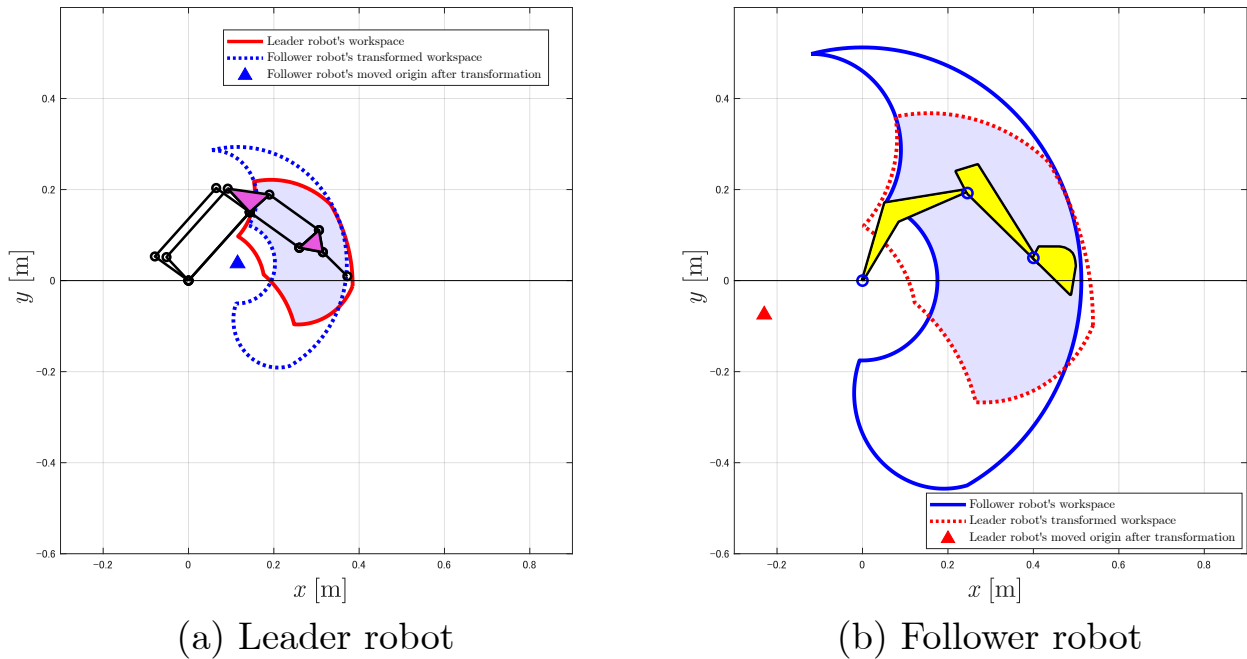


Fig.3.8 Transformation of state between leader and follower

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.3.9(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），掘削の後に再掘削を行うアトラクタ軌道（青色実線），掘削の後に旋回を行うアトラクタ軌道（赤色実線），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．表示されている円筒座標系の原点（黒色の円）は座標変換後のフォロワの原点の位置を示している．

実際の掘削ロボットは油圧で駆動するものが一般的であるが，今回の実験機はリーダ，フォロワともに DC モータで駆動する．計測した操作力と現在の状態から半自律制御系に基づいて計算された目標位置を逆運動学解析によって関節角度に変換し，リーダロボットとフォロワロボットのモータはモータドライバによって電圧制御による PD 制御によって目標関節角度へと追従する．サンプリングタイムは 3ms である．掘削用の土壌の砂利には直径平均 4~7 mm の大きさである矢作砂を用い，容器には横 1065 mm 縦 303 mm 奥 726 mm のコンテナを半分に分割した片面を用いた．

リーダ・フォロワともに 6 軸力覚センサが組み込まれており，リーダの力覚センサは制御に用いるが，フォロワ側の力覚センサは実験検証用である．実際の油圧ショベルのコックピットの位置に対応する部分に操作者への映像提示用のビデオカメラを取り付けた．フォロワには砂がプーリベルトに接触するのを防ぐためのカバーを取り付けた．

フォロワロボットの関節角度は Fig.3.10(b) に示すように旋回部分を θ_{1f} ，ブームの根本を



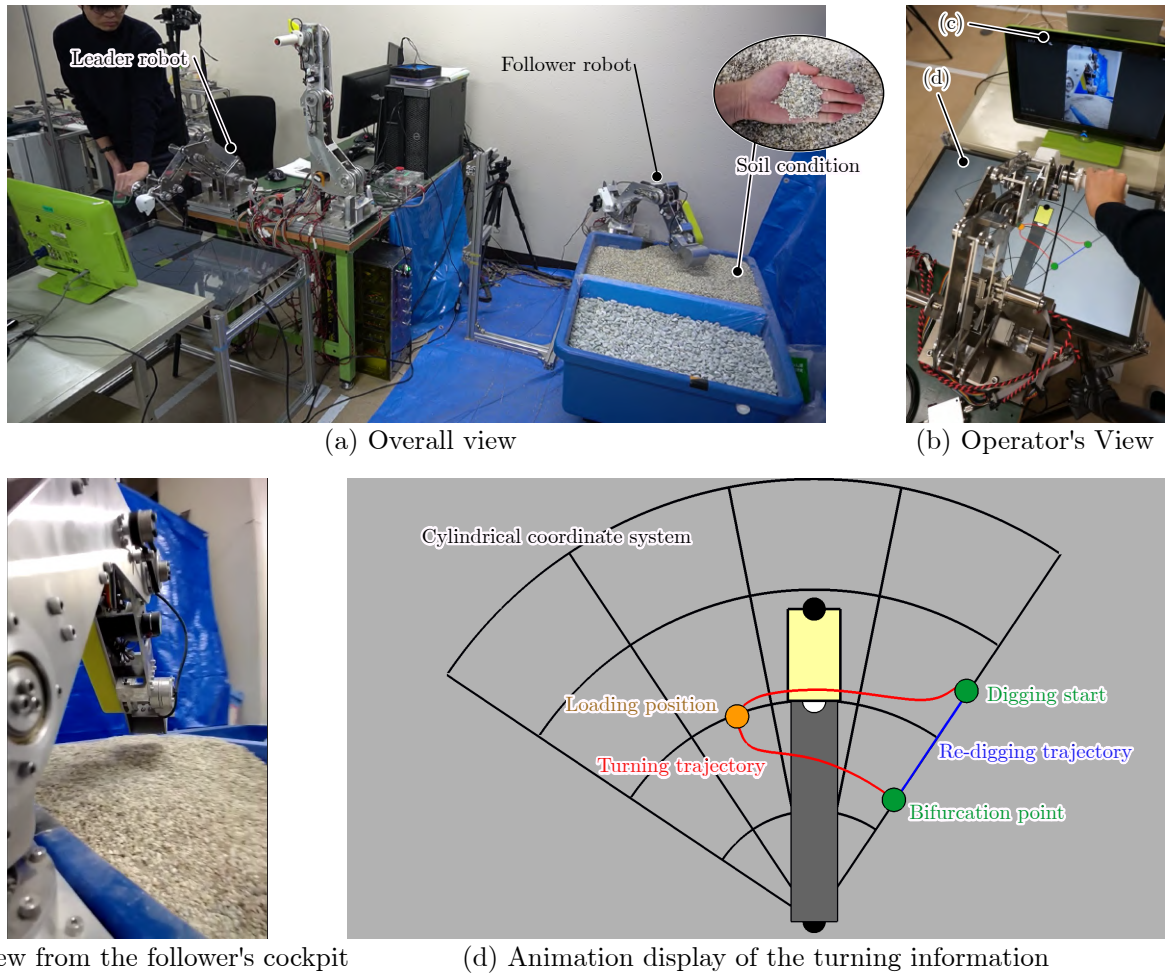


Fig.3.9 Experimental setup

θ_{2f} , アームの根本を θ_{3f} , バケットの根本を θ_{4f} とし, ブーム, アーム, バケットのリンク長をそれぞれ L_{1f}, L_{2f}, L_{3f} とすると, 順運動学から

$$\begin{bmatrix} \theta_f \\ x_f \\ y_f \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1f} \\ L_{1f} \cos \theta_{2f} + L_{2f} \cos(\theta_{2f} + \theta_{3f}) \\ L_{1f} \sin \theta_{2f} + L_{2f} \sin(\theta_{2f} + \theta_{3f}) \\ \theta_{2f} + \theta_{3f} + \theta_{4f} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

と計算できる. フォロワロボットのリンク長と各関節の可動域をそれぞれ Table.3.3, Table. 3.4 に示す. Table. 3.4 に示した関節角度の可動域から作業空間におけるフォロワのバケット根本の可動域を Fig.3.8(b) に青い実線で示す. Fig.3.10(a) の時点の地面に垂直な状態をフォロワロボットの初期姿勢とし, 掘削タスクの開始位置 \mathbf{x}_f^{start} は, $\mathbf{x}_f^{start} = \begin{bmatrix} 0.0 \text{ rad} & 0.4 \text{ m} & 0.05 \text{ m} & -0.745 \text{ rad} \end{bmatrix}^T$ とした.



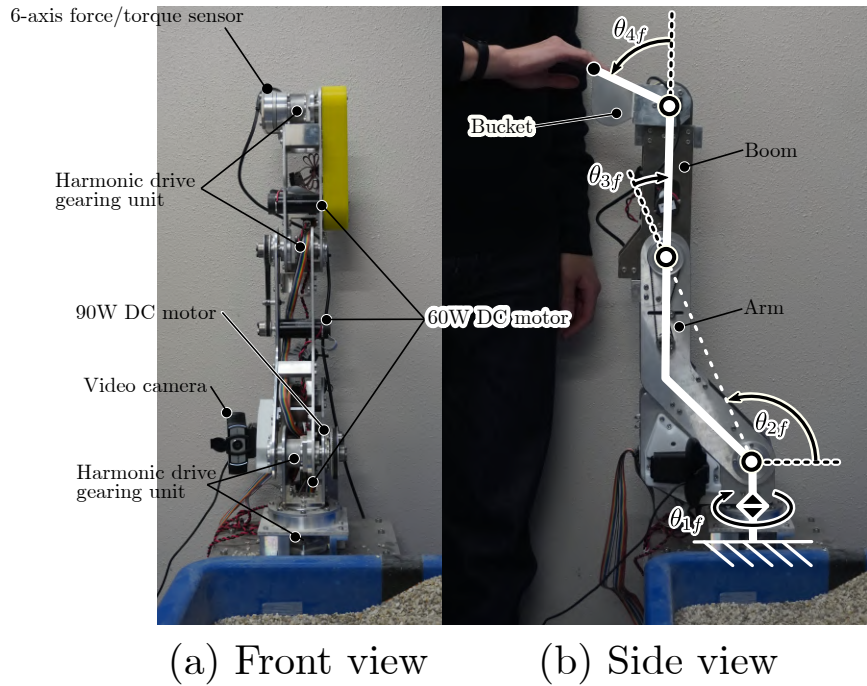


Fig.3.10 Follower robot's position parameters

Table.3.3 Link length of the follower robot

L_{1f}	0.312 m
L_{2f}	0.210 m
L_{3f}	0.118 m

Table.3.4 Work space of each joint of the follower

$0^\circ \leq \theta_{1f} \leq 90^\circ$
$-52.38^\circ \leq \theta_{2f} \leq 112.62^\circ$
$-147.62^\circ \leq \theta_{3f} \leq 22.62^\circ$
$-112^\circ \leq \theta_{4f} \leq 68^\circ$

3.4 離散的なアトラクタ軌道の分岐の実験検証

先述した実験機のリーダー・フォロワロボットを用いて、分岐アトラクタと淀みを用いた離散的なタスクの選択の検証を行い、設計した半自律制御系の妥当性をリーダーフォロワロボットの状態と操作力の時系列データを基に調べた。

Fig.3.11 に離散的なアトラクタ軌道の分岐の検証実験の様子を示している。Fig.3.12 には検



証実験におけるフォロワロボットの状態と人の操作力の時間変化を示している。本節の実験では掘削作業の試行を 2 回行った。

Fig.3.12 の 1~9 秒の部分は掘削動作後に再掘削の軌道を選択した際のフォロワの位置と人の操作力を示しており、Fig.3.11(a-1)~(a-5) と対応している。ロボットは初期位置から出発し、掘削開始位置 (3.5 の点 B) に到達した。Fig.3.12 の 3 秒時点で y 方向負の向き (下向き) に操作力を加えたことで、Fig.3.11(a-2)~(a-4) に対応した掘削動作 (3~6 秒) を行った。実験開始 6 秒後に分岐点の淀みで y 方向正の向き (上向き) の成分を主とする操作力が加えられたことで、巡回せずに掘削開始位置に戻る軌道が選択され Fig.3.11(a-5)~(b-1) に示すようにロボットは初期位置に戻った。

一方、Fig.3.12 の 9~17 秒の部分は掘削後に巡回積み込み動作を選択した際のフォロワの位置と人の操作力を示しており、Fig.3.11(b-1)~(b-5) と対応している。実験開始 12 秒後の時点で分岐点の淀みで θ 方向負の向き (積込位置の方向) の成分を主とする操作力が加えられた。この方向の操作力は操作者が巡回軌道を選択したことを意味し、これにより Fig.3.11(b-4)~(b-5) に示すようにロボットは巡回し土壌の積込を行った。これらの結果から提案手法によって操作力の方向による離散的なタスク選択が実現されていることが検証された。

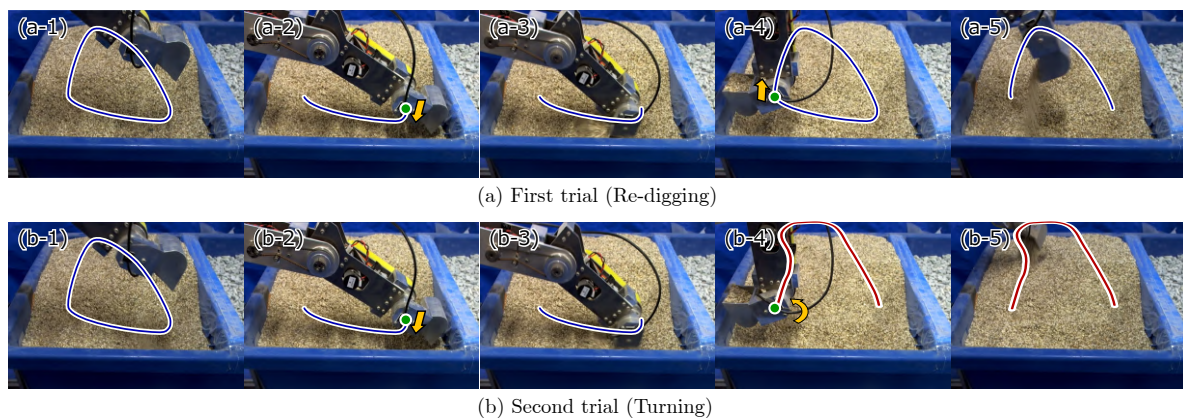


Fig.3.11 Robot motion in the experiment of task selection

3.5 おわりに

本章では、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、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。提案手法の半自律制御系によって、以下のことを実現した。以下に成果を示す。

- アトラクタの淀みを軌道上の 1 点に収束する吸い込みのベクトル場とし、リーダ・フォロワロボットでアトラクタ上での一時停止と再開を実現した。



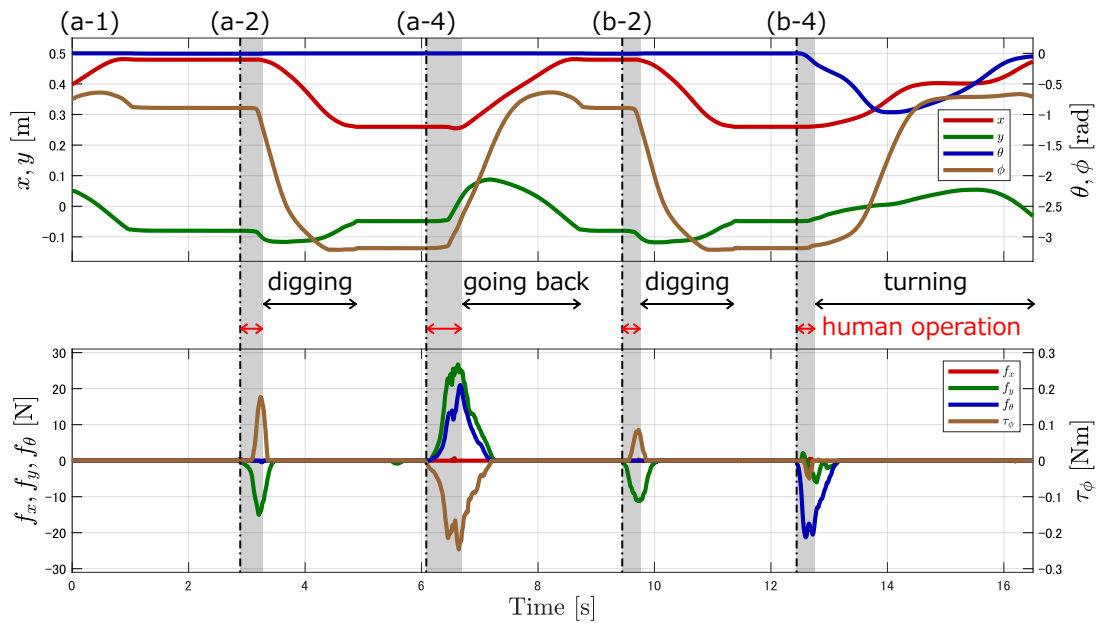


Fig.3.12 Positions and operational force in the experiment of task selection

- 掘削，土壌の積み込みの選択を実現するために，掘削，旋回のための分岐を持つ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現した．
- 旋回情報をアニメーションで代替する新たなリーダーロボットを設計・製作した．

また，本研究ではアトラクタに複数のタスクを埋め込み操作力の方向によるタスク選択を実現したが，ロボットの状態空間内での操作の方向を区別して用いるため，一つに分岐点に埋め込める分岐タスクの数には限界が存在する．一方で，現状のタスク設定において一つに分岐点に設計される分岐タスクは2個程度であるため十分対処可能である．



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

4.1 はじめに

第3章では、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。

一方で、第3章で提案した離散的タスク選択について以下のような課題点が挙げられる。

- 従来手法でタスク選択の操作を楽にする（選択時に要する操作力を小さくする）ためには、淀み全体の吸い込みを弱くする必要があるが、これによって誤った方向への操作もしやすくなり操作ミスが起きやすくなる。
- ある分岐点に存在するタスク間において選択される頻度が大きく異なる場合でもそれぞれの軌道の選択しやすさに差異が無いため、意図しないタスク選択が起きやすくなる。
- タスク選択時の操作方向（分岐軌道の進行方向）は複数成分のカップリングであるため、リーダーロボットを用いて正しい軌道の方向に操作するのが難しい。

そこで本章では、これまで等方的な吸い込みであったアトラクタの淀みに異方性を持たせるアトラクタの淀みの歪みを設計する。淀みの歪みを分岐軌道の進行方向に発生させることで、軌道方向の吸い込みを弱めタスク選択の操作を楽にすると同時に、分岐軌道に向かう正しい操作方向の提示を操作者に与える。また、タスク選択において選ばれやすい軌道が存在する点に着



目し、人の操作履歴に基づいたタスク間の優先度の学習を設計する。学習結果に基づいて淀みの歪みの形状を変更し、操作頻度をタスクの選択しやすさに反映させることで操作性を向上させる。設計した淀みの歪みに基づく優先度を有するタスク選択を含む半自律制御系をリーダー・フォロシステムに実装しその評価を行う。

4.2 淀みの歪みの設計

4.2.1 淀みの歪みのベクトル場の設計

歪みを有する淀みのベクトル場は、歪みのない淀みのポテンシャル場を線形変換することによって計算される。歪みのない淀みは Fig.4.1(a) に示すようなある 1 点 $\mathbf{x}_s \in \mathbb{R}^4$ に収束する吸い込みのベクトル場 \mathbf{v}_s として定義されており、

$$\mathbf{v}_s(\mathbf{x}) = -\frac{ar^n}{r^m + b} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{r} = W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s), r = \|\mathbf{r}\| \quad (4.2)$$

によって定義される。ここで m と n は $m > n$ の正の整数であり、本論文では $m = 6, n = 2$ とした。 $W \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は成分間のスケール調整のための重み行列である。 $a \in \mathbb{R}$ の値は吸い込みの強さを変更し、 $b \in \mathbb{R}$ は吸い込みの領域を変更する。

歪みのない淀みのポテンシャル場 V_s は

$$V_s(\mathbf{x}) = \int \|\mathbf{v}_s\| dr = a \frac{\arctan\left(\frac{r^3}{\sqrt{b}}\right)}{3\sqrt{b}} \quad (4.3)$$

によって定義され、 Fig.4.1(b) に示すような等方的な窪みで表される。

歪んだ淀みのポテンシャル場 V'_s は歪みのない淀みのポテンシャル場 V_s を r について線形変換し、

$$V'_s(\mathbf{x}) = a \frac{\arctan\left(\frac{r'^3}{\sqrt{b}}\right)}{3\sqrt{b}}, r' = r \frac{r_0}{R(\mathbf{x})} \quad (4.4)$$

によって計算される。ここで、 r_0 は歪みのない淀みの半径であり、 $R(\mathbf{x})$ は \mathbf{r} の偏角に応じて淀みの半径を変更し歪ませる関数である。 V'_s は Fig.4.1(c) に示すように、ある方向の周辺で淀みの半径が拡大され半径方向の勾配が緩やかになることで、淀みからの脱出時に必要な操作力の最大値が減少する。また、半径方向の勾配が緩やかになると同時に、淀みの歪みの中心への接線方向の勾配が発生することで、正しい操作方向の提示を操作者に与えることが可能となる。



歪んだ淀みのベクトル場 \mathbf{v}'_s は歪んだ淀みのポテンシャル場 V'_s を直交座標系で偏微分すること

$$\mathbf{v}'_s(\mathbf{x}) = \frac{\partial V'_s}{\partial \mathbf{x}} \quad (4.5)$$

によって計算される．計算された歪んだ淀みのベクトル場 \mathbf{v}'_s を Fig.4.1(d) に示す．

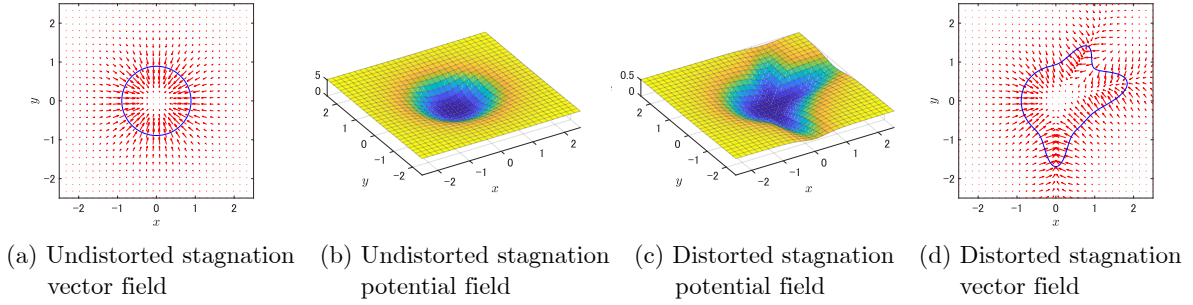


Fig.4.1 Design of distorted stagnation vector fields

4.2.2 淀みの歪みの形状の設計

4次元の淀みの歪みの形状は，式(4.4)に示すように関数 $R(\mathbf{x})$ によって \mathbf{r} の偏角に応じて半径を線形変換することで計算される． \mathbf{r} の偏角に応じて淀みの歪みの半径を変化させる関数 $R(\mathbf{x})$ は

$$R(\mathbf{x}) = r_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_{dst}^i}{\cosh^2(\|S_{ae}^i R_y^i R_p^i R_r^i \mathbf{x}_{ae}^i\|)} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{x}_{ae}^i = \mathbf{e}_{dir}^i \arccos\left(\frac{\mathbf{r}^T \mathbf{x}_0^i}{r}\right) \quad (4.7)$$

$$\mathbf{e}_{dir}^i = \frac{H_i^{\perp \#} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} - \mathbf{x}_0^i\right)}{\|H_i^{\perp \#} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} - \mathbf{x}_0^i\right)\|} \quad (4.8)$$

$$S_{ae}^i = \text{diag}(b_{dst}^{1,i}, b_{dst}^{2,i}, b_{dst}^{3,i}) \quad (4.9)$$

$$R_r^i = R_r^i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_r^i & \sin \psi_r^i \\ 0 & -\sin \psi_r^i & \cos \psi_r^i \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$R_p^i = \begin{bmatrix} \cos \psi_p^i & 0 & -\sin \psi_p^i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_p^i & 0 & \cos \psi_p^i \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$R_y^i = \begin{bmatrix} \cos \psi_y^i & \sin \psi_y^i & 0 \\ -\sin \psi_y^i & \cos \psi_y^i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$



によって計算され、計算された歪んだ淀みの半径は Fig.4.2 に示すように 4 次元球面上に突起を発生させたような形状となる。 n は歪みの数、 a_{dst}^i は歪みによる突起の高さ、 $b_{dst}^{*,i}$ ($*$ = 1, 2, 3) は歪みによる突起の広さ (偏角の各方向について 3 成分)、 ψ_{\dagger}^i (\dagger = r, p, y) は歪みによる突起の回転角度 (ロール・ピッチ・ヨーについて 3 成分) を表す。 $\mathbf{x}_0^i \in \mathbb{R}^4$ は歪みを発生させる方向の単位方向ベクトルを表し、 $\mathbf{x}_{ae}^i \in \mathbb{R}^3$ は、 \mathbf{x}_0^i を原点として原点からの角距離と方位が正しい 4 次元球の投影座標系における \mathbf{r}/r の座標を表す。 \mathbf{e}_{dir}^i は 4 次元球面上で \mathbf{x}_0^i を基準とした \mathbf{r}/r の方位を表し、 $H_i^\perp \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ は \mathbf{x}_0^i の零空間の正規直交基底を並べたものを表し、 $H_i^{\perp \#}$ は $H_i^{\perp T} (H_i^\perp H_i^\perp T)^{-1}$ で定義される擬似逆行列である。

\mathbf{x}_{ae}^i のように球面上の基準点からの角距離と方位が正しい球の投影座標系は、特に 3 次元球に対して正距方位図法と呼ばれ、 Fig.4.3(a) に示すような 3 次元球を Fig.4.3(c) に示すような平面上の真円で表すことができる。この座標系上で歪みの突起の形状を Fig.4.3(c) に示すように計算することで、基準方向からの角距離と方位が正しい適切な変形が可能となる。正距方位図法で歪みの突起を計算した結果をメルカトル図法に変換した形状を Fig.4.3(b) に示しているが大きく歪んでおり、淀みの歪みの突起の計算に正距方位図法を用いる必要性があることが分かる。ロボットの状態変数が $N (> 3)$ 次元のときも同様に、式 (4.7),(4.8) に示すように正距方位図法を用いて $(N - 1)$ 次元球に投影することで歪んだ淀みの突起の形状を計算可能である。

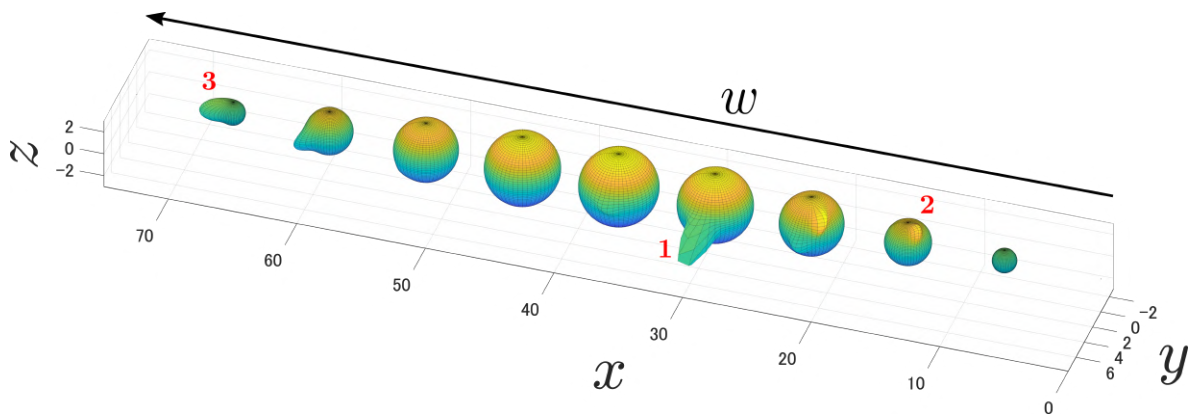


Fig.4.2 Design example of 4D distorted stagnation shape



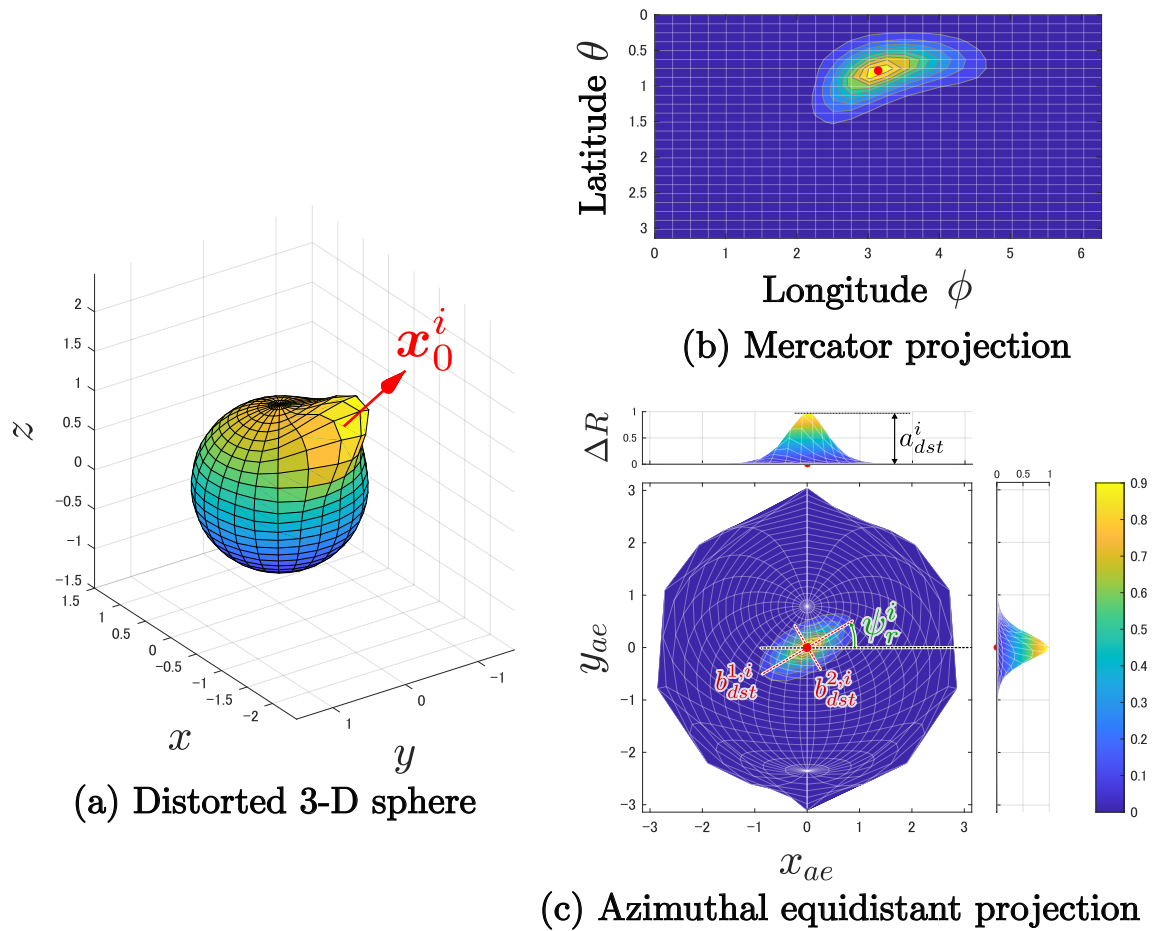


Fig.4.3 Calculation of the azimuthal equidistant projection method on a 3D sphere

4.2.3 歪みのパラメータの学習則の設計

4.2.1, 4.2.2 節で設計した歪んだ淀みのベクトル場のパラメータを操作力に基づいて更新していくことで、タスクの実行頻度を学習する。学習則により更新する歪みのパラメータは $a_{dst}^i, b_{dst}^{*,i}, \psi_{\dagger}^i$ とし、歪みを発生させる方向 x_0^i はアトラクタ軌道の方が予め決定しているため、それに基づいて設定した値を固定パラメータとして用いる。

$a_{dst}^i, b_{dst}^{*,i}, \psi_{\dagger}^i$ を含むパラメータ $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{7n}$ でベクトル場のノルム $\|\mathbf{v}'_s\|$ を偏微分した勾配を用いて、歪みの各パラメータの操作力に基づく変化量 $\Delta \mathbf{p}_{grad}$ を

$$\Delta \mathbf{p}_{grad} = \begin{cases} 0, & \text{if } \mathbf{f}_h \cdot \mathbf{v}'_s \geq 0 \\ \alpha(\mathbf{f}_h \cdot \mathbf{v}'_s) \frac{\partial \|\mathbf{v}'_s\|}{\partial \mathbf{p}}, & \text{if } \mathbf{f}_h \cdot \mathbf{v}'_s < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

によって計算する。



また, $a_{dst}^i, b_{dst}^{*,i}$ に式 (4.14) に示す上下限值を設定した.

$$a_{min} \leq a_{dst}^i \leq a_{max}, \quad b_{min} \leq b_{dst}^{*,i} \leq b_{max} \quad (4.14)$$

加えて, 1つの淀みにおける歪みの大きさの総和を評価する指標 $f_c = \sum_{k=1}^n (a_{dst}^i \Delta\theta_c^{1,i} \Delta\theta_c^{2,i} \Delta\theta_c^{3,i}) \leq M_c$, $\Delta\theta_c^{*,i} = \frac{1}{b_{dst}^{*,i}} \log \left(\sqrt{\frac{a_{dst}^i}{a_{min}}} + \sqrt{\frac{a_{dst}^i - a_{min}}{a_{min}}} \right)$ を計算する. M_c は f_c の上限値である. $f_c < M_c$ のときは式 (4.13) の値をそのまま用いることができるが, $f_c \geq M_c$ のときは歪みのパラメータの変化量を計算し直す必要がある. 式 (4.14) を満たすためには

$$\frac{df_c}{dt} \leq 0 \quad (4.15)$$

を満たす必要があり, したがって,

$$\text{minimize } \|\Delta\mathbf{p}^{ab'} - \Delta\mathbf{p}_{grad}^{ab}\|^2 \quad (4.16)$$

$$\text{subject to } \left(\frac{\partial f_c}{\partial \mathbf{p}^{ab}} \right)^T \Delta\mathbf{p}^{ab} = 0 \quad (4.17)$$

で表される制約付き最小二乗問題を満たす $\Delta\mathbf{p}^{ab'}$ を求める. ここで, $\mathbf{p}^{ab} \in \mathbb{R}^{4n}$ は \mathbf{p} の $a_{dst}^i, b_{dst}^{*,i}$ 成分, $\mathbf{p}^\psi \in \mathbb{R}^{3n}$ は \mathbf{p} の ψ_{\dagger}^i 成分で

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}^{ab} & \mathbf{p}^\psi \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

であり,

$$\mathbf{p}^{(k+1)} = \begin{cases} \mathbf{p}^{(k)} + \Delta\mathbf{p}_{grad}, & \text{if } f_c < M_c \\ \mathbf{p}^{(k)} + \Delta\mathbf{p}', & \text{if } f_c \geq M_c \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\Delta\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{p}^{ab'} & \Delta\mathbf{p}_{grad}^\psi \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

によって歪みのパラメータ \mathbf{p} を学習する. この学習則では, $f_c \geq M_c$ のときに各パラメータ間で増加量の奪い合いが発生し, 選択されたタスクの歪みは大きくなる一方で, 選択されなかったタスクはその増加分を補うために減少する. これにより, タスクの実行頻度を学習し, 頻繁に選択される軌道はより選択しやすくなり, 他の軌道は比較的选择しづらくなる.

4.3 実験検証

4.3.1 淀みの歪みの学習則の検証

はじめに歪んだ淀みとその学習則を実験装置に実装し, 淀みの歪みの学習則を検証を行った. 淀みの歪みのパラメータを学習するために, 20 分間にわたって半自律制御系による掘削作業を行い, 毎回旋回軌道を選択した. 実験開始時点の学習前の歪みのパラメータで $f_c = M_c$



となるように M_c を設定し、実験開始時点からパラメータ間の奪い合いが起こるようにした。表 4.1 に学習の前後の淀みの歪みのパラメータを示す。旋回軌道の方向の歪みのパラメータは a_{dst}^1 が増加（歪みの突起が高くなる）し、 $b_{dst}^{2,1}$, $b_{dst}^{3,1}$ が減少（歪みの突起が広くなる）しており、旋回軌道の優先度が高くなるように学習している。一方で、再掘削軌道の方向の歪みのパラメータは a_{dst}^2 が減少（歪みの突起が低くなる）し、 $b_{dst}^{1,2}$, $b_{dst}^{2,2}$, $b_{dst}^{3,2}$ が増加（歪みの突起が狭くなる）しており、旋回軌道の優先度が低くなるように学習している。したがって、設計した学習則にしたがって操作頻度に基づいて軌道の優先度を適切に変更できることが分かった。

Table.4.1 Changes in stagnation distortion parameters before and after the learning

	Turn (initial value)	Redig (initial value)	Turn (after learning)	Redig (after learning)
a_{dst}^i	2.5	2.5	2.8	1.0
$b_{dst}^{1,i}$	3.0	3.0	4.5	3.5
$b_{dst}^{2,i}$	3.0	3.0	3.3	3.5
$b_{dst}^{3,i}$	3.0	3.0	1.2	3.5
ψ_r^i	0.0	0.0	-0.55	1.1×10^{-5}
ψ_p^i	0.0	0.0	0.22	1.1×10^{-5}
ψ_y^i	0.0	0.0	0.017	1.3×10^{-5}

4.3.2 淀みの歪みの操作性の検証

Fig.4.4 に歪みの無い淀み、学習前の歪んだ淀み、学習後の歪んだ淀みの3種類の淀みにおいて旋回軌道と再掘削軌道をそれぞれ選択したときの操作力の大きさを比較した。旋回軌道と再掘削軌道のどちらを選択した場合でも、青線の歪みの無い淀みよりも緑線の学習前の歪んだ淀みの方が操作力が小さくなっている事が分かる。このことから、淀みの歪みによってタスク選択に要する操作力を低減できていることが分かる。また、4.3.1 節の実験において、旋回軌道の優先度を高め、再掘削軌道の優先度を低くするように学習した。旋回軌道の選択では、緑線の学習前の歪んだ淀みよりも赤線の学習後の歪んだ淀みにおける操作力の方が小さくなっている。反対に、再掘削軌道の選択では緑線の学習前の歪んだ淀みよりも赤線の学習後の歪んだ淀みにおける操作力の方が大きくなっている。このことから、淀みの歪みと操作力に基づく歪みのパラメータの学習によって、操作の頻度に応じたタスクの優先度（軌道の選択しやすさ）の変更が可能であることが分かった。

Fig.4.5 には分岐点において旋回軌道を選択したときの淀み周辺でのロボットの軌跡 (4自由度) を2次元平面に射影したものを示す。Fig.4.5(a) の歪みのない淀みでのタスク選択の操作では分岐軌道の方向から大きく逸脱した方向に操作してしまっていることが分かる。Fig.4.5(b) の歪みのある淀みにおけるタスク選択では歪んだ淀みのベクトル場によって分岐軌道の方向へと操作方向の提示がなされ、正しい方向に誘導されながら操作できていることが分かる。



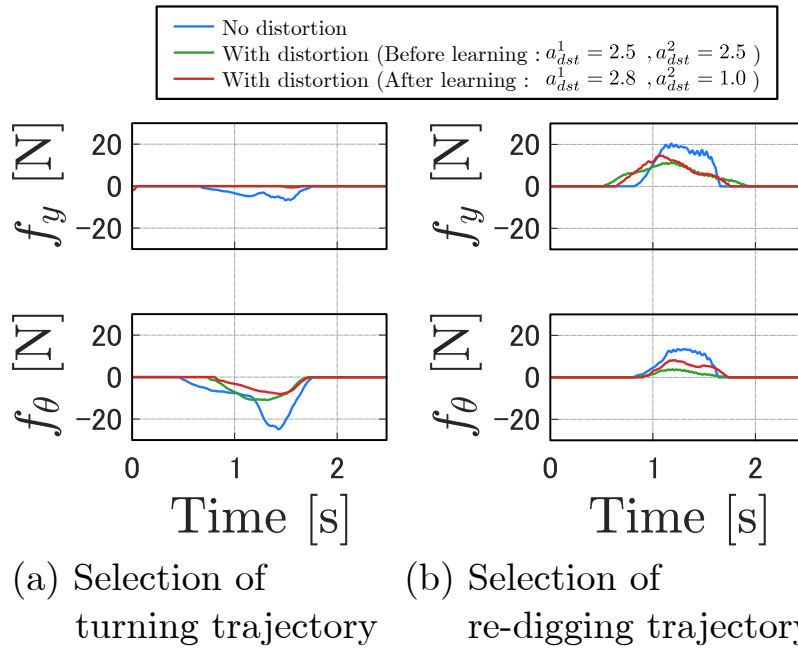


Fig.4.4 Operational force when selecting a branching trajectory

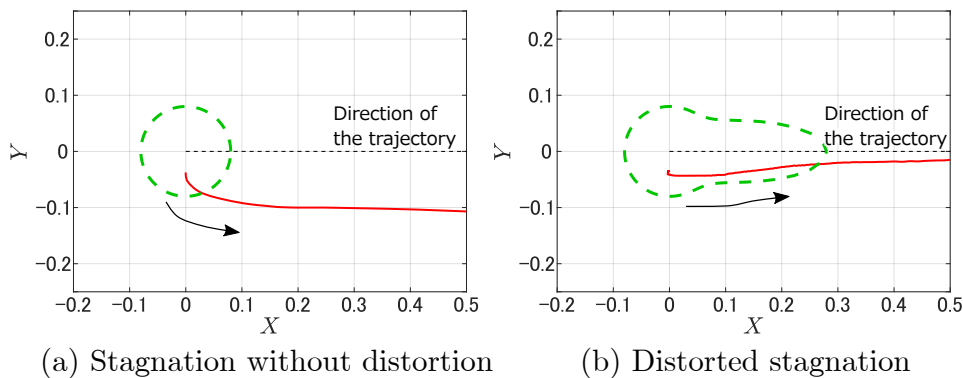


Fig.4.5 Direction of operation when selecting a bifurcated orbit (turning trajectory)

4.4 おわりに

本章では、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、アトラクタの軌道の分岐と淀みの歪みに基づくタスク選択の優先度の設計を行い、実験によりその有効性を検証した。以下に成果を示す。

- タスク選択の操作負荷を低減し、操作方向の提示を行う淀みの歪みのベクトル場を設計した。
- 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



タの学習則を設計した。

- 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，歪みによる操作負荷の低減，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の中で検証した。

また，本研究では淀みの歪みの形状を変更することで分岐タスクの優先度を変更したが，淀みは吸い込みのベクトル場であるため優先度をどれほど高めても自動でタスクが遷移することはない。淀みの歪みを吸い込みから吐き出しに切り替えることでタスクの自動遷移を実現することは可能だが，分岐点を不安定化させることを意味し，タスク選択を操作者が担い作業の安全性を担保するという機能に反するため本研究では採用していない。



第 5 章

半自律制御系の連続的な掘削位置の変更の設計

5.1 はじめに

本章では、半自律制御系における連続的な掘削位置の変更について詳細に説明する。第 3 章では、操作力によって離散的なタスク切り替えを行える半自律系の設計を行った。一方で、遠隔掘削機の操作性能をさらに向上させるためには、掘削位置の変更といったタスク実行位置の連続的な変更をオペレータが行えるようにするなどのさらなる課題に対処し、より現実的な作業に対応できるようにする必要があるが、アトラクタベースのコントローラはベクトル場を用いるため、1 つの固定された軌道が埋め込まれており、埋め込まれた軌道の安定性を維持したまま軌道を変更することは計算上困難である。

そこで、半自律遠隔操縦システムを発展させるために、本章では以下に示す 2 点を主な目的とする。

1. 掘削前に操作者が操作力に応じてシームレスに掘削位置を変更できるようにする。本論文では、離散的タスク選択に対して、操作力に応じて掘削軌跡を連続的に変形させ掘削開始位置を滑らかに変化させる機能を連続的タスク選択と呼ぶこととする。
2. 一つの操作力入力に対して、離散的タスク選択と連続的タスク選択の操作を分離することで、操作者にとってより直感的な制御を実現する。ここで「直感的」とは、フォローにおいて実現される運動方向が操作者の入力方向と一致することを意味する。

これらの目的を達成するために、以下の方策を採用する。

1. 仮想空間上でアトラクタを設計し、座標変換を用いてバケットの位置・姿勢に変換する。座標変換のパラメータを変更することで、制御系の安定性を損なうことなく、操作



者が掘削位置を変更できる。

2. 人の操作力から軌道の変形量（掘削位置）を決定する拡張カルマンフィルタ（EKF）[49] を設計する。入力の特徴に基づき、離散的タスク選択と連続的タスク選択の操作を分離する。

これらの手法を先に開発したシステムと統合することで、離散的タスク選択と連続的タスク選択を実装した、より汎用性の高い掘削用リーダー・フォロワシステムのコンセプトを検証する。

タスク形状を変形するパラメータを内部に有する力学系を用いたタスク軌道の連続的な変形を行う半自律ロボットシステムがこれまでに提案されてきた。岡田らは、軟弱地盤と硬質地盤に対する浅掘りと深掘りの軌跡をアトラクタベースの力学系に組み込んだ掘削ロボットの半自律制御システムを提案しており、バケット荷重やジョイスティックを用いた人の操作に応じてインデックスパラメータを変化させることで、掘削深さのシームレスな遷移を実現している [54]。この研究では、インデックスを追加することで高次のベクトル場を用いたが、制御器の設計に計算量が多く、安定性の保証が難しく、そのため、単純な軌道にしか適用できない。pHRI（Physical Human-Robot Interaction）の文脈では、Khoramshahi らが、人間の意図するタスクにパラメータ化された動的システムをオンラインで適応させるために、協調ロボットを用いてタスク軌道を変換することを提案している [55]。しかし、離散的タスク選択 ([50], [52]) と連続的タスク軌道変形 ([54], [55]) を、単一ロボットの非線形力学系で組み合わせて動作分離を実現する手法は提案されていない。本論文では、アトラクタを持つ非線形力学系においてタスク軌道を変形させ、離散的タスク選択と軌道変形の操作分離を実現する半自律リーダーフォロワシステムを提案する。

5.2 連続的なアトラクタ軌道の変形的设计

3.2.1 節で設計した掘削軌道アトラクタは、先に定められた軌道に収束する。しかし、実際の作業においては、掘削する位置は毎回変更し、広範囲を掘削することが求められる。したがって、自律制御系に座標変換を施すことにより、収束する掘削軌道を変形させる。掘削軌道の変形のための座標変換行列は、以下の要件を満たす。

- 掘削開始位置（Fig.3.5 における点 B）の θ_{xy} 成分を変化させる。
- 掘削終了位置（Fig.3.5 における点 C）の y , θ 成分は掘削開始位置とともに変化するが、 x 成分は変化しない。
- 土砂の積込位置は変化させない。



これらの要件を考慮し設計した仮想空間 $\bar{\mathbf{x}}$ から現実世界 \mathbf{x} へと変換する座標変換行列 C を以下に示す.

$$\mathbf{X} = C\bar{\mathbf{X}} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T & 1 \end{bmatrix}^T, \bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}^T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5.2)$$

$$C(\mathbf{s}_{ct}) = TS(\mathbf{s}_{ct})T^{-1} \quad (5.3)$$

$$T(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \phi_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \theta_0 & x_0 & y_0 & \phi_0 \end{bmatrix}^T \quad (5.5)$$

$$S(\mathbf{s}_{ct}) = \text{diag} \left(s_\theta, \frac{s_x - 1}{\theta_e}(\theta - \theta_0) + 1, \frac{s_y - 1}{\theta_e}(\theta - \theta_0) + 1, 1, 1 \right) \quad (5.6)$$

$$\mathbf{s}_{ct} = \begin{bmatrix} s_\theta & s_x & s_y \end{bmatrix}^T \quad (5.7)$$

式 (5.2) に示す \mathbf{X} と $\bar{\mathbf{X}}$ はそれぞれ \mathbf{x} と $\bar{\mathbf{x}}$ の同次座標表示である. T は式 (5.4) にある平行移動を表す座標変換行列であり, \mathbf{x}_0 は式 (5.5) にある座標変換の基準位置を表す定数ベクトルであり, その x 成分は掘削終了位置の x 成分と一致しており, y 成分は元の掘削軌道の上端と同じ高さで, θ 成分は積込位置の θ 成分と一致している. S は式 (5.6) にあるスケールの座標変換行列であり, θ 座標を通常通りに s_θ 倍に拡大し, xy 座標では掘削動作を行う xy 平面においてスケール比 s_x, s_y 倍に拡大し, $\theta = \theta_0$ の xy 平面ではスケール比がともに 1 倍となるように設定した. Fig.5.1(a) は xy 平面における座標変換前 (黒色点線) と座標変換後 (赤色実線) の座標系と掘削軌道 (Fig.3.5(a)) を示し, Fig.5.1(b) は $x\theta$ 平面における座標変換前 (黒色点線) と座標変換後 (赤色実線) の座標系を示している. θ_e は, Fig.5.1 (b) に示すように掘削平面と積込平面との間の旋回角度の差の初期値を表す定数である. 式 (5.4), (5.6) を用いて, 式 (5.1), (5.3) のように \mathbf{x}_0 を基準位置として座標変換を行い, Fig.5.1 に示すように, 積込位置を固定したまま掘削開始位置を移動させた軌道が得られる.

5.3 拡張カルマンフィルタを用いた軌道変形量の推定と操作分離の設計

人の操作力はアドミッタンス制御と軌道の変形の両方の入力信号として用いられており, アドミッタンス制御と軌道の変形との操作の分離を行う必要がある. 例えば, 掘削開始位置の淀みでロボットが一時停止した場合, オペレータは (1) 掘削位置の変更, (2) 掘削開始の 2 つの操作を順番に行う. 掘削位置を変更するには, ロボットが一時停止したまま (淀みから抜け出さないまま) 軌道を変形させる操作力を加える必要がある. 一方, 作業を再開して掘削を開



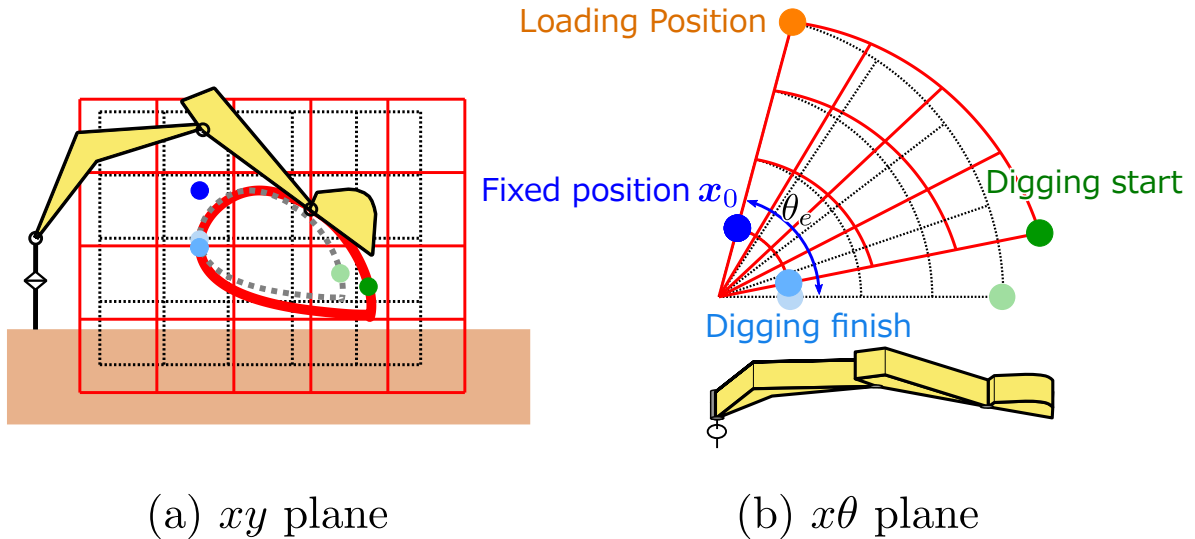


Fig.5.1 Coordinates transformation for excavation work

始するためには、ロボットを操作して淀みから抜け出す必要があるが、この操作力が同時に意図しない軌道変形を引き起こす可能性がある。

ここで、両者の操作特性を比較してみると、アドミッタンス制御による操作は淀みから抜け出すときに行われ、比較的素早い力による操作である。一方、軌道の変形は掘削開始位置を微調整するために行われ、ゆっくりとした力を加える操作である。このような操作特性の違いに着目し本論文では、軌道の変形に対して人の操作力に2次のフィルタを施した動特性を設定することで、アドミッタンス制御と軌道の変形の操作を周波数分離することを可能とする。この操作分離を実現するためにEKFを用いて人の操作力から座標変換のスケール s_{ct} を推定する。

まず、 s_{ct} を変更する操作モデルを

$$s_{ct} = \frac{F}{s(s+F)}v \quad (5.8)$$

と設計した。このとき、 $F \in \mathbb{R}$ はローパスフィルタのカットオフ周波数で、 $v \in \mathbb{R}^3$ は入力ノイズを表す白色雑音である。式(5.8)を離散化し、

$$\xi_{k+1} = \Gamma \xi_k + v'_k \quad (5.9)$$

$$\xi = \begin{bmatrix} s_{ct} \\ \dot{s}_{ct} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 - F\Delta t \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$v'_k = \begin{bmatrix} 0 \\ F\Delta t \end{bmatrix} v_k \quad (5.12)$$

となる。 Δt はサンプリングタイムを表し、式(5.9)がEKFにおける状態方程式となる。本



論文では $F = 0.2\pi\text{rad/s}$ と設定した. 次に, EKF に用いる観測方程式を

$$\mathbf{V}_k = \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\mathbf{s}_{ct,k}, \mathbf{x}_{l,k}) + \mathbf{w}_k \quad (5.13)$$

と設定する. $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^4$ は $\dot{\mathbf{x}}^{auto}$ と \mathbf{w} を含む出力値であり, $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^4$ は観測ノイズである. このとき実際に観測される出力値 $\tilde{\mathbf{V}} \in \mathbb{R}^4$ は

$$\tilde{\mathbf{V}}_k = \mathbf{V}_k + G\mathbf{f}_{h,k} \quad (5.14)$$

であり, G はスケール調整の定数で, $\mathbf{f}_{h,k} \in \mathbb{R}^4$ は人の操作入力である. 提案するシステムでは式 (5.9) の状態方程式と式 (5.13) の観測方程式を用いて, EKF によって $\mathbf{f}_{h,k}$ から $\boldsymbol{\xi}$ を推定する.

$E(*)$ は期待値を表し,

$$E(\mathbf{v}'_k \mathbf{v}'_k{}^T) = Q_k \quad (5.15)$$

$$E(\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k{}^T) = R_k \quad (5.16)$$

$$E(\mathbf{v}'_k \mathbf{w}_k{}^T) = 0 \quad (5.17)$$

となる. ここで, 式 (5.13) を $(\boldsymbol{\xi}_k, \mathbf{x}_k) = (\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu})$ の周りで線形化すると

$$\mathbf{V}_{k+1} = D_k \boldsymbol{\xi}_k + E_k \mathbf{x}_k + F_k + \mathbf{w}_k \quad (5.18)$$

$$D_k = \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mathbf{S}} \quad (5.19)$$

$$E_k = \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.20)$$

$$F_k = \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu}) - \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\eta} - \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \boldsymbol{\xi}} \boldsymbol{\mu} \quad (5.21)$$

$\boldsymbol{\xi}_k$ の推定値を $\bar{\boldsymbol{\xi}}_k$ として与え, \bar{P}_k を

$$\bar{P}_k = E(\bar{\mathbf{e}}_k \bar{\mathbf{e}}_k{}^T) \quad (5.22)$$

$$\bar{\mathbf{e}}_k = \boldsymbol{\xi}_k - \bar{\boldsymbol{\xi}}_k \quad (5.23)$$

とした. EKF の目的は, $\hat{\boldsymbol{\xi}}_k$ を最適化するカルマンゲイン K_k を求めることであり,

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}_k = \bar{\boldsymbol{\xi}}_k + K_k(\tilde{\mathbf{V}}_k - \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\bar{\boldsymbol{\xi}}_k, \mathbf{x}_{l,k})) \quad (5.24)$$

である. 最適の定義は,

$$\hat{P}_k = E(\hat{\mathbf{e}}_k \hat{\mathbf{e}}_k{}^T) \quad (5.25)$$

$$\hat{\mathbf{e}}_k = \boldsymbol{\xi}_k - \hat{\boldsymbol{\xi}}_k \quad (5.26)$$



を最小化することであり、また、

$$\boldsymbol{\xi}_k - \hat{\boldsymbol{\xi}}_k = \boldsymbol{\xi}_k - \bar{\boldsymbol{\xi}}_k - K_k(\tilde{\mathbf{V}}_k - \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\hat{\boldsymbol{\xi}}_k, \mathbf{x}_{l,k})) \quad (5.27)$$

$$= \bar{\mathbf{e}}_k - K_k \left(\frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\bar{\boldsymbol{\xi}}_k, \mathbf{x}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}} \bar{\mathbf{e}}_k + \mathbf{w}_k \right) \quad (5.28)$$

$$= (I - K_k D_k) \bar{\mathbf{e}}_k - K_k \mathbf{w}_k \quad (5.29)$$

$$D_k = \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\bar{\boldsymbol{\xi}}_k, \mathbf{x}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}} \quad (5.30)$$

が満たされるため

$$\hat{P}_k = (I - K_k D_k) \bar{P}_k (I - K_k D_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (5.31)$$

と計算できる。 K_k は以下の方程式の解として得られる。

$$\frac{\partial \hat{P}_k}{\partial K_k} = -2D_k \bar{P}_k (I - K_k D_k)^T + 2R_k K_k^T = 0 \quad (5.32)$$

このとき、

$$K_k = \bar{P}_k D_k^T (D_k \bar{P}_k D_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.33)$$

と計算される。また、最適化された \hat{P}_k は

$$\hat{P}_k = \bar{P}_k - K_k D_k \bar{P}_k \quad (5.34)$$

と計算できる。タイムステップ $k+1$ を考えると、

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \boldsymbol{\xi}_k + \mathbf{v}'_k \quad (5.35)$$

$$\bar{\boldsymbol{\xi}}_{k+1} = \hat{\boldsymbol{\xi}}_k \quad (5.36)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \hat{\boldsymbol{\xi}}_k + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{\xi}}_k}{\partial \boldsymbol{\xi}} \hat{\mathbf{e}}_k + \mathbf{v}' \quad (5.37)$$

であり、

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} - \bar{\boldsymbol{\xi}}_{k+1} = \Gamma \hat{\mathbf{e}}_k + \mathbf{v}'_k \quad (5.38)$$

$$\Gamma = \frac{\partial \hat{\boldsymbol{\xi}}_k}{\partial \boldsymbol{\xi}} \quad (5.39)$$

と計算でき、したがって、

$$\bar{P}_{k+1} = \Gamma \hat{P}_k \Gamma^T + Q_k \quad (5.40)$$

と計算できる。

拡張カルマンフィルタにおける計算手順を以下に示す。



Step0 ξ_0 の推定値 $\bar{\xi}_0$ と $\bar{P}_0 = E((\xi_k - \bar{\xi}_k)^2)$ を定義する.

Step1 以下の式

$$K_k = \bar{P}_k D_k^T (D_k \bar{P}_k D_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.41)$$

$$D_k = \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\bar{\xi}_k, \mathbf{x}_k)}{\partial \xi} \quad (5.42)$$

から, カルマンゲイン K_k を求め,

$$\hat{\xi}_k = \bar{\xi}_k + K_k(\tilde{V}_k - \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\hat{\xi}_k, \mathbf{x}_{l,k})) \quad (5.43)$$

$$\hat{P}_k = \bar{P}_k - K_k D_k \bar{P}_k \quad (5.44)$$

から $\hat{\xi}_k$, \hat{P}_k を求める. さらに $\hat{\xi}_k$ から

$$\tilde{V}_k = \dot{\mathbf{x}}^{auto}(\hat{\xi}_k, \mathbf{x}_{l,k}) + G \mathbf{f}_{h,k} \quad (5.45)$$

によって \tilde{V}_k を得る.

Step2 以下の式

$$\bar{\xi}_{k+1} = \Gamma \hat{\xi}_k \quad (5.46)$$

から $\bar{\xi}_{k+1}$ を求め, さらに

$$\bar{P}_{k+1} = \Gamma \hat{P}_k \Gamma^T + Q_k \quad (5.47)$$

から \bar{P}_{k+1} を求める.

Step3 k を $k+1$ とし, 同様の手順を繰り返す.

以上をまとめると, 離散的なタスク選択と連続的な軌道変換の操作は以下のように分離することができる.

1. 離散的タスク選択はアドミタンス制御による操作力の作用によって行われ, 分岐点から選択したい軌道に向かう淀みからの脱出を意味する. 淀みからの脱出は, 淀みの最大吸引速度以上の操作力を加えるだけで発生するため, 脱出に十分な強さの操作力 (高周波の強い操作力) を素早く加えることで, 軌道がほとんど変形しないようにタスクを選択します.
2. 掘削開始位置の淀みでロボットを一時停止させた状態のまま操作力を加え, 2 次の動特性を持つ EKF により s_{ct} を変化させることで, 連続的な軌道変換を行う. そのため, 淀みの吸引力よりも弱い操作力 (比較的弱い低周波数の操作力) をゆっくりと加えることでタスク軌道を変形させ, ロボットが淀みから脱出しない (掘削タスクを開始しない) ようにする.



5.4 連続的なアトラクタ軌道の変形と操作分離の検証

拡張カルマンフィルタと座標変換を含む連続的なタスク形状の変形の検証を行う。3.3.5 節で述べた実験環境を用いて、分岐アトラクタと淀みを用いた離散的なタスクの選択と合わせて実装し、設計した半自律制御系の妥当性をリーダー・フォロワロボットの状態と操作力の時系列データを基に調べた。

3.2.4 節で設計された分岐を有する掘削軌道アトラクタと 5.2 節, 5.3 節で設計されたアトラクタ軌道の変形を実装した半自律制御系を用いて実験を行った。掘削動作は連続で 3 回行われ、実験におけるロボットの動作の様子を Fig.5.2 に示す。Fig.5.2(a), (b), (c) はそれぞれ 3 回の掘削動作を表している。 θ, x, y 各成分の操作力 f_θ, f_x, f_y と座標変換のスケール s_θ, s_x, s_y の変化を Fig.5.3 に示す。Fig.5.3 の点線の時刻は Fig.5.2 の各写真の時刻と対応している。橙色, 緑色, 紫色, 茶色の実線がそれぞれ θ, x, y, ϕ 成分を表している。青く塗られている区間ではロボットは軌道アトラクタに沿って動作している。赤く塗られている区間ではアドミッタンス制御が主として操作に関与しており、淀みからの脱出, 分岐軌道の選択が行われている。緑色に塗られている区間ではロボットは淀みの中で一時停止しており、操作者による軌道の変形が行われている。時刻 0 からスタートし、Fig.5.3 の 1 回目の (a-1) (約 2 秒) までの間は、自律制御器によって初めの淀み点 (掘削開始位置) まで移動し停止する。1 回目の掘削では掘削開始位置を変更せず、初期状態の位置で掘削を始めることとした。(a-2) の直後 (約 4 秒) に人が y 方向負の向きに操作力を素早く与えることで、ロボットは淀みを脱し、(a-3) の前後 (4~7 秒) では自律制御器によって掘削を行い、分岐点で再び停止する。ここでは掘削した土壌の量が不十分であると操作者が判断し、(a-4) (分岐点) で y 方向正の向きに操作力を与えることで、積込を行わずに再度掘削する軌道を選択した。2 回目の掘削動作の (b-1)~(b-2) では、人が x 方向負の向きに操作力をゆっくりと与える (バケットを手前に引く) ことで、 s_x が減少している (掘削開始位置が手前に移動する)。これにより 1 回目とは異なる位置から掘削を行い、(b-4) では分岐点において θ 方向に負の操作力を与えることで、土壌の積込の軌道 (b-5) を選択している。3 回目の掘削動作の (c-1)~(c-2) では、 s_x, s_y, s_θ を操作力によって変化させ、左方向に旋回した位置から掘削を行った後、(c-4) の分岐点で積込軌道を選択した。

また、軌道の変形を行っている Fig.5.3 の緑の区間では、各成分の操作力は数秒間ゆっくりと与えられているのに対して、軌道の選択の操作 (Fig.5.3 の 4, 7, 22, 25, 41, 44 秒) は操作力を短時間 (1 秒弱) 与えることによって行われており、軌道の変形と軌道の選択の部分と比較すると軌道の選択時の s_{ct} の変動が小さいことから、動特性の設定による操作の周波数分離が可能であることが確認できた。



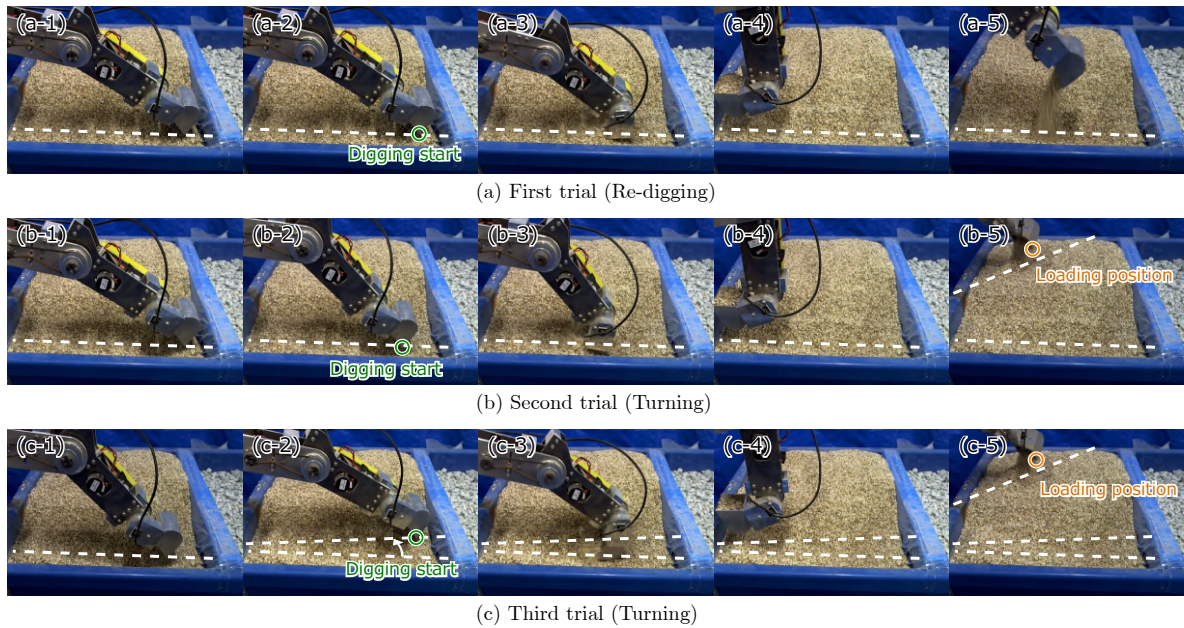


Fig.5.2 Robot motion in the experiment of trajectory deformation

5.5 おわりに

本章では、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ーフェースにおける、アトラクタの変形に基づくタスクの運動形状の変更を実現する半自律制御系を提案した提案手法の半自律制御系によって、以下のことを実現した。

- 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。特に、掘削終了位置や積み込み位置を固定した座標変換を提案した。
- 軌道の連続的な変形に加えて、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1つの操作インターフェース（力センサ）で行うために、座標変換のスケールの推定に動特性を埋め込んだ EKF を用いることで操作の周波数分離を行った。



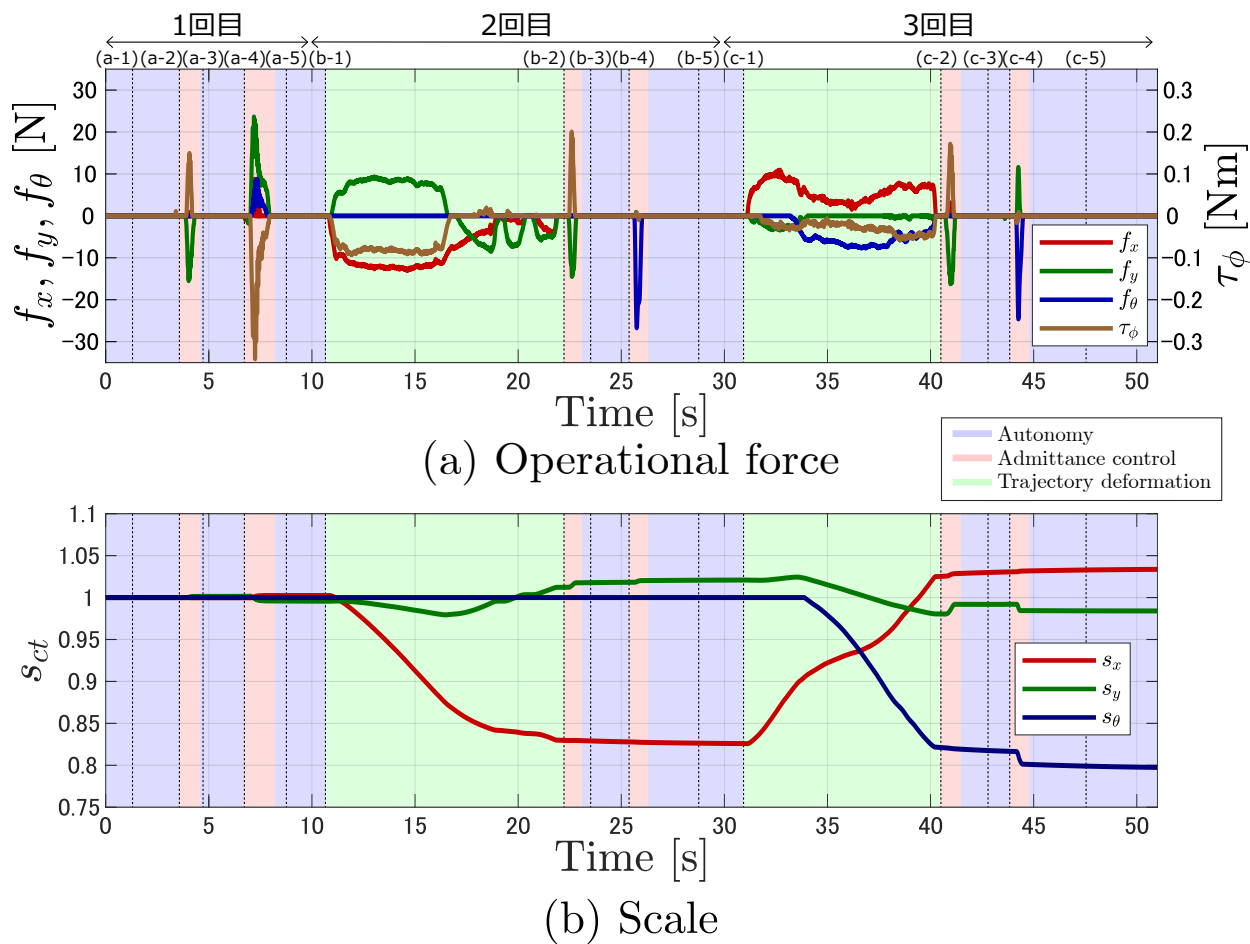


Fig.5.3 Operational force and scale in the experiment of trajectory deformation



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

6.1 類似タスク間の離散的タスク選択

6.1.1 はじめに

第 3 章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。加えて、タスクの形状が類似していても、座標変換による軌道形状の変形だけでは対応しきれない場合も多く存在する。そこで本章の前半では、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、リーダー・フォロワシステムに提案手法を実装しその評価を行う。また、本章の後半では、類似タスク間のタスク選択の操作ミスを軽減するために、第 4 章で設計した淀みの歪みを次元拡張に対応可能となるように改良した上で、統合して実装しその評価を行う。

6.1.2 類似タスク選択のための力学系次元拡張

第 3 章にて設計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.6.1(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



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 [53]. 本論文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し, 離散的タスク選択に適用する. 拡張次元の状態変数を $\mathbf{x}_e \in \mathbb{R}^N$ とし, 状態変数を

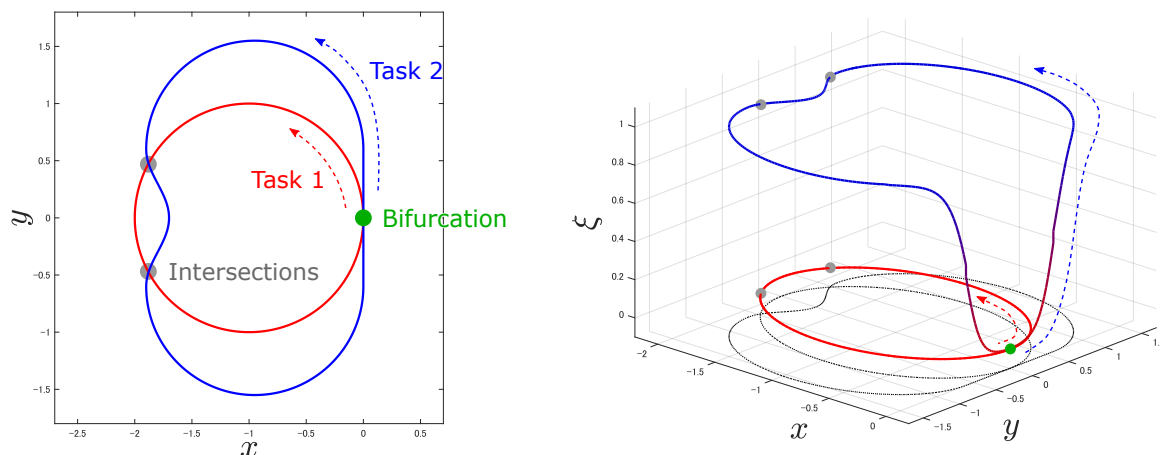
$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T & \mathbf{x}_e^T \end{bmatrix}^T \quad (6.1)$$

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.6.1(a) の Task 2 の軌道を Fig.6.1(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.6.1(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.6.2 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 \mathbf{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, \mathbf{x} の変化に伴って ξ も変化し, Task 2 の軌道に収束する.

Fig.6.2 に示す単純な分岐軌道アトラクタを有する非線形力学系を用いて, Fig.6.3 に示すような人の操作入力を印加するシミュレーションを行う. シミュレーションにおける人の操作入力は 2 自由度であり, 拡張されていない現実の状態空間の次元と同じである. 操作入力にはゲームコントローラ (ソニー・インタラクティブエンタテインメント製 DualSense) のジョイスティックを用いて行った. Fig.6.3 における緑色の円は, ロボットが一時停止しタスク選択のために人の操作入力を待機する淀みの位置を表す. 黒い実線はロボットの実際の状態の軌跡を表し, 水色の矢印は加えられた人の操作入力を表す. 拡張前の現実の状態空間における操作入力の方向が Task 1 の軌跡に近ければ, Task 1 がそのまま実行される. 一方で操作入力の方向が Task 1 よりも Task 2 の軌道に近い場合, $bm\mathbf{x}$ の変化に伴って x_i が変化し, 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 intersections other than bifurcation (b) Dimensional extension of the state space

Fig.6.1 Dimensional extension to transform two tasks with similar trajectories into different one

6.1.3 掘削作業のための離散的分岐を有する軌道アトラクタ

本論文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。離散的な分岐を有する軌道アトラクタを組み込むタスク軌道を Fig.6.4 に示す。Fig.6.4(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.6.4(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.6.4 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.6.4(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。

離散的な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.6.4 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.6.5 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.6.4 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し、ロボットは掘削動作を行い、分岐点 2 (Fig.6.4 の点 B2) に向かう。一方、操作者がロボットを奥に押し、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



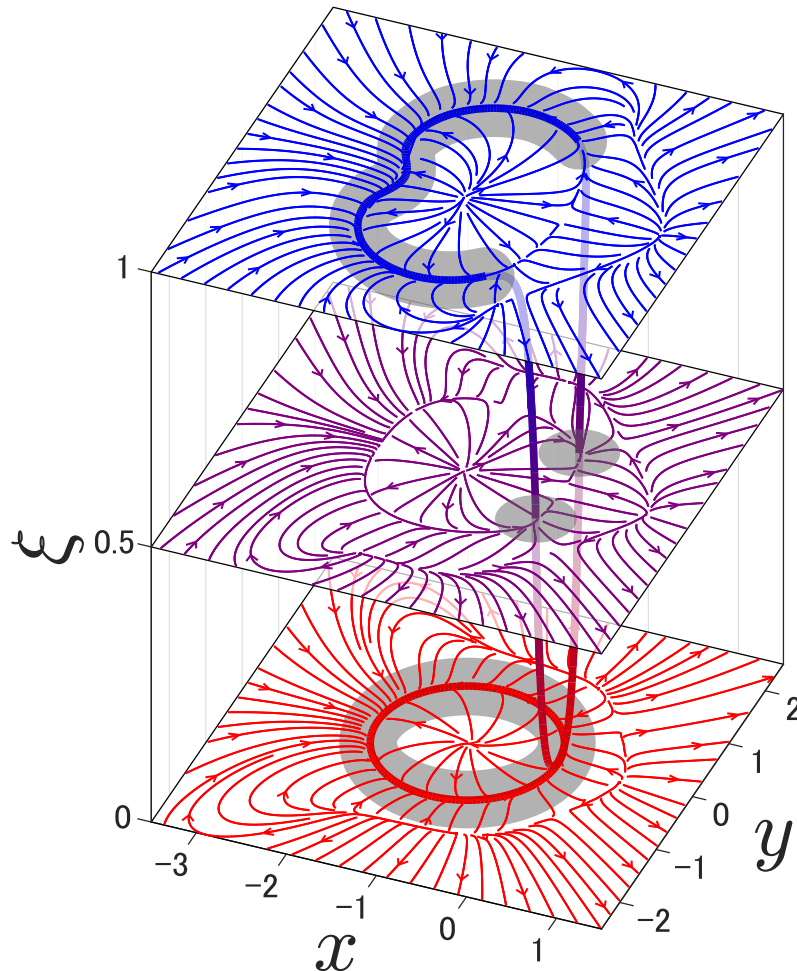


Fig.6.2 Designed vector field for similar trajectories in the extended state-space

み込み動作を行うか否かの選択を行う。ロボットを上を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。

6.1.4 次元拡張した分岐アトラクタの実験検証

6.1.3 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ー・フォロ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.6.6 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 $f_\theta, f_x, f_y, \tau_\phi$ を Fig.6.6 に示す。Fig.6.6(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.6.6(a-3) (a-6) で土砂をかき集める動作を実行している。Fig.6.6(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



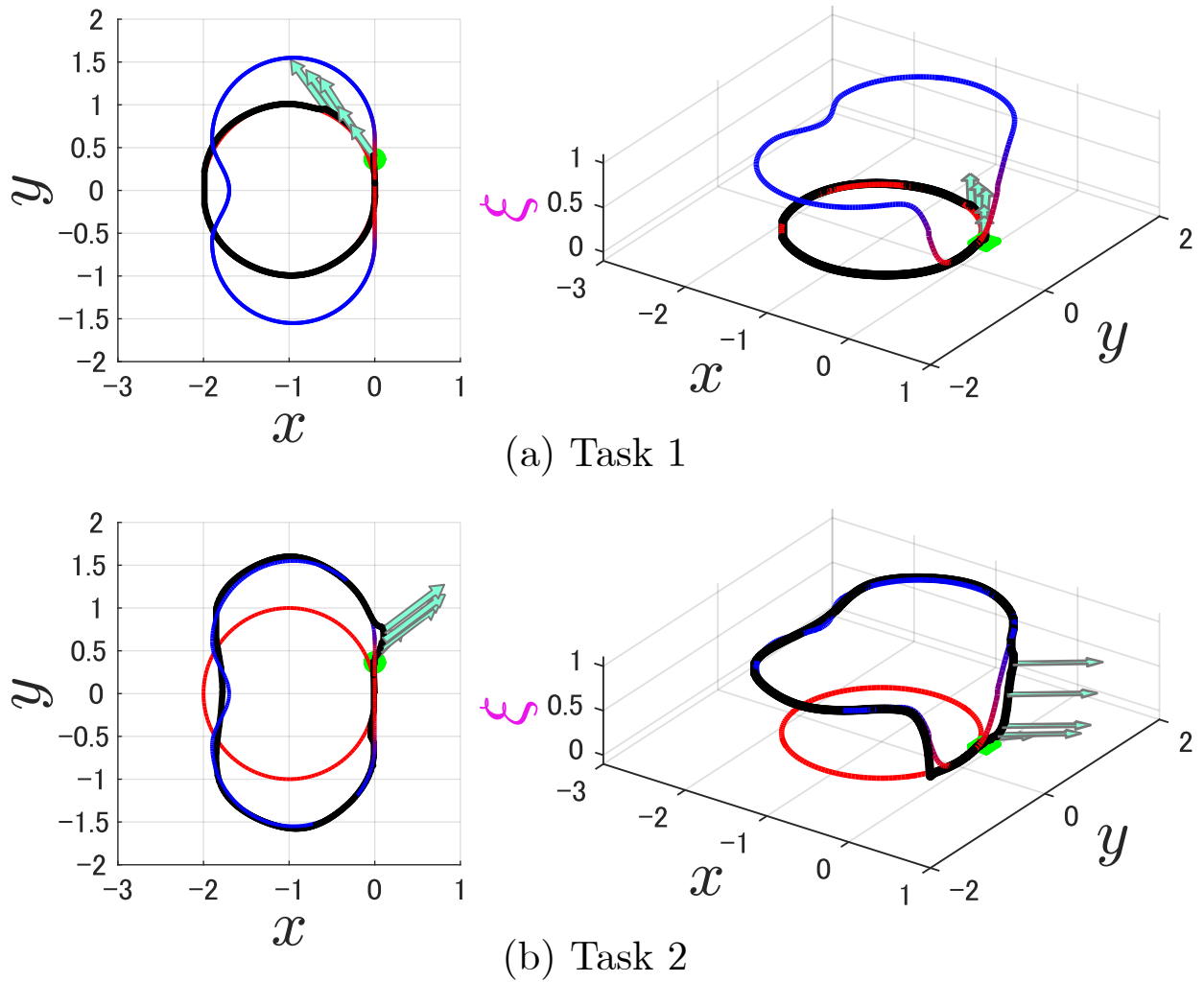


Fig.6.3 Simulated result of designed vector field for similar trajectories in the extended state space

ξ は増加せずそのまま掘削動作を実行している. Fig.6.4, Fig.6.5 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.6.6(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.



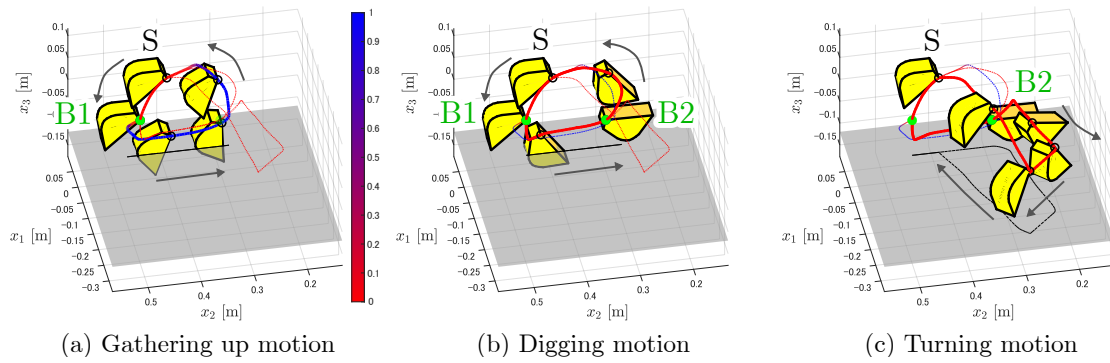


Fig.6.4 Excavator trajectory for gathering up, digging and turning

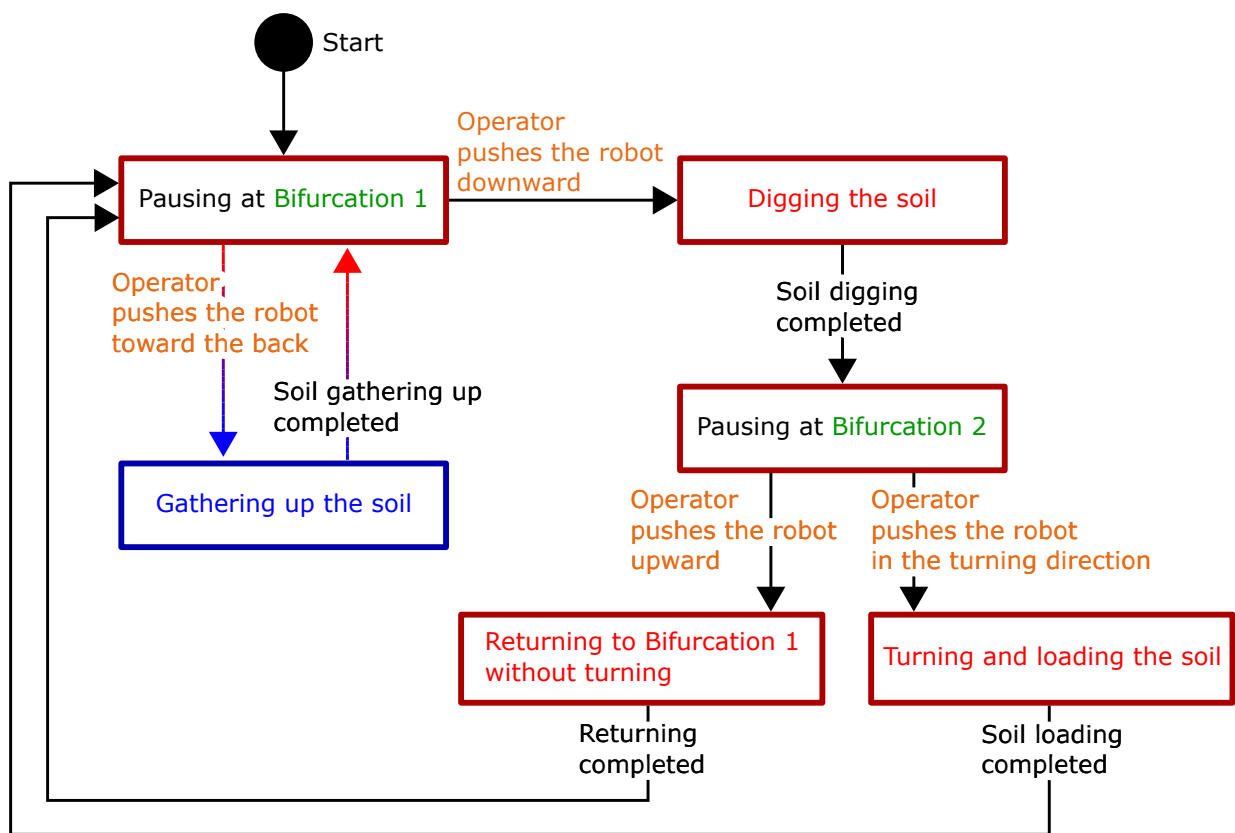


Fig.6.5 State transition diagram of the semi-autonomous system

6.2 淀みの歪みに基づく人の操作誘導と類似タスク区別

6.2.1 類似タスク区別の課題点

前節では、状態空間の次元拡張を用いることで類似したタスク軌道の近接や交差を回避し、類似タスクの選択を実現する手法を提案した。一方でこの手法には以下の課題が存在する。



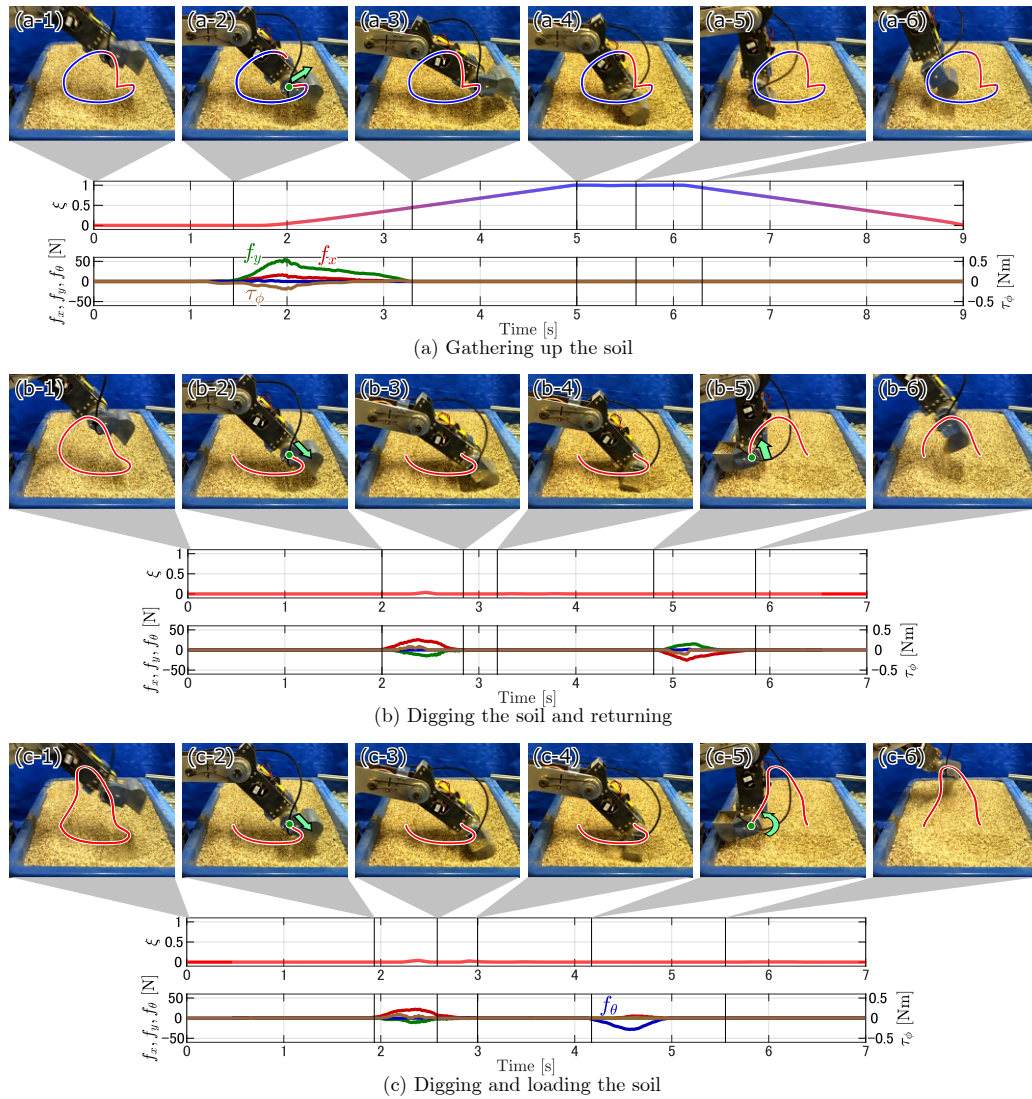


Fig.6.6 Time lapse of the robot motion

- タスク選択時の操作方向（分岐軌道の進行方向）は複数成分のカップリングであるため、リーダロボットを用いて正しい軌道の方に操作するのが難しい。
- 拡張次元成分のアトラクタによる変化が不十分であることに起因する操作ミスが発生しやすい。

そこで本節では、第 4 章において提案したアトラクタの歪みの歪みを用いた、拡張次元を含む人の操作の誘導を設計する。歪んだ歪みにより、分岐において正しい軌道に誘導する操作方向の提示を操作者に与えると同時に、選択されたアトラクタ軌道に移行しやすいように拡張次元成分を変化させる。これを実現するために、歪んだ歪みのベクトル場の機能の一つである操作方向の誘導の効果を強めるように歪んだ歪みに改良を施す。また、類似タスク間の選択においてタスク実行位置を変更するために、第 5 章において提案した操作力による連続的タスク



選択を合わせた半自律制御系を実装する。淀みの歪みを用いた人の操作を誘導する類似タスク選択と連続的タスク選択を含む提案システムをリーダー・フォロワロボットに実装しその評価を行う。

6.2.2 拡張次元を含む人の操作の誘導のための淀みの歪みの改良

本章では、ロボットの物理的な自由度に拡張次元 ξ を加えた 5 次元空間における淀みの歪みを用いる。式 (4.6)~(4.12) を 5 次元に拡張することで、Fig.6.7 に示すように 5 次元球面上に突起を発生させたような歪んだ淀みの形状を計算する。

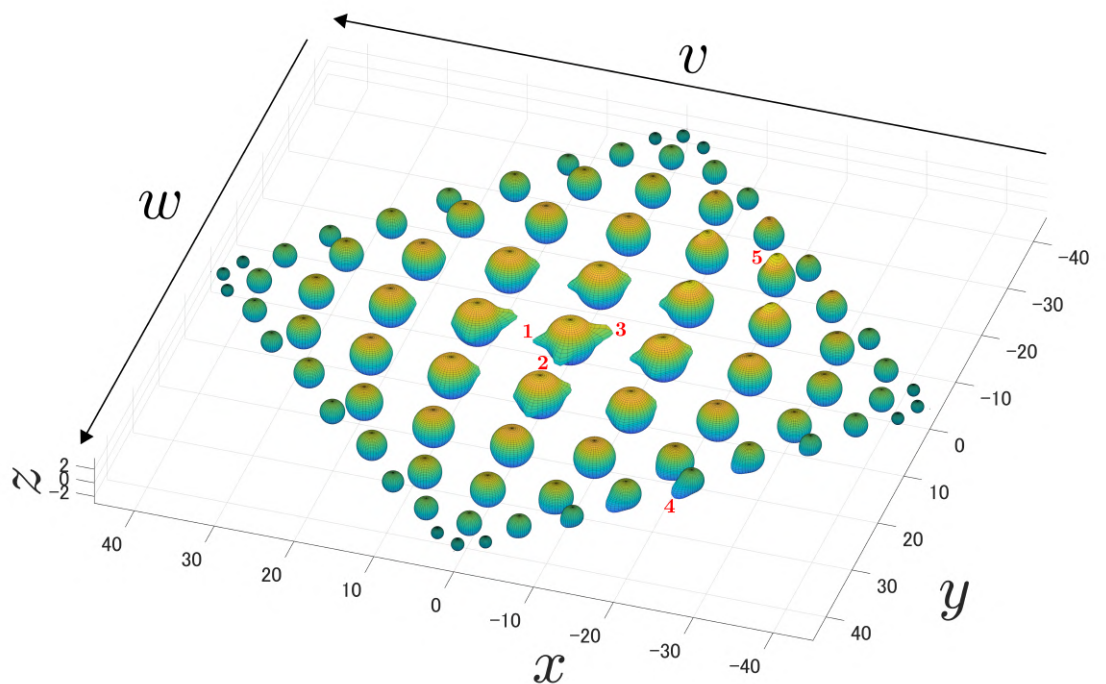


Fig.6.7 Example of 5D distorted stagnation spherical shape design

また、式 (4.5) で計算した \mathbf{v}'_s は

$$\mathbf{v}'_s = \frac{\partial V'_s}{\partial r'} \left(-r \frac{r_0}{R_{dst}^2} \frac{\partial R_{dst}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{r_0}{R_{dst}} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{x}} \right) \quad (6.2)$$

と表わせ、Fig. 6.8 に示すように分岐タスク軌道方向への誘導の成分 $-r \frac{\partial V'_s}{\partial r'} \frac{r_0}{R_{dst}^2} \frac{\partial R_{dst}}{\partial \mathbf{x}}$ と中心への吸い込みの成分 $\frac{\partial V'_s}{\partial r'} \frac{r_0}{R_{dst}} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{x}}$ に分解可能である。

これにより、各項のそれぞれの特性を独立して調整可能となり、ここで、操作方向の誘導の



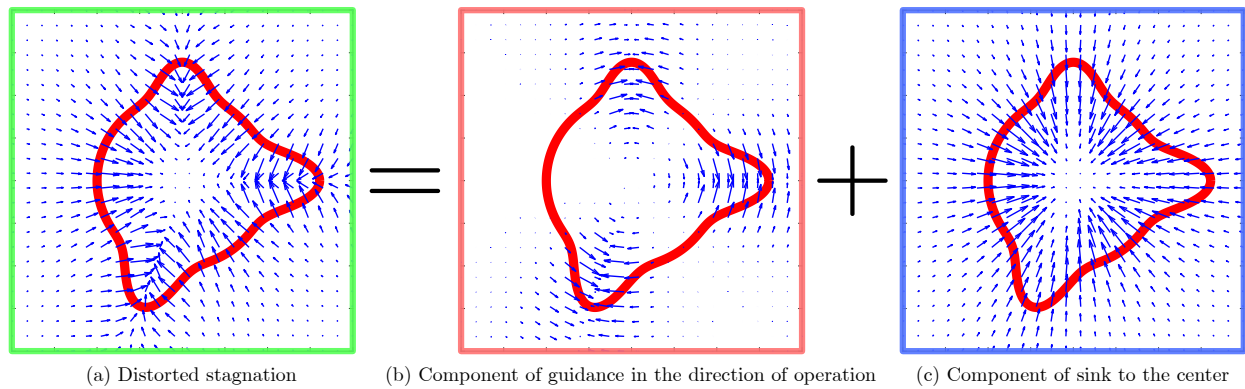


Fig.6.8 Decomposition of the vector field of stagnation distortion. The vector field of stagnation distortion can be decomposed into directional induction and sucking into the center.

成分を強める係数 C_d を導入することで \mathbf{v}'_s を

$$\mathbf{v}'_s = \frac{\partial V'_s}{\partial \mathbf{r}'} \left(-C_d r \frac{r_0}{R_{dst}^2} \frac{\partial R_{dst}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{r_0}{R_{dst}} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{x}} \right) \quad (6.3)$$

と計算することとする。

淀みの歪みが ξ 方向の成分を持っている場合、操作方向誘導の作用により、現実空間上の成分の操作力のみによって、 ξ 成分を変動させることが可能となり、また、 C_d を大きくすることで ξ の変動量を大きくすることが可能となる。現実の状態空間が 1 次元であるときの ξ 成分の操作誘導の作用の様子を Fig. 6.9 に示す。Fig. 6.9(a) に示す歪みのない淀みでは、現実空間上の成分の操作力のみを加えても ξ は変動しない。Fig. 6.9(b) に示す ξ 方向に歪んだ淀みでは、歪みの現実空間上の射影方向に操作力を加えるだけで ξ も連動して変動する。Fig. 6.9(c) では $C_d = 3.5$ としており、操作誘導の作用を強めた結果、現実空間上で同様の操作力を加えた場合でも、6.9(b) の状況より ξ の変動量が多くなっている。

6.2.3 淀みの歪みによる操作の誘導の実験検証

はじめに、アトラクタを用いずに、ロボットを掘削開始位置にある Fig.6.4 における分岐点 B1 に歪んだ淀みだけを置いた状態で、歪んだ淀みの中からそれぞれの分岐タスクの方向にロボットを操作することで、淀みの歪みによる拡張次元 ξ の変化の誘導の検証を行った。Fig.6.10 には分岐点 B1 の歪んだ淀みにおいて、2 つの分岐軌道の方に合わせて設計されている淀みの歪みの方向にロボットを操作したときの淀み周辺でのロボットの軌跡 (5 自由度) を $xy\xi$ 空間, xy 平面, $y\xi$ 平面に射影したものを示している。操作者は xy 平面内の方向にしか操作力を加えられないため、 ξ 軸方向の変化は歪んだ淀みに起因するものである。Fig.6.10(a) に示すかき集め軌道 (奥) 方向に操作したときでは、水色の矢印で示す淀みの歪みが ξ 方向に



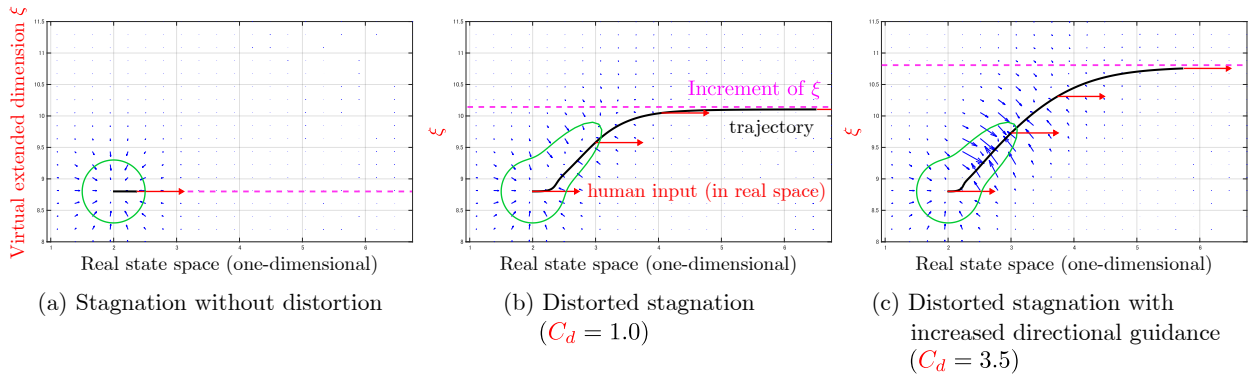
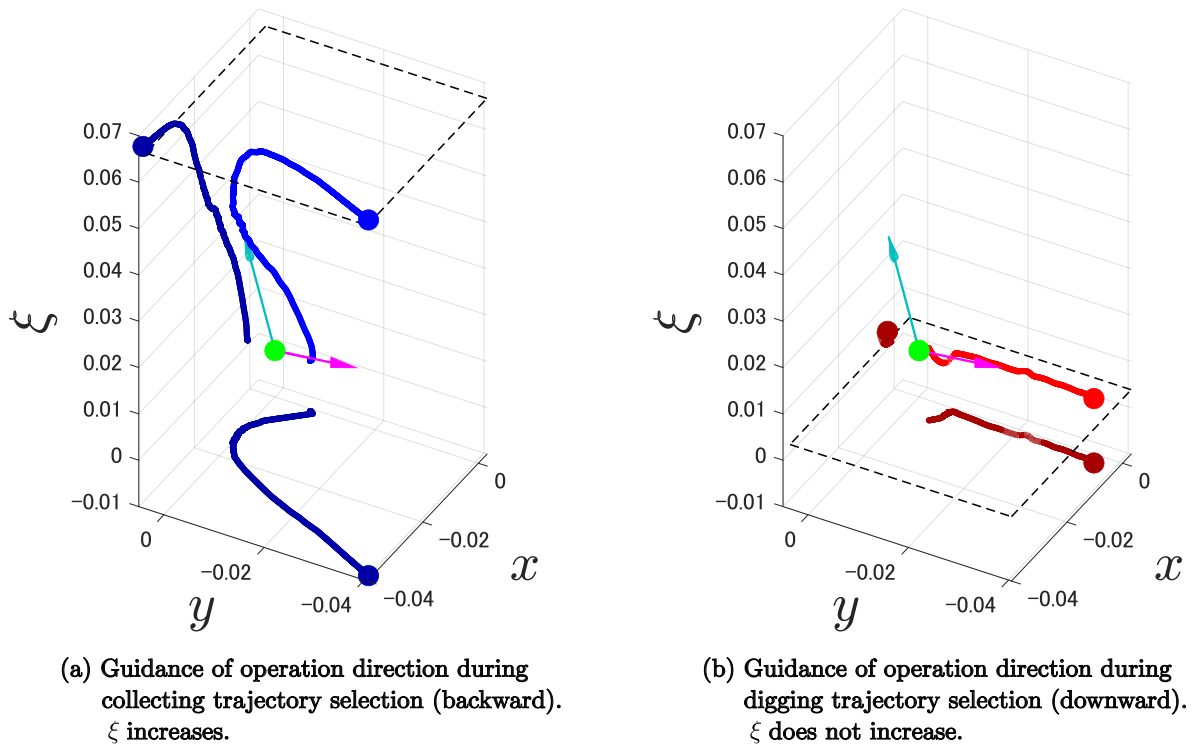


Fig.6.9 Simulation of the contribution of stagnation distortion to the change in extended dimension

正の成分を持っているため、淀みから抜け出すように操作すると、ロボットの状態は淀みの歪みの方向に誘導され、 ξ が増加していることが分かる。一方で、Fig.6.10(b)に示す掘削軌道(鉛直下)方向に操作したときでは、ピンクの矢印で示す淀みの歪みが ξ 成分を持っていないことから ξ がほとんど変化していないことが分かる。このように、現実空間上の操作力の方向に応じて仮想の状態量 ξ を変動できることを確認した。



(a) Guidance of operation direction during collecting trajectory selection (backward). ξ increases.

(b) Guidance of operation direction during digging trajectory selection (downward). ξ does not increase.

Fig.6.10 Verification of guiding human operation by distorted stagnation



6.2.4 淀みの歪みを用いた類似タスクの選択と軌道の変形の検証

類似タスクの選択を有する軌道アトラクタとアトラクタ軌道の変形を実装した半自律制御系を用いて実験を行った。一連のタスクは連続で3セット行われ、実験におけるロボットの動作の様子と操作力、軌道変形の倍率、拡張次元 ξ の変化を Fig.6.11 に示す。1セット目の作業では軌道を変形させずにそのまま掘削し、積込軌道を選択した。2セット目の作業では掘削位置を左奥方向かつ下方向に変形させた後に掘削を行い、そのまま復帰する軌道を選択した。3セット目の作業では掘削位置を2回目より右側かつ手前に移動させた状態で、かき集め動作を選択した。Fig.6.6 で示した、歪みの無い従来の淀みを用いた場合では ξ の変動に3秒程度掛かっているが、歪んだ淀みで誘導した場合は1.7秒程度で ξ が変動しており、これにより ξ の変動不足に起因する意図に反したタスク遷移を回避できるものと思われる。また、かき集め動作を含む半自律制御系においても、軌道の変形はゆっくりとした操作力で、タスク選択は素早い操作力を加えて行うことで、操作分離できていることが分かる。

6.3 おわりに

本章では、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、リーダー・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。
- 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、 ξ の変動不足に起因する意図に反したタスク遷移を回避する手法を提案した。
- 提案した淀みの歪み、類似タスク間の軌道の分岐を持つアトラクタ、座標変形による軌道の変形を含む半自律制御系を実験装置に実装し、淀みの歪みによる拡張次元の変化への寄与、類似タスクを含む軌道の分岐を持つアトラクタにおける軌道の変形と操作分離を実現できることを実験の中で検証した。

また、本研究では類似する分岐タスク選択を実現したが、分岐点での操作力の方向によって



タスク選択を行うため，類似するタスクであっても操作方向の違いを明確にするために分岐直後の軌道方向を曲げて設計しておく必要がある．大幅に軌道方向を曲げることはタスク実行の所要時間の増加につながるため，操作者が明確に区別可能な軌道方向の差異を調査した上で分岐点周辺で曲げる量を大きくし過ぎないように次元拡張軌道設計することが求められる．



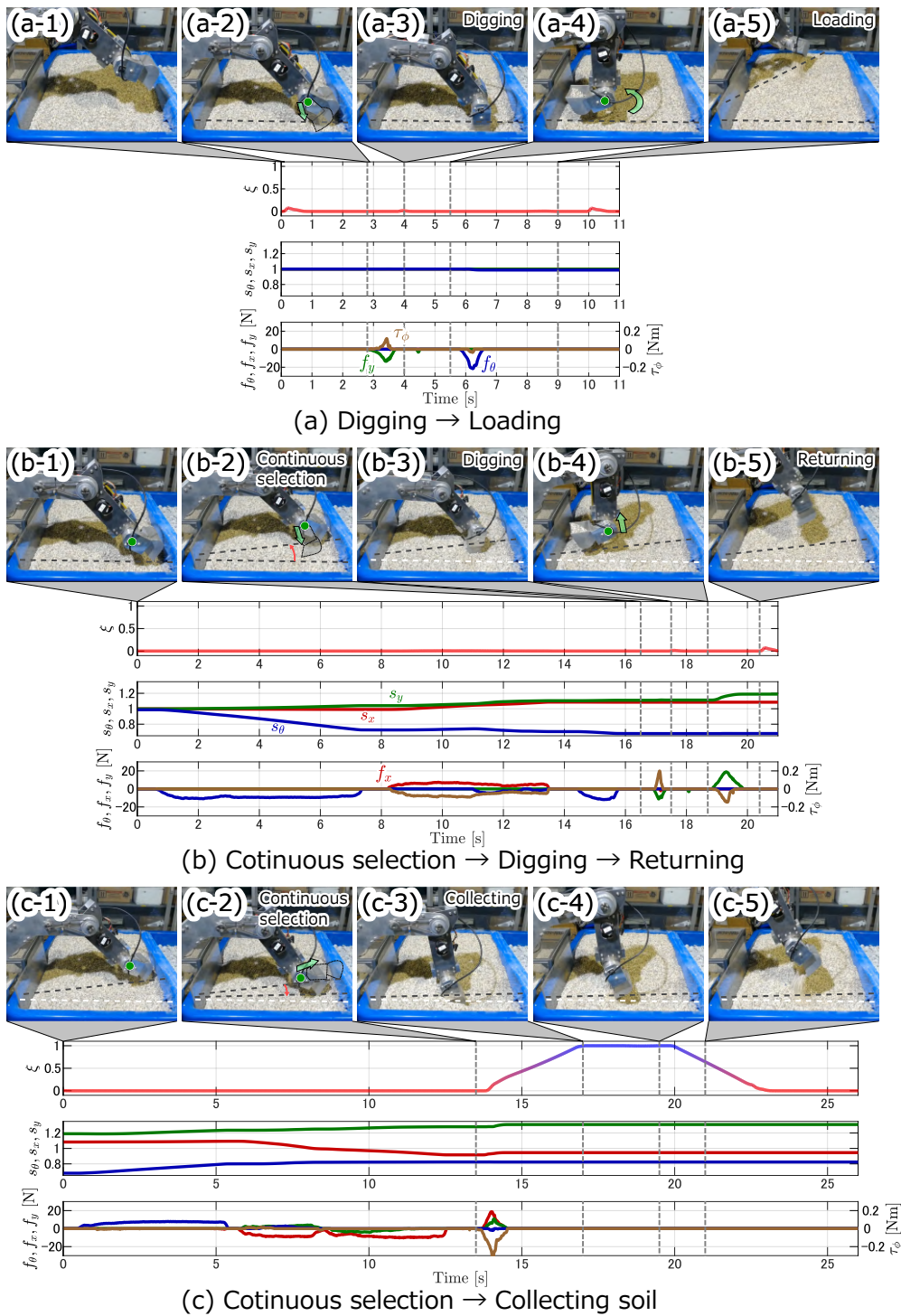


Fig.6.11 Robot motion in the experimental verification



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

7.1 はじめに

これまでの章において用いていた自律制御系では、目標となる運動の軌道を与え、軌道に収束する速度ベクトル場を定義し、これを関数近似することでコントローラを設計していた。このため、大域的な安定性が保証できないうえ、実装前に軌道アトラクタが形成されていることを確認する必要がある。また、実現される軌道が先に与えた目標軌道からずれることも多く、その確認も必要である。

一方、掘削作業では (a) 現場の環境に合わせてその場で掘削軌道を与えたい場合や、(b) 掘削の進行に合わせて軌道をオンラインで変更したい場合がある。(a) では短時間で大域的に安定な軌道アトラクタ（大域的な引き込み領域を持つ軌道アトラクタ）を設計する必要がある。また、(b) では障害物回避のように軌道を局所的に変更したい場合と掘削位置の変更のように軌道全体をシフトさせたい場合がある。しかし、いずれの場合も、従来手法では上述の理由から難しい。

人の操作履歴からロボットが運動を獲得する学習手法は模倣学習と呼ばれ、障害物回避 [57], [58], 制約を満たした行動生成 [59]-[64], 学習の効率化 [66]-[71], マルチモーダルな学習手法 [73]-[76], 制御系の安定性について近年盛んに研究されている。参考文献 [77]-[81] において、大域的に安定なアトラクタの設計手法について述べられているが、いずれの手法においても計算量の問題から軌道の変形をオンラインで行うのは難しい。また、参考文献 [82] では軌道アトラクタを変形する手法を提案しているが、これは後からベクトル場に拘束条件を与えるもので、どのような軌道が実現されるかが直感的にわかりにくい。

人とロボットの半自律協働作業における目標軌道の修正に関する研究がこれまでも行われており、Shek らは作業対象の物体中心のサブタスクとして人間の物理的介入を解釈する手法



を提案しグラフニューラルネットワークを用いてオブジェクトごとの特徴をオンラインで更新し、ロボットの行動を適応させることができることを示した [83]. Koutras らは半自律協働作業中に認識システムの遅延やエラーにも対応可能な動的障害物回避制御スキームを提案し、ロボットマニピュレータを用いた実験によりその有効性を検証している [84]. Losey らは人-ロボット間の物理的相互作用を通じてロボットの実際の軌道と参照軌道の両方を変更できる新しいインピーダンス制御アプローチを提案し、制約付き最適化とリアルタイム実装のアルゴリズムを用いてその有効性を検証した [85]. また, Losey らは物理的な人とロボットの相互作用からオンラインで人間の目的とするタスク変形を学習する方法を提案しており, 人の操作介入を隠れた目的関数を持つ部分可観測マルコフ決定過程 (POMDP) として定式化している [86]. 中嶋らは遠隔操作における物体把持タスクを支援するための力学系に基づくアプローチを提案しており, 目標位置と人操作入力に基づいて仮想目標位置を生成し, ロボットの指と対象物との衝突回避のために仮想力を用いて軌道をオンラインで修正する手法を提案した [87]. これらの手法では, 半自律協働作業におけるオンライン目標軌道変形を可能にするが, 急峻な変形となだらかな変形の両立については提案・検証されていない.

そこで本章では, 作業現場においてダイレクトティーチングされた操作データから大域的に安定な軌道アトラクタを有する制御系の設計手法を提案するとともに, 現場環境の変化に対応して目標軌道を直感的にオンラインで変形することが可能な手法を提案する. 提案手法では, 目標軌道を関数近似し, 軌道と現在位置との最近傍点を探索し, 軌道に収束しながら軌道に沿って流れる速度ベクトル場を計算することで, 大域的に安定なアトラクタを実現する. また, オンラインでアトラクタの目標軌道の急峻な変形となだらかな変形を両立させることを目的とし, 人の入力信号のスペクトル解析を行い, それに基づいて, 軌道の基底関数に重み付けされた逐次最小二乗法によって軌道の変形を計算することで, 操作入力の周波数に応じてアトラクタ軌道の変形の鋭さを変化させる. さらに, 軌道の変形の操作特性を変化させることを目的とし, 重みの計算にメンバーシップ関数を導入することで, その周波数応答を変化させる. また, シミュレーションを用いて, 提案手法の有効性の評価を行う. 最後に, 実験機を用いた提案手法の検証実験を行う.

7.2 大域的に安定な軌道アトラクタの設計

軌道アトラクタを利用した自律制御系は離散時間で

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n) \quad (7.1)$$

の差分方程式で表される. \mathbf{f} は \mathbf{x} の関数なので速度ベクトル場を表す. 以下では, 自律制御系が大域的に安定で, 与えられた運動を実現するように \mathbf{f} を以下のアルゴリズムで設計する.



教示データが

$$\Xi_N = \{\boldsymbol{\xi}_1 \quad \boldsymbol{\xi}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{\xi}_N\} \quad (7.2)$$

で与えられたとする。ただし、掘削のような繰り返し動作を想定し、 $\boldsymbol{\xi}_{N+1} = \boldsymbol{\xi}_1$ とする。この軌道は、例えば Fig.7.1(a) のような閉曲線を描く。 Ξ を媒介変数 ψ を用いて

$$\boldsymbol{\xi}_k = A\mathbf{z}_k \quad (7.3)$$

$$A = [\mathbf{b}_0 \quad \mathbf{a}_1 \quad \mathbf{b}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{a}_m \quad \mathbf{b}_m] \quad (7.4)$$

$$\mathbf{z}_k = [1 \quad \sin \omega_1 \psi_k \quad \cos \omega_1 \psi_k \quad \cdots \quad \sin \omega_m \psi_k \quad \cos \omega_m \psi_k]^T \quad (7.5)$$

で関数近似する。ただし、

$$\omega_i = 2\pi i, \psi_k = \frac{k}{N+1} \quad (7.6)$$

であり、これは Ξ を有限個の三角多項式で近似していることに相当する。このとき A は、

$$A_N = \Xi_N Z_N^\# \quad (7.7)$$

$$Z_N = [\mathbf{z}_1 \quad \mathbf{z}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{z}_N] \quad (7.8)$$

で得られる。ただし、 $Z^\# = Z^T(ZZ^T)^{-1}$ であり、 $J_\Xi = \|\Xi_N - A_N Z_N\|^2$ の最小二乗解を与えるものとする。

次にコントローラについて述べる。ロボットの状態 \mathbf{x} が与えられたとき、

$$J_x = \|\boldsymbol{\xi}(\psi) - \mathbf{x}\|^2 \quad (7.9)$$

を最小化する $\psi (0 \leq \psi \leq 1)$ を探索する。これには、Fig.7.1(b) のようにいくつかの \mathbf{z} の中から \mathbf{x} に近い少数のものを選択し、

$$\psi \leftarrow \psi + 2(\boldsymbol{\xi}(\psi) - \mathbf{x}) \frac{\partial \boldsymbol{\xi}}{\partial \psi} \quad (7.10)$$

によって ψ を更新し、 J_x を最小化する ψ を見つける。この ψ を $\tilde{\psi}$ とし、

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\xi}(\tilde{\psi} + \Delta\psi) - \boldsymbol{\xi}(\tilde{\psi}) - 2\delta(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}(\tilde{\psi})) \quad (7.11)$$

とする。 $\Delta\psi$ はロボットの速さを定め、 δ は軌道への収束の強さを表しており、軌道の垂直方向に

$$U = \delta \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}(\tilde{\psi})\|^2 \quad (7.12)$$

で表されるポテンシャルを設定していることに相当する。このとき、 \mathbf{f} は Fig.7.1(c) で表され、大域的に安定な速度ベクトル場を形成する。なお、ここでは2次元の例を示したが、 \mathbf{x} の次元に依らない。



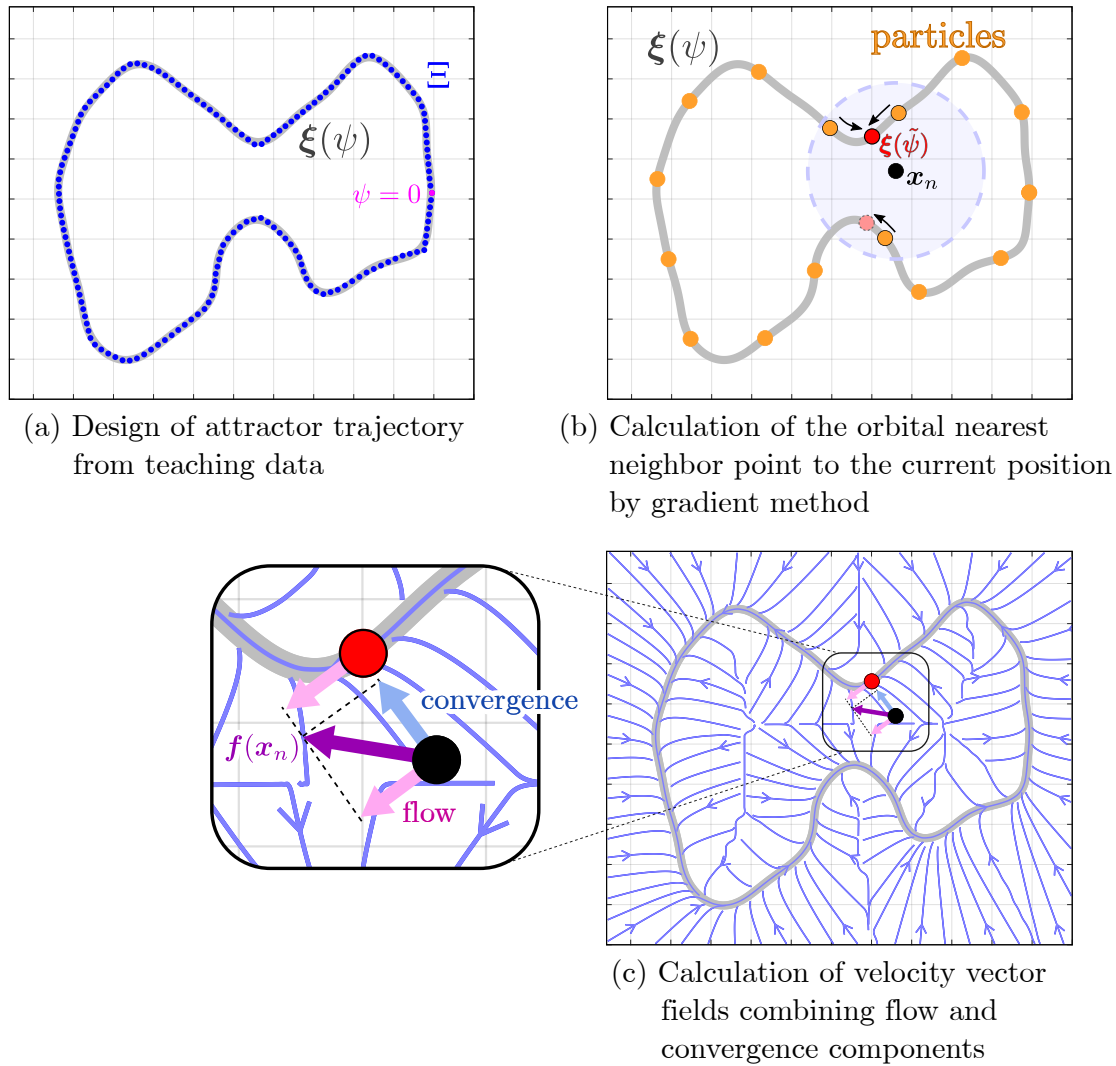


Fig.7.1 Design of globally stable attractor

7.3 周波数分離を行う軌道変形のための逐次更新

7.3.1 軌道の逐次更新

7.2 章で設計したアトラクタ軌道を人の操作入力に基づいて変形させる場合、逐次最小二乗法 (Recursive Least Squares, RLS) を用いることで、新たなアトラクタ軌道を表すパラメータ A_n が計算可能である。ここでは、人がロボットの運動途中に手先に力 \mathbf{F} を加え、

$$J_{\Xi} = \|\Xi_{N+1} - A_{N+1}Z_{N+1}\|^2 \quad (7.13)$$

$$\Xi_{N+1} = [\alpha\Xi_N \quad \hat{\xi}_{N+1}], Z_{N+1} = [\alpha Z_N \quad \hat{z}_{N+1}] \quad (7.14)$$

$$\hat{\xi}_{N+1} = A_N \hat{z}_{N+1} + \mathbf{F}_{N+1}, \hat{z}_{N+1} = z(\psi_{N+1}) \quad (7.15)$$



を最小化するよう A_{N+1} を逐次最小二乗法によって求めた。ただし、 α は忘却係数を意味する。しかし、この場合、 A のうち、大きな ω_i を持つ基底関数（高周波数成分）に関する係数が激しく変化する傾向が強かった。これは軌道の急峻な変化をもたらし、障害物回避のための軌道変形には適するが、掘削位置変更などのように軌道全体をシフトさせるような場合には適さない。そこで、これら両方に適用できるよう、以下の評価関数を設定する。

$$\hat{J} = \|\Xi_{N+1} - A_{N+1}Z_{N+1}\|^2 + \|(A_{N+1} - A_N)W_{N+1}\|^2 \quad (7.16)$$

基底関数ごとの係数の変動量 $(A_{N+1} - A_N)$ を W_{N+1} によって重み付けする。また、

$$W_{N+1} = [\alpha W_N \quad \Delta W_{N+1}] \quad (7.17)$$

とし、 ΔW_{N+1} は F のスペクトル解析から得る。まず、式 (7.16) の逐次計算について述べる。 A_{N+1} は、 W 、 ΔW を対角行列とし逐次最小二乗法を適用すると、

$$A_{N+1} = \hat{A}_{N+1} + A_N \hat{W}_{N+1} \quad (7.18)$$

$$\hat{A}_{N+1} = \hat{A}_N + ([\hat{\xi}_{N+1} \quad 0] - \hat{A}_N X_{N+1}) X_{N+1}^T P_{N+1} \quad (7.19)$$

$$\hat{W}_{N+1} = \hat{W}_N + ([0 \quad \Delta W_{N+1}] - \hat{W}_N X_{N+1}) X_{N+1}^T P_{N+1} \quad (7.20)$$

$$X_{N+1} = [\hat{z}_{N+1} \quad \Delta W_{N+1}] \quad (7.21)$$

$$P_{N+1} = (\alpha^2 P_N^{-1} + \hat{z}_{N+1} \hat{z}_{N+1}^T + \Delta W_{N+1} \Delta W_{N+1}^T)^{-1} \quad (7.22)$$

で得られる。なお、 P_N は

$$P_N = (Z_N Z_N^T + W_N W_N^T)^{-1} \quad (7.23)$$

であることと、 ΔW_N が対角行列であることから、

$$\Delta W_N \Delta W_N^T = \omega_1 \omega_1^T + \omega_2 \omega_2^T + \cdots + \omega_{2m} \omega_{2m}^T \quad (7.24)$$

$$\Delta W_N = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_{2m}] \quad (7.25)$$

で書けるので、式 (7.22) は逆行列補題から逆行列を求めることなくスカラの割り算の繰り返しで計算できる。

7.3.2 人の入力のスเปクトル解析による ΔW の計算

W_N は人の入力信号のスเปクトル S_N によって計算される。 S_N は

$$[\mathbf{F}_1 \quad \mathbf{F}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{F}_N] \doteq S_N [z(\tilde{\psi}_1) \quad z(\tilde{\psi}_1) \quad \cdots \quad z(\tilde{\psi}_N)] \quad (7.26)$$

$$S_N = \text{diag} \{s_0 \quad s_1 \quad \cdots \quad s_{2m}\} \quad (7.27)$$



を満たすよう求める。これは、 \mathbf{F} を低次のフーリエ級数で近似したものに相当する。 \mathbf{S} は 7.3 章と同様に忘却係数付きの逐次最小二乗法によって求める。さらに、 S を周波数ごとにまとめ、

$$\bar{S}_N = [\bar{s}_0 \quad \bar{s}_1 \quad \cdots \quad \bar{s}_m]^T \quad (7.28)$$

$$\bar{s}_k = \begin{cases} |s_k| & \text{if } k = 0, \\ \left\| \begin{bmatrix} s_{2k-1} & s_{2k} \end{bmatrix} \right\| & \text{if } k \neq 0 \end{cases} \quad (7.29)$$

とする。

\bar{S}_N にメンバーシップ行列 M を乗じることで、 W_N の計算のために新たに用いる値 \tilde{S}_N を

$$\tilde{S}_N = M \bar{S}_N \quad (7.30)$$

$$\tilde{S}_N = [\tilde{s}_0 \quad \tilde{s}_1 \quad \cdots \quad \tilde{s}_m]^T \quad (7.31)$$

$$M = [\mu_{ij}] \quad (7.32)$$

と計算する。

\tilde{S}_N を用いて ΔW_N を

$$\Delta W_N = \text{diag} \{w_0 \quad w_1 \quad \cdots \quad w_m\} \quad (7.33)$$

$$w_k = \frac{1}{\delta_w + \tilde{s}_k} \quad (7.34)$$

と計算する。 δ_w は分母が 0 になるのを回避するための定数である。スペクトル \tilde{S}_N が大きいほど、対応する周波数の基底関数についての重みが小さくなり、 A の対応する成分が変動しやすくなる。これにより、入力周波数に応じた急峻さの軌道の変形を行う。

M が単位行列のとき、スペクトルと基底関数の周波数は 1 対 1 対応となる。一方で、この変形手法では操作力のスペクトルに基づいて、意図する軌道への変形を実現することを目指しているが、人の操作力のスペクトルと軌道を定める周波数基底関数の対応は必ずしも一致せず、人が意図する変形が難しい場合がある。そこで、操作力のスペクトルと基底関数の周波数の関係を表すメンバーシップ関数を導入することで、操作力のスペクトルと変動する係数の関係を設定し、単一の係数ではなく、複数の係数の組み合わせで変動させることで軌道変形の挙動を変化させる。スペクトルと基底関数の周波数が 1 対 1 対応の関係の場合、 M は Fig.7.3(a) に示すような単位行列となる。

一方、Fig.7.2 に三角関数での関数近似において 1 つの新たなデータ点を加え急峻な変形が起きたときの基底関数の係数の変動量を示している。青い円は過去のデータ点、青い曲線は 18 個の三角関数による近似結果であり、赤い円で示す新たなデータ点を追加した後の関数近似結果を赤い曲線で示している。このとき、周波数ごとの係数の変動量はすべての周波数でほぼ一定となっている。すなわち、急峻な変動を起こしている場合でも、対応する高周波数成分



のみが優位になるのではなく、その周波数以下の係数全体が連動して変動していることが分かる。この変形時の係数の変動の関係性を考慮することで、高周波成分が単体で変化することによって起因する振動的挙動の軽減に加えて、 M を単位行列としたときには含まれていない係数の変動が起こり変形量自体を増加させられることが期待できる。Fig.7.2 に示す特性を考慮し、スペクトルと対応する周波数以下の全ての係数を変動させるメンバーシップ行列は Fig.7.3(b) に示すように

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \leq j) \\ 0 & (i > j) \end{cases} \quad (7.35)$$

とし、対角成分より上の成分が 1 となる上三角行列とした。

また、 M を単位行列や上三角行列とすると、軌道全体をシフトさせるためには、軌道一周全体に渡って継続的に操作力を加える必要があり、操作性が悪くなる原因となる。これは Fig.7.3(a), (b) において赤い点線で示すようにスペクトルと対応する係数の周波数の組み合わせが対角線上に分布しているためである。そこでさらに、Fig.7.3(c) に示すように (b) の対角線を折れ線とし、折れ線より上の行列要素を 1 とすることで、スペクトルと係数の周波数の関係のスケーリングを行い、なだらかな変形（軌道全体のシフト）が起きやすいように設計した。これにより、より少ない時間の操作介入で軌道全体のシフトを行えるようにする。

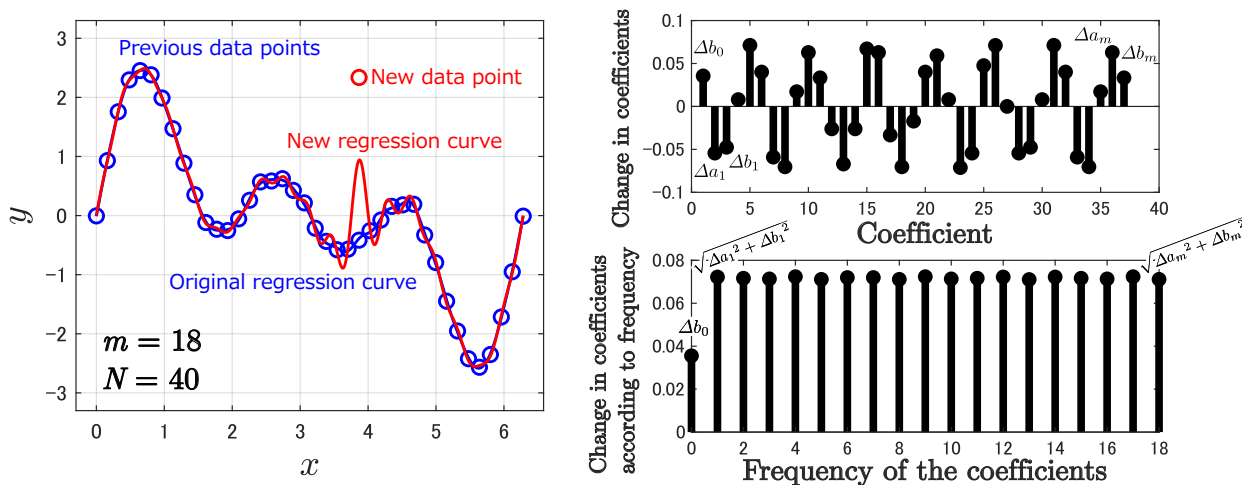


Fig.7.2 Variation of coefficients when a new data point is added in the functional approximation of a trigonometric polynomial

7.4 シミュレーションによる提案手法と RLS の比較

7.2 章で設計した大域的に安定なアトラクタと 7.3 章で設計した軌道の変形の逐次更新則を 2 自由度系のシミュレーションに実装し、人の操作による直感的な軌道の変形の提案手法の検証を行った。



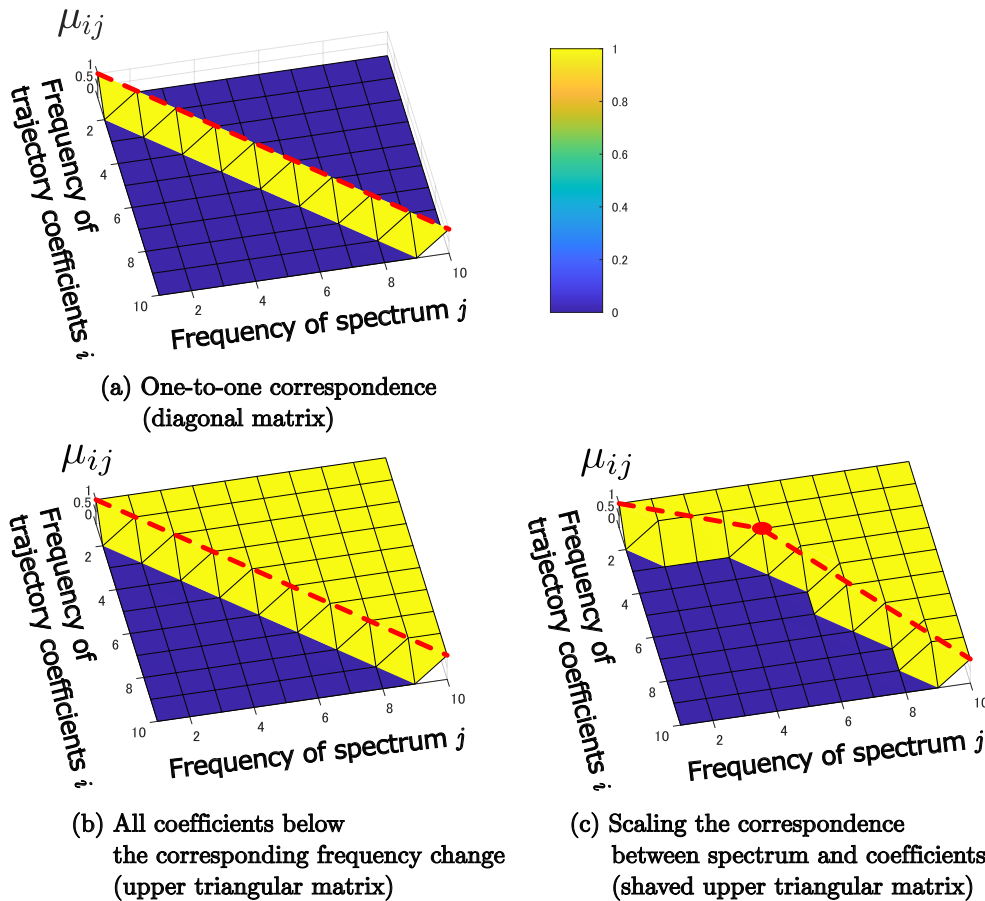


Fig.7.3 Membership function design

まず、RLS と M が単位行列のときの提案手法の比較を行った。シミュレーションでは黒点で示す座標 $(0, -1)$ 周辺の通過と同時に $1 - \cos(\theta(t))$ で表される操作入力信号を 1 波長分だけ与える。RLS と提案手法をそれぞれ用いたシミュレーションにおいて、この操作を 4 回行ったときの軌道の変形の様子を比較する。高周波数と低周波数の操作入力を印加したときのシミュレーションによる検証の結果をそれぞれ Fig.7.4 と Fig.7.5 に示す。高周波数の入力信号を印加した Fig.7.4 では局所的な障害物を回避するように軌道を変形することを想定している。シミュレーションでは、従来手法と提案手法においてともに入力に基づく急峻な変形を実現できている。

低周波数の入力信号を印加した Fig.7.5 では軌道をシフトさせることを想定している。従来手法を用いたシミュレーションでは、入力信号の大きさの変動によって元の軌道の形状が歪みながら変形している。これは軌道のパラメータの高次元成分が変動していることに起因すると考えられる。一方で、提案手法を用いたシミュレーションでは形状を変えずに軌道全体が右に移動していることから意図通りの変形を行うことができている。また、このときの提案手法における入力信号のスペクトルは 0 次 (定数項) と 1 次が優位となっており、入力信号のスペク



トルに基づいた重み付けを行うことで、操作意図に基づいた直感的な軌道の変形を行うことができています。

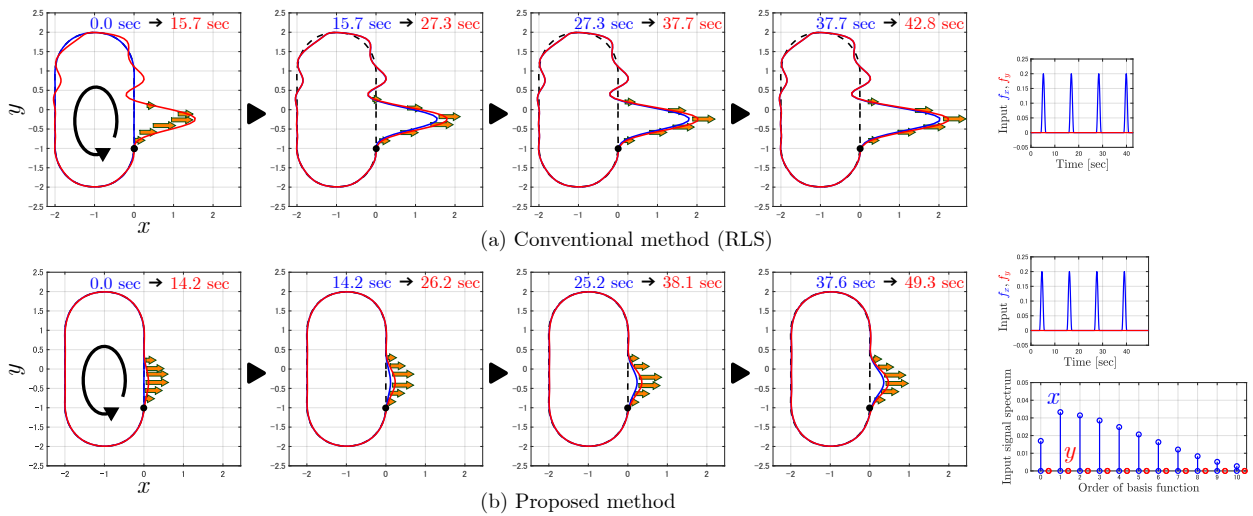


Fig.7.4 Simulation results with high-frequency signal input

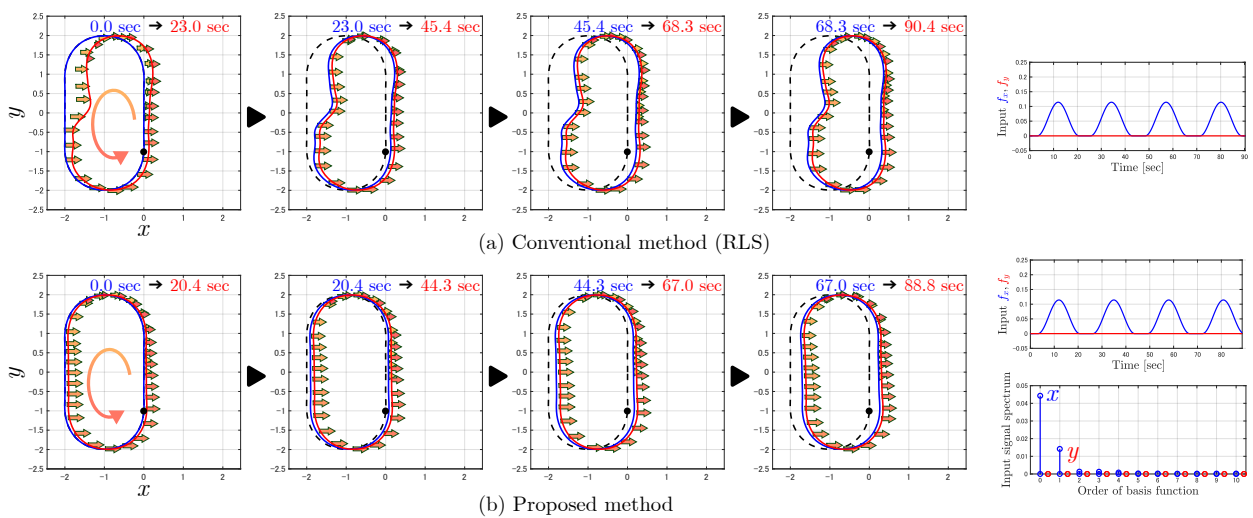


Fig.7.5 Simulation results with low-frequency signal input

7.5 メンバシップ関数を変更した場合の変形挙動のシミュレーションによる検証

次に、メンバーシップ関数を変更した場合の 2 次元のシミュレーションにおける、人の操作による直感的な軌道の変形の提案手法の検証を行った。シミュレーションでは黒点で示す座標 $(0.41, -0.1)$ 周辺の通過と同時に $1 - \cos(\theta(t))$ で表される操作入力信号を 1 波長分だけ与



える。7.3.2 章で設計した 3 種類のメンバーシップ関数をそれぞれ用いたシミュレーションにおいて、軌道全体のシフトと障害物の回避を意図した周波数の異なる 2 種類の操作入力信号を加えたときの軌道の変形の様子を比較する。軌道全体のシフトと障害物の回避のための操作入力を印加したときのシミュレーションによる検証の結果をそれぞれ Fig.7.6 と Fig.7.7 に示す。軌道全体のシフトを意図した Fig.7.6 では、比較的低周波数のなだらかな操作入力が印加されている。操作入力が印加されているのは軌道上の半周程度に渡った範囲のみであるが、Fig.7.6(c) では、スペクトルと係数の対応関係のスケーリングを行っているため、高周波入力の影響を抑え軌道全体がシフトできていることが観察できる。

障害物の回避を意図した Fig.7.7 では、急峻な変形のために比較的高周波数の操作入力が印加されている。いずれのメンバーシップ関数を用いた状況でも障害物を回避するような急峻な変形が実現できている。Fig.7.6(b) では、対応する周波数以下の全ての係数が変動するため、(a) よりも大きく変動できていることが分かる。

7.6 実験機を用いた大域安定なアトラクタの軌道変形の提案手法の検証

3.3.5 節で述べた実験環境を用いて、大域安定なアトラクタの軌道変形の検証を行う。まず、軌道変形に用いる大域安定アトラクタのティーチングを行う。ティーチング軌道のデータにはリーダ・フォロワロボットを直接手動操作した際の時系列データを用いており、常に一定速度以上でロボットが運動し、軌道が閉軌道となるようにデータの整形を施した軌道データから 7.2 節に示した手法で Fig. 7.8 に示す大域的に安定なアトラクタを設計した。教示データにおいてロボットは土壌を掘削し、旋回し土砂の積み込みを行っている。

アトラクタのオンライン軌道変形の操作の検証実験を 3 回に渡って実施した。まず、Fig. 7.9 に示すように障害物回避を意図した軌道変形を行った。黒い線で表される元のアトラクタ軌道にピンクの矢印で示す操作力が加えられ、青い線で示す軌道に変形される。掘削動作の途中で鉛直上向きに高周波の操作力が素早く加えられ、土壌中の障害物を回避するように軌道が変形された。

次に、Fig. 7.10 に示すように旋回方向への掘削軌道全体のシフトを意図した軌道変形を行った。アトラクタ軌道に沿って動作させながら、常に旋回方向に低周波数の操作力を加え続ける。これにより軌道が旋回方向左側にシフトし、掘削位置が左側に移動している。

最後に、Fig. 7.11 に示すように、複数回の繰り返し掘削において、鉛直方向へ掘削軌道を段階的に深くしていく変形を意図した軌道変形を行った。4 回繰り返し掘削を行いながら、だんだん深く掘るように鉛直下方向に低周波数の操作力を加え続けた。これにより掘削の進行に応じて、掘削深さを変更することができた。



7.7 おわりに

本章では、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のための、大域的に安定な軌道アトラクタとアトラクタ軌道の直感的なオンライン変形手法の設計を行った。以下に成果を示す。

- 大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系を実際の操作データに基づいて設計するために、目標軌道を関数近似し、現在位置との最近傍点の探索により、軌道に収束する速度ベクトル場を計算する手法を提案した。
- アトラクタ軌道の直感的な変形をオンラインで行うために、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した。
- 大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系におけるアトラクタ軌道のオンライン変形の操作性を向上させるために、メンバーシップ関数を設計し、スペクトルと変動する多項式の係数の周波数の関係を設定し、
 - 複数の係数を連動して変動させることで、軌道変形の挙動を軽減し、変形量を増加させる手法を提案した。
 - また、スペクトルと係数の間のスケールを変更することで、より少ない時間の操作介入で軌道全体のシフトを行える手法を提案した。
- 提案した大域的に安定なアトラクタと軌道の直感的なオンライン変形手法を2自由度のシミュレーションに実装し、入力スペクトルに応じて意図通りの変形が行えることを検証した。
- 提案した大域的に安定なアトラクタと軌道の直感的なオンライン変形手法を実験用の4自由度ロボットに実装し、障害物回避、旋回方向への軌道のシフト、掘削深さの段階的変更といった変形が意図通りに行えることを検証した。



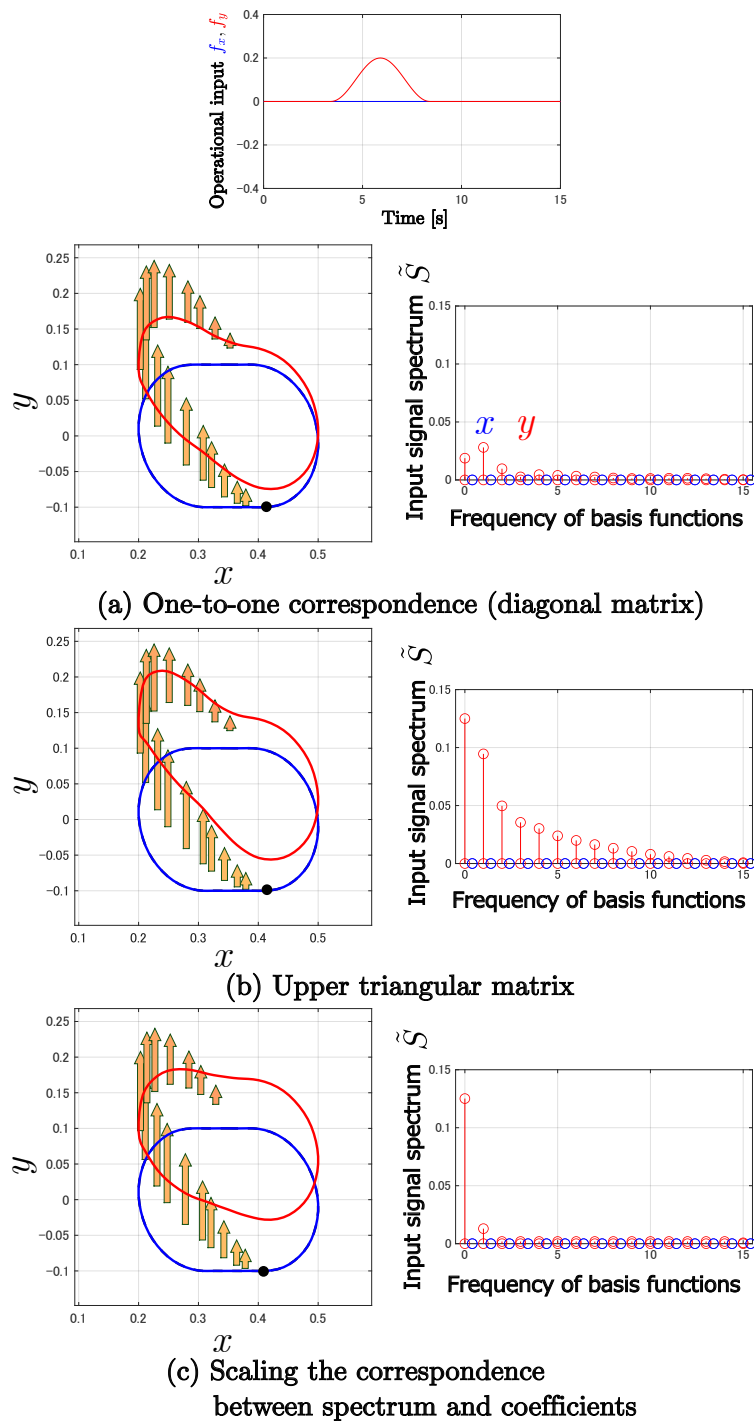


Fig.7.6 Simulation results when applying a low-frequency manipulation input intended to shift the entire trajectory



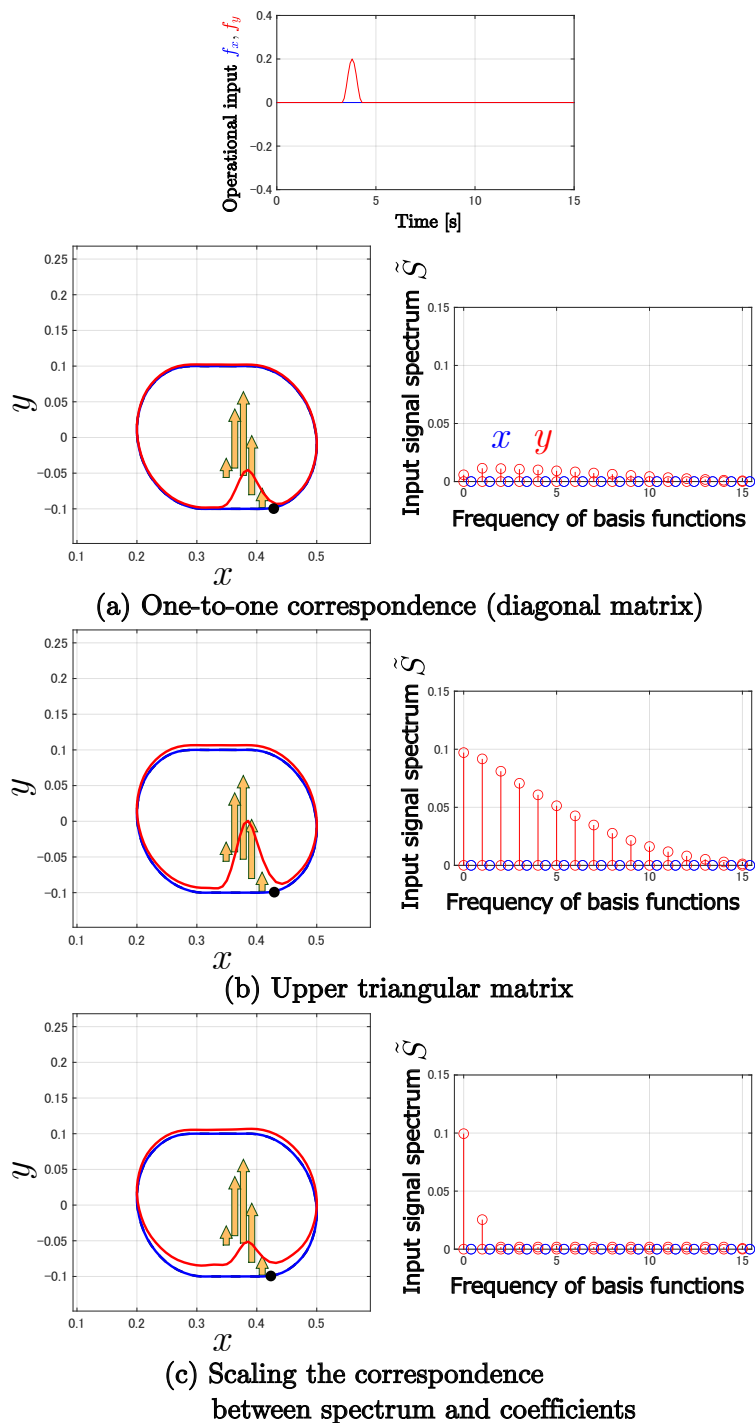


Fig.7.7 Simulation results when high-frequency operation input intended to avoid obstacles is applied



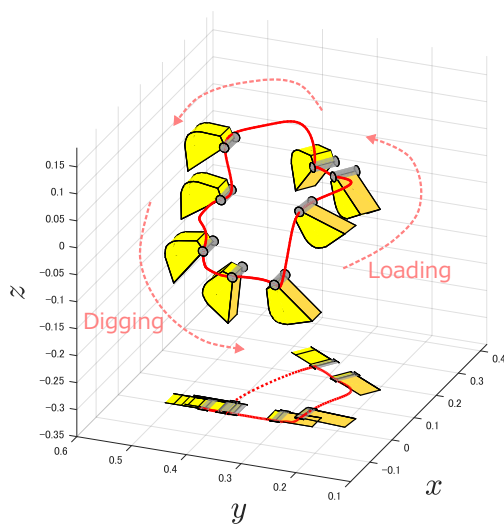


Fig.7.8 Teaching trajectory acquired from manual operation

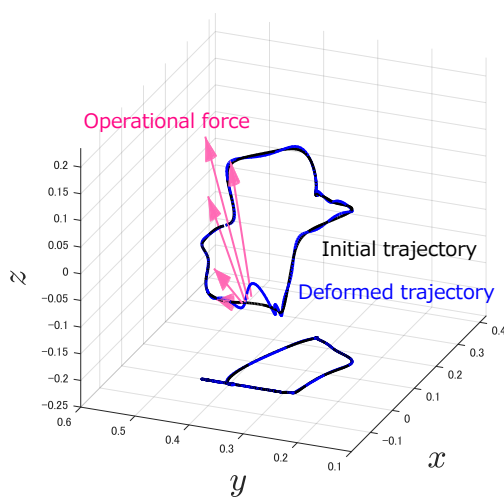


Fig.7.9 Experimental result of trajectory deformation intended to avoid obstacles

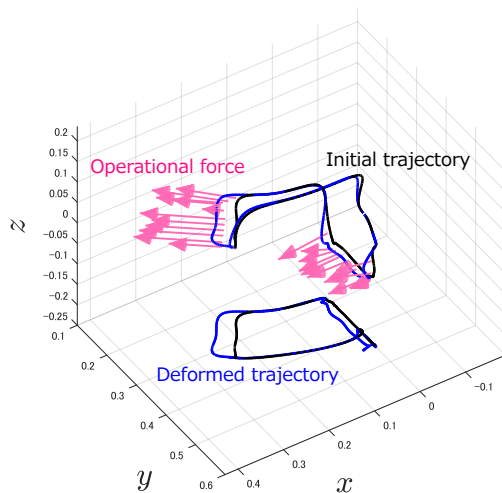


Fig.7.10 Experimental result of trajectory deformation intended to shift the entire digging trajectory in the turning direction

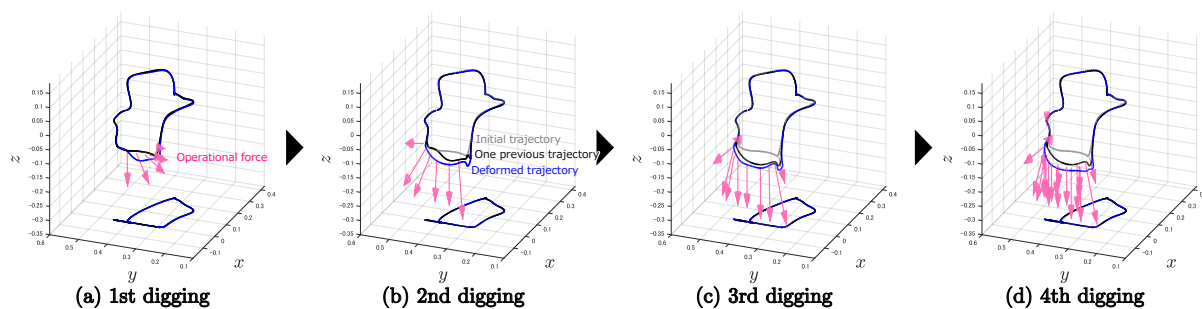


Fig.7.11 Experimental result of trajectory deformation intended to deepen the excavation trajectory in the vertical direction



第 8 章

結論

8.1 研究の成果

本論文では、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、汎用的な人の操作介入を実現する半自律制御系を提案した。多様な環境に対応し、状況に応じたタスク選択を行うために、人の操作介入によって実現できる機能を増やすことを目的とし、要素技術の開発を行った。提案手法の半自律制御系において以下のことを実施した。

- 力覚提示と人の操作、操作負担軽減を行う半自律系の設計を実施した。
 - アドミッタンスモデルと平衡多様体を組み合わせた半自律バイラテラル制御系を設計し、ロボットに実装した。
 - アドミッタンスモデルの仮想剛性と仮想減衰係数をリーダー・フォロワの位置偏差の関数とし、可変とすることで状況に応じた可変アドミッタンス制御を実現した。
 - * 無負荷時の軽快な動作を実現した。
 - * 土壌の硬さの違いによって力覚提示を変化させることが出来た
 - * 掘削不可能な障害物の力覚提示による知覚を行うことが出来た。
 - 旋回情報をアニメーションで代替するリーダーロボットを含むリーダー・フォロワロボットを設計・製作した。
- 軌道アトラクタに対する人の操作介入の自由度の拡張の設計を実施した。
 - 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の設計を実施した。
 - * アトラクタの淀みを軌道上の 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の一時停止と再開を実現した。
 - * 掘削、土壌の積み込みの選択を実現するために、掘削、旋回のための分岐を持つ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現した。
- 離散的タスク選択における淀みの歪みに基づくタスク優先度の設計を実施した。
 - * タスク選択の操作負荷を低減し、操作方向の提示を行う淀みの歪みのベクトル場を設計した。
 - * 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した。
 - * 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、歪みによる操作負荷の低減、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の中で検証した。
 - 軌道アトラクタを有する非線形力学系における連続的タスク選択の設計を実施した。
 - * 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。特に、掘削終了位置や積み込み位置を固定した座標変換を提案した。
 - * 軌道の連続的な変形に加えて、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1つの操作インタフェース（力センサ）で行うために、座標変換のスケールの推定に動特性を埋め込んだEKFを用いることで操作の周波数分離を行った。
 - 類似タスク区別のための非線形力学系次元拡張の設計を実施した。
 - * 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。
 - * 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、 ξ の変動不足に起因する意図に反したタスク遷移を回避する手法を提案した。
 - * 提案した淀みの歪み、類似タスク間の軌道の分岐を持つアトラクタ、座標変形による軌道の変形を含む半自律制御系を実験装置に実装し、淀みの歪みによる拡張次元の変化への寄与、類似タスクを含む軌道の分岐を持つアトラクタにおける軌道の変形と操作分離を実現できることを実験の中で検証した。



- ダイレクトティーチング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の提案を行った。
 - 大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系を実際の操作データに基づいて設計するために、目標軌道を関数近似し、現在位置との最近傍点の探索により、軌道に収束する速度ベクトル場を計算する手法を提案した。
 - アトラクタ軌道の直感的な変形をオンラインで行うために、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した。
 - 大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系におけるアトラクタ軌道のオンライン変形の操作性を向上させるために、メンバーシップ関数を設計し、スペクトルと変動する多項式の係数の周波数の関係を設定し、
 - * 複数の係数を連動して変動させることで、変形量を増加させる手法を提案した。
 - * また、スペクトルと係数の間のスケールを変更することで、より少ない時間の操作介入で軌道全体のシフトを行える手法を提案した。
 - 提案した大域的に安定なアトラクタと軌道の直感的なオンライン変形手法を 2 自由度のシミュレーションに実装し、入力のスペクトルに応じて意図通りの変形が行えることを検証した。
 - 提案した大域的に安定なアトラクタと軌道の直感的なオンライン変形手法を実験用の 4 自由度ロボットに実装し、障害物回避、旋回方向への軌道のシフト、掘削深さの段階的変更といった変形が意図通りに行えることを検証した。

上記の実施事項により、本論文では人とロボットが協力し作業を実行する半自律リーダー・フォロシステムにおける以下の事項を実現した。

- リーダー・フォロロボットの可変アドミッタンス制御を設計したことにより、リーダーロボットをフォロロボットのミニチュアとして直接操作しているような操作感を実現し、操作負荷に応じた適切な力覚提示を受けながら、アトラクタを有する非線形力学系を用いた自律制御系に直接操作介入することを実現した。
- 離散的タスク選択の設計により、タスクの成否や施工計画に応じた操作者による次の実行タスク内容の離散的な切り替えをリーダーロボットを介した物理的な操作介入のみによって実現した。また、タスクの選択頻度に応じたタスク間の遷移しやすさの変更と類似した分岐タスク間のタスク選択を実現した。
- 連続的タスク選択の設計により、施工の進行や現場の環境に応じた次のタスク実行位置のリーダーロボットを介した連続的な選択を実現し、アトラクタを用いた半自律系にお



る掘削位置の変更を行い広範囲の掘削を行うことを可能とした。また、離散的タスク選択と連続的タスク選択それぞれの人の操作の周波数特性に基づいた操作の分離を行ったことで、追加のボタン操作を導入することなく、タスク実行位置の連続的な選択と離散的なタスク選択を同一のリーダーロボットで行うことを実現した。

- 実際の軌道データに基づいて大域的に安定なアトラクタを有する非線形力学系を設計する手法を提案したことで、半自律制御系に埋め込むタスクの参照軌道をダイレクトティーチングにより現場で取得し、多様な現場に応じたタスク軌道が埋め込まれた安定性の保証されているコントローラを即座に設計することを実現した。
- 人の操作力のスペクトルに応じてなだらかな変形と急峻な変形を区別して操作できるようにする大域安定アトラクタのオンライン軌道変形手法を設計したことにより、アトラクタ軌道のオンライン変形において、タスク実行位置の全体的な移動と急峻な障害物回避の両方を単一の操作力による直感的な介入により実現した。

8.2 今後の課題

以下に今後の課題として実施すべき内容を示す。

1. 実際の運用における有効性の評価

提案手法を掘削機の実機に実装し、実際に遠隔操作の効率が向上するのかを評価する必要がある。この際、設定タスクや比較対象、評価指標、被験者を適切に選択する必要がある。複合的な要素を含んでいるため単純な比較は難しい。

2. ダイレクトティーチングにおける軌道の重複と軌道の分岐を考慮したアトラクタ設計

教示データにおける軌道の重複や、軌道の分岐と合流を考慮したダイレクトティーチング手法の設計を行う必要がある。この際にはタスク軌道の位相情報を活用して、軌道同士の距離を調整する方法が有効である。

3. タスクの学習と変形における拘束条件

任意の形状にタスク軌道を変形することで与えられたタスクの意図から逸脱してしまう恐れがあるため、タスク軌道の変形に拘束条件を与える必要がある。そこで、軌道上の位置に応じた拘束や変形しやすさを分散で表現し変形アルゴリズムに反映させる手法や変形軌道の解空間の次元削減を用いた手法の開発を行う必要がある。

4. より多様なタスクの埋め込みと自由な切り替え

非線形力学系により多様なタスクを埋め込み、自由に切り替え可能とするために、機能を追加し選択の要素を増やす（次元拡張）と同時に計算量を軽減させるためにタスクの次元圧縮も行う必要がある。

5. 油圧ショベルの実機を用いた現場実装をするための課題



本論文では、提案したアトラクタベースの半自律制御系の実験検証において電磁モータを用いた実験検証用ロボットを用いたが、実際の油圧ショベルは油圧を駆動源とするアクチュエータを用いており、制御入力に対する動特性が大きく異なる。また、実際の遠隔操作ではリーダ・フォロワ間の情報伝達の通信遅延が発生する。これらの影響下においてもアトラクタベースの半自律制御系が有効に動作するのかをより実環境に近い状況で実験検証する必要がある。油圧ショベルの動特性と情報伝送遅延への対応については、油圧ショベルの動特性モデルと通信遅延を考慮した予測制御の設計を行う必要がある。

6. 掘削以外の分野における半自律ロボットへの応用

- 移動ロボットやモバイルマニピュレータにおいても協働タスクの実行を目的とした半自律制御系の設計、提案を行うことが可能である。この際、タスク空間における手先位置からクローラの位置、アームの関節角度を計算する冗長な逆運動学を計算する必要がある。また、ベースの移動を含む多様な協働マルチタスクを設計する必要がある。
- リハビリを支援する協働ロボットにおいても、柔軟に人と協働する半自律ロボットが有効である。ここでは、使用者の意図を適切に抽出し、使用者の状態改善のために軌道収束のコンプライアンスと軌道の適応の調整を行う必要がある。
- マッサージや研磨タスクを行う協働ロボットや宇宙や海中などの極限環境で動作する遠隔操縦ロボットのように掘削以外の分野における半自律ロボットへと応用した手法の提案を行う必要がある。



参考文献

- [1] 吉田 貴, "無人化施工におけるテレロボティクス", 日本ロボット学会誌, vol.30, no.6, pp.585-587, 2012.
- [2] 茂木 正晴, 西山 章彦, 藤野 健一, 油田 信一, "無人化施工における油圧ショベルの作業時間計測～モデルタスクによる搭乗・遠隔操作での作業時間比較～", 土木技術資料, vol.57, No. 4, pp.16-19, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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, 浅間一, "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.
- [5] 北條 怜, 阪田 顕, 棟本 真弘, 羽田 靖史, 竹下 嘉人, 飛鳥馬 翼, 北原 成郎, "多視点映像生成による遠隔操作支援技術の開発と評価", 計測自動制御学会論文集, vol.57, no.12, pp. 526-532, 2021.
- [6] R. Sato, M. Kamezaki, S. Sugano and H. Iwata, "Gaze pattern analysis in multi-display systems for teleoperated disaster response robots," 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Budapest, Hungary, pp. 003534-003539, 2016.
- [7] 永谷 圭司, 薬師川 楓, 桐林 星河, 渡辺 敦志, "土砂災害の初動対応を目指した無人建設機械の状態提示技術の研究開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2016, セッション ID 1P1-10a6, p. 1P1-10a6-, 2016.
- [8] 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.
- [9] Masaru Ito, Yusuke Funahara, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, Yuichi Kurita, "Development of a Cross-Platform Cockpit for Simulated and Tele-Operated Excavators," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.31, no.2, pp. 231-239, 2019.
- [10] M. Kamezaki, J. Yang, H. Iwata, S. Sugano, "Visibility enhancement using autonomous multicamera controls with situational role assignment for teleoperated work machines," Journal of Field Robotics, vol.33, no.6, pp.802-824, 2016.
- [11] 佐藤 隆哉, 亀崎 允啓, 山田 充, 橋本 毅, 菅野 重樹, 岩田 浩康, "無人化施工の掘削リリース作業における側面カメラの最適および好適配置の実験的導出", 日本機械学会論文集, vol.85, no.876, p.19-00066, 2019.
- [12] M. Moteki, et al., "Research on improving work efficiency of unmanned construction," Proc. of 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2016, pp. 478-486.
- [13] 鷹巢 征行, "臨場感ある遠隔操作を実現するオペレータへの提示技術の研究", 日本建築学会構造系論文集, vol.63, no.63, pp.53-59, 1998.



- [14] 吉灘 裕, 武田 周, 横田 眞一, "大型バイラテラルマニピュレータの研究: 第2報 プロトタイプモデルの試作と作業性評価," 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol.44, no.4, pp.81-86, 2013.
- [15] 加藤 英寿, 山田 宏尚, 武藤 高義, "遠隔操作建設ロボットシステムのマスタ・スレーブ制御 (第2報: 重力補償による多関節アームへの拡張)," 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol.34, no.4, pp.7-13, 2003.
- [16] 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.
- [17] 荒木 亮次, 岡田 大貴, 田崎 勇一, 横小路 泰義, 吉灘 裕, 中村 晋也, 倉鋪 圭太, "災害対応油圧駆動ロボットの高臨場感遠隔操縦のための手先負荷力推定," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2018, 2A1-J05-, 2018.
- [18] 古屋 弘, 栗生 暢雄, 清水 千春, "3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」(特集 巨大地震にそなえる 予測・対策・復旧)," 大林組技術研究所報, no.76, pp.1-10, 2012.
- [19] 永野 光, 竹之内 栄人, 昆陽 雅司, 田所 諭, "筐体で生じる高周波振動の触覚伝達による建設ロボットの遠隔操縦支援," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2018, セッション ID 2A1-J04, p. 2A1-J04-, 2018.
- [20] A. A. Yusof, T. Kawamura, and H. Yamada, "Operational Evaluation of a Construction Robot Tele-operation with Force Feedback," Transaction of The Japan Fluid Power System Society (JFPS), vol.43, no.1, pp.753-758, 2011.
- [21] Takahiro Ishikawa, Michiya Masuda, Shunsuke Uda, Koichiro Yokoyama, Kenniti Hamamoto, Kiminao Kogiso, "Constrained remote control of construction machine with time-varying delay and packet loss," Advanced Robotics, vol.37:1-2, pp.46-60, 2023.
- [22] 渡辺 将旭, 前田 宗彦, 早瀬 幸知, "電制化された建設機械向けの導入が容易で操作方法を切り替えられる遠隔操縦システム," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2016, p. 2A2-10a6-, 2016.
- [23] B. Son, C. Kim, C. Kim and D. Lee, "Expert-Emulating Excavation Trajectory Planning for Autonomous Robotic Industrial Excavator," 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, USA, pp. 2656-2662, 2020.
- [24] J. Huh et al., "Deep Learning-Based Autonomous Excavation: A Bucket-Trajectory Planning Algorithm," in IEEE Access, vol. 11, pp. 38047-38060, 2023.
- [25] R. J. Sandzimier and H. H. Asada, "A Data-Driven Approach to Prediction and Optimal Bucket-Filling Control for Autonomous Excavators," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 2682-2689, 2020.
- [26] D. Lee, I. Jang, J. Byun, H. Seo and H. J. Kim, "Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control," 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Prague, Czech Republic, pp. 2135-2142, 2021.
- [27] A. Rasul, A. Khaicnour and J. Seo, "Effective Ground Mapping for Autonomous Excavation," 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of, pp. 1087-1092, 2021.
- [28] P. Egli and M. Hutter, "Towards RL-Based Hydraulic Excavator Automation," 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, USA, pp. 2692-2697, 2020.



- [29] P. Egli, D. Gaschen, S. Kerscher, D. Jud and M. Hutter, "Soil-Adaptive Excavation Using Reinforcement Learning," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9778-9785, Oct. 2022.
- [30] Y. Zhu, L. Wang and L. Zhang, "Excavation of Fragmented Rocks with Multi-modal Model-based Reinforcement Learning," *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Kyoto, Japan, pp. 6523-6530, 2022.
- [31] Q. Lu, Y. Zhu and L. Zhang, "Excavation Reinforcement Learning Using Geometric Representation," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 4472-4479, 2022.
- [32] T. Osa and M. Aizawa, "Deep Reinforcement Learning With Adversarial Training for Automated Excavation Using Depth Images," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4523-4535, 2022.
- [33] Yutaka Okamoto, Masafumi Okada, "Dynamical modeling of excavation based on bucket workload and control of excavated soil weight," *Mechanical Engineering Journal*, vol. 10, no. 6, p. 23-00200, 2023.
- [34] Mikko Hiltunen, Rauno Heikkil, Ilpo Niskanen, Matti Immonen, "Open InfraBIM for remote and autonomous excavation," *Automation in Construction*, vol.156, p.105148, 2018.
- [35] 平井 成興,"特集 テレロボティクスの理論 Shared Autonomy の理論," *日本ロボット学会誌*, vol.11, no.6, pp.788-793, 1993.
- [36] A. Menon et al., "Shared Control of Assistive Robots through User-intent Prediction and Hyperdimensional Recall of Reactive Behavior," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 12638-12644, 2023.
- [37] B. Guan, R. V. Godoy, F. Sanches, A. Dwivedi and M. Liarokapis, "On Semi-Autonomous Robotic Telemanipulation Employing Electromyography Based Motion Decoding and Potential Fields," *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Detroit, MI, USA, pp. 6991-6997, 2023.
- [38] N. Boguslavskii, Z. Zhong, L. M. Genua and Z. Li, "A Shared Autonomous Nursing Robot Assistant with Dynamic Workspace for Versatile Mobile Manipulation," *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Detroit, MI, USA, pp. 7040-7045, 2023.
- [39] 榊 泰輔, 館 章,"インピーダンス制御の接触安定性についての一考察," *日本ロボット学会誌*, vol.12, no.3, pp.489-496, 1994.
- [40] 横小路 泰義, 吉川 恒夫,"マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性," *計測自動制御学会論文集*, vol.26, no.5, pp.572-579, 1990.
- [41] 佐野 明人, 藤本 英雄,"マスタスレーブシステムの制御系設計の動向," *システム／制御／情報*, vol.42, no.7, pp.356-362, 1998.
- [42] 横小路 泰義,"マスタ・スレーブ制御の理論," *日本ロボット学会誌*, vol.11, no.6, pp.794-802, 1993.
- [43] 金岡 克弥,"パワー増幅マスタスレーブシステムのための力順送型バイラテラル制御," *第 27 回 日本ロボット学会学術講演会予稿集*, 3C1-06, 2009.
- [44] Ryo Kikuuwe,"A Sliding-Mode-Like Position Controller for Admittance Control With Bounded Actuator Force," *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol.19, no.5, pp.1489-1499, 2014.
- [45] 古田 勝久, 小菅 一弘, 塩手 良知, 秦野 弘,"仮想内部モデルに基づくマスタスレーブマニピュレータの制御," *計測自動制御学会論文集*, vol.24, no.2, pp.70-76, 1988.



- [46] Angelika Peer, Martin Buss, "A New Admittance-Type Haptic Interface for Bimanual Manipulations," *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol.13, no.4, pp.416-427, 2008.
- [47] Alexandre Lecours, Boris Mayer-St-Onge, Clément Gosselin, "Variable admittance control of a four-degree-of-freedom intelligent assist device," *ICRA*, pp.3903-3908, 2012.
- [48] 岡本 裕, 土方 亘, 岡田 昌史, "ベクトル場を利用した仮想ポテンシャルの設計とロボットの平衡多様体への安定化," *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, vol.2018, p. 2A2-E15-, 2018.
- [49] A. H. Jazwinski, "Stochastic Processes and Filtering Theory," San Diego, CA: Academic, 1970.
- [50] Pistillo, A., Calinon, S., and Caldwell, D. G., "Bilateral physical interaction with a robot manipulator through a weighted combination of flow fields," In *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, pp. 3047-3052, 2011.
- [51] M. Okada and Y. Nakamura, "Design of the continuous symbol space for the intelligent robots using the dynamics-based information processing," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. *ICRA '04.*, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 3201-3206 Vol.4, 2004.
- [52] M. Khoramshahi and A. Billard, "A dynamical system approach to task-adaptation in physical human-robot interaction," *Autonomous Robots*, vol.43, no.4, pp.927-946, 2019.
- [53] 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.
- [54] 岡田 昌史, 岡本 裕, 舩屋 賢, "人の操作モデルと拡張カルマンフィルタによる状態推定を用いた掘削の半自律制御," *日本機械学会論文集*, vol.86, no.884, p.19-00320, 2020.
- [55] M. Khoramshahi, A. Laurens, T. Triquet, and A. Billard, "From human physical interaction to online motion adaptation using parameterized dynamical systems," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1361-1366, 2018.
- [56] M.Okada, K.Tatani, Y.nakamura, "Polynomial design of the nonlinear dynamics for the brain-like information processing of whole body motion," In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.11410-1415, 2002.
- [57] A. Coulombe and H. -C. Lin, "Generating Stable and Collision-Free Policies through Lyapunov Function Learning," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 3037-3043, 2023.
- [58] S. Shaw et al., "Constrained Dynamic Movement Primitives for Collision Avoidance in Novel Environments," *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Detroit, MI, USA, pp. 3672-3679, 2023.
- [59] A. Strazys, M. Burke and S. Ramamoorthy, "Learning Robotic Cutting from Demonstration: Non-Holonomic DMPs using the Udwadia-Kalaba Method," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 5034-5040, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160917.
- [60] J. J. Aloor, J. Patrikar, P. Kapoor, J. Oh and S. Scherer, "Follow The Rules: Online Signal Temporal Logic Tree Search for Guided Imitation Learning in Stochastic Domains," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 1320-1326, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160953.



- [61] X. Li, M. Baur and O. Brock, "Augmentation Enables One-Shot Generalization in Learning from Demonstration for Contact-Rich Manipulation," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 3656-3663, 2023.
- [62] C. Basich, S. Mahmud and S. Zilberstein, "Learning Constraints on Autonomous Behavior from Proactive Feedback," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 3680-3687, 2023.
- [63] M. Przystupa, F. Haghverd, M. Jagersand and S. Tosatto, "Deep Probabilistic Movement Primitives with a Bayesian Aggregator," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 3704-3711, 2023.
- [64] G. Li, Z. Jin, M. Volpp, F. Otto, R. Lioutikov and G. Neumann, "ProDMP: A Unified Perspective on Dynamic and Probabilistic Movement Primitives," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 4, pp. 2325-2332, 2023.
- [65] Maxim Vochten, Tinne De Laet, Joris De Schutter, "Generalizing demonstrated motion trajectories using coordinate-free shape descriptors," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 122, p-103291, 2019.
- [66] Ying Zhang, Miao Li, Chenguang Yang, "Robot learning system based on dynamic movement primitives and neural network," Neurocomputing, Volume 451, Pages 205-214, 2021.
- [67] A. Tekden, M. P. Deisenroth and Y. Bekiroglu, "Neural Field Movement Primitives for Joint Modelling of Scenes and Motions," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 3648-3655, 2023.
- [68] T. Ablett, B. Chan and J. Kelly, "Learning From Guided Play: Improving Exploration for Adversarial Imitation Learning With Simple Auxiliary Tasks," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 3, pp. 1263-1270, 2023.
- [69] J. Huang, J. Hao, R. Juan, R. Gomez, K. Nakamura and G. Li, "Model-based Adversarial Imitation Learning from Demonstrations and Human Reward," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, 2023.
- [70] H. Tahara, H. Sasaki, H. Oh, E. Anarossi and T. Matsubara, "Disturbance Injection Under Partial Automation: Robust Imitation Learning for Long-Horizon Tasks," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 5, pp. 2724-2731, 2023.
- [71] J. Sedlar et al., "Imitrob: Imitation Learning Dataset for Training and Evaluating 6D Object Pose Estimators," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 5, pp. 2788-2795, 2023.
- [72] F. Regal et al., "Using Single Demonstrations to Define Autonomous Manipulation Contact Tasks in Unstructured Environments via Object Affordances," 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Detroit, MI, USA, pp. 3664-3671, 2023.
- [73] M. Chang and S. Gupta, "One-shot Visual Imitation via Attributed Waypoints and Demonstration Augmentation," 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, pp. 5055-5062, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160944.
- [74] A. Paolillo, P. R. Giordano and M. Saveriano, "Dynamical System-based Imitation Learning for Visual Servoing using the Large Projection Formulation," 2023 IEEE International Con-



- ference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, pp. 755-761, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160935.
- [75] L. Biagiotti, R. Meattini, D. Chiaravalli, G. Palli and C. Melchiorri, "Robot Programming by Demonstration: Trajectory Learning Enhanced by sEMG-Based User Hand Stiffness Estimation," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, no. 4, pp. 3259-3278, 2023.
- [76] H. Kim, Y. Ohmura, A. Nagakubo and Y. Kuniyoshi, "Training Robots Without Robots: Deep Imitation Learning for Master-to-Robot Policy Transfer," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 5, pp. 2906-2913, 2023.
- [77] S. M. Khansari-Zadeh and A. Billard, "Learning Stable Nonlinear Dynamical Systems With Gaussian Mixture Models," IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, no. 5, pp. 943-957, 2011.
- [78] Neumann K, Steil JJ, "Learning robot motions with stable dynamical systems under diffeomorphic transformations," Robotics and Autonomous Systems, vol.1, no. 70, pp. 1-5, 2015.
- [79] 成清辰生, Hamed JABBARI ASL, 山藤祐希, 川西通裕, "パワーアシストロボットの Assist-as-Needed 適応速度場制御," 計測自動制御学会論文集, vol.55, no.9, pp.529-535, 2019.
- [80] P. Gesel and M. Begum, "Learning Stable Dynamics via Iterative Quadratic Programming," 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, pp. 2958-2964, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10161237.
- [81] Figueroa, N. and Billard, A., "Locally active globally stable dynamical systems: Theory, learning, and experiments," The International Journal of Robotics Research, vol. 41, no.3, pp.312-347, 2022.
- [82] 岡田 昌史, 中村 大介, 門根 秀樹, 梶山 博史, 中村 仁彦, "力学的情報処理におけるアトラクタ設計法に関する研究 - 逐次設計による可塑性の導入と階層化設計による大規模化 - ," 日本ロボット学会誌, vol.23, no.5, pp.583-593, 2005.
- [83] Alvin Shek, Bo Ying Su, Rui Chen, and Changliu Liu, "Learning from Physical Human Feedback: An Object-Centric One-Shot Adaptation Method," in 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2023), London, UK, pp. 9910-9916, 2023.
- [84] L. Koutras, K. Vlachos, G. S. Kanakis, F. Dimeas, Z. Doulgeri and G. A. Rovithakis, "Enforcing Constraints for Dynamic Obstacle Avoidance by Compliant Robots," 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, pp. 5221-5227, 2023.
- [85] D. P. Losey and M. K. O' Malley, "Trajectory Deformations From Physical Human-Robot Interaction," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 1, pp. 126-138, 2018.
- [86] Losey DP, Bajcsy A, O' Malley MK, Dragan AD. "Physical interaction as communication: Learning robot objectives online from human corrections," The International Journal of Robotics Research, vol.41, no.1, pp.20-44, 2022.
- [87] 中嶋 優人, 中西 淳, "把持タスクにおける仮想力と力学系を用いた軌道修正による遠隔操作支援," 日本ロボット学会誌, vol.41, no.5 , pp. 469-477, 2023.



謝辞

本研究に際して、岡田・土方研究室の岡田昌史教授、土方亘准教授のご指導をいただきました。岡田昌史教授には学部4年次より機械工学、ロボット工学、制御工学について非常に多くの知識を教わり、多くの貴重な経験をさせていただきました。また、斬新なアイデアに基づき研究の方向性を決定していく過程を横で目撃することで非常に多くの洞察を得ることができました。常日頃より文章や資料、プレゼンの作成に関する指導をいただき、その結果として一度の国際学会を含む11回の学会参加をすることができました。そのうちのいくつかはコロナ渦につきリモート開催となり渡米が見送られたことは非常に残念でしたが、今後も国際学会に積極的に挑戦したいと考えております。民間企業でロボットの研究開発に取り組む予定なので、学会などの研究活動でまたお世話になることがもしかするとあるかもしれません。その際はよろしくお願いたします。

土方亘准教授にも学部4年次より研究会においてご指導いただきました。プレゼンの方法、研究背景と研究目的のつながり、手法の評価方法などに関して非常に鋭い角度からの指摘、質問をいただき研究方針や説明の方法を一度原点に立ち返って再確認するきっかけを下さいました。また、自分の研究に対してだけでなく他の方に対する質問や指摘なども通して研究活動における重要な着眼点を多く学ばせていただきました。これまで本当にお世話になりました。

また、宮崎大学の舩屋賢准教授には国際学会への投稿経験が少ない私に投稿におけるアドバイスを頂き、私が研究において用いる専門知識に関する書籍を快く貸し出していただきました。在籍時には研究室内の環境整備に関しても多大な尽力をいただき、快適な研究生活を支えていただきました。

審査員である武田行生教授、西田佳史教授、三浦智准教授には、中間審査と下読み会にて博士論文の研究目的や研究の意義、提案システムのコンセプトやメリット、研究限界を明確に伝える方法についてご指導いただきました。本当にありがとうございました。

共同で掘削ロボットの実験を行っている博士課程の先輩である岡本裕氏にはロボットの実装やプログラミングにおいて多大なるご指導をいただきました。ロボットの使用時間がお互い限られているにもかかわらず自由にロボットを使わせていただいていることに感謝しております。



岡田・土方研究室の皆様には常日頃よりいろいろな場面で助けていただきました。学部4年時から6年間、この研究室で過ごす中で多くの先輩、同期、後輩の方々と出会い、学生室や研究会で時間を共にしました。その誰もがひたむきに研究に取り組んでおり、その後ろ姿に私自身も強く励まされ刺激を受けることが多々ありました。お蔭様で毎日楽しんで研究活動に勤しむことが出来ました。

多くの友人の存在も私の研究活動の大きな支えとなりました。日々の由無し事を友人と電話越しや居酒屋で語り合った時間は日々の大きなストレス解消となりました。また、合気道部の友人の方々と稽古した時間も貴重なリフレッシュの時間でした。稽古の時間とその後にはラーメンや中華、カレーうどんを食べビールを飲みながら語った時間はこの先の人生で振り返っても何物にも代えがたい、かけがえのない時間だったと言えるでしょう。

父さん、母さん、おじいちゃん、おばあちゃんにも生活面、精神面で多大なる支援をいただきました。18歳で地元を離れた日の時点では、まさかこのまま9年間も同じ学校に通い続けるとは、私も含め誰も想像だにしていなかったでしょう。これからは少しずつではありますが、これまでに受け取ってきた分だけ恩返しをしていきたいと考えています。

2023年11月に入籍した妻にも日常的に生活を支えてもらいました。生活リズムが崩れがちな私でしたが、そんな私の健康を気遣う言葉を日頃からかけてくれました。平日には自分の仕事の合間を縫って2人分の食事を用意してくれ、休日には出不精な私をおしゃれなカフェ巡りや美味しいお酒が飲める居酒屋に導きリフレッシュさせてくれました。数年間心配をかけたことが、これからもよろしく願います。

また、本研究を実施するにあたり小松製作所の方々に支援いただき、建機の制御ソフトウェア開発に携わる現場の視点より多大なご助言をいただきましたことに感謝致します。

全ての方々の支援のお蔭様で、毎日楽しんで研究活動に勤しむことが出来ました。本当にありがとうございました。今後とも交流がありました際にはよろしく願いいたします。



