T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	人間機械協調掘削のための場に基づく自律系の設計
Title(English)	
著者(和文)	岡本裕
Author(English)	Yutaka Okamoto
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12768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,遠藤 玄,山北 昌毅,菅原 雄介
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12768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

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

令和5年度

東京工業大学 工学院 機械系 エンジニアリングデザインコース

博士論文

人間機械協調掘削のための
場に基づく自律系の設計

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

エンジニアリングデザインコース

岡本 裕

目次

第 1 章　序論 1

1.1　社会的背景 1

1.2　無人化施工における油圧ショベルの操作技術 3

1.2.1　油圧ショベルについて 3

1.2.2　油圧ショベルの掘削作業の遠隔操作に関する従来研究 5

1.2.3　油圧ショベルの掘削作業の自律化に関する従来研究 7

1.2.4　遠隔操作及び自律制御の問題に対する考察 7

1.3　本論文の目的と構成 9

第 2 章　掘削深さに関する人の操作モデルに基づく掘削の半自律制御系設計 12

2.1　はじめに 12

2.2　掘削深さに関する半自律制御系の設計 12

2.2.1　時間の拘束を持たない自律制御系の設計 12

2.2.2　人の操作介入 15

2.3　半自律制御系の実験検証 17

2.3.1　実験装置の概要 17

2.3.2　自律制御系による掘削 17

2.3.3　半自律制御系による掘削 20

2.4　おわりに 22

第 3 章　掘削深さと速度を導入した半自律制御系の設計 23

3.1　はじめに 23

3.2　掘削速度に関する操作自由度を導入した半自律制御系の設計 24

3.2.1　自由度カップリングについて 24

3.2.2　ベクトル場の分割設計 24

3.2.3　流れの大きさに関する人の操作モデルの設計 25

3.3　掘削速度に関する半自律制御系の実験検証 26

3.3.1　実験環境の用意 26

3.3.2　掘削速度の自律制御系の実験検証 28

3.3.3　障害物衝突時の人の操作介入の検証 29



3.4 おわりに 32

第 4 章 土砂掘削モデルに基づいた掘削距離変化による掘削量の自律制御 34

4.1 はじめに 34
4.2 掘削モデルの設計 36
4.2.1 掘削量とバケット仕事との関係調査のための予備実験 36
4.2.2 掘削の力学モデルの設計 39
4.3 ドラッグ距離変化による掘削量の制御 42
4.4 提案手法の実験検証 45
4.4.1 実験概要 45
4.4.2 中粒土砂への掘削検証 45
4.4.3 異なる土砂高さ h での掘削 48
4.4.4 細粒土砂への掘削検証 50
4.4.5 議論 51
4.5 おわりに 53

第 5 章 土砂の特性変化に対する自律制御系のロバスト性検証 54

5.1 はじめに 54
5.2 平坦と非平坦土砂の掘削における差異 55
5.3 実験検証 56
5.4 おわりに 62

第 6 章 結論 63

6.1 研究の成果 63
6.2 今後の課題と展望 65

参考文献 66

参考文献 66

研究発表 72

発表論文 72
口頭発表 72
その他 (論文) 73
その他 (発表) 73

謝辞 74

図目次

1.1 Annual change in the number of construction workers in Japan's construction industry. 1
1.2 Annual change in construction investment in Japan. 2
1.3 Structure of a hydraulic excavator. 4
1.4 Input interface and operation of JIS type form in a hydraulic excavator. 4
1.5 Process of an excavation. 5
1.6 Teleoperating control system of excavator. 5
1.7 Digging motion for soft or hard soil. 8
1.8 Digging motion when the bucket is caught on a rock. 8
1.9 Digging motion for amount of soil in the bucket. 9
1.10 Semi-autonomous control system of excavator. 10

2.1 Two kinds of the digging motion. 13
2.2 Definition of vector field. 13
2.3 Motion change of dynamical system with respect to i. 14
2.4 Change of index i and motion of the digging. 14
2.5 Experimental setup. 17
2.6 Digging with the autonomous control system. 18
2.7 Transition of the load on the bucket. 18
2.8 Change of the digging according to the load on the bucket. 19
2.9 Transition of the load on the bucket using varying i. 19
2.10 Comparison of the digging by the autonomous control system. 20
2.11 Digging by the semi-autonomous control system. 20
2.12 Transition of the load on the bucket by the semi-autonomous control system. 21
2.13 Comparison between 'without' and 'with' human operation in the semi-autonomous control. . . . 21

3.1 Motion of excavator's bucket only with one degree of operation. 23
3.2 Definition of vector field. 25
3.3 Vector field for convergence and flow. 25
3.4 Excavation robots composed of leader-follower system. 26
3.5 Configuration of leader-follower system. 27



3.6 Size of robots. . . . 28
3.7 Size of a container for soil. . . . 28
3.8 Digging with $i = 0$, $j = 0.7$ (experiment). . . . 29
3.9 Digging with $i = 1$, $j = 0.7$ (experiment). . . . 30
3.10 Digging with varying i and j. . . . 31
3.11 The time variations of θ, i and j. . . . 32
3.12 Motion of excavation of the follower robot. . . . 33
3.13 Transition of $||\boldsymbol{F}||, i, j$. . . . 33

4.1 Three phases of an excavation process (Penetrate, Drag, and Scoop). . . . 34
4.2 Change in soil in front of the bucket during excavation. . . . 35
4.3 Experimental setup. . . . 37
4.4 Soils used in the experiments. . . . 37
4.5 Correspondence of sensors in hydraulic excavator and the robot. . . . 38
4.6 Trajectories used in the experiments. . . . 39
4.7 Experimental results of measured q and w for each soil type. . . . 40
4.8 Specifications in micro-time excavation. . . . 40
4.9 Optimized lines of the relation between q and w for each soil condition. . . . 42
4.10 Excavation with the autonomous control system. The figure shows the motion of the excavation for $q^{ref} = 365$ g. . . . 46
4.11 Comparison between the excavation for $q^{ref} = 325$ g and the excavation for $q^{ref} = 365$ g. . . . 46
4.12 Comparison of the trajectories of the excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system. . . . 47
4.13 The time variations of w in the excavations to the medium grained soil for each q^{ref}. . . . 48
4.14 q^m for $q^{ref} = 330$ g ~ 365 g using the medium grained soil. . . . 49
4.15 Comparison of r and the excavation with a change in h. . . . 49
4.16 q^m for q^{ref} with a change in h. The data for each h is represented by a different color. . . . 50
4.17 Comparison of the trajectories of the excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system in excavating fine grained soil. . . . 51
4.18 The time variations of w in the excavations to the fine grained soil for each q^{ref}. . . . 52
4.19 q^m for $q^{ref} = 375$ g - 415 g using the fine grained soil. . . . 52

5.1 Multiple excavation. . . . 54
5.2 Experimental procedure for comparison of excavation between to flat and non-flat soil. . . . 55
5.3 Trajectories used in the experiment. . . . 56
5.4 Relation between workload and soil weight on experiment of excavation between to flat and non-flat soil. . . . 57
5.5 scooping phase in trajectory (ii). . . . 58
5.6 Equipment for measuring the shape of the soil surface. . . . 58

5.7 Example of point cloud of soil surface measured by LiDAR. 59
5.8 Mean shape of soil surface measured by the Lidar before second excavation for each q^{ref}. 60
5.9 Comparison of the trajectories of the second excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system. 60
5.10 The time variations of w in the excavations to the flat and non-flat soil for each q^{ref}. 61
5.11 q^m for q^{ref} in the excavations to the flat and non-flat soil. 62



表目次

1.1 Approximate Ratio of a part of social infrastructure beyond 50 years of construction. 2

4.1 The optimized and identified value of ρ and α for each soil condition. 42
4.2 The values of the parameters used in the excavation to the medium grained soil. 45
4.3 σ for each h. 50
4.4 The values of the parameters used in the excavation to the fine grained soil. 50

5.1 The values of the parameters used in the second excavation to the medium grained soil. 55
5.2 The values of the parameters used in the second excavation to the medium grained soil in the experimental verification of the proposed method. 58
5.3 Root mean square error σ for q^{ref}. 61

第 1 章

序論

1.1 社会的背景

現在，日本の建設業界は人材不足が続いており，建設業界の就業者数は世界全体では増加傾向にある一方で，日本では減少している．Figure 1.1 は，総務省「労働力調査」[1] より日本の建設業における全就業者数とその内の技能者数の年推移をまとめたものである [2]． また，建設業では高

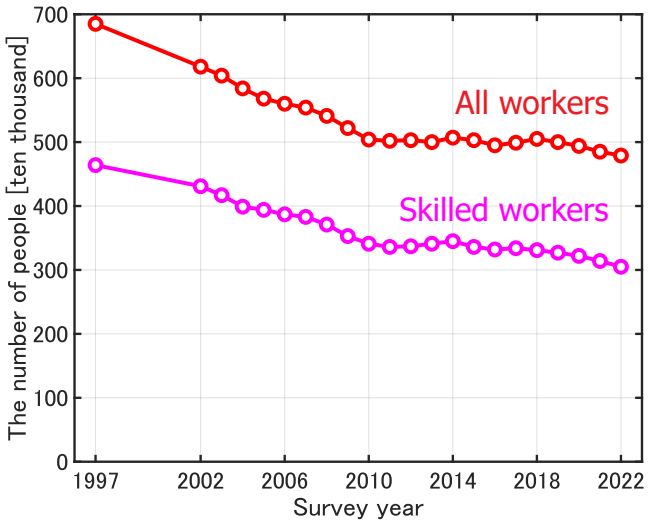


Fig.1.1: Annual change in the number of construction workers in Japan's construction industry.

齢化が進行しており，国土交通省の不動産・建設経済局「最近の建設業を巡る状況について【報告】」[3] によれば，2020 年における建設業就業者の内 55 歳以上は約 36%，29 歳以下が約 12% であり，一方で全産業の就業者においては 55 歳以上の割合は約 31%，29 歳以下の割合は約 16.6% と報告されており，全産業界と比較して建設業は高齢化が進み，若手が少なくなっている．建設業の就業者数が減少している原因として，建設業の労働環境がきつい，汚い，危険 (頭文字をとって，「3K」と呼ばれる) であることが挙げられる．建設業の年間実労働時間は全産業と比べて 360 時間 (約 2 割) 以上長く，建設工事全体では技術者の約 4 割が 4 週当たり休日が 4 日以下で労働を行って

いる．また，建設業は基本的に屋外での肉体労働に従事することが多く，その作業の性質上身体への負担が大きい．令和 4 年における建設業の度労働災害による死亡者数は 281 人，全産業では 74 人 (約 36%) であり，建設業の全産業に対する就業者割合 7.1% [1, 2] を考慮すると建設業死亡者数は非常に大きいものであり，建設労働が危険なものであることを指し示している．

建設業における労働力の供給が減少する中で，建設業務自体の需要は年々高まっている．Figure 1.2 は，国土交通省「令和 4 年度建設投資見通し」[4] より 2015 年から 2023 年現在に至るまでの日本の建設業への投資額の総額及びその建築と土木との内訳をまとめたものである．ただし，2021 年，2022 年のデータは見込みのものであり，2023 年のデータは見通しのものである．総額は，2015 年から 2023 年にかけて年々増加し，その内の土木分野への投資額も増加しており，建設業への需要が増加していることが分かる． 特に土木分野への投資増加は，近年日本における高度経済成長期

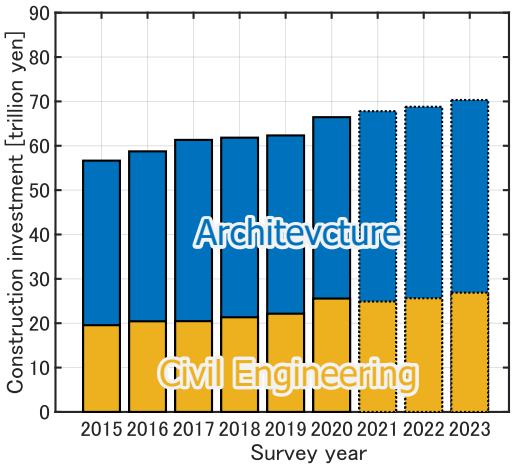


Fig.1.2: Annual change in construction investment in Japan.

以降に整備した社会インフラの老朽化問題が深刻化していることが一因とされている．Table 1.1 は，国土交通省「国土交通白書 2023」[5] より建設後 50 年以上経過する社会インフラ (道路橋，トンネル，港湾施設) のおおよその割合を示したものであるが，20 年後の 2040 年にはいずれも半数以上が老朽化するため，インフラ改修作業が必要とされている．

Table 1.1: Approximate Ratio of a part of social infrastructure beyond 50 years of construction.

Type of Infrastructure	2020/03	2030/03	2040/03
Overpass(approx. 730,000 total)	30 %	55 %	75 %
Tunnel(approx. 10,000 total)	22 %	36 %	53 %
Port facilities(approx. 61,000 total)	21 %	43 %	66 %

また，自然災害対応への需要も高まっている．日本は地形及び地理的な特性から，地震，津波，風水害，火山噴火等の災害発生頻度が高い国である．これまでに，1990〜1996 年雲仙岳噴火，1995 年阪神・淡路大地震，2011 年東北地方太平洋沖地震等の大災害に見舞われている．このような災

害への対応として，被災者の救助活動だけではなく，瓦礫や倒木，土砂等の除去を含むインフラ復旧・復興作業も重要である．建設業者と行政との間で「災害協定」[6] が締結されており，建設業者はインフラ復旧・復興作業を行うこととなっている．この協定は，災害発生時の建設業者の防災活動等に関する取り決めであり，平成 26 年 2 月の関東甲信・東北地方における豪雪災害の際にはこの協定による要請により地域の建設業就業者約 6 万人，建機約 3 万台が活動を行った [7]．また，日本の国家政策として，「防災・減災，国土強靱化のための 3 か年緊急対策」「防災・減災，国土強靱化のための 5 か年加速化対策」[8] と題した建設業強化の取り組みが実施されている．更には，近年は地球温暖化の進行の影響による水・土砂災害の激甚化・頻発化が懸念されており，水災害においては，国土交通省気象庁の観測データ [9] によれば，2022 年における全国 (アメダス) の日降水量 300mm 以上等の強度の雨の頻度が 1980 年代に比べて約 2 倍と増加し，その結果氾濫危険水位を超過した河川数は 2014 年と比較して約 5 倍と増加傾向にある [10]．土砂災害においても，2018 年に発生件数が過去最大の 3459 件を筆頭に 2011-2020 年間の年あたりの平均発生件数が 1495 件と，2001-2010 年間の平均 1058 件と比較して約 1.5 倍と増加傾向にある [10]．よって，今後とも災害件数が増加し，建設業は今以上に対応が求められることが予想される．

日本の建設業は低供給，高需要の状況下にある．現在日本は少子高齢社会であり生産年齢人口 (15-64 歳) の将来予測として 2023 年 7400 万人から 2050 年には 5300 万人と約 2/3 に減少すると報告されている [11]．また，近年では労働力確保のために増加する建設業への外国人労働者の受け入れ [2] に関しても，高度外国人からの魅力度が全体 25 位と低いことを踏まえると，今後外国人から日本が労働先として選択されるかは不透明である．よって，現状況の改善方法として就業者数自体の増加は困難であるため，作業者当たりの生産性の向上が重要である．現場での建設作業は，測量，設計・施工計画，施工，検査と分けられ，各作業の生産性向上のために，情報通信技術 (以下，ICT(Information and Communication Technology) と略す．) の利用が建設業界で推進されており，国土交通省は建設施工への ICT 活用を推進する政策として”i-Construction”が取り組まれている [12,13]．特に施工において，作業者の負担を軽減し作業の危険性を下げ，同時に生産性を向上させることができる面から，作業者が作業現場から離れた場所から建機を操作する無人化施工が期待されている．様々な無人化施工技術があるが，本研究では建設機械である油圧ショベルの操作技術に焦点を当てる．

1.2 無人化施工における油圧ショベルの操作技術

1.2.1 油圧ショベルについて

油圧ショベルとは，土木作業のために Fig. 1.3 のような腕状の構造が油圧シリンダにより駆動し，無限軌道車輪等によって自走する建設機械であり，ユンボ，バックホー，ショベルカーと呼ばれることがある．油圧ショベルは，Fig. 1.3 のように下部走行体，上部旋回体，アタッチメントの 3 つの要素から構成される [14] [15]．更に，アタッチメント部は根元からブーム，アーム，バケッ

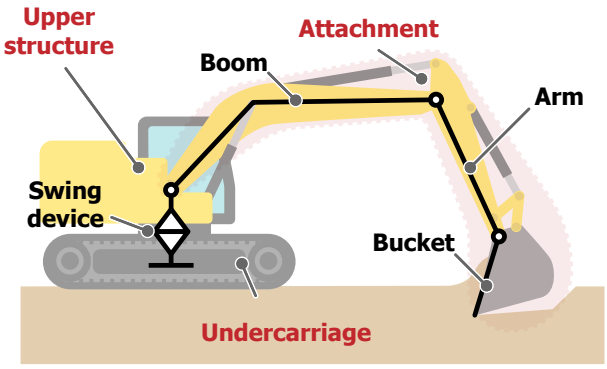


Fig.1.3: Structure of a hydraulic excavator.

トから構成されており各関節が油圧シリンダによって駆動する．すなわち，油圧ショベルは走行部を除くと 4 自由度のマニピュレータであり，操縦者はこの機械を Fig. 1.4 のような 2 つのジョイスティックと 2 つのレバーからなる操縦装置を用いて操作を行う．ジョイスティックは 4 自由度のマニピュレータ部を，レバーは走行部に対応しており，特にジョイスティックの入力はマニピュレータの各関節の速度である．ただし，Fig. 1.4 の操作形態は一例 (JIS パターン [16]) であり，建機メーカーによって異なる形態が採用されている．このことから，所望の手先速度を達成するためには，操縦者は脳内で逆運動学問題を解き，各関節の速度に変換し，動作のカップリングからレバーを同時に動かす必要があり，初心者には困難である． この油圧ショベルが得意な作業は，土を

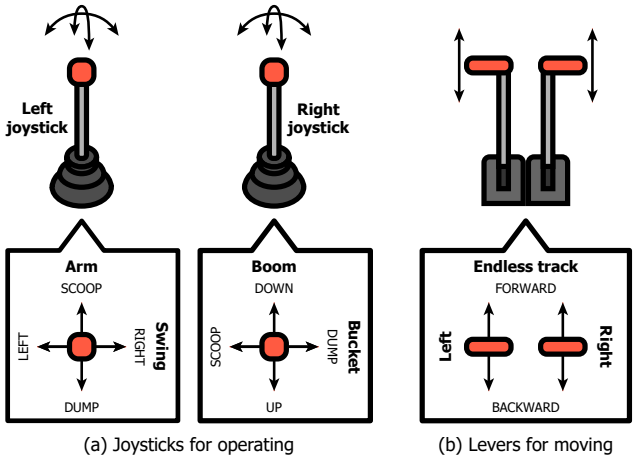


Fig.1.4: Input interface and operation of JIS type form in a hydraulic excavator.

掘る掘削作業，掘削した土をトラック等に積み込む積込作業，バケット部を別のアタッチメントに変更して行う破砕・選別作業，下部走行体前方にある排土板を用いて行う整地・法面整備作業と多種多様である [17]． 本研究では，この中で最も一般的な作業である掘削作業を対象とする．掘削作業は，Fig. 1.5 のように 3 つの段階，掘削位置にバケット手先を移動させる (a) アプローチ，土砂を掘削する (b) 掘削，掘削した土砂を所定の位置移動させる (c) 排土で行われるものであり，この

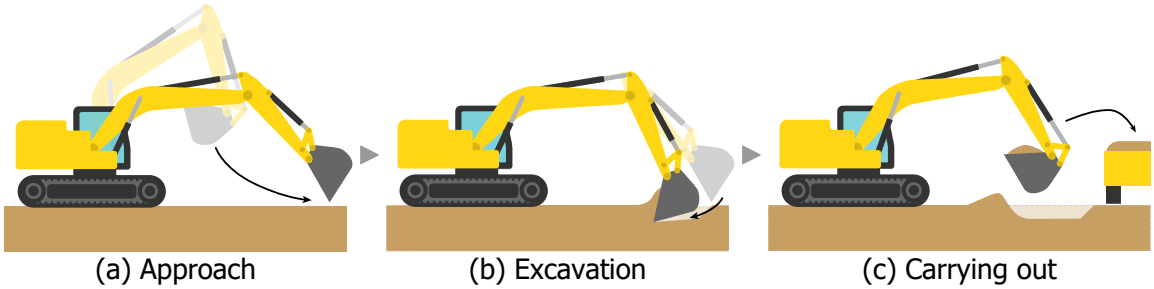


Fig.1.5: Process of an excavation.

作業を所望の掘削量又は土砂形状になるまで繰り返し行う．

1.2.2 油圧ショベルの掘削作業の遠隔操作に関する従来研究

油圧ショベルの掘削作業の遠隔操作は，Fig. 1.6 ように作業現場の建設機械周辺の映像，音，振動等の環境情報を建設機械等に取り付けられたセンサで取得し，遠隔地に送信された情報を基に作業者が操作を行う技術である． この技術の利点は，災害現場や，原子炉建屋や火山等の有毒性のあ

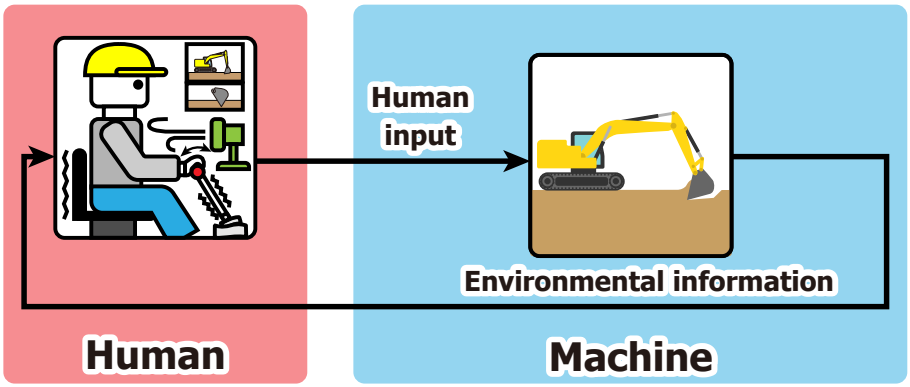


Fig.1.6: Teleoperating control system of excavator.

る危険な環境での作業を行う必要がなくなり操作者の安全性が向上すること，遠隔地に直接行く必要がなくなり，交通時間や操作者の負担が減少すること，人自身が操作することから緊急時の対応のような柔軟な操作が可能であることが挙げられる．これまでに遠隔による油圧ショベルの操作を災害現場等で使用した例が報告されている [18, 19]．また，企業においても遠隔操作の製品開発が盛んに行われている [20–24]．この油圧ショベルの遠隔操作において，操作者に提示する情報が重要であり，情報提示に関する研究が行われている．

遠隔操作において，操作者は一般的に油圧ショベルのコックピット視点や機体周辺の映像等の視覚情報を得ながら作業を行う．この映像提示の研究として，佐藤らの油圧ショベル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 [25] 及び作業効率を向上させるカメラの最適

配置を実験的に求める研究 [26] や伊藤らの映像環境が作業効率へ与える影響を調査する研究がある [27]．特に文献 [27] では，2D かつ低解像度の小型多画面の複数視点圧縮映像よりも，両眼立体 3D かつ 4K 解像度 (3840 × 2160 画素) の大型単画面の非圧縮映像の方が作業効率を 23-35% 向上することを示されており，視覚情報において立体的な映像が有効である．このことから，VR 技術やヘッドマウントディスプレイ (HMD) を利用した研究もおこなわれている．山田らの VR 技術を利用して操作者に搭乗時のような臨場感を提供して運転支援をするヒューマンインタフェースの開発 [28]，橋本らの HMD を活用した無人化施工システムについての提案と開発 [29] 及び画像表示システムの効果を検証 [30]，Ito et al. の HMD や座席の振動・傾きを用いたトレーニングシミュレータとしての機能も持つインタフェースの研究 [31] がその代表的な例である．また，映像に描画する付加情報の研究として，Ito et al. は油圧ショベルの掘削時における機体の転倒や落下等の不安定度を提案し，その情報をメータによって視覚的に提示する手法 [32] が報告されている．

実機での操作においては，操作者は機体の反力や振動という力覚や触覚情報を得ながら作業を行うことから，質量，粘性，剛性を調整するインピーダンス制御や，姿勢制御と力制御を同時に行うバイラテラル制御の研究が行われており，Salcudean らのリーダ・フォロワ系の力と速度の相対値に応じてインピーダンスを変化させるバイラテラル制御 [33, 34]，加藤らの実測の速度-駆動力特性によって変化する閾値を用いた可変剛性制御の研究や [35]，山田らの手先の力覚をジョイスティックに提示する研究 [36] 等がある．また，触覚情報として振動や電気刺激を利用する研究も行われており，Ito et al. は，バケットと土砂との距離を振動に変換して入力インタフェースであるコントローラを振動させる手法を提案し [37]，村上らは，掘削の反力の提示として機能的電気刺激を操作者の腕に与えるバイラテラル制御を提案した [38]．

操作性向上のために，Kim らの操作インタフェースの開発として，人の腕を操作インタフェースとして扱う研究 [39, 40] や豊田の従来の油圧ショベルに搭載することで遠隔操作可能とするゴム人工筋肉駆動型遠隔操縦ロボットの開発 [41] 等のハード開発の研究も行われている．以上のように，いずれの提示情報においても作業効率増加のために操作者への提示情報の種類やその次数を増やす傾向にある．このようなシステムの実現のためには，油圧ショベル側には多くのセンサを準備し，高解像度な画像を含めた多くの情報を遠隔地に伝送する必要があり，機器の破損により引き起こされるシステムの信頼性の問題，多くの情報を伝送するための時間的遅延の問題が生じる．特に遅延が発生する環境下では，操作者は常に注意を払わなければならないことから負担が大きく増加し，熟練者の操作であっても直接操作時と比べ施工時間が最大で約 6 倍程度要すること等が報告されている [25, 42]．これに対して，古屋らが次世代高速通信 5G を用いた遠隔操作の研究を実施したが，作業効率は通常の搭乗操作と比較して約 2 割低下する結果となった．以上より，遠隔操作は環境情報の提示によって人の操作によって柔軟な制御を可能とするが，低作業効率な技術であるといえる．

1.2.3 油圧ショベルの掘削作業の自律化に関する従来研究

油圧ショベルの掘削作業の自律制御は，掘削や人操作の力学モデルに基づく自律系を設計し，測定された環境情報と掘削本体の状態を入力として建機が環境に応じて自律的に掘削を行う技術である．この技術の利点は，遠隔操作技術と同様に操作者の安全性が向上すること，大量の環境情報を遠隔地に送信する必要がないこと，環境情報によって適切な掘削を行い，人の労働時間に束縛されないことから作業効率が向上することが挙げられる．よって，油圧ショベル側を自律制御する手法は遠隔操作の問題に対処する手法といえる．

掘削においては土砂による環境外力を受けることから，バケットにはたらく力やトルクを用いた自律制御の研究が行われている．Jud et al. の力/トルクについての軌道データを用いることで多様な土壌に適用可能な自律制御系の研究 [43]，Filippos et al. のバケットの仕事率を最大にする最適軌道を生成する自律制御の系の研究 [44] 等がある．また，掘削作業は土砂の状況に応じて掘削方法を変化させる必要があり，熟練者の技能と自律制御を実現することも重要である．掘削作業というシーケンシャルな作業と技能という曖昧なものと扱う観点から，Shi et al. のバケット負荷を基にファジイ制御器によってタスクを選択する研究 [45–47]，鮫島らの熟練オペレータの操作から設計したファジイ制御器によって自律掘削を実現する研究 [48]，操作者による通常作業における動作速度と仕上がり精度を目指した自律掘削の評価 [49] 等が行われている．実機の油圧ショベルを用いた研究開発も行われており，山元らの動作計画と制御に 3 次元情報を用いた油圧ショベルによる自律掘削に関する研究開発 [49,50] 等が行われている．

しかし，掘削現場の状況は多様であり設置したセンサだけでは観測できない不慮の事態が数多くあり得る．特に掘削作業は非常に大きな力で大きなものを動かすため，想定していない動きが重大な事故を導く可能性から，完全な自律制御は安全性に大きな問題を抱えており実世界での利用には多くの課題が残されている，すなわち，フレーム問題 [51] が致命的になる可能性も否定できない．以上より，自律制御は通常時には適切な軌道生成によって高作業効率を実現するが，緊急時における安全性の面で問題がある技術であるといえる．

1.2.4 遠隔操作及び自律制御の問題に対する考察

建設機械である油圧ショベルの操作において，「通常時の高作業効率」&「緊急時の柔軟な対応」の両立が重要であるが，従来の遠隔操作及び自律制御の技術において両立は困難である．これらの問題に対処するために，人間機械協調掘削を実現する自律制御が有効であろう．これは，自律制御系に人の介入を加えた制御系を意味し，軽微な介入であれば介入後は再び自律制御系に復帰するような制御系である．これは非常時に対応するセンサと制御系の役割を人が担うものであり，通常時において人はあまり操作しないことから操作者の負担が軽減された状態を維持できる．このような自律制御系を設計するためには，自律制御系が人の介入を許容するために以下のような新たな設計が必要である．

1. **時間の拘束がない制御系**　一般に，機械の運動 (動作) はフィードバック制御された閉ループ系に対して目標位置 (または目標速度) を与えることで実現される．このとき，目標位置はタイムスタンプを持つ時系列データの場合が多く，運動は時間の流れに従った時間拘束をもって生成される．しかし，油圧ショベルではバケットにはたらく外力により動作が停止する場合があり，目標値が時間と共に進めば油圧ショベルは極めて大きな力を発生し機器の破損を導きかねない．また，半自律制御系のためには人の介入による停止や，動作の速度変更等が必要である．これらより，掘削の自律制御では運動が時間の拘束を持たないことが必要である．
2. **人の操作に近い制御系**　操作者は自分の意思と自律制御系の動きが合致しないときに非常時と感じ介入することが予想される．そのため，自律制御系は通常時には人の操作に近い動きを生成する必要がある．掘削作業において，人は油圧ショベルに対して無理のない出力範囲で安全かつ効率的に適当な量を掘削するように操作を行う．このような掘削の自律系を実現するためには，バケットにはたらく力を調節するために掘削深さ，土砂内の障害物を回避するために掘削速度，掘削量を調整するために掘削距離（ドラッグ距離）に関する自律系が必要である．　土が軟らかい場合，人は Fig. 1.7(a) のように土壌深くまでバケットを沈め土壌を

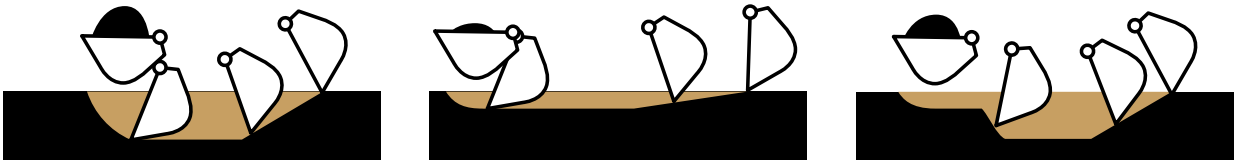


Fig.1.7: Digging motion for soft or hard soil.

すくい取る．一方，土壌が硬い場合は Fig. 1.7(b) のように土壌表面を引っかくようにすくい取る．掘削中に土砂内に埋蔵した岩等によってバケットが引っ掛かった場合，人は Fig. 1.8 のようにバケットの引っ掛かりを外すためにバケットの進行方法，つまり掘削速度を逆にし，引っ掛からない浅い掘削に変更する．　また，作業効率向上のために，バケット内の土砂の量

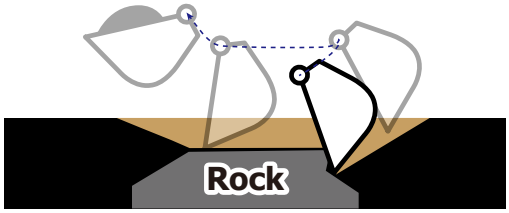


Fig.1.8: Digging motion when the bucket is caught on a rock.

が想定よりも少なかった場合，人は Fig. 1.9(a) のように掘削距離を伸ばしより多く掘ろうとする．一方で，バケット内の土砂の量が想定よりも多かった場合，Fig. 1.9(b) のように掘削距離を伸ばしより多く掘ろうとする．　一般には，人は油圧ショベルの性能，操縦レバーの挙

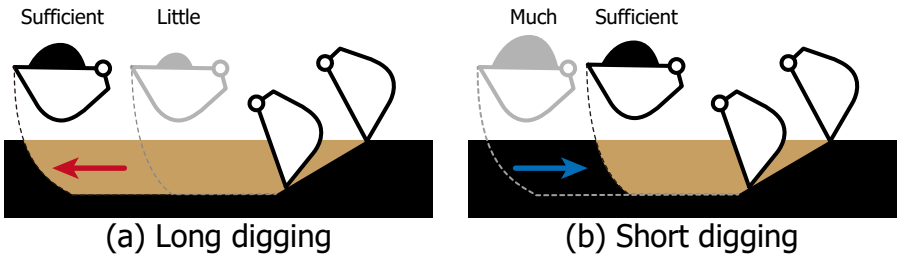


Fig.1.9: Digging motion for amount of soil in the bucket.

動と油圧ショベルの動作の齟齬，エンジン音や機体の振動等から土壌の固さ，機体の負荷を判断し，掘削深さにおいては Fig. 1.7(c) のように変化させながら作業を実施する．自律制御系がこれらの動作を実現しなければ人は常に介入することとなり操作者の負担を減らすことができなくなる．

3. **人の介入を許容する自律系**　掘削現場は多様であることから，これら全てに対して自律制御系を最適化することは難しい．また，人の操作も多様であり熟練者であっても余計な動作が含まれる．そのため，人の操作と自律制御系でどちらを優先させるかの判断は難しく，人の操作と自律制御系の中間的な動作を実現させることで人の介入を許容する必要がある．人がさらに操作を加えればより人に寄った操作へと連続的に移行し非常時の対応も可能となる．

1.3　本論文の目的と構成

本論文では，無人化施工における油圧ショベルの掘削作業を対象とし，通常時の高作業効率かつ緊急時の柔軟な対応を両立した制御系として，人間機械協調掘削のための場に基づく自律系設計を提案する．場とは，空間座標の関数から求められる物理量のことであり，時刻 $t = k$ における油圧ショベルの状態を $\boldsymbol{x}_k$ とし，$\boldsymbol{x}_k$ を空間座標と定義したとき，$f(\boldsymbol{x}_k)$ で表されるものである．$f(\boldsymbol{x}_k)$ の場を用いることで $\boldsymbol{x}_k$ のダイナミクスは，

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + f(\boldsymbol{x}_k) \tag{1.1}$$

と表すことができ，これは時刻 $k+1$ の目標値 $\boldsymbol{x}^r_{k+1}$ が現在の時刻の状態 $\boldsymbol{x}_k$ のみから決定されるもので，目標軌道が時間の拘束を持たず 1.2.4 の要件 (1) を満たす．この場の概念は，主にベクトル場として用いることが多く，特に物理学では重力場や電磁場があげられる．機械工学においては，ポテンシャル場として用いられることが多く，佐藤は，デッドロックを生じないロボットの動作計画のために極小点のないポテンシャル場の設計に関する研究 [52] を行い，辻らは移動ロボットの軌道生成における目標位置の到達度を表す単調減少関数を用いることで時間挙動の調整を可能にする新たな人工ポテンシャル法に関する研究 [53] を行った．他には，動力学を考慮し，能動的な制御系においても安定化を可能にする Passive Velocity Field Control(PVFC) [54] を用いた，Yin et al. の受動的なエネルギー蓄積要素の挙動を模倣した新たな PVFC の研究 [55] や Yamakita et al.

の自然な歩行動作を実現するために仮想受動歩行を用いたマルチパターン歩行と PVFC を組み合わせた制御手法の研究 [56] 等が報告されている．これらの制御手法を油圧ショベルの掘削作業に適用する場合，掘削軌道に対応したポテンシャル場の関数を設計することが困難であり，油圧系の動力学は遅れやむだ時間を含み，極めて複雑であり設計が困難であることから，ポテンシャル場や Passive Velocity Field Control の適用は難しいといえる．一方で，岡田らの自律制御系には目標軌道をアトラクタとして埋め込んだ非線形力学系の研究 [57] がある．この力学系の設計において，$\boldsymbol{x}^r_{k+1}$ が先に与えた軌道に収束するようなベクトル場の入出力データを用意し，そのデータに対して関数近似を行うことで $f(\boldsymbol{x}_k)$ を容易に求められる．よって，提案する制御系が受動的なものであると仮定すると，油圧ショベルの掘削に対してアトラクタによる制御系設計手法が適用可能であるといえる． このような半自律制御系の先行研究として，三木らが提案したアトラクタを用いた油圧

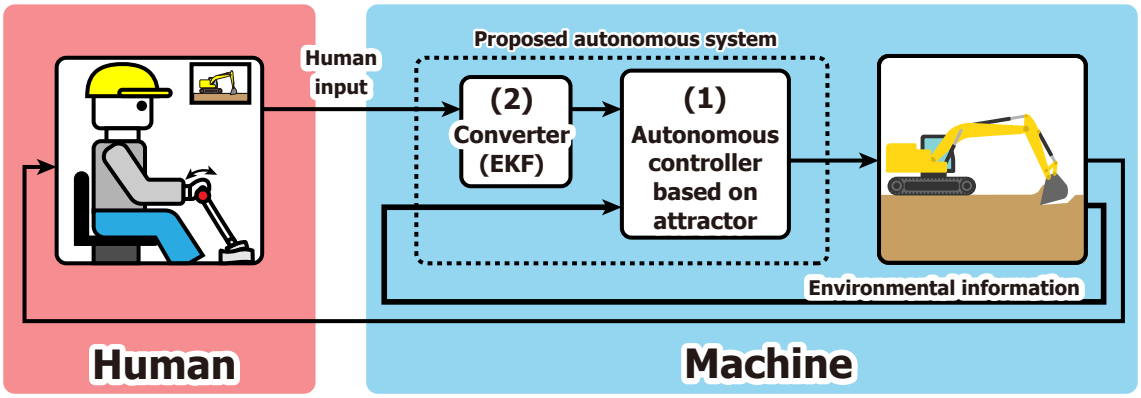


Fig.1.10: Semi-autonomous control system of excavator.

ショベルの半自律制御系設計がある [58, 59]，これは，Fig. 1.10 のような (1) 掘削の自律系と (2) 人の操作入力から自律系に介入可能なインデックスへの変換器から構成される半自律制御系である．(1) においては，バケットにはたらく負荷 i を設定し i に応じて掘削軌道を変化させる自律系とし，掘削深さに関する人の操作に近い制御系 (1.2.4 の要件 2) を実現するものである．(2) においては，人のレバー操作コマンドを i に変換させるために，自律系とは別に i の変化にダイナミクスを設定し，人の操作コマンドと i の計測値から拡張カルマンフィルタによって i の推定値を得ることで人と制御系の中間的な操作 (1.2.4 の要件 3) を実現するものである．しかし，先行研究 [59] において制御系設計手法を提案し，実験装置への実装を行ったが，動きは極めてゆっくりであるうえ，目標掘削力からの誤差も大きく，人の介入による変化もわずかであり，提案する手法の有効性が検証できておらず，1.2.4 の要件 2 における掘削深さや掘削距離の操作に関する自律制御系 (Fig. 1.10(1) に該当) の議論も行っていない．そこで，本論文ではまず先行研究 [59] の手法を基にし，場であるアトラクタを用いた人の操作介入を前提とした掘削の自律制御系の高性能化を行う．まず，先行研究 [59] の手法によって人の操作介入が可能であることを確認するために，油圧ショベルを模したロボットによる実験検証を行う．その後，人の操作に近い自律制御系を実現するために，掘削速度や

掘削距離に関する自律制御系設計の提案を行う．掘削速度においては，半自律制御系も提案する．

本論文は，全 6 章からなる．構成は以下に示す．

- 2 章では，先行研究で提案されたアトラクタを用いたバケットにはたらく力に基づき掘削深さを変更する半自律制御系の実験検証を行う．この手法では，アトラクタを掘削深さ方向に次元拡張し，その次元を操作インデックスとし，その値をバケット負荷のセンサ信号で変化させることで連続的に掘削深さが変化可能な自律制御系を設計し，拡張カルマンフィルタを用いてインデックス値を推定することで人の操作が介入可能な半自律制御を設計している．しかし，先行研究ではこの手法の有効性が未検証であったため，油圧ショベルを模したロボットに手法の実装を行い，掘削深さに関する半自律制御系の有効性を検証する．
- 3 章では，2 章で提案した掘削深さの半自律制御系において，岩との衝突等の緊急時における対応が困難であることを指摘し，これを解決するために，第 2 章で提案した半自律制御系を拡張し，掘削速度の操作インデックスを付与した半自律制御系を提案する．自律制御系のアトラクタ設計過程において，自由度のカップリングを基にベクトル場を目標掘削軌道に対して速度方向と収束方向に要素分割し，新な操作インデックスとして軌道の流れのベクトル場の大きさを決定する係数を導入することで，掘削速度の自律制御系を実現する．さらに，掘削速度に関する操作モデルを導入し半自律制御系を設計する．最後に，提案手法を用いてリーダ・フォロワ系による実験検証を行い，人の操作介入でフォロワ側が障害物との衝突から復帰可能であることを示す．
- 4 章では，掘削距離 (ドラッグ距離) に関する自律系として，ドラッグ距離を制御パラメータとした土砂の掘削量制御を提案する．オンラインな掘削量制御の実現には，土砂の掘削モデルを用いた掘削量の推定が必要である．そこで，まず掘削量制御に関する従来研究について述べ，その課題を示す．次に，掘削量を表すマクロ的指標として，バケットが土砂にした仕事に着目し，油圧ショベルを模したロボット用いて掘削の予備実験を行い，掘削量と仕事の相関を確認する．次に，その実験データに基づき仕事から掘削量を推定可能な掘削の力学モデルを設計し，そのモデルを用いたドラッグ距離変化による目標量を達成する制御手法を提案する．最後に，提案手法の有効性を確認するために，油圧ショベルを模したロボットを用いて，複数の条件下での目標量制御の実験を行う．ここでは，掘削作業において 1 回目に該当する平坦な表面の土砂に対する掘削を行う．
- 5 章では，4 章で提案した自律制御系が土砂の特性が変化する非平坦な土砂への掘削においても適用可能であることを検証する．まず，平坦な土砂と非平坦な土砂における掘削量と仕事の関係の差異を実験により確認するとともに，提案する掘削モデルが適用可能か検証する．次に，非平坦な土砂に対して提案手法による実験検証を行い，土砂の特性変化に対する提案手法のロバスト性を確認する．
- 6 章では全体のまとめを行う．2-5 章で得られた成果を総括し，今後の課題と展望について述べる．



第 2 章

掘削深さに関する人の操作モデルに基づく掘削の半自律制御系設計

2.1 はじめに

1.2.4 章や 1.3 章でも述べたように，高作業効率かつ緊急時対応を両立した制御系には，3 つの要件，時間の拘束がない制御系，人の操作に近い制御系，人の介入を許容する自律系を満たす自律制御系が必要であり，それらの要件を満たす制御則として場の概念を用いた非線形力学系であるアトラクタを用いたダイナミクスが有効である．先行研究 [59] において，この発想を基にした人の入力を許容する自律制御系，半自律制御系の設計手法が提案され，実験装置への実装を行ったが，提案手法の有効性を明確に示すには至らなかった．また，要件 2 における掘削深さ以外の操作要素，掘削速度や掘削距離の自律制御系に関しても論じていない．本章は，先行研究 [59] で提案された掘削深さの自律制御系の有効性を確認するために，油圧ショベルを模したロボットを用いて実験検証を行う．

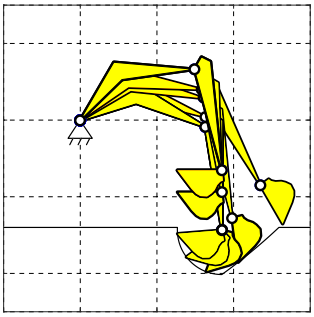
2.2 掘削深さに関する半自律制御系の設計

2.2.1 時間の拘束を持たない自律制御系の設計

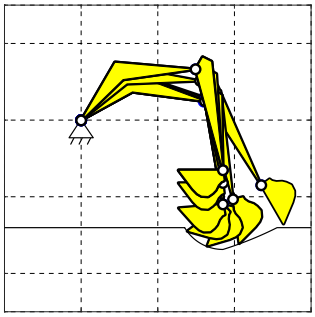
本章では提案する手法について説明する．Fig. 2.1(a) にある柔らかい土壌のための深い掘削と，Fig. 2.1(b) にある固い土壌のための深い掘削を設定する．深い掘削はバケットを地面の深くまで沈め多くの土壌をすくう動作であり，高効率であるが土壌が固い場合に油圧ショベルに大きな負荷がはたらく．浅い掘削は地面の表面を削る動作でありバケット負荷が小さいが時間効率は低い． 各掘削動作の運動データを次式で与える．ただし，深い掘削を上付き 0 とし浅い掘削を上付き 1 とした．

$$\Xi^0 = \left\{ \begin{array}{cccc} \boldsymbol{\xi}_1^0 & \boldsymbol{\xi}_2^0 & \cdots & \boldsymbol{\xi}_N^0 \end{array} \right\} \tag{2.1}$$

$$\Xi^1 = \left\{ \begin{array}{cccc} \boldsymbol{\xi}_1^1 & \boldsymbol{\xi}_2^1 & \cdots & \boldsymbol{\xi}_N^1 \end{array} \right\} \tag{2.2}$$



(a) Deep digging



(b) Shallow digging

Fig.2.1: Two kinds of the digging motion.

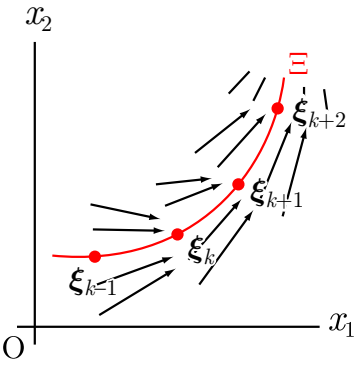


Fig.2.2: Definition of vector field.

いま，これら 2 つのデータの補間 Ξ^i を

$$\Xi^i = (1-i)\Xi^0 + i\Xi^1 \quad (0 \leq i \leq 1) \tag{2.3}$$

とし，インデックス i の値に応じて Ξ^i を目標軌道として生成する力学系

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, i_k) \tag{2.4}$$

を設計する．なお，$\boldsymbol{x} \in R^3$ はバケット手先の位置と姿勢から構成される状態変数である．$\boldsymbol{f}$ は Fig. 2.2 のように目標軌道 Ξ の周りに Ξ に収束するベクトル場を定め，これを関数近似することで得られる．具体的には $\boldsymbol{f}$ を

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, i_k) = \boldsymbol{a}_0 + \boldsymbol{a}_1 \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ i_k \end{bmatrix} + \cdots + \boldsymbol{a}_\ell \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ i_k \end{bmatrix}^\ell = \Theta\phi(\boldsymbol{x}_k, i_k), \quad \Theta = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_0 & \boldsymbol{a}_1 & \cdots & \boldsymbol{a}_\ell \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

のように $\boldsymbol{x}$，i の ℓ 次多項式とし，$\boldsymbol{x}$ と i を合わせた 4 次元空間の中で多くの Ξ^i を用いてベクトル場を定義し，まとめて関数近似することで係数行列 Θ が得られる．なお，ベクトルのべき乗は例えば $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T$ とすると，

$$\boldsymbol{x}^3 = \begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2 x_2 & x_1 x_2^2 & x_2^3 \end{bmatrix}^T \tag{2.6}$$

のように定義する．この関数によって $i = 0$ のとき任意の初期値 $\boldsymbol{x}_0$ は Ξ^0 へと引き込まれ，$i = 1$ のときに Ξ^1 へと引き込まれる．また，$0 < i < 1$ のときは式 (2.3) で定義される Ξ^i へと引き込まれる．時刻 $k+1$ の $\boldsymbol{x}_{k+1}$ は時刻 k の $\boldsymbol{x}_k$，i_k のみから決まるため，この力学系は与えられた i_k の値に依存した時間の拘束がない軌道を安定に生成する．すなわち，Ξ^i がアトラクタとなる．Fig. 2.3 は i を変化させたときに力学系が生成する軌道を表したものである．なお，実際には Ξ は 3 次元空間で定義されるが，ここではバケット手先位置の 2 次元で表示した．赤破線と青破線はそれぞれ掘削軌道 Ξ^0 と Ξ^1 を表しており，Fig. 2.3(a)，(b)，(c) の黒実線は i の値を変化させたときの力学系

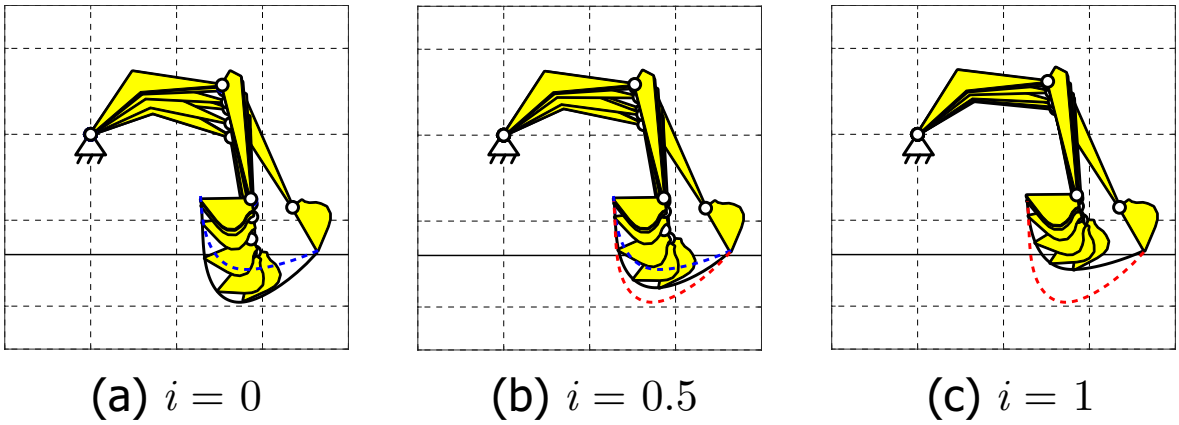


Fig.2.3: Motion change of dynamical system with respect to i.

の動きを表している．それぞれ $\boldsymbol{x}$ が Ξ^0，$\Xi^{0.5}$，Ξ^1 へと引き込まれながら移動していることが分かる．これにより，i によって変化する掘削軌道を生成する自律系が設計されている．

ここで i をバケットにはたらく負荷に応じて変化させると，式 (2.4) の $\boldsymbol{f}$ は現在の油圧ショベルの姿勢とバケットの負荷に基づいた連続的な変化を生成する．Fig. 2.4 に i を連続的に変化させたときの動きを示す． Fig. 2.4(a) は油圧ショベルの動き，Fig. 2.4(b) は i の変化の様子を示してお

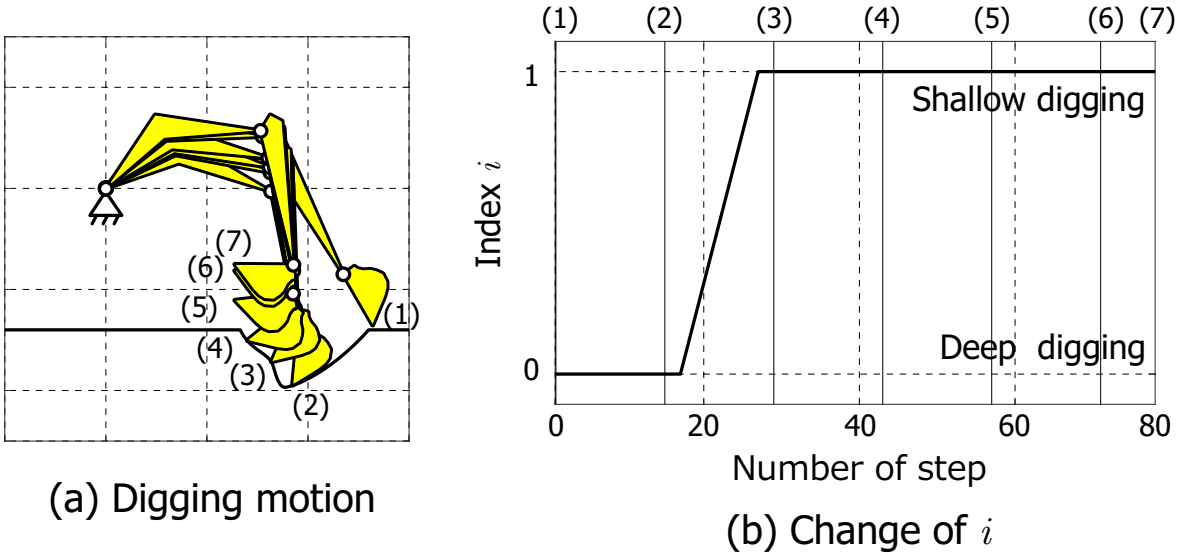


Fig.2.4: Change of index i and motion of the digging.

り，それぞれの図の (1)~(7) が対応している．Fig. 2.4(b) のように $i = 0$(深い掘削) から始め，途中で $i = 1$(浅い掘削) に変化させたところ，Fig. 2.4(a) のように途中で深い掘削から浅い掘削に連続的に変化する動作が得られた．この結果から，バケットの負荷に応じて i を変化させることで，連続的に動作を変化させる自律制御系が設計できている様子が理解できる．1.2.4 章で述べたように，この動きは実際の現場で人が掘削を行う場合によく見られる操作である．バケットの負荷が大

きくなり，油圧ショベルが停止しそうな場合にブーム (第 1 リンク) を上げて負荷を小さくすることで連続的に作業を行う熟練者の操作である．これにより，i をバケットの負荷に応じて変化させることで人の操作に近い自律制御系が設計できることが分かる．

2.2.2 人の操作介入

次に，式 (2.4) の自律制御系に人操作介入部の設計を行う．式 (2.4) の $\boldsymbol{f}$ は，現在の油圧ショベルの状態 $\boldsymbol{x}$ とバケットの負荷 i に基づいた $\boldsymbol{x}$ に関する速度コマンドと見なすことができ，これは人の掘削と類似したレバー操作コマンド $\boldsymbol{V}$ を生成していることから，人の自律モデルと考えることができる．一方，人は i の値を正確に知ることはできず，操作レバーと油圧ショベルの動きの齟齬，振動，音などからバケットの負荷を間実ため i には多くのノイズが含まれていると考えられる．そこで，人の操作モデルを

$$\begin{cases} i^h_{k+1} = i^h_k + K^h(i_k - i^h_k) + v_k \\ \boldsymbol{V}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, i^h_k) + \boldsymbol{w}_k \end{cases} \tag{2.7}$$

とする．i はバケットの負荷の真値であり，人は様々な環境情報からこれを i^h として感じ取る．K^h は定数であり，時間と共に i^h を i へ収束させる効果を持つ．ただし，i^h は多くのノイズを含むため v_k を加えた．一方，$\boldsymbol{V}$ は i^h に基づいて油圧ショベルの状態 $\boldsymbol{x}$ を Ξ^i へと収束させる速度コマンドであり，人のレバー操作を表している．ただし，人の操作にもノイズが含まれることから $\boldsymbol{w}$ を加えた．v が大きいことは人が i を感じ取りにくい環境であることに相当し，$\boldsymbol{w}$ が大きいことは初心者のように余計なレバー操作が多いことに相当する．

式 (2.7) を元に, センサから計測した i と人のレバー操作 $\boldsymbol{V}$ から拡張カルマンフィルタ (Extended Kalman Filter: EKF) [60,61] を用いて，i^h を $\widehat{i^h}$ で推定し，これにより，

$$\widehat{\boldsymbol{V}}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, \widehat{i^h_k}) \tag{2.8}$$

によって速度コマンドを推定し，

$$\boldsymbol{x}^r_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + \widehat{\boldsymbol{V}}_k \tag{2.9}$$

を目標値として油圧ショベルを制御する．これにより，人の操作が $\widehat{i^h}$，$\widehat{V}$ に反映され，人の操作介入が可能な半自律制御系が得られる．EKF のアルゴリズムを以下に示す．

Step 0　$Q_k = E(v_k^2)$ と $R_k = E(\boldsymbol{w}_k^T \boldsymbol{w}_k)$ が与えられているとする．ただし，$E(\cdot)$ は期待値を表す．また，i^h の初期値 $\bar{i}^h_0$ が与えられているとし，$\bar{P}_0 = E((i^h_k - \bar{i}^h_k)^2)$ を定義する．

Step 1　カルマンフィルタゲイン K_k を

$$K_k = \bar{P}_k D_k^T (D_k \bar{P}_k D_k^T + R_k)^{-1}, \quad D_k = \frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, \bar{i}^h_k)}{\partial i^h} \tag{2.10}$$

から計算する．

Step 2 $\widehat{i^h}$, $\widehat{P}_k$ を

$$\widehat{i}^h_k = \bar{i}^h_k + K_k(\boldsymbol{V}_k - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, \bar{i}^h_k)), \quad \widehat{P}_k = \bar{P}_k - K_k D_k \bar{P}_k \tag{2.11}$$

からを求める．さらに $\widehat{i^h}$ から

$$\widehat{\boldsymbol{V}}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, \widehat{i}^h_k) \tag{2.12}$$

によって速度コマンドの推定値 $\widehat{\boldsymbol{V}}$ を得る．

Step 3 以下の式

$$\bar{i}^h_{k+1} = \widehat{i}^h_k + K^h(i^s_k - \widehat{i}^h_k) \tag{2.13}$$

によって $\bar{i}^h_{k+1}$ を求め，さらに，

$$\bar{P}_{k+1} = A\widehat{P}_k A^T + Q_k \tag{2.14}$$

から $\bar{P}_{k+1}$ を求める．ただし，$A = 1 - K^h$ である．

Step 4 $\bar{i}^h_k$, $\bar{P}_k$ を $\bar{i}^h_{k+1}$, $\bar{P}_{k+1}$ に更新し同様の手順を繰り返す．

本提案手法の特徴を以下にまとめる．

1. 式 (2.4) では，次の時刻の値が現在の状態のみから決定するため，生成される運動は時間の拘束を持たない．そのため，掘削の負荷により油圧ショベルが停止した場合に目標値は一定の値となり，フィードバック制御 (PD 制御) によって力を発生するもののその値は増加しない．これにより，機器の破損の可能性が低くなる．
2. 一般にベクトル場で表された力学系が複数の軌道をアトラクタとするよう設計することは難しいが，式 (2.4) では i を用いて次元を拡張し，i に依存した複数の軌道をアトラクタとして埋め込むことを可能としている．また，i をバケットにはたらく負荷に合わせて変化させることで，環境情報からバケットの負荷を感じ取り掘り方を変える人の操作に近い自律制御系が設計できている．
3. 式 (2.4) の力学系は数学的に設計したものであるが，人の操作データを用いれば人に近い操作を実現することから人の操作自律モデルと見なすことができる．そこで，観測された i と人の操作量 $\boldsymbol{V}$ を用いて式 (2.7) の $\widehat{i^h}$ を EKF で推定し，式 (2.12) から $\widehat{\boldsymbol{V}}$ を求め，式 (2.9) を油圧ショベルの目標値とすることで，人の介入を許容する自律系，すなわち，半自律制御系の設計が可能となっている．なお，式 (2.7) の上式は i の真値から i^h が計算される式となっているが，人は i の真値を観測しておらず，レバー操作と油圧ショベルの動きの齟齬，振動，音などの環境情報から i を感じ取っていると考えられるので，正確な人の操作モデルではない．ただし，現象として同等の結果を得るので，現象に基づいた人の自律モデルであると考えることができる．

2.3 半自律制御系の実験検証

2.3.1 実験装置の概要

提案する制御系の有効性を実験により検証する．実験装置の全体図を Fig. 2.5 に示す． 油圧ショ

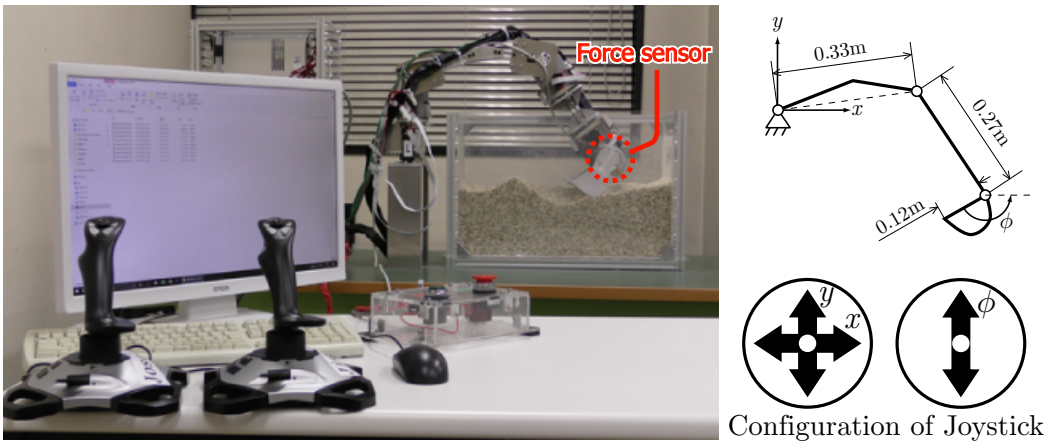


Fig.2.5: Experimental setup.

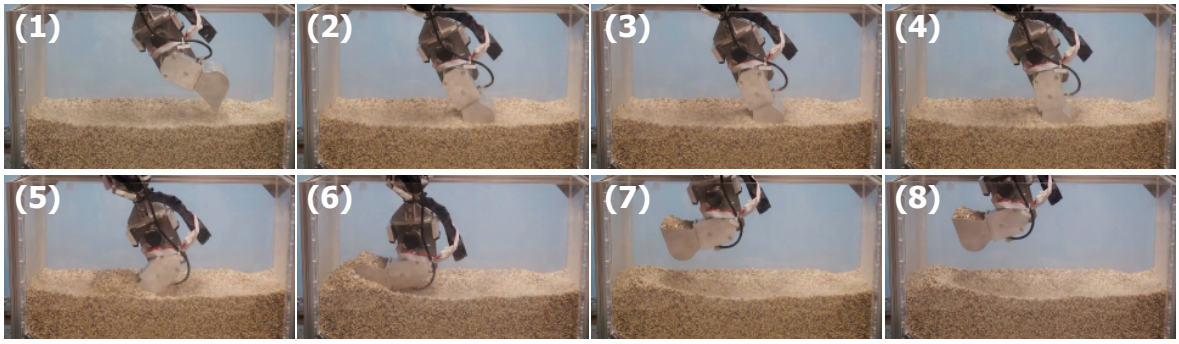
ベルは平面 3 自由度ロボットであり，人は 2 つのジョイスティックを使用してロボットを操作する．ジョイスティックの入力は手先座標系による位置とバケットの回転の速度入力とし，それを逆運動学解析により関節角度座標系に変換して用いた．また，操作の容易性からジョイスティックからの入力はそれぞれ x 方向，y 方向，バケットの姿勢 ϕ に対応させ，JIS 規格による操作とは異なるものである．制御系は Windows 10，VC++ を用いたマルチタスクプログラミングによって製作し，ロボットは得られた目標角度に対して各関節 PD 制御される．フィードバック制御のサンプリングタイムは 1.5msec とした．各関節には MAXON 社の 60W DC モータと速比 1/50 のハーモニック減速器を用い，土壌は大きさが 4 ～ 7mm の砂利を用いた．このロボットは土壌を掘削するのに十分なトルクを有している．また，バケット根元には 6 軸力センサが搭載されバケットにはたらく負荷を計測する．

2.3.2 自律制御系による掘削

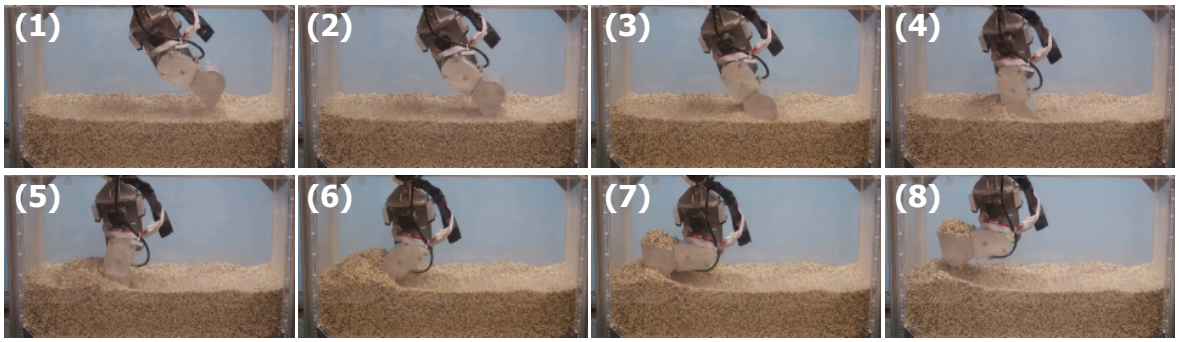
まず，式 (2.4) の i を 0 および 1 に固定した自律制御系による掘削を行った．このときの掘削の様子を Fig. 2.6 に示す． また，このときのバケットにはたらく力の変化の様子を Fig. 2.7 に示す．なお，バケットにはたらく力は力センサによって計測された x 方向の力 F_x，y 方向の力 F_y から

$$\|\boldsymbol{F}\| = \left\| \begin{bmatrix} F_x & F_y \end{bmatrix}^T \right\| \tag{2.15}$$

をプロットした．深い掘削をすることで，バケットの負荷が大きくなることが分かる．また，負荷が大きい場合バケットの動きはゆっくりとなり掘削にかかる時間が大きくなっている．これは自律



(a) $i = 0$ Deep digging



(b) $i = 1$ Shallow digging

Fig.2.6: Digging with the autonomous control system.

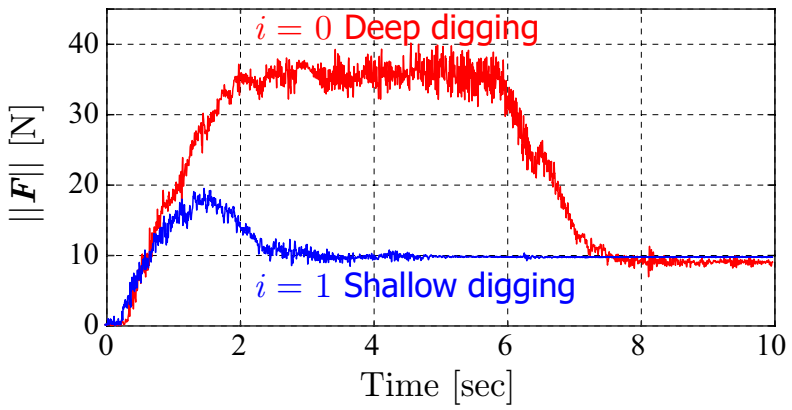


Fig.2.7: Transition of the load on the bucket.

制御系が時間の拘束を持たないことによる効果である．

次に，i を以下のルールで変化させ，

$$i \leftarrow \begin{cases} i + \delta_i & (\|\boldsymbol{F}\| > F_s) \\ i - \delta_i & (\|\boldsymbol{F}\| \leq F_s) \end{cases} \tag{2.16}$$

負荷に応じた連続的な掘削の変化を見た．負荷が大きいとき，すなわち $\|\boldsymbol{F}\|$ がある閾値 F_s より大

きい場合には i を $\delta_i > 0$ だけを増やし浅い掘削へと移動させる．負荷が小さいとき，すなわち $\|\boldsymbol{F}\|$ が F_s より小さい場合には i を減らし深い掘削へと移動させる．このときの掘削の様子を Fig. 2.8 に，バケットにはたらく力の変化の様子を Fig. 2.9 に示す． Fig. 2.9 における赤線は $i = 0$ のとき

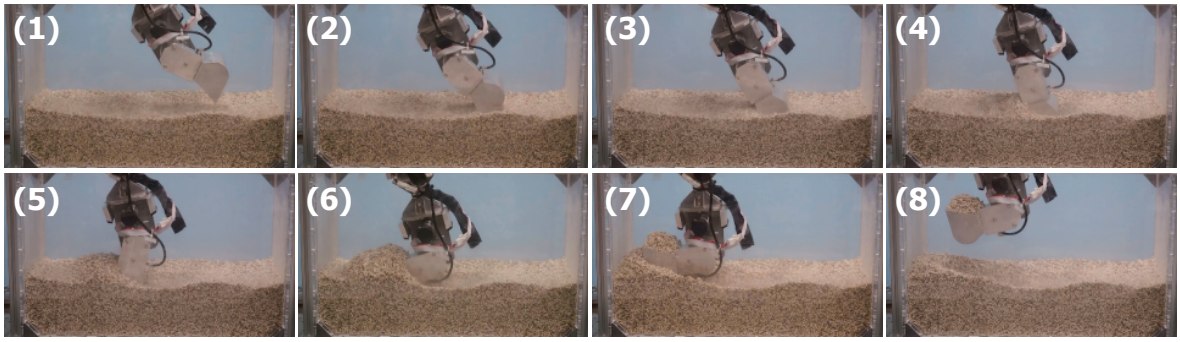


Fig.2.8: Change of the digging according to the load on the bucket.

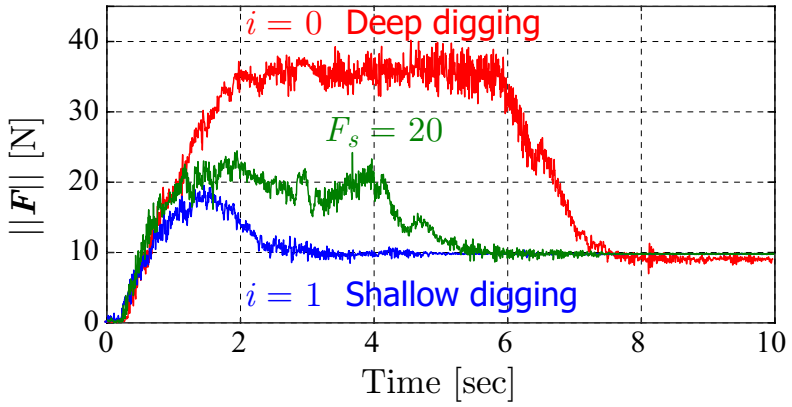


Fig.2.9: Transition of the load on the bucket using varying i.

のバケットにはたらく力の変化の様子，青線は $i = 1$ のときのバケットにはたらく力の変化の様子を表しておりこれらは Fig. 2.7 と等しい．緑線は F_s を設定したときのバケットにはたらく力の変化の様子を示している．なお，$F_s = 20$ とし，$i = 0$(深い掘削) から始めた．$\|\boldsymbol{F}\|$ が閾値の 20 より大きくなることで i が増加し，深い掘削から浅い掘削へと動きが変化する．深い掘削と浅い掘削の間で動きが遷移することで $\|\boldsymbol{F}\| = 20$ 付近に保たれる掘削が行われている． また，深い掘削，浅い掘削，i を変化させた掘削の動きの比較を Fig. 2.10 に示す．青色の実線は掘削時におけるバケット先端の軌道を示している．Fig. 2.10(c) における A 後の軌道の傾きが Fig. 2.10(a) の深い掘削に比べて緩やかになっている．これは深い掘削から浅い掘削へと動きが遷移したことを意味している．以上の結果から，F_s を設定することによりバケットの負荷に応じて掘削の動作を変化させる人の掘削操作に近い自律制御系が実現できていることが分かる．

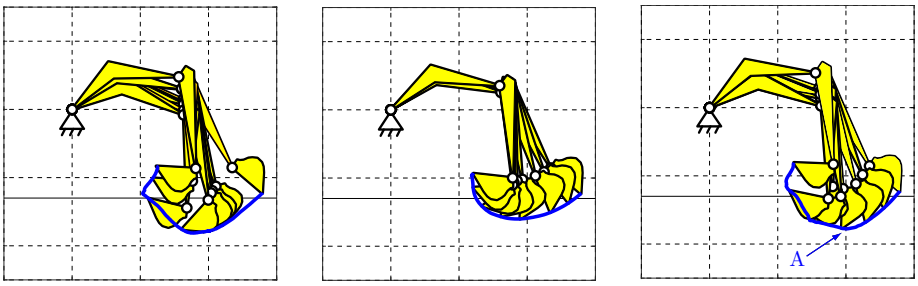


Fig.2.10: Comparison of the digging by the autonomous control system.

2.3.3 半自律制御系による掘削

人の操作介入を加えながら半自律制御系による掘削を行った．このときの掘削の様子を Fig. 2.11 に示す．また，その様子を添付した参考動画に示す．Fig. 2.11 の (3) から (4) の間で，操作者が掘削途中に左手のジョイスティックを奥に倒しバケットを上方向 (y 方向正の向き) に動かすように操作を加えその後元の位置に戻した． このときのバケットにはたらく力 $\|\boldsymbol{F}\|$ とバケットの負荷 i，推

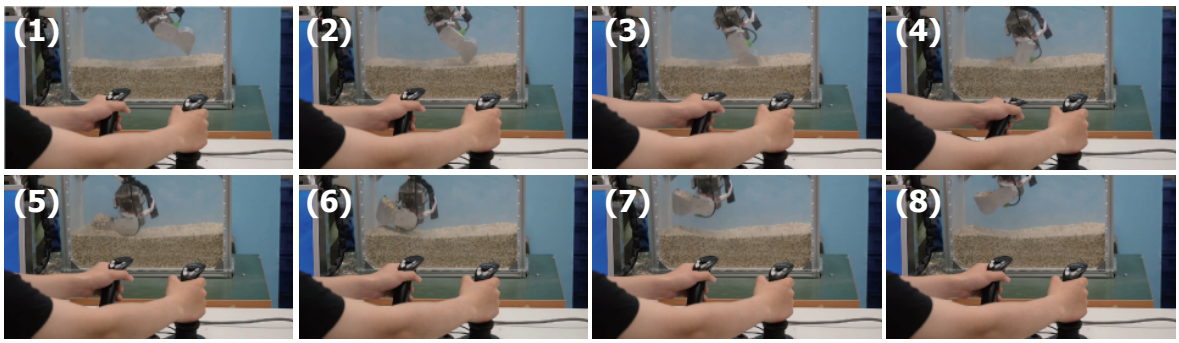


Fig.2.11: Digging by the semi-autonomous control system.

定値 $\widehat{i^h}$ の遷移を Fig. 2.12 に示す． Fig. 2.12 上図の青線は人が操作を加えないときの $\|\boldsymbol{F}\|$ の変化であり，掘削の開始と共に値が大きくなる．約 2 秒で $\|\boldsymbol{F}\|$ が $F_s = 30$ を越えたことに伴い下図の青線にあるように i の値は大きくなってやや浅い掘削へと移行するが，$\|\boldsymbol{F}\|$ があまり F_s を上回らないことから $i = 0$ の深い掘削を続ける．一方，Fig. 2.12 上図の赤線は人の操作が加わったときの $\|\boldsymbol{F}\|$ の変化を示しており，人がレバーから y 方向上向きの操作を加えることで，$\widehat{i^h}$ は下図のマゼンダ線で示される値をとり，その結果ロボットはやや浅い掘削を遷移することで $\|\boldsymbol{F}\|$ は小さな値を維持する．なお，このとき $\|\boldsymbol{F}\|$ は F_s を上回らないので i は赤線で示されるように $i = 0$(深い掘削) のままである．すなわち，人の操作が加わることで $\widehat{i^h}$ が大きくなり，浅い掘削へと移行している．

これらの結果から，以下の考察を得る．

1. この実験では $F_s = 30$ を設定したが，この値は Fig. 2.7 と比べるとバケットに大きな負荷が

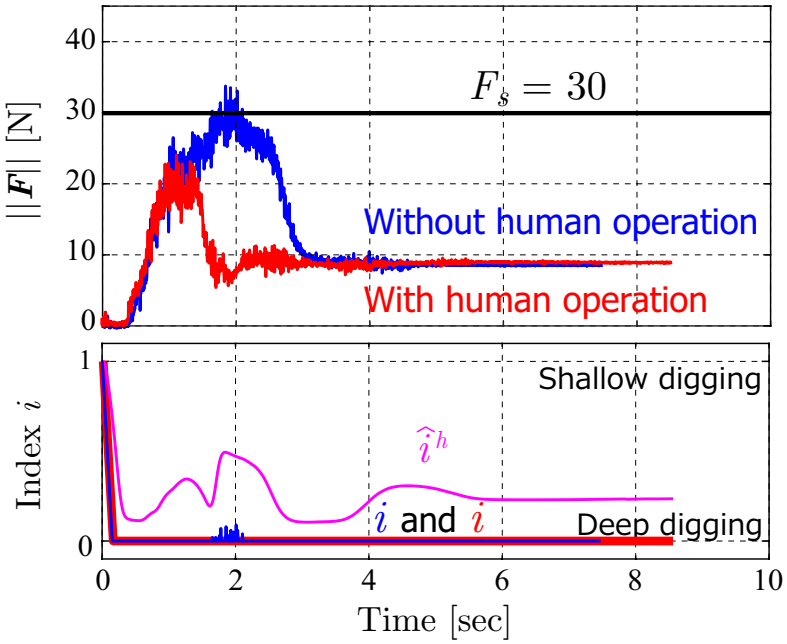


Fig.2.12: Transition of the load on the bucket by the semi-autonomous control system.

はたらく掘削を導くもので，自律制御系のための閾値としては適した値ではない．実際，Fig. 2.12 の青線のようにバケットには大きな力が働いている．これに対し，人が介入することで負荷を小さく抑えることができる．これは半自律制御系によって人が介入することで適切な掘削が可能であることを示している．

2. 人が操作を加えない場合と加えた場合との掘削動作の比較を Fig. 2.13 に示す．人の操作を加えることで掘削の深さが浅くなっている．この差は約 1.2cm であり，バケットの口の大きさの約 10% に相当する．これによりバケットにはたらく力が 3 分の 2 程度に軽減されている．

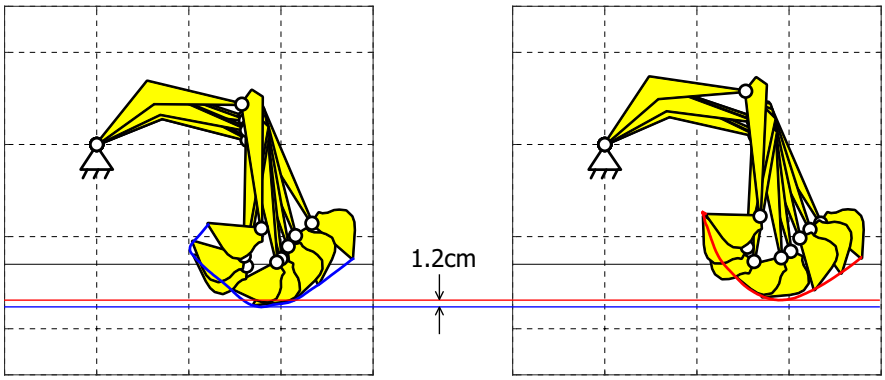


Fig.2.13: Comparison between 'without' and 'with' human operation in the semi-autonomous control.

2.4 おわりに

本章では，先行研究 [59] を基にした掘削深さの半自律制御系の実験検証を行った．まず，自律制御系による掘削実験を行い，一定負荷の掘削の達成を確認した．次に，油圧ショベルを模したロボットに対して人がジョイスティックによる入力を加える形で半自律制御系の掘削実験を行い，その有効性を確認した．

第 3 章

掘削深さと速度を導入した半自律制御系の設計

3.1 はじめに

本章では，2 章で提案した半自律制御系を拡張し，掘削速度の操作インデックスを付与した半自律制御系を提案する．2 章の実験結果から，2 章で提案した半自律制御系に対して岩等に衝突した場合，深さの変化で回避できなければ，動けなくなる課題を得た．従来の制御法では，Fig. 3.1 の赤と青の破線で表した深さの異なる軌道間でしか操作者は動かすことができない．そのため，岩との衝突後に，回避するための元の軌道を逆向きに辿れるような操作は実現できていない．この課題

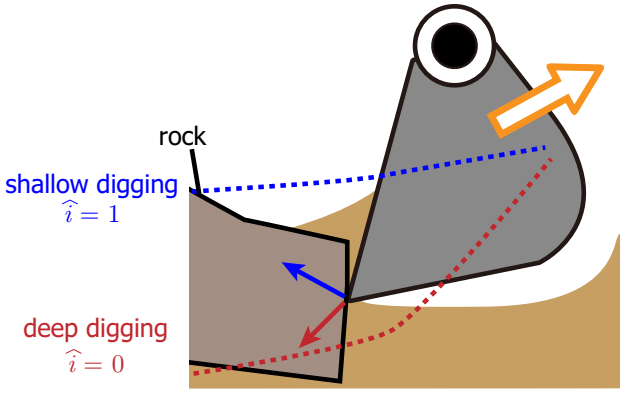


Fig.3.1: Motion of excavator's bucket only with one degree of operation.

を解決する方法として，掘削深さ以外の操作自由度を追加することが考えられる．操作性の課題については，掘削動作が Fig. 3.1 の橙色の矢印のような掘削方向の逆方向になり，浅い掘削軌道に移行することで岩との衝突を回避できるようになる．つまり，掘削速度の操作自由度を追加することで解決できる．1.2.4 章の要件 2 より，掘削速度の操作自由度も掘削作業の操作として重要なものであり，この操作自由度を追加することは価値のあることである．本章では，操作自由度カップリングを用いることで掘削深さの半自律制御系を拡張し，掘削速度の操作自由度を追加した半自律制御系を提案する．また，この提案手法の有効性を確認するために，従来型入力インタフェースであるジョイスティックを用いての実験検証と，新たな入力インタフェースとしてリーダ・フォロワ系

を導入し，これ用いての実験検証を行う．

3.2 掘削速度に関する操作自由度を導入した半自律制御系の設計

3.2.1 自由度カップリングについて

式 (2.4) に対して新たに掘削速度の操作自由度を追加した力学系を設計する．従来法では，インデックス i に基づいて掘削軌道を変化させた．掘削軌道は，バケットの位置 x，y と姿勢 ϕ の 3 次元で構成されており，軌道は 1 次元曲線であることから x, y, ϕ はのカップリングを表しているといえる．すなわち，人の入力を 1 つのパラメータ $\widehat{i}$ に変換して軌道を変化させていることから，人の操作自由度は 1 であるといえる．これにより，Fig. 3.1 に表されるように，バケットが土壌の負荷により静止した場合に，人がどのような操作をしても深掘りと浅掘りの間の軌道しかとることができず，掘削をやめ，後に戻るような操作はできなくなる．一般には浅掘り軌道に移行することでバケットの負荷が減り動き出せるが，土壌の状況によりその限りではない．この問題を解決するためには，人の操作自由度を増やし，バケットが軌道に沿って戻れるような動作のカップリングとこれを操作自由度に持つ制御系の設定が必要である．

一方，JIS で規定された油圧ショベルのレバー操作は Fig. 1.4 で表される．2 つの十字に動くレバーによって，アーム，ブーム，バケット，旋回のそれぞれの自由度を操作するが，動作のカップリングはレバーを同時に動かすことを要求し，初心者には難しい．そこで，x，y，ϕ のカップリングに $\dot{x}$，$\dot{y}$，$\dot{\phi}$ のカップリングの自由度を加え，式 (2.4) を変形させた自律系を設計する．

3.2.2 ベクトル場の分割設計

Figure 3.2 は，掘削深さの自律制御系における式 (2.5) の設計で用いるベクトル場の定義である．掘削深さの自律制御系では，ある i のもと軌道 Ξ 上の点 $\boldsymbol{\xi}_k^i$ 回りにある点を始点として，軌道上の次点 $\boldsymbol{\xi}_{k+1}^i$ を終点としたベクトルを定義し，これが

$$\Theta \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, i) \simeq \boldsymbol{f} \tag{3.1}$$

となるように関数近似によって Θ を求めた．そこで，$\boldsymbol{f}$ を軌道への収束場 $\boldsymbol{f}_c$ と軌道に沿った流れ場 $\boldsymbol{f}_f$ に分割し，

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + \Theta_c \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k, i_k) + j\Theta_f \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k, i_k) \tag{3.2}$$

$$\Theta_c \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, i) \simeq \boldsymbol{f}_c, \quad \Theta_f \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, i) \simeq \boldsymbol{f}_f \tag{3.3}$$

を考える．Figure 3.3 に表すように，$\Theta_c \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, i)$ は軌道に収束するための場，$\Theta_f \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}, i)$ は軌道に沿った流れを表す場である．i は式 (2.7) と同様に，掘削深さを表すインデックスであり，i の変化により深掘り，浅掘りの軌道が変化する．j は流れの大きさを表すインデックスであり，$-1 \leq j \leq 1$ とすれば，通常の掘削，静止，軌道に沿って戻る動きのいずれも実現できる．

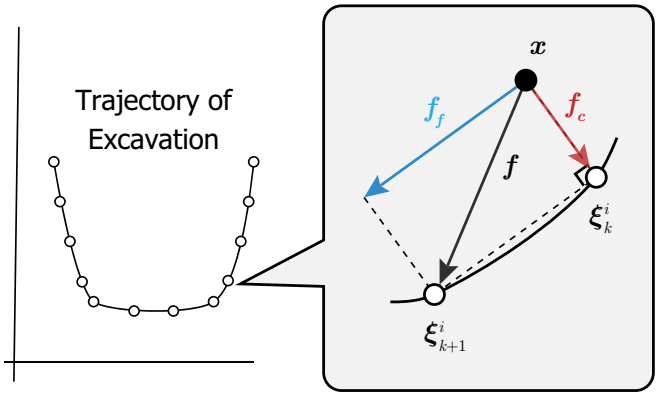


Fig.3.2: Definition of vector field.

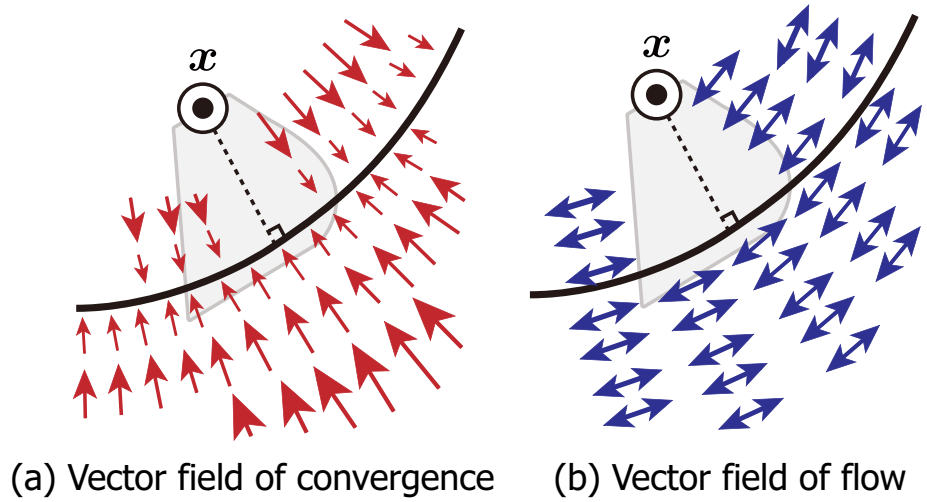


Fig.3.3: Vector field for convergence and flow.

3.2.3 流れの大きさに関する人の操作モデルの設計

自律制御系に人の操作を加えるために人の操作モデルを設計する．式 (3.2) におけるインデックス i, j について，以下の力学系を定義する．

$$i^h_{k+1} = i^h_k + K^i(i^s_k - i^h_k) + v_i \tag{3.4}$$

$$j^h_{k+1} = j^h_k + K^j(1 - j^h_k) + v_j \tag{3.5}$$

$$V_k = (\Theta_c + j^h_k \Theta_f)\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k, i^h_k) + \boldsymbol{w} \tag{3.6}$$

ただし，$K^i(0 < K^i < 1), K^j(0 < K^j < 1)$ は定数であり，v_i, v_j はシステムノイズ，$\boldsymbol{w}$ は観測ノイズである．これは，人が i と j をセンサ信号 i^s と状態 $\boldsymbol{x}$ から i^h, j^h として予測しながら，ショベルへの速度コマンド V を決定するモデルである．そこで，センサ信号 i^s として人の操作入力 V に基

づいて，i^h, j^h, V を拡張カルマンフィルタによって推定し，

$$\widehat{\boldsymbol{V}}_k = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k, \widehat{i}^h_k, \widehat{j}^h_k) \tag{3.7}$$

をショベルへの速度目標値として用いて，式 (2.9) と同様に目標値を計算し油圧ショベルを制御する．人の操作を反映させた半自律制御系が構成される．人の操作が無い場合，時間の経過と共に式 (3.5) の i^h はセンサ信号 i^s に，j^h は 1 に収束する．すなわち，ショベルは常に軌道に沿った動きへと進む．しかし，人の操作が加わり，V が軌道を戻るような操作であった場合に，拡張カルマンフィルタによって $\widehat{j}$ は負の値と推定され，その結果，式 (3.6) の V は軌道を戻る速度ベクトルとなる．また，人が軌道を戻る操作をやめれば，$\widehat{j}$ は徐々に 1 へと収束し，軌道に沿った動きをとるようになる．以上より，式 (2.7) に対して掘削速度の操作自由度を追加した半自律系を設計できた．

3.3 掘削速度に関する半自律制御系の実験検証

3.3.1 実験環境の用意

実験で用いた油圧ショベルを模したリーダ・フォロワ系のロボットを Fig. 3.4 に，制御に必要な周辺機器の構成を Fig. 3.5 に示す． Fig. 3.4 におけるリーダ・フォロワ系のロボットは 4 自由度

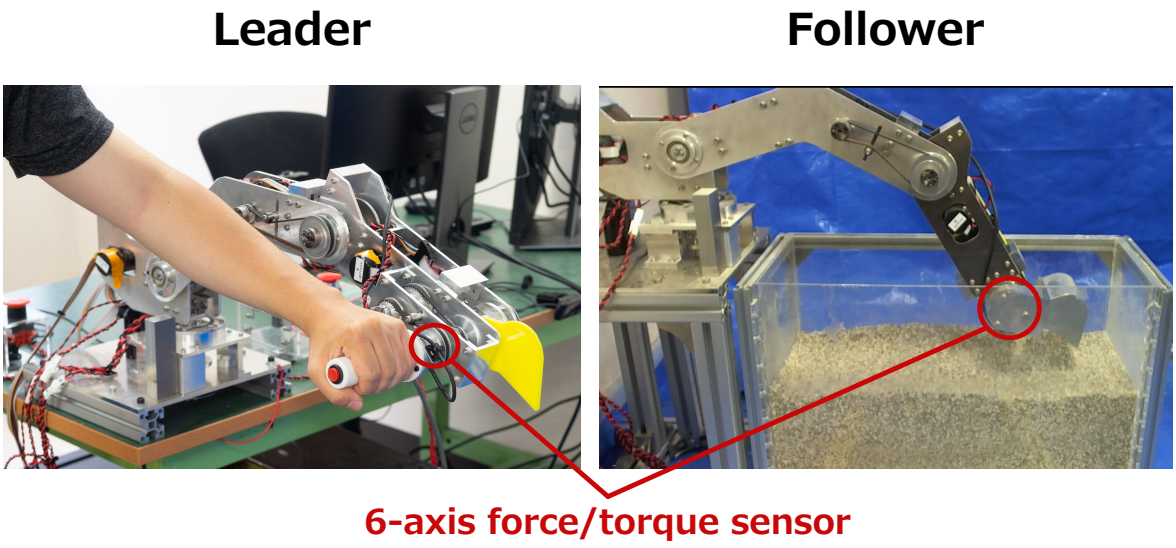


Fig.3.4: Excavation robots composed of leader-follower system.

ロボットであり，本実験では旋回部を除いた平面 3 自由度で動作させた．実際の油圧ショベルは，油圧駆動のものが一般的であるが，本ロボットはモータによるベルト駆動で動作する．入力インタフェースから操作者がロボットの状況を判断でき，油圧ショベルの姿勢を直接操作できるという利点があるため，リーダ・フォロワ系によって構築する．リーダ・フォロワ系のそれぞれのロボット

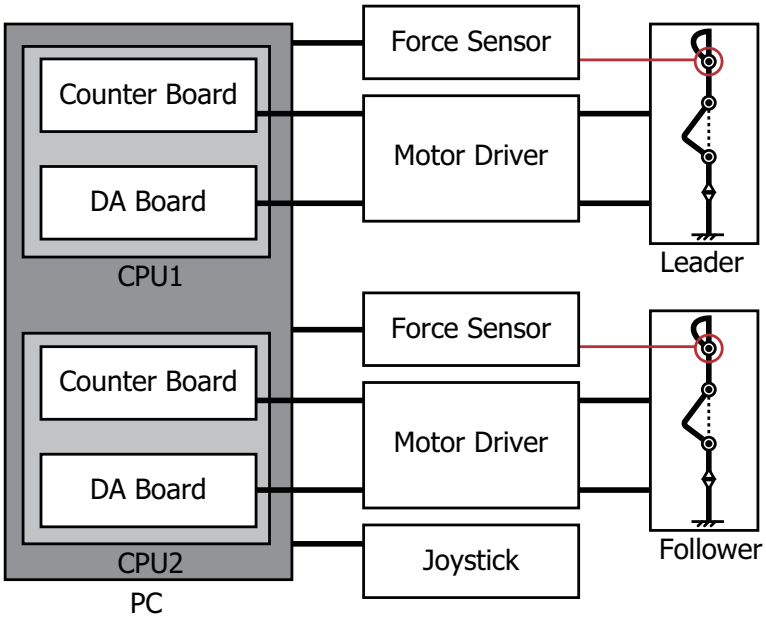


Fig.3.5: Configuration of leader-follower system.

は Fig. 3.5 に示すようにモータドライバを通じて，1 台の実験用 PC に搭載された Interface 社のカウンタボードと DA ボードにそれぞれ接続されている．実験用 PC 内で計算された目標値 $\boldsymbol{x}^{ref}$ を逆運動学によって各関節の対偶における相対角度を得て，その値を目標角として各モータをモータドライバによって PD 制御する．実験用 PC からモータドライバへは，プログラム上で求めた電圧指令を DA ボードを介して出力しており，その電圧に比例してモータドライバは電圧を出力し制御する．指令電圧域は -10V $\sim$ 10V であり，これをモータドライバの出力 -10A $\sim$ 10A に対応させている．各関節部には MAXON 社のものが用いられており，モータの出力はタイミングベルトを介してハーモニックギアドライブに伝えられ，所望の関節角度となる．ハーモニックギアドライブのギア比は，ロボットの根元の関節部が 1/100，他の関節部が 1/50 である．また，バケットの根元の関節部には，歪みゲージ式の 6 軸の力覚センサが取り付けられており，バケットの回転に従って力覚センサも回転するような取り付け方をしている．本センサは 3 軸の並進力と偶力を歪みゲージで検出し，信号をセンサ内臓の変換基板でデジタル化し，USB を介して実験用 PC に送られる．リーダ側のセンサは人の操作，フォロワ側のセンサはセンサ信号の測定に用いた．制御系は Windows 10，VC++ を用いたマルチタスクプログラミングによって製作し, フィードバック制御のサンプリングタイムは 3.0msec とした．リーダ・フォロワ系の同期制御には文献 [62] の手法を用いた．

ロボットの各リンクの長さを Fig. 3.6 に示す．また，土を入れる容器として Fig. 3.7 の厚さ 5mm のアクリル板とアルミフレームからなる箱を用いる．内部の寸法は，x 軸方向に 0.5m，y 軸方向に 0.3m，奥行き方向に 0.25m である．

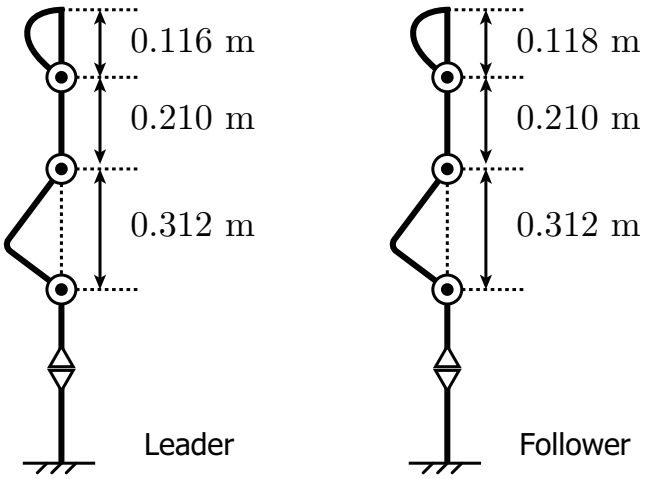


Fig.3.6: Size of robots.

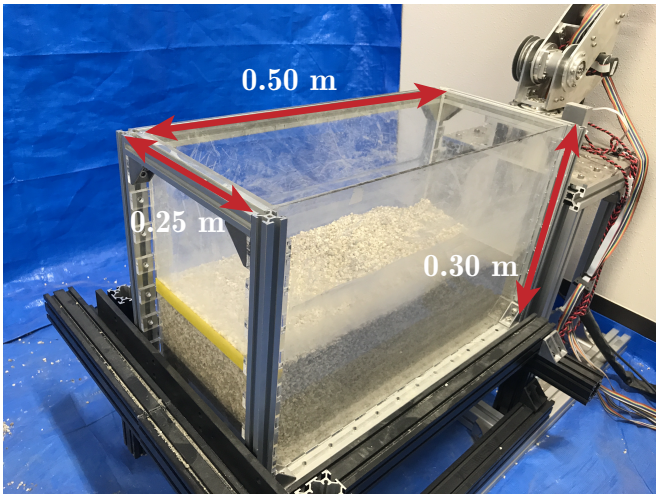


Fig.3.7: Size of a container for soil.

3.3.2 掘削速度の自律制御系の実験検証

提案した掘削速度の操作自由度を加えた自律制御系を用いて, ジョイスティックから i, j を直接入力し，連続的な軌道の変化が可能であることを確認する．ここでは，フォロワ側のロボットを用いた．まず，式 (3.2) において $i = 0$, $j = 0.7$ とインデックスを固定して実験を行った．Figure 3.8 にその結果を示す．次に，式 (3.2) において $i = 1$, $j = 0.7$ とインデックスを固定して実験を行った．Figure 3.9 にその結果を示す．Figure 3.8，Fig. 3.9 における赤色と青色の破線は，コントローラ設計のときに用意した深い軌道と浅い軌道を表している．黒色の実線にはバケット手先の軌道を表している．設計したコントローラによって，深い掘削や浅い掘削が実現できていることが分かる．

さらに，インデックスの初期値を $i = 0$, $j = 0$ として，i と j をジョイスティックによって増減

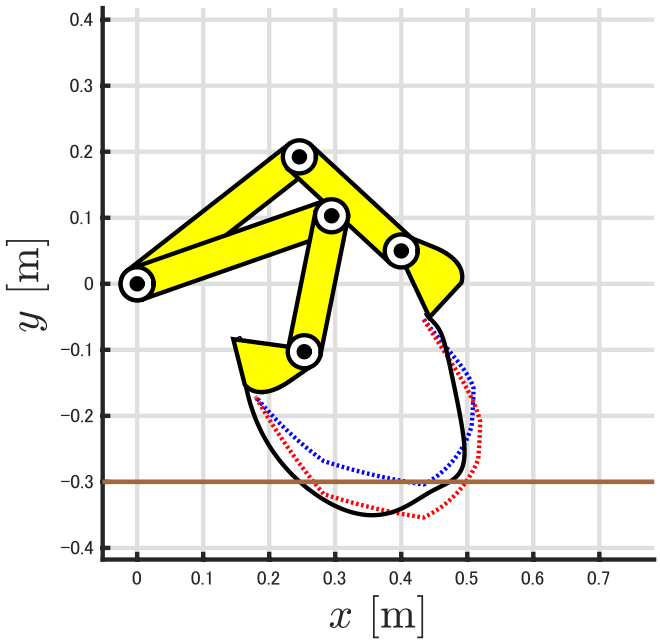


Fig.3.8: Digging with $i = 0$, $j = 0.7$ (experiment).

させた．その結果を Fig. 3.10，Fig. 3.11 に示す．Figure 3.10 は掘削動作の様子を，Fig. 3.11 は掘削動作時の関節角度 θ とコントローラのインデックス i，j の時間変化を表している．ロボットは，Fig. 3.10 の緑の矢印の向きに沿って，点 A から動作を開始し，点 B で折り返し，点 C を経由して再び点 A に戻るように動作した．制御開始時には $j = 0$ からスタートするため，約 3 秒間ロボットは動かない．その後，ジョイスティックのレバーを入れ，j を 0.3 から 0.5 とすることで，ロボットは動き出す．同時に i が 0 から 1 に変化することで，深い掘削軌道から浅い掘削軌道へと変化している．その後 $t = 9.5$ には掘削を終了し，$t = 12$ まで軌道の端点 B に停留している．次に $t = 12$ から j の値を負の値にすることで，先程とは逆方向に動き出している．また，このとき i を 1 から 0 に変化することで，浅い掘削軌道から深い掘削軌道へと変化している．これは点 C で掘削軌道が下方向に変化していることから判断できる．もし浅い軌道であれば，Fig. 3.9 の黒い実線の軌道のように下方向に変化せずに動く．同時にレバーを大きく倒し j を -0.8 まで変化させることで，ロボットは大きな速度で動いている．$t = 16$ には点 A に戻り，停留している．これらの結果から，i と j の連続的な変化によってロボットの動きを連続的に変化させられることが理解できる．

3.3.3 障害物衝突時の人の操作介入の検証

提案した掘削速度の操作自由度を加えた半自律制御系を用いて，障害物衝突時に人の操作によって回避可能か実験検証を行った．障害物として直方体のアルミニウムを土に埋めて用いた．フォロワ側において掘削途中で障害物に衝突し停止している状態において，人が障害物回避のためにリーダ側を用いて操作介入を行った．その結果を Fig. 3.12，Fig. 3.13 に示す．Figure 3.12 は (1)〜(4)

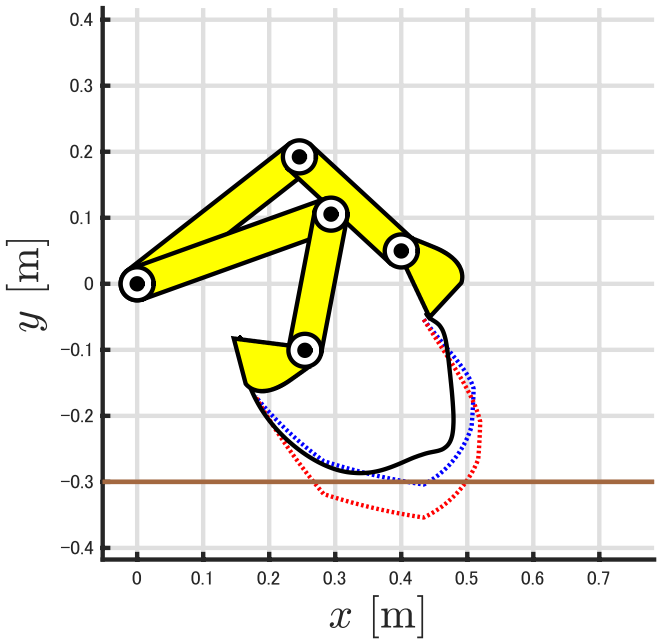


Fig.3.9: Digging with $i = 1$, $j = 0.7$ (experiment).

の時系列順によるフォロワ側のロボットの掘削動作の様子（赤実線）を，Fig. 3.13 は掘削動作時のフォロワ側のバケットに掛かる負荷の大きさ $||F||$（緑実線）と，コントローラにおけるインデックスのセンサ信号 i^s（赤実線）と，i^h, j^h の推定値 $\widehat{i^h}, \widehat{j_h}$（青実線）の時間変化を表しており，それぞれの点 A∼D は対応している．Figure 3.12 の茶実線は土の表面，青四角は障害物を表し，Fig. 3.13 の黄領域は人が介入した時間範囲を表している．Fig. 3.13 の橙実線は，式 (2.16) の i の閾値制御のためのケット負荷 $||F||$ の閾値である．

Figure 3.12 (1) の点 A でバケットが土に接触しその後コントローラによる自律掘削を行っている．この間は人の操作が無いので，$i^s, \widehat{i^h}$ 共に同様の値で変化している．土に接触した後は，閾値制御により $||F||$ が閾値となるように，$i^s, \widehat{i^h}$ が変化している．次に Fig. 3.12 (1) の点 B でバケット手先が障害物に接触し，バケット負荷 $||F||$ が上昇し，閾値と比較して非常に大きな値となる．その結果，i が $i = 0$ の最大値まで上昇し，掘削軌道へ移行しようとするが，障害物のため動けないので，Figure 3.12 (2) の点 C まで掘削動作を止められている．このとき，人の操作が無いため $\widehat{j_h}$ は変化しない．その後，点 C でリーダ側で動作停止を認識した人が操作介入を行い，(3) の点 C,D 間の軌道のように，一旦バケットを掘削の逆方向に動かし，その後，掘削深さが浅くなるように上に持ち上げるように操作した．操作介入を行った時間範囲を Fig. 3.13 に黄色の領域で示す．操作者が逆方向に操作したことで，拡張カルマンフィルタを通じて $\widehat{j_h}$ が負になり，バケットが岩から離れた．岩との接触が無くなることで $||F||$ が減少し，それに応じて $i^s, \widehat{i^h}$ も減少する．このとき，操作者が上に持ち上げる操作をしているため，拡張カルマンフィルタを通じて浅い軌道へと移ろうと $\widehat{i^h}$ が i^s よりも大きな値をとっている．バケットを岩から十分離した後，操作者が浅い軌道に元の掘削方向に戻したことにより，$\widehat{j_h}$ が正の値になる．このように，リーダ側での人の操作入力が拡張カル

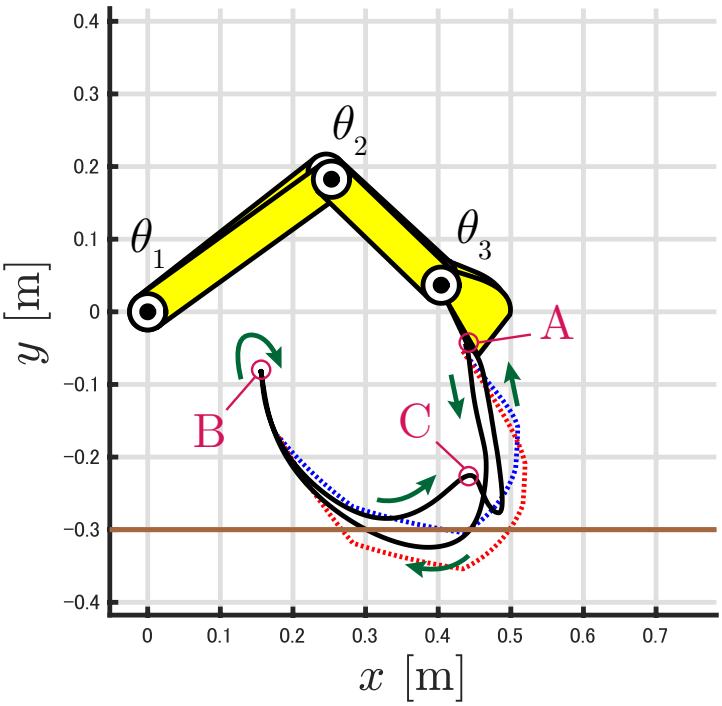


Fig.3.10: Digging with varying i and j.

マンフィルタを通じ $\widehat{i^h}, \widehat{j_h}$ を変化させることで，Fig. 3.12 (3) の点 C,D 間の軌道のようにフォロワ側の動作に反映され障害物を回避する運動を実現できている．点 D で人は操作を止め，Fig. 3.12 (4) の点 D 後のように自律掘削に復帰している．これは $i^s, \widehat{i^h}$ 共に同様の値で変化し，$||F||$ が閾値となるように変化していることから分かる．このとき，$\widehat{j_h}$ は人の操作は無いため変化しない．

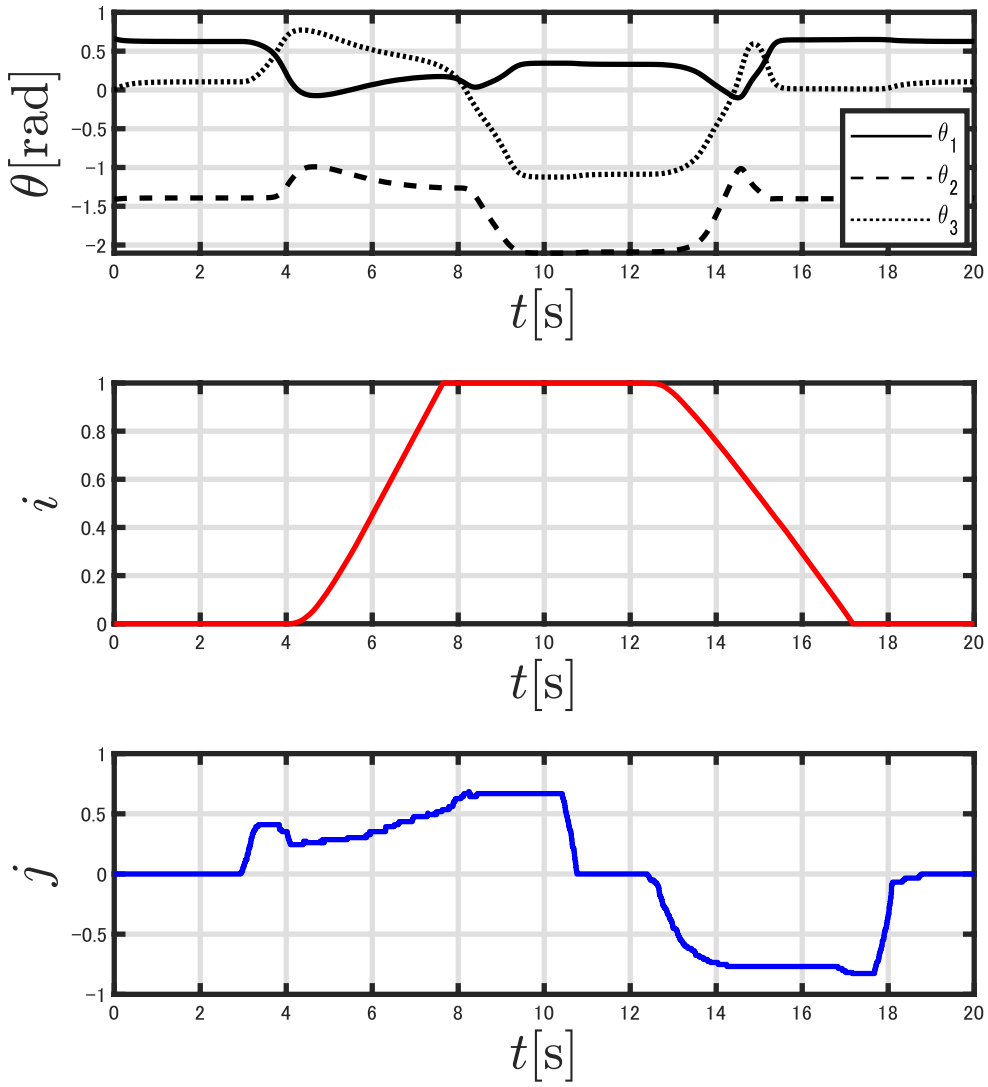


Fig.3.11: The time variations of θ, i and j.

3.4 おわりに

本章では，操作自由度のカップリングに基づき，掘削深さの半自律制御系のアトラクタを収束方向と流れ方向のベクトル場に分離することで，掘削速度の操作自由度を追加した半自律制御系の設計手法を提案した．また，その他提案手法による油圧ショベルを模したリーダ・フォロワ系を用いた実験検証によりその有効性を確認した．

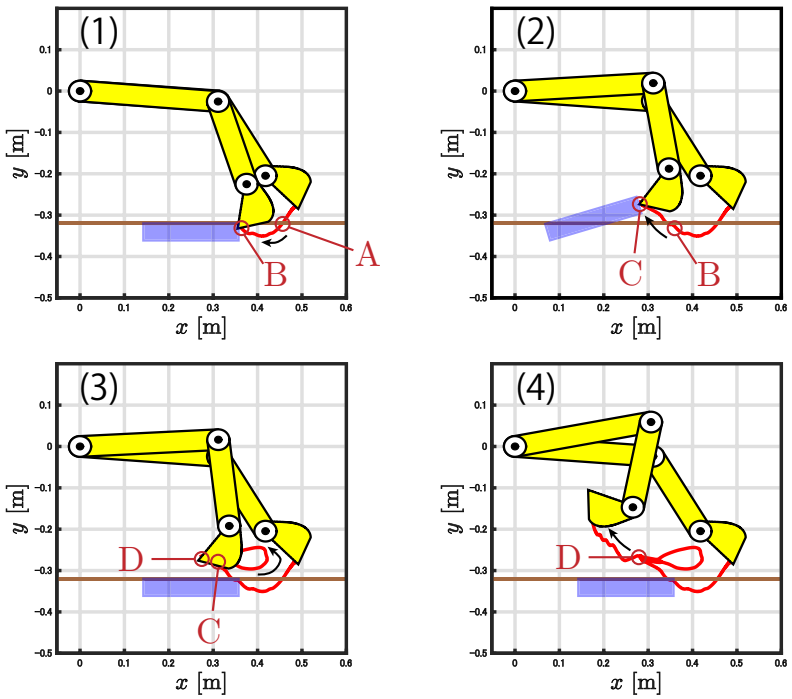


Fig.3.12: Motion of excavation of the follower robot.

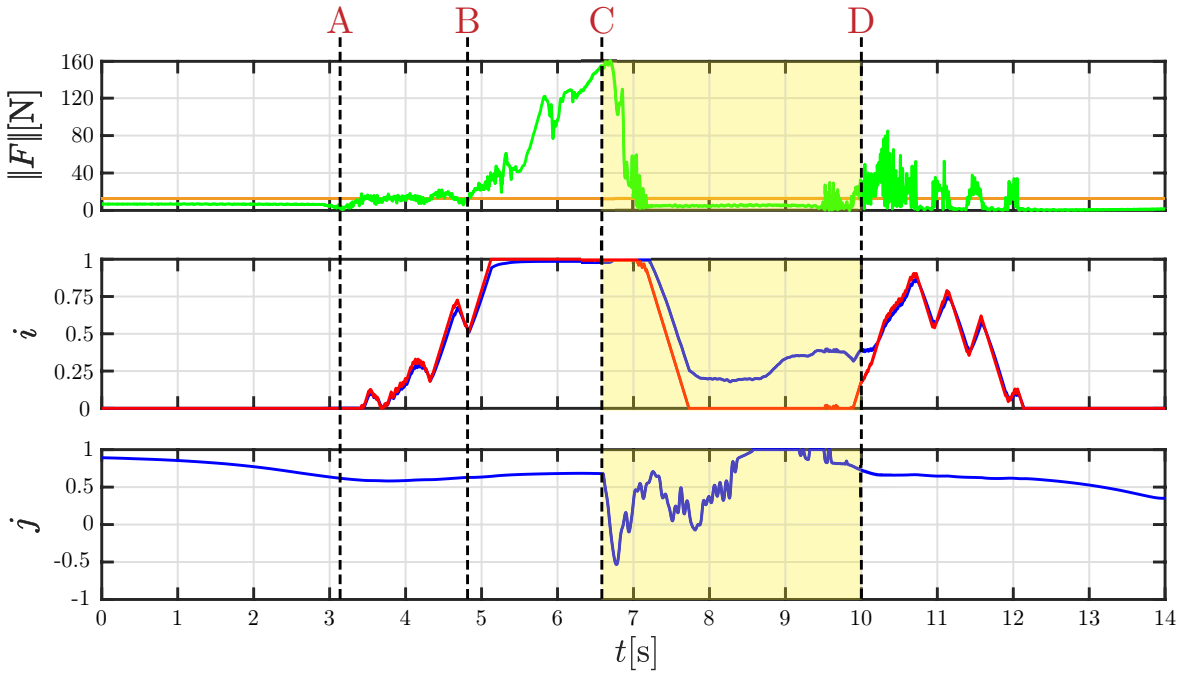


Fig.3.13: Transition of $||\boldsymbol{F}||, i, j$.

第 4 章

土砂掘削モデルに基づいた掘削距離変化による掘削量の自律制御

4.1 はじめに

3 章で設計した掘削深さと速度の半自律制御系の課題として，掘削中にバケット内に十分な土砂が入った場合に，そこで掘削を終了できず，無駄な距離を掘削し続け，エネルギー効率が悪い問題がある． 実際の掘削作業において，適当な距離で適当な量を掘削することは重要である． Figure 1.5(b) の掘削工程は, Fig. 4.1 に示すように 3 フェーズ, バケットを土砂中に挿入する (i)Penetrate, 土砂に挿入したままバケットを建機本体側に引き寄せて土砂をかき集める (ii)Drag，バケットを掬い上げる (iii)Scoop で行われる．このとき，Fig. 4.2 のように引きずられて山状になった土砂 (盛り土) の一部がバケットに入り，掘削土砂となる．その後，その土砂は所望の場所に運ばれる．この掘削土砂の量 (以下，掘削量) は有限であり，その最大値はバケットの最大容積と土の安息角によって決まることが知られている [63]. この作業において，熟練者は掘削中の土砂の状態やバケット

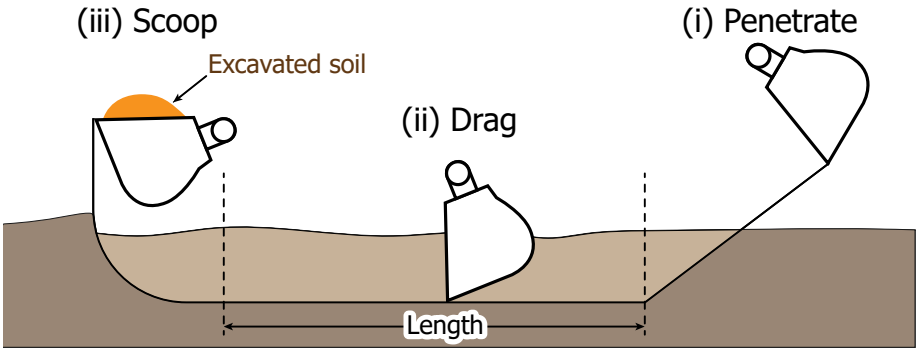


Fig.4.1: Three phases of an excavation process (Penetrate, Drag, and Scoop).

の動きに応じてフェーズ (ii) のドラッグ距離を調整することで，適切な量の土砂を掘削する．しかし，非熟練者はこのような掘削を行わないため，掘削量が少なかったり，こぼしたりして作業効率が低下することがある．以上から，掘削作業の自律化のためには，十分な掘削量を達成する土砂の



Fig.4.2: Change in soil in front of the bucket during excavation.

状態に応じたドラッグ距離の制御が必要であるため，本章では掘削距離に関する自律系として，掘削距離 (ドラッグ距離) を制御パラメータとした土砂の目標掘削量達成する自律制御系を提案する．

この掘削量は，フェーズ (ii) 直後のバケット内の土砂量に強く依存するものである．しかし，Fig. 4.2 のように掘削中の土砂は動き続けるため直接観測することは困難である．したがって，掘削量を制御するためには，掘削モデルに基づいてバケット内の土砂の量を推定する必要がある．

掘削中のバケットと土砂間の相互作用のシミュレーションは，離散要素法（DEM）を用いて行われてきた．しかし，その方法は計算量が多く，リアルタイム制御には不向きである Nezami らは，多面体粒子を用いた DEM によるシミュレーションを行ったが，1 秒間のシミュレーションに 2 時間以上を要している [64]．Svanberg らは，剛体有限要素と DEM を組み合わせた数値モデルを設計し，掘削全体のシミュレーションを行った（Svanberg ら，2021）．このシミュレーションでは，1 秒間のシミュレーションに約 1 時間を要している [65]. また，簡易的なシミュレーションとして，石井らは有限体積法に基づく高速シミュレーションを提案しているが，2 次元モデルであり精度が低い問題がある [66].

掘削時の土の挙動を学習し，最適な軌道を計画する研究が行われている．Sandzimier らは，掘削サイクル中のバケット充填率を予測するために，データ駆動型モデルを用いた最適制御アルゴリズムを設計した [67]．彼らのモデルのパラメータを訓練するためには，深度カメラで測定した数百のデータセットが必要であった．Lu らは，幾何学的表現を用いた強化学習により，乱雑に配置された岩へバケットを挿入する計画手法を提案した [68]. この手法では，RGB-D カメラで測定した掘削時の土砂表面の点群を入力とし，シミュレーション上で 35,000 の掘削シーンを学習した．しかし，いずれの研究においても学習に必要なデータ数が多い問題がある．

また，バケットと土砂の相互作用をモデル化する試みも行われている．Reece は，静力学の釣り合い式を用いることで，掘削時の土砂の挙動が土の凝集力，重量，粘着力，サーチャージの影響を考慮した単純な 4 つの方程式 (”Fundamental Equation of Earthmoving”の頭文字から FEE と呼ばれる) で表されることを示した [69]．畠は，土砂固有の特性値として掘削時にバケットにはたらく比切削抵抗の実験式を求めた [70] [71]．この比切削抵抗を基にして，室らは軟岩に対するバケッ

トの刃先に作用する非定常掘削抵抗と刃先の軌跡, 及び掘削土量について実験的考察を行った [72].

また，掘削中にバケットにはたらく抵抗力を予測するために FEE を用いた研究も行われている．Singh らは，学習を用いて掘削時の抵抗力を予測する研究を行っており，その際に基底関数の設計において FEE を利用した [73]．Zhao らは，改良された FEE モデルを用いて，土の抵抗力を予測する手法を提案した [74]．Egli らは，FEE を用いて設計したモデルを用いて，シミュレーション内で異なる土質に対する掘削を学習し，その学習結果を用いたコントローラを設計する手法を提案した [75]．いずれの研究においても，掘削量は単純な幾何学的形状のみの議論に留まっている．

掘削における土砂の挙動は，高い非線形性を持つ物理現象である．従来の掘削モデルは，その現象をミクロ的な表現を試みたためパラメータが多くなり，そのパラメータ同定に膨大なデータ数が必要となっている．掘削量の推定においては，土砂の各粒子の挙動を捉える必要が無く，マクロな掘削土砂全体の挙動が分かればよい．そこで，掘削現象のマクロ的指標としてバケットが土砂にした仕事に着目する．掘削量は，フェーズ (iii) 直前のフェーズ (i)(ii) でかき集めた盛り土の大きさに大きく依存し，この盛り土が大きければ大きいほど掘削量は大きくなる．この盛り土はフェーズ (i)(ii) でバケットが土砂に仕事をした結果であることから，掘削量とバケットが土砂にした仕事は強い相関があると予想される．加えて，制御量が仕事であることの利点として，計測が容易であることと油圧ショベル内で計測が可能であることが挙げられる．バケットが土砂にした仕事を計測するには，バケットの移動量と力が必要となるが，ICT 化された油圧ショベル [76] において移動量は各リンクに取り付けられたストロークセンサ付シリンダや IMU 等によって計測でき，力はエンジンから計測可能であり，計測は容易である．また，仕事の計測は油圧ショベルのシステム内で完結するものであり，LiDAR やカメラ等のセンサを用いる制御量と比較して，外部環境からの影響が小さく，作業現場ごとでのセンサチューニングを減らすことができる．実際に，Takamichi et al. は，掘削量と仕事の関係式を実験的に求め，シミュレーションによって最適な軌道を計画する研究を行った [77]．しかし，この研究における掘削量と仕事の関係式は，仕事が無限大になると掘削量も無限大になるものであり，バケットの容積は有限であることを考えると，この実験式は現実に即していない．そこで，本研究では，まず油圧ショベルを模したロボット用いて掘削の予備実験を行い，掘削量と仕事の相関を確認する．次に，その実験データに基づき仕事から掘削量を推定可能な掘削の力学モデルを設計し，そのモデルを用いた掘削距離 (ドラッグ距離) 変化による目標量を達成する制御手法を提案する．最後に，提案手法の有効性を確認するために，油圧ショベルを模したロボットを用いて実験を行う．

4.2 掘削モデルの設計

4.2.1 掘削量とバケット仕事との関係調査のための予備実験

この節では，掘削量を推定するための掘削の力学モデルを設計する．モデルを設計する上で，バケットが土砂にはたらいた仕事 w に着目し，まず，掘削量 q と w の関係の調査のために予備実験

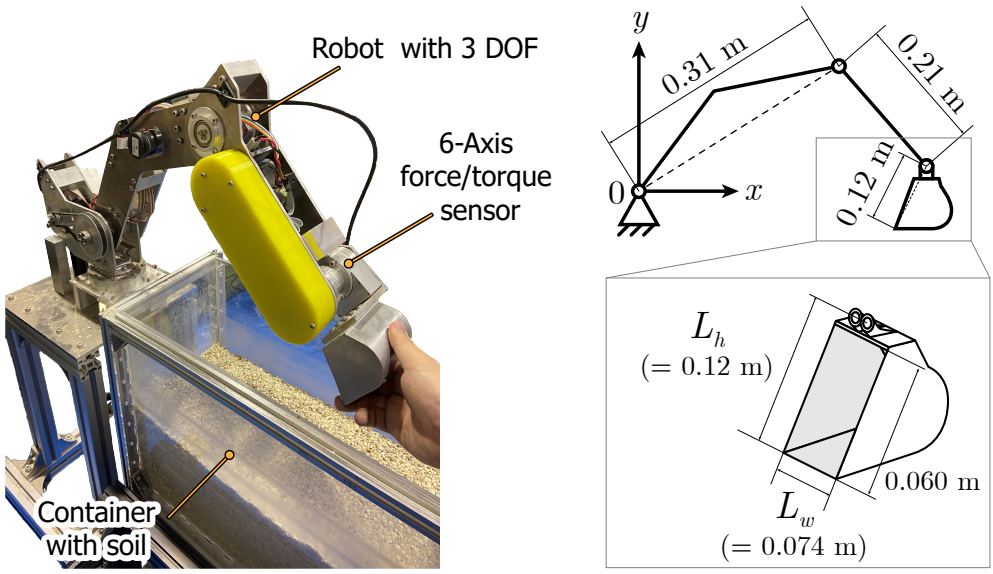


Fig.4.3: Experimental setup.



Fig.4.4: Soils used in the experiments.

を行った．実験では，ドラッグ距離や深さを変化させて複数種類の掘削を行い，掘削終了時の q と w を計測した．実験装置を Fig. 4.3 に示す．油圧ショベルを模したロボット (油圧ショベル) は，各関節にエンコーダ，バケット関節に 6 軸力/トルクセンサを搭載した 3 自由度ロボットである．w は，それらのセンサ値を用いて計算し，q はデジタル秤を用いて計測を行った．仕事の計測における油圧ショベルと油圧ショベルの測定器具の対応を Fig. 4.5 に示す． 油圧ショベルのブーム関節

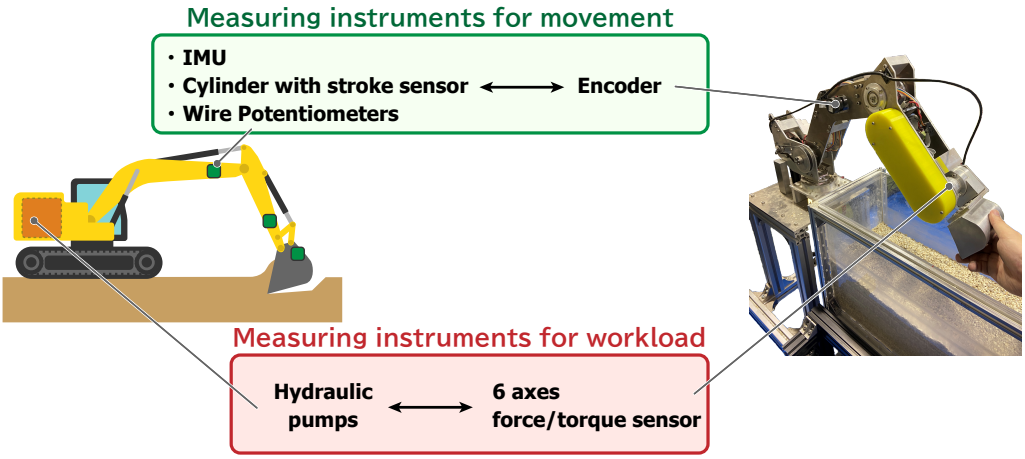


Fig.4.5: Correspondence of sensors in hydraulic excavator and the robot.

を原点とする座標系を設定し，時刻 $t = i$ における油圧ショベルの状態変数を $\boldsymbol{x}_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$ と定義する．ただし，(x_i, y_i) をバケットジョイントの位置，θ_i をバケットの向きである．ある時間 $i(0 \leq i \leq N)$ における w は，重力による仕事を除外するために，x 軸方向のみを考慮し，

$$w = \sum_{i=0}^{N} f_{x,i} \dot{x}_i \Delta t \tag{4.1}$$

と定義する．ただし，f_x はバケットが土砂にした水平方向 (x 軸方向) の力，Δt はサンプリングタイムである．重力による仕事を除外するために，x 軸方向のみを考慮する．仕事のモデル化にあたり，実験の再現性を確保し，粒子の回転成分がバケットの仕事に対して支配的になることを防ぐために，乾燥した小粒径の土砂が適切だと考え，実験においては Fig. 4.4 の粒度が異なる 2 種類の土砂 (中粒土砂，細粒土砂) を使用した． また，1 つの基本軌道を用意し，その軌道に対して初期姿勢を中心にドラッグ距離 (x 軸) と深さ方向 (y 軸) に変換することでドラッグ距離や深さが異なる 77 種類の軌道を生成し，それらを用いて各種類の土砂に対して掘削を行った．その 77 種類の軌道を深さごとに色分けして Fig. 4.6 に示し，同じ深さの軌跡において色の濃い方がドラッグ距離が長いことを表している．各実験において，実験前に土砂の表面を Fig. 4.6 の茶色線のように $y = -0.225$ m の高さで均している． 各種類の土砂における測定データ (w^m, q^m) を Fig. 4.7 に示す．各データの色は，Fig. 4.6 の軌道の色と対応している．Fig. 4.6 のデータ分布から，w が増加するにつれて，q は増加し，一定値に収束していることがわかる．ここで注目すべきは，データが土砂の種類，軌道の長さや深さに関係なく，単一曲線周辺に分布していることである．これらの実験結果から，q と w の間には，$q = f(w)$ で表される次のような関係があることがわかった:

- f は単調増加する上に凸の関数である: $\frac{df}{dw} > 0,\ \frac{d^2 f}{dw^2} \leq 0$
- f は最大掘削量 q_{max} に収束する関数である: $\lim_{w \to \infty} f(w) = q_{max}$
- f は原点を通る関数である: $f(0) = 0$

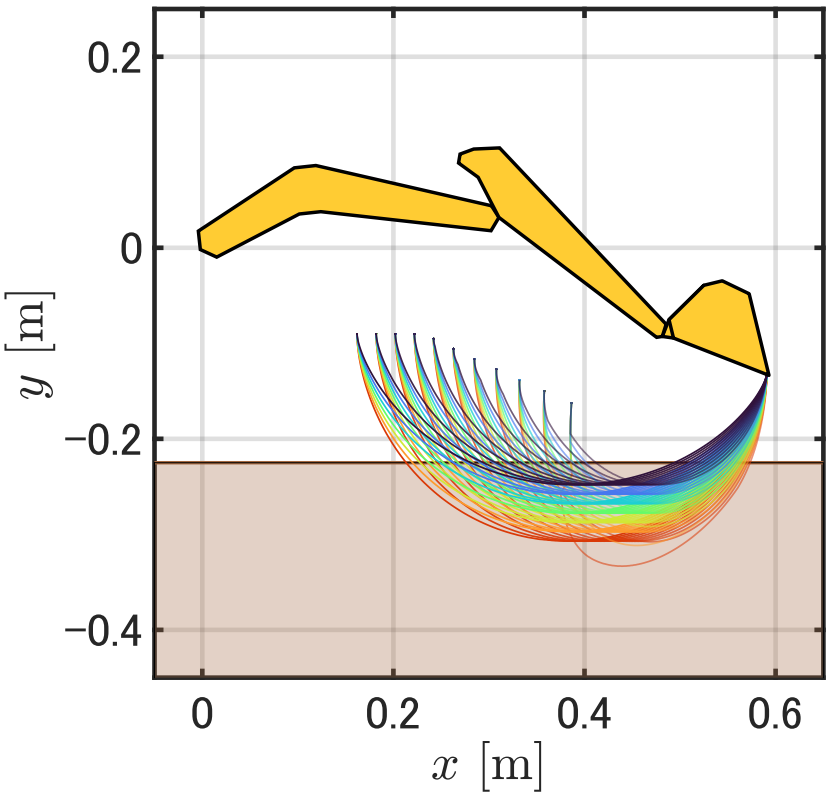


Fig.4.6: Trajectories used in the experiments.

- f は土砂に関する物理的パラメータに依存する関数である

4.2.2 掘削の力学モデルの設計

予備実験結果により得られた $q = f(w)$ の関係を満たす掘削の動的モデルを設計する． Figure 4.8 は時刻 $t = k$ の掘削を表したものである．ただし，このモデル設計における k は離散値ではなく，連続値である．微小時間 Δt において，バケットは水平力 $f_{x,k}$ を加えながら微小体積 $\Delta u_k (= \dot{u}_k \Delta t)$ を掃引する．時刻 $t = k$ における原点から土砂表面までの高さを h_k と定義する．まず，q について考える．掘削対象の土砂密度 ρ は各微小体積で一様ではないが，そのばらつきは小さいと仮定し，掘削土砂全体の平均値を用いると，q は

$$q_k = \rho v_k \tag{4.2}$$

と表現できる．ただし，v_k は Fig. 4.8 の青色領域で表されるバケット内の土砂体積である．ここで， Δu_k に対する Δv_k の割合 $(\Delta v_k / \Delta u_k \ (0 \leq \Delta v_k / \Delta u_k \leq 1))$ を考える．バケット内に十分な土砂が入っていない場合やバケットが土砂に深く差し込まれている場合は，バケット内に土砂が入り込んで易くなるため，$\Delta v_k / \Delta u_k$ が大きくなる．このことから，$\Delta v_k / \Delta u_k$ は，バケットの土砂

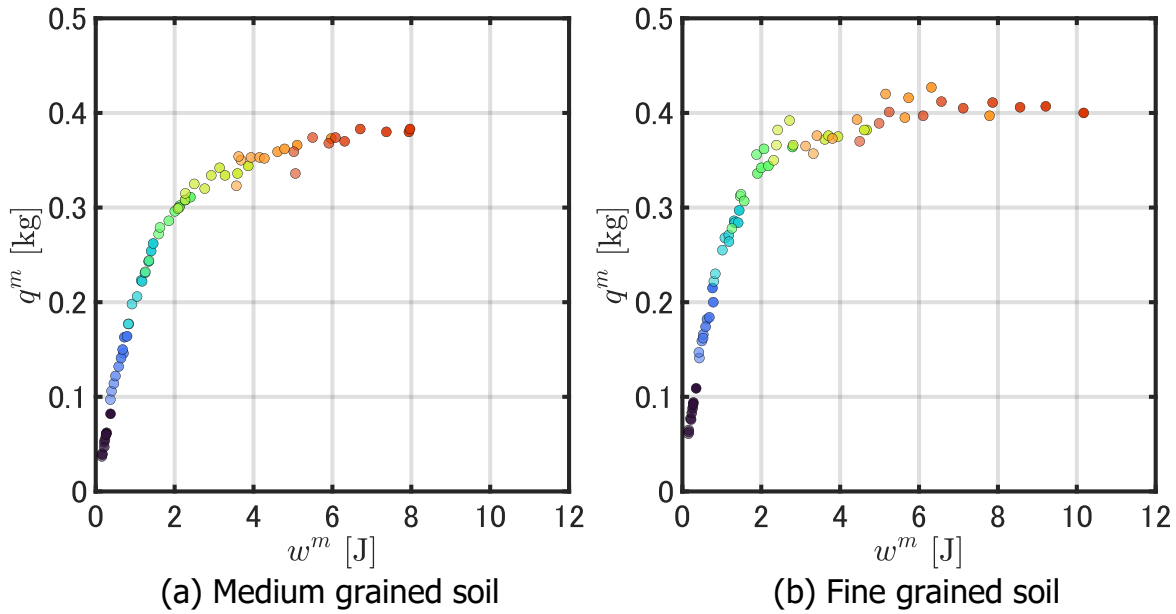


Fig.4.7: Experimental results of measured q and w for each soil type.

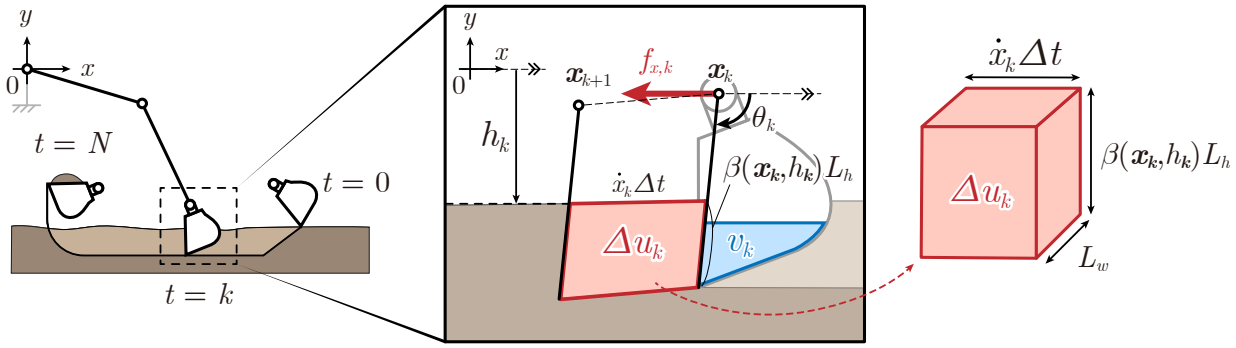


Fig.4.8: Specifications in micro-time excavation.

充填率 (Fill factor) とバケットの土砂への挿入率 (Embed factor) に依存すると考えられる．“Fill factor”は，バケットの最大体積 v_{max} に対する現在の体積 v_k の割合であり，v_{max} は JIS 等の産業標準 [78] によって定義されるものである．“Embed factor”は，バケットの関節から切り刃までの長さ L_h に対する土砂に埋め込まれた長さの割合 β であり，

$$\beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) = \frac{h_k - y_k - L_h \sin\theta_k}{L_h}, \ (0 \leq \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \leq 1) \tag{4.3}$$

と表される．よって，$\Delta v_k / \Delta u_k$ は

$$\frac{\Delta v_k}{\Delta u_k} = \left(1 - \frac{v_k}{v_{max}}\right) \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \tag{4.4}$$

と表すことができ，式 (4.2) and 式 (4.4) より，Δq_k は

$$\Delta q_k = \rho \Delta v_k = \rho \left(1 - \frac{q_k}{\rho v_{max}}\right) \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \Delta u_k \tag{4.5}$$

と表される．次に，w について考える．微小仕事 $\Delta w_k (= \dot{w}_k \Delta t)$ は，式 (4.1) の時間微分とバケットの x 軸方向速度 $\dot{x}$ を用いて，

$$\Delta w_k = f_{x,k} \dot{x}_k \Delta t \tag{4.6}$$

と表される．文献 [79] より，$f_{x,k}$ は定常掘削においては実験的に

$$f_{x,k} = 1.8 R_s L_w \left\{\beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) L_h\right\}^2 10^{-0.45(\frac{\pi}{2} - \theta_k)} \tag{4.7}$$

と表現できることが知られている．ただし，R_s は土砂の種類に依存する定数であり，各変数の表記は本論文の表記と整合を取るために文献 [79] から変更している．本研究における掘削では，深さを変化させずにドラッグ距離を変化させる掘削であるため，式 (4.7) を適用可能である．Δu_k は Fig. 4.8 のように赤色矩形で近似され，

$$\Delta u_k = \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) L_h L_w \dot{x}_k \Delta t \tag{4.8}$$

と表すことができる．ここで，パラメータ α を

$$\alpha = 1.8 R_s 10^{-0.45(\frac{\pi}{2} - \theta)} L_h \tag{4.9}$$

と定義する．挿入段階からドラッグ段階までは θ_k は大きく変化しないことから， α は土砂の種類とバケットの形状にのみ依存する定数とみなすことができる．式 (4.6) に式 (4.7) を代入することで，Δw_k は

$$\Delta w_k = \alpha \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \Delta u_k \tag{4.10}$$

と表される．式 (4.10) は，$\alpha\beta(\boldsymbol{x}_k, h_k)$ が土砂に応じた単位体積当たりの仕事，掘削抵抗であることを示している．以上，式 (4.5) と式 (4.10) より，掘削の力学モデルは，

$$\begin{cases} \dot{q}_k = \rho \left(1 - \frac{q_k}{\rho v_{max}}\right) \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \dot{u}_k \\ \dot{w}_k = \alpha \beta(\boldsymbol{x}_k, h_k) \dot{u}_k \end{cases} \tag{4.11}$$

と設計される．最後に，式 (4.11) の解を求める．式 (4.11) から $\beta(\boldsymbol{x}_k, h_k)\dot{u}_k$ を消去することで，

$$\dot{q}_k = \frac{\rho}{\alpha} \left(1 - \frac{q_k}{\rho v_{max}}\right) \dot{w}_k \tag{4.12}$$

が導かれ，ここでの ρ, α, v_{max} は定数である．式 (4.12) を時間積分することで，

$$q_k = \rho v_{max} \left\{1 - \exp\left(-\frac{w_k}{v_{max}\alpha}\right)\right\} \tag{4.13}$$

が導かれる．ただし，$q_0 = 0$，$w_0 = 0$ の境界条件を用いて積分定数を決定している．

提案モデルの有効性を検証するために，Fig. 4.7 の実験データを用いて式 (4.13) への近似を行った．$v_{max} = 2.70 \times 10^{-4}$ m^3 を用いて，非線形最小二乗法により ρ と α を同定した．土砂の種類ごとの ρ と α の同定値を Table 4.1 に，その同定値を用いた曲線を Fig. 4.9 に示す．また，Table 4.1 には ρ の計測値を示す．Figure 4.9 から，提案モデルが掘削における土砂の力学を良く表現していることがわかる．加えて，ρ の同定値と計測値は非常に近い値であり，これは提案モデルが有効であることを示している．ただし，提案モデルを実際の作業現場に適用するためには，事前の掘削による少なくとも 2 つの独立データを用いて，ρ と α のパラメータを同定する必要がある．

Table 4.1: The optimized and identified value of ρ and α for each soil condition.

	Medium grained soil		Fine grained soil	
Parameter	Optimized value	Identified value	Optimized value	Identified value
ρ [kg/m^3]	1.35 $\times 10^3$	1.33 $\times 10^3$	1.46 $\times 10^3$	1.53 $\times 10^3$
α [kg/(m $\cdot$ s^2)]	4.65 $\times 10^3$	-	3.73 $\times 10^3$	-

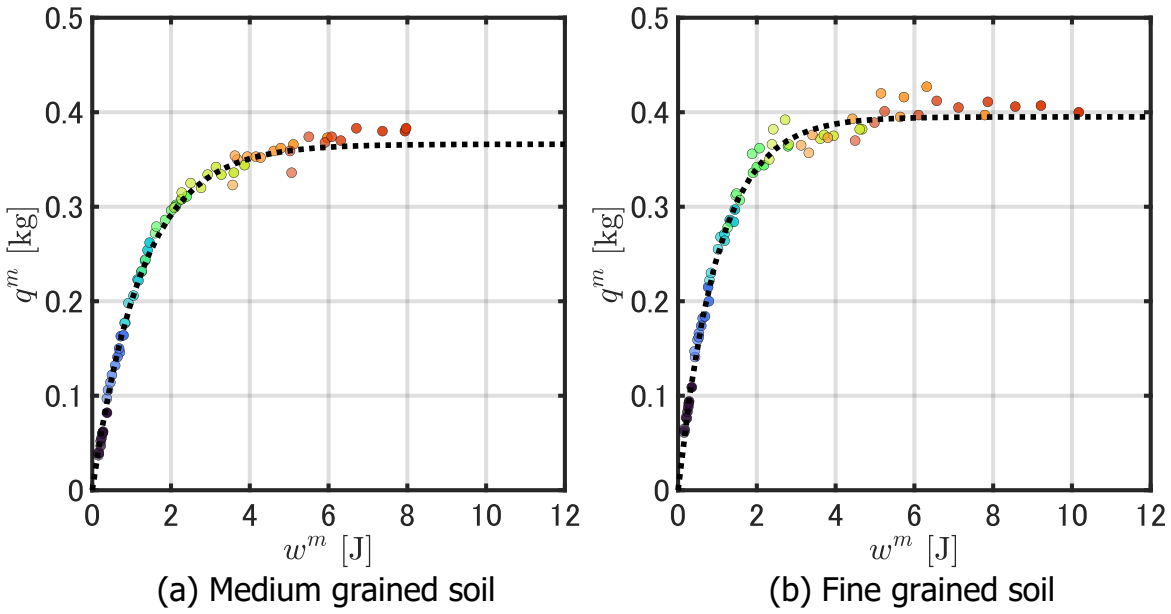


Fig.4.9: Optimized lines of the relation between q and w for each soil condition.

4.3 ドラッグ距離変化による掘削量の制御

この節では，提案する掘削の力学モデルを用いて目標掘削量 q^{ref} を達成する制御手法を提案する．本制御における制御パラメータは，掃引体積 u を決めるドラッグ距離である．式 (4.11) より，q は u より計算可能である．しかし，β には h の情報が必要である．土砂の表面は凹凸や斜面等の様々な状態をしており，h は未知パラメータである．そのため，式 (4.11) における $\dot{w}$ と $\dot{u}$ の関係

を用いて，$\dot{w}$ から土砂の高さの推定値 $\hat{h}$ を求める．$\dot{w}$ はバケット関節に取り付けた力センサとモータのエンコーダのセンサ値により算出し，$dotu$ はバケットの運動学から算出する．以下では，その制御アルゴリズムについて説明する．基本軌道は，予め次式のように定義されているものとする．

$$\Xi^r = \{\boldsymbol{\xi}_0^r \quad \boldsymbol{\xi}_1^r \quad \boldsymbol{\xi}_2^r \quad \cdots \quad \boldsymbol{\xi}_N^r\} \tag{4.14}$$

ただし，各 $\boldsymbol{\xi}_i^r = [x_i'^r, y_i'^r, \theta_i'^r]^T$ $(0 \leq i \leq N-1)$ は条件

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}_{i+1}^r - \boldsymbol{\xi}_i^r & \neq 0 \\ x_{i+1}'^r - x_i'^r & \geq 0 \\ \theta_{i+1}'^r - \theta_i'^r & \leq 0 \end{cases} \tag{4.15}$$

を満たすものとする．これらの条件は，掘削中にバケットが前進し続け，戻らないことを表している．ここで，変形後の軌道を

$$X^r = \{\boldsymbol{x}_0^r \quad \boldsymbol{x}_1^r \quad \boldsymbol{x}_2^r \quad \cdots \quad \boldsymbol{x}_N^r\} \tag{4.16}$$

と定義し，式 (4.14) に対して，初期値 ξ_0 を中心としたドラッグ距離方向 (x 軸) への座標変換を適用すると，変形後の軌道 $\boldsymbol{x}_k$ は，

$$\boldsymbol{x}_k^r = \begin{bmatrix} r_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_k^r + \begin{bmatrix} 1-r_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_0^r \tag{4.17}$$

となる．ただし，r_k はドラッグ距離方向の拡大係数である．油圧ショベルは，この式 (4.16) に対して位置制御される．式 (4.17) より，動的モデルに基づいて決定される r_k によって制御パラメータであるドラッグ距離を変化させる．

r_k は以下のアルゴリズムで導出される．このプロセスでは，$q-w$ の関係が非線形であるため，オンライン反復計算が必要となる．

Step 1 q^{ref} を設定する．

Step 2 q^{ref} に対応した目標仕事 w^{ref} を式 (4.13) の逆関数

$$w^{ref} = -\alpha v_{max} \log \left| 1 - \frac{q^{ref}}{\rho v_{max}} \right| \tag{4.18}$$

を使用して求める．

Step 3 バケットが土砂に接触したとき，制御を開始する $(t=0)$．本研究では，バケットに取り付けられた力センサによって接触を検知した．同時に，バケットが接触したときの土砂の高さを $\hat{h}_0$ と設定する．

Step 4 時刻 $t=k$ において，力センサで $f_{x,k}$ を，エンコーダで $\boldsymbol{x}_k, \dot{\boldsymbol{x}}_k$ を計測し，それらセンサ値かを用いて式 (4.1), 式 (4.6) より $w_k, \dot{w}_k$ を計算する．ただし，このアルゴリズムにおける k は離散値である．

Step 5 式 (4.11) を満足するような $\hat{h}_k$ を求める．まず，運動学より，$\dot{u}_k$ を求める．次に，式 (4.11) における $\dot{w}_k$ に対して 1 次の Tayler 展開を行い，

$$\dot{w}_k = \alpha\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)\dot{u}_k + \left(\alpha\frac{\partial\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)}{\partial h}\dot{u}_k + \alpha\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)\frac{\partial\dot{u}_k}{\partial h}\right)\Delta h_k \tag{4.19}$$

が導出され，$\hat{h}_k$ の変化量 Δh_k は，

$$\Delta h_k = \left(\alpha\frac{\partial\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)}{\partial h}\dot{u}_k + \alpha\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)\frac{\partial\dot{u}_k}{\partial h}\right)^{-1}\left(\dot{w}_k - \alpha\beta(\boldsymbol{x}_k, \hat{h}_k)\dot{u}_k\right) \tag{4.20}$$

と求められる．よって，Δh_k を使って $\hat{h}_k$ を

$$\hat{h}_k \leftarrow \hat{h}_k + \delta_h\Delta h_k \tag{4.21}$$

と更新する．ただし，δ_h は重みパラメータであり，試行錯誤的に決定されるものである．この更新計算を数回繰り返す．

Step 6 最終的な仕事の予測値 w_N が w^{ref} となるような r_k を求める．まず，X^r の中から $\boldsymbol{x}_k$ に対して最近傍となる $\boldsymbol{x}_n^r$ を探索する．w^{ref} を達成するには，残りの軌道である $\boldsymbol{x}_{n+1}$ から $\boldsymbol{x}_N$ が

$$w^{ref} = w_k + \sum_{i=n}^{N}\alpha\beta(\boldsymbol{x}_i^r, \hat{h}_k)\hat{\dot{u}}_i\Delta t \tag{4.22}$$

を満たす必要がある．ただし，$\hat{\dot{u}}_i$ は $\dot{u}_i$ の予測値であり，

$$\hat{\dot{u}}_i = -\frac{L_w\beta(\boldsymbol{x}_i^r, h_k)L_h(x_{i+1}^r - x_i^r)}{\Delta t} \tag{4.23}$$

と定義されるものである．次に，$\boldsymbol{x}_i^r$ は r_k を用いた式 (4.17) によって定義されることから，Δr_k は

$$w^{ref} = w_k + \sum_{i=n}^{N}\alpha\beta(\boldsymbol{x}_i^r, \hat{h}_k)\hat{\dot{u}}_i\Delta t + \sum_{i=n}^{N}\alpha\left(\frac{\partial\beta}{\partial x_i^r}\frac{\partial x_i^r}{\partial r_k}\hat{\dot{u}}_i + \beta(\boldsymbol{x}_i^r, \hat{h}_k)\frac{\partial\hat{\dot{u}}_i}{\partial r_k}\right)\Delta t\Delta r_k \tag{4.24}$$

と求められる．よって，Δr_k を用いて r_k を

$$r_k \leftarrow r_k + \delta_r\Delta r_k \tag{4.25}$$

と更新する．ただし，δ_r は重みパラメータであり，試行錯誤的に決定されるものである．この更新計算を数回繰り返す．

Step 7 更新された Δr_k を用いて， X^r を更新する．

Step 8 $\hat{h}_k, r_k$ を $\hat{h}_{k+1}, r_{k+1}$ に更新する．Steps 4-8 をサンプリング時間ごとに繰り返し行う．

以上より，仕事率と仕事に応じてドラッグ距離を制御することで，q^{ref} を達成する掘削軌道を実現する．

提案手法の特徴を以下にまとめる．

- 仕事 w と掘削量 q 間の関係に着目し，バケットの掃引体積 u を利用して掘削の力学モデル (式 (4.11)) とその解 (式 (4.13)) を導出した．式 (4.13) は，Fig. 4.9 のように予備実験の結果と一致していることを確認した．
- 提案モデルにおいて，事前に同定が必要な未知パラメータは α と ρ の 2 つのみであり，モデルは少ないデータ数で設計可能である．
- 提案アルゴリズムは，測定されたバケット仕事率から土砂の高さを推定し，その推定値を用いてドラッグ距離を変化させることで掘削量を制御するものである．

4.4 提案手法の実験検証

4.4.1 実験概要

この節では，実験により提案手法の有効性を検証する．実験においては，Fig. 4.3 や Fig. 4.4 と同じ実験装置及び土砂を用いる．様々な q^{ref} を設定し，提案手法を用いてロボットによる掘削を行い，実際の掘削量 q^m を測定した．Ξ のメモリ使用量を減らすために，非線形ダイナミクス

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + f(\boldsymbol{x}_k) \tag{4.26}$$

を利用した．Ξ をアトラクタとして埋め込むことで，初期値 $\boldsymbol{x}_k$ が与えられると $\boldsymbol{x}_{k+1}$ から $\boldsymbol{x}_N$ まで $\boldsymbol{x}_k$ が自律的に生成される [80]．この式 (4.26) から生成された目標姿勢 $\boldsymbol{x}$ に対し関節角度を求め，この関節角度に対して PD 制御を行っており，サンプリングタイム $\Delta t = 5.0$ msec で PD 制御を含む提案アルゴリズムの一連の処理を行った．加えて，アルゴリズムの Step5 と Step6 において，$\delta_h = 0.3$, $\delta_r = 0.05$ と設定し，繰り返し計算回数は 10 回とした．また，各掘削の前に土砂の表面を一定の高さ h に均した．

4.4.2 中粒土砂への掘削検証

まず，一定の高さ $h = -0.255$ m で Fig. 4.4(a) の中粒土砂に対して掘削を行い，提案手法によって q^{ref} が達成可能か検証を行った．使用したパラメータを Table 4.2 に示す．ただし，r_0 は r_k の初期値である．q^{ref} は，バケットの最大掘削量の約 90% となるように $325untg$ から $365untg$ までの $5untg$ 刻みで計 9 種類を設定し，各 q^{ref} に対して 1 回，合計 9 回の実験を行った． 実験時のロボットの掘削動作として，$q^{ref} = 365$ g のときを Fig. 4.10 に示す． $q^{ref} = 325$ g と $q^{ref} = 365$ g の場合の掘削の比較を Fig. 4.11 に示す．$q^{ref} = 325$ g におけるバケット手先の軌道を黒色線，推

Table 4.2: The values of the parameters used in the excavation to the medium grained soil.

Parameter	ρ [kg/m^3]	α [kg/(m $\cdot$ s^2)]	v_{max} [m^3]	h [m]	r_0 [−]
Value	1.36 $\times 10^3$	4.13 $\times 10^3$	2.70 $\times 10^{-4}$	-0.225	0.300

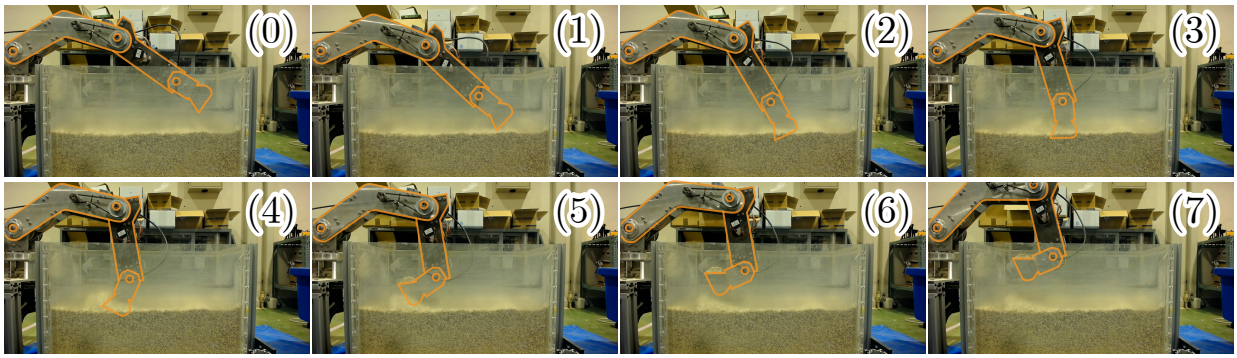


Fig.4.10: Excavation with the autonomous control system. The figure shows the motion of the excavation for $q^{ref} = 365$ g.

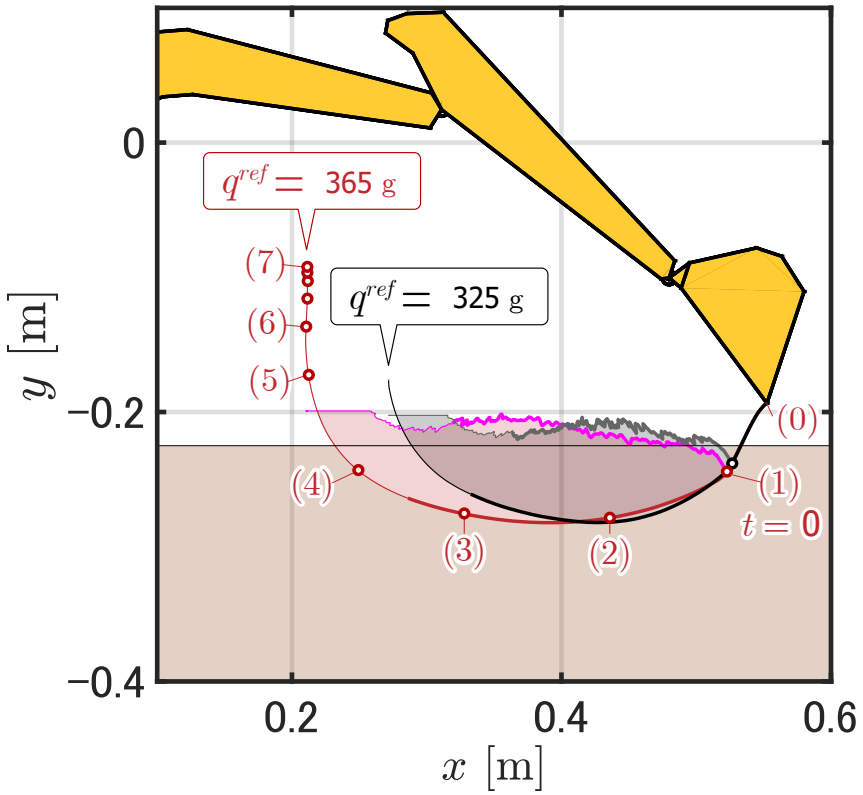
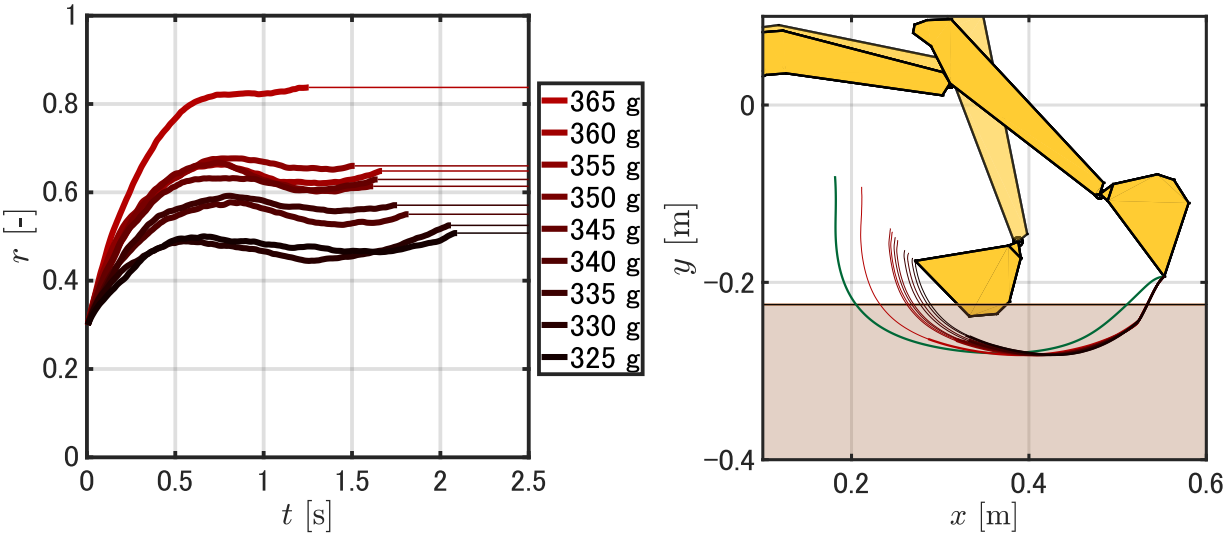


Fig.4.11: Comparison between the excavation for $q^{ref} = 325$ g and the excavation for $q^{ref} = 365$ g.

定土砂高さ $\hat{h}$ を灰色線で示し，$q^{ref} = 365$ g におけるバケット手先の軌道を赤色線，$\hat{h}$ を桃色線で示す．こられの線において，実線はその動作中にアルゴリズムが動作していることを意味し，細線は r が変化しても掃引体積が変化しない掬い上げの段階に入り掘削距離が変化していないことを表している．赤色線上の番号 (0)-(7) は，Fig. 4.10 の番号 (0)-(7) に対応している．また，アルゴリズムは (1) のとき ($t = 0$) に開始しており，(1)-(7) の赤丸は 0.5 秒間隔で配置している．各 q^{ref} の $\hat{h}$ の形状は，土砂がバケットによって掃引されるときには盛り上がり，掬い上げるときには崩れる実際の現象と一致する．バケットの土砂の掃引体積 u は，各 $hath$ と軌道で囲まれた領域の面積である．$q^{ref} = 365$ g においては，$q^{ref} = 325$ g よりドラッグ距離が長く，u が大きいことがわかる．

次に，各 q^{ref} に対する r の時間変化を Fig. 4.12(a) に，バケットの手先軌道を Fig. 4.12(b) に示す．q^{ref} ごとに色を分けて表示しており，Fig. 4.12(a) と Fig. 4.12(b) の色は対応している．Fig. 4.12(b) における緑線は，基本軌道 Ξ^r を表している．Fig. 4.12(a) より，q^{ref} が大きくなるに連れて，r_k の最終的な値が大きくなっていることわかり，Fig. 4.12(b) より，q^{ref} が大きくなるに連れて，ドラッグ距離が長くなっていることがわかる．

次に，各 q^{ref} に対する w の時間変化を Fig. 4.13 に示す．各線の色は Fig. 4.12 と対応している．各水色破線は，各 q^{ref} に対応する目標仕事 w^{ref} を表している．各 q^{ref} において，w は最終的に w^{ref} に収束しており，仕事の制御を達成していることがわかる．



(a) Time variety of r (b) Trajectories of bucket

Fig.4.12: Comparison of the trajectories of the excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system.

最後に，各 q^{ref} に対する q^m を Fig. 4.14 に示す．各データの色は，Fig. 4.12 と対応している．黒色破線は，$q^m = q^{ref}$ を表している．加えて，q^{ref} に対するデータの二乗平均平方根誤差 (RMSE)σ を計算すると，$\sigma = 3.14$ g であった．これは，最大掘削量 $q_{max} = \rho v_{max} \sim 374$ g に対して約

0.840% であり，十分に小さい値である．Fig. 4.14 において，q^{ref} が大きくなるに連れて誤差が大きくなるのは，q^{ref} が大きい場合，最大掘削量に近い掘削となり，掃引した土砂が崩れやすいためだと考えられる．以上の実験結果から，一定の土砂高さで中粒土砂に対する掘削の場合，提案手法によって目標量掘削が達成可能であることを確認した．

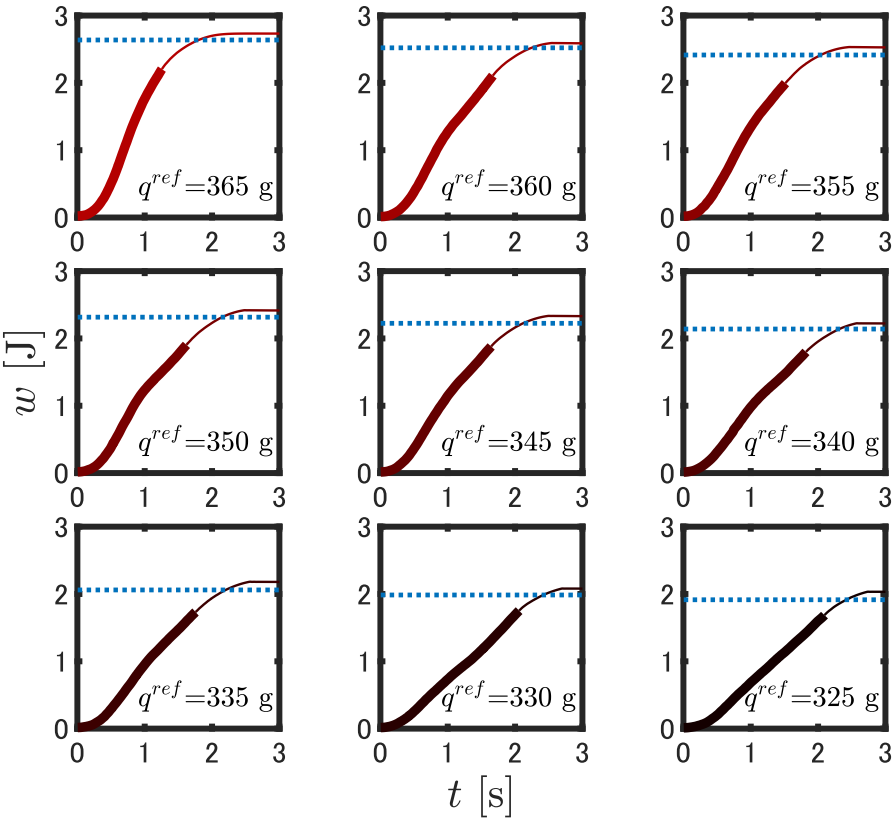


Fig.4.13: The time variations of w in the excavations to the medium grained soil for each q^{ref}.

4.4.3 異なる土砂高さ h での掘削

次に，異なる h を設定した場合も提案手法によって q^{ref} が達成可能か検証を行った．掘削前の h は-0.225 m から-0.234 m まで 0.003 m 刻みの計 4 種類を設定した．土砂の種類，基本軌道，パラメータ，q^{ref} は 4.4.2 章と同じものを使用した．h と q^{ref} の各組ごとに一回ずつ，計 36 回の実験を行った．ただし，$h = -0.225$ m においては，4.4.2 章のデータを用いた． 各 h における r の時間変化とバケットの手先軌道を Fig. 4.15 に示す．h が変化しても，同じ q^{ref} に対しては u は同じある．そのため，h が低くなるに応じて，各 q^{ref} における r の最終的な値は大きくなり，ドラッグ距離が長くなっている．

各 h における，q^{ref} に対する q^{m} を Fig. 4.16 に，σ を Table 4.3 に示す．Table 4.3 における σ の平均値は 4.48 g であり，これは $q_{max} \sim 374$ g に対して約 1.20% であることから，各 h における

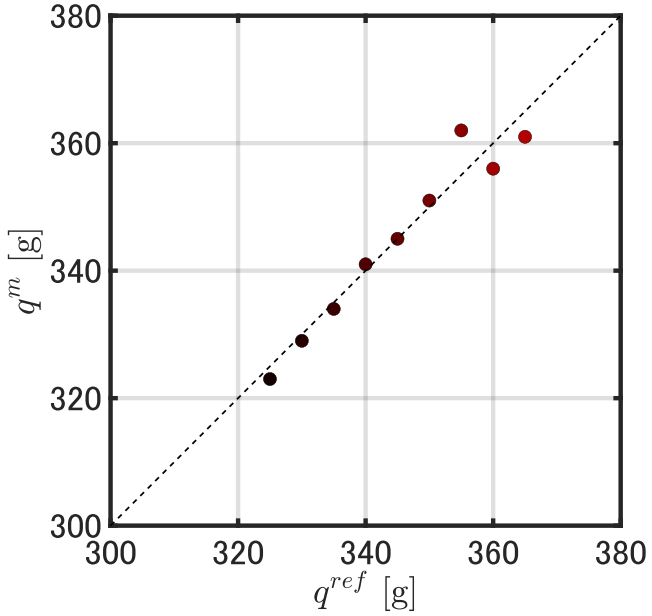


Fig.4.14: q^m for $q^{ref} = 330$ g $\sim$ 365 g using the medium grained soil.

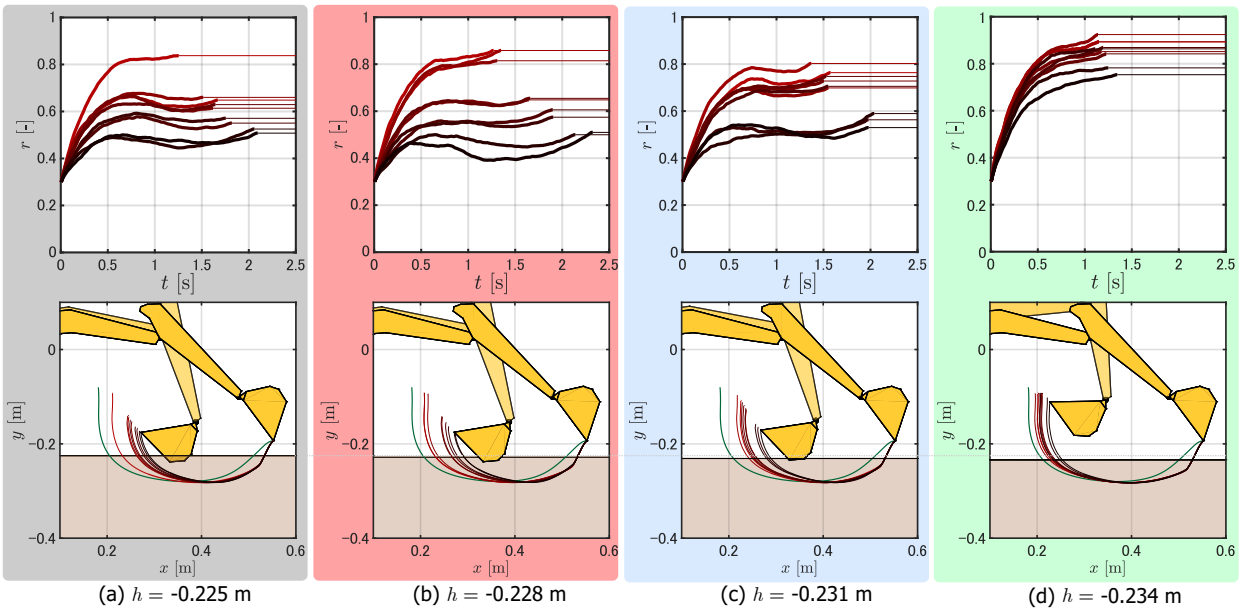


Fig.4.15: Comparison of r and the excavation with a change in h.

q^m と q^{ref} はほぼ一致している．以上の実験結果から，異なる h を設定した場合も提案手法によって目標量掘削が達成可能であることを確認した．

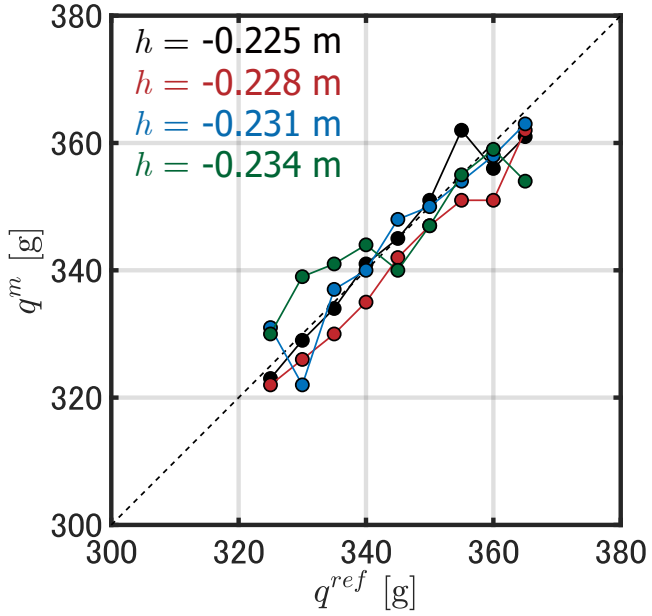


Fig.4.16: q^m for q^{ref} with a change in h. The data for each h is represented by a different color.

Table 4.3: σ for each h.

h[m]	-0.225	-0.228	-0.231	-0.234
σ[g]	3.14	4.07	3.68	5.91

4.4.4 細粒土砂への掘削検証

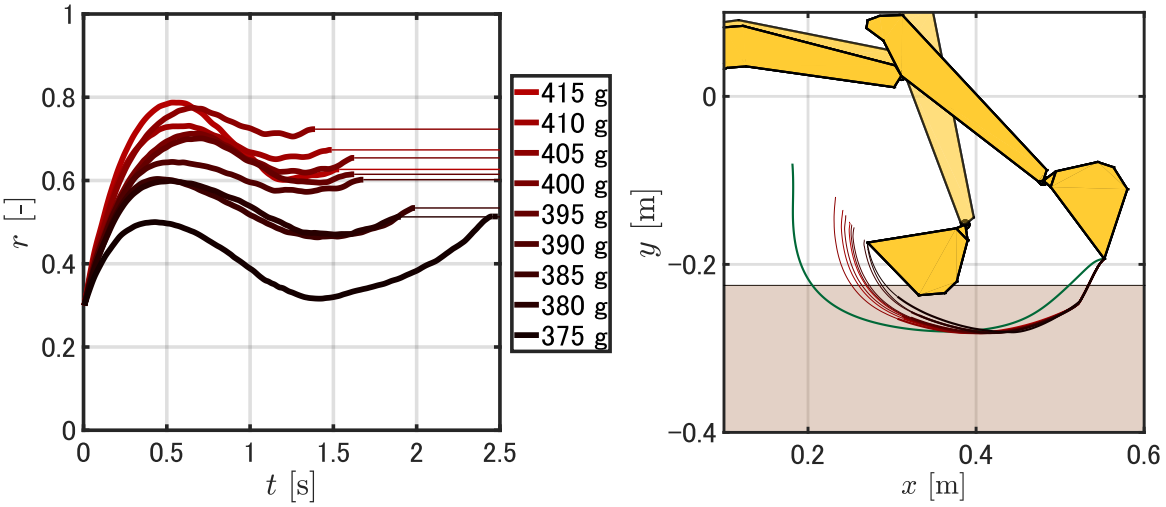
最後に，種類の異なる土砂の場合も提案手法によって q^{ref} が達成可能か検証を行った．細粒土砂を用いて，4.4.2 章と同様の実験を行った．q^{ref} は，バケットの最大掘削量の約 90% となるように 375 g から 415 g までの 5 g 刻みで計 9 種類を設定し，各 q^{ref} に対して 1 回，合計 9 回の実験を行った．他のパラメータは Table 4.4 のように設定した． 各 q^{ref} に対する r の時間変化を Fig. 4.17(a)

Table 4.4: The values of the parameters used in the excavation to the fine grained soil.

Parameter	ρ [kg/m^3]	α [kg/(m $\cdot$ s^2)]	v_{max} [m^3]	h [m]	r_0 [−]
Value	1.50 $\times 10^3$	3.68 $\times 10^3$	2.70 $\times 10^{-4}$	-0.225	0.300

に，バケットの手先軌道を Fig. 4.17(b) に Fig. 4.12 と同様に示す．Fig. 4.17(a) と Fig. 4.17(b) の色は対応している．中粒土砂への掘削実験と同様に，q^{ref} に応じて r と軌道が変化していることがわかる．次に，各 q^{ref} に対する w の時間変化を Fig. 4.19 に，Fig. 4.13 と同様に示す．Figure 4.19 より，各 q^{ref} において w が最終的に w^{ref} に収束していることがわかる．最後に，q^{ref} に対する q^m を Fig. 4.19 に示す．また，Fig. 4.19 における σ は 5.00 g であり，これは $q_{max} \sim 405$ g に対して約 1.23% であることから，q^m と q^{ref} はほぼ一致している．中粒土砂と比較して，q^{ref} 全体に渡っ

て誤差が大きいのは，粒度が小さい分動きやすく，崩れやすいためであると考えられる．以上の実験結果より，種類の異なる土砂を設定した場合も提案手法によって目標量掘削が達成可能であることを確認した．



(a) Time variety of r (b) Trajectories of bucket

Fig.4.17: Comparison of the trajectories of the excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system in excavating fine grained soil.

4.4.5 議論

以上の実験結果全体をまとめると，以下の通りである．

1. 掘削の力学モデルにおいて, 以下のような仮定を設定した:
   (a) 掘削量は，バケットの仕事によって決定する．
   (b) バケットの仕事は，バケットの掃引体積によって決定する．
   実験結果は，掘削においてこれらの仮定が成立することを示している．
2. 提案するアルゴリズムにおいて，h は 式 (4.11) における $\dot{w}$ と $\dot{u}$ の関係から推定するが，この h は真の土砂高さを表すパラメータではなく，ρ と α の誤差を吸収するパラメトリックパラメータである．例えば，真の ρ が同定した rho より大きければ，土砂高さは高く推定され，q は q^{ref} より ρ の誤差分だけ大きく推定される．これにより，提案手法は誤差に比較的強く柔軟な制御となっている．
3. 実際の現場では，作業効率を高めるために q^{ref} を $q_{max}(=\rho v_{max})$ と設定することが多い．このような場合，提案手法により，適切なドラッグ距離によるエネルギー的にも高効率な掘削を達成可能である．

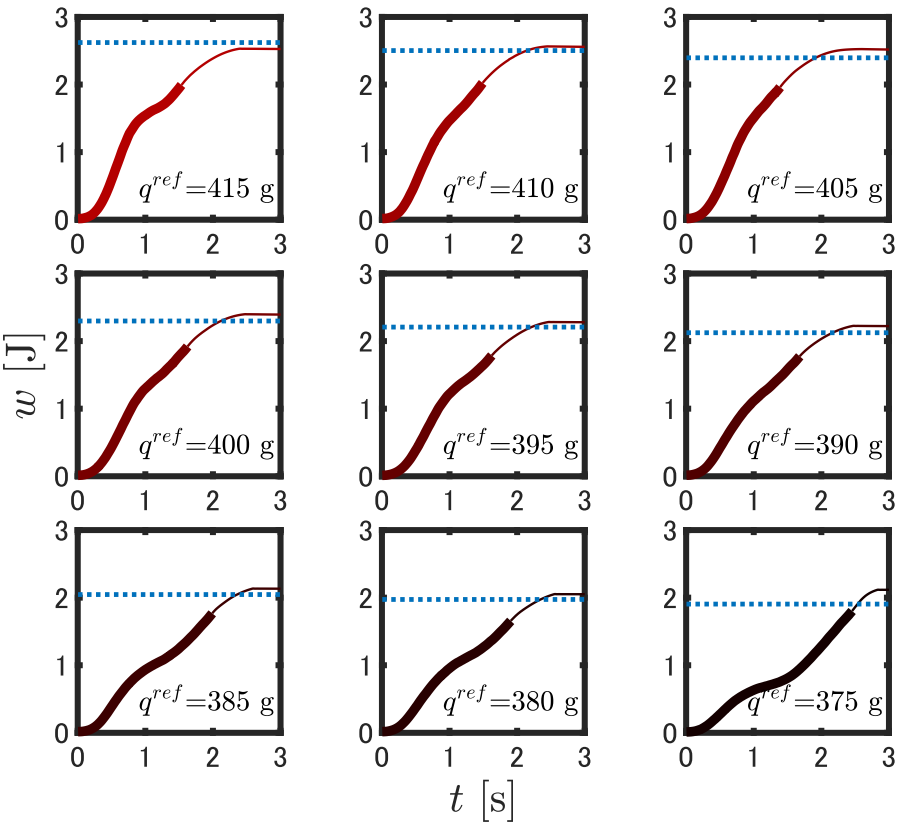


Fig.4.18: The time variations of w in the excavations to the fine grained soil for each q^{ref}.

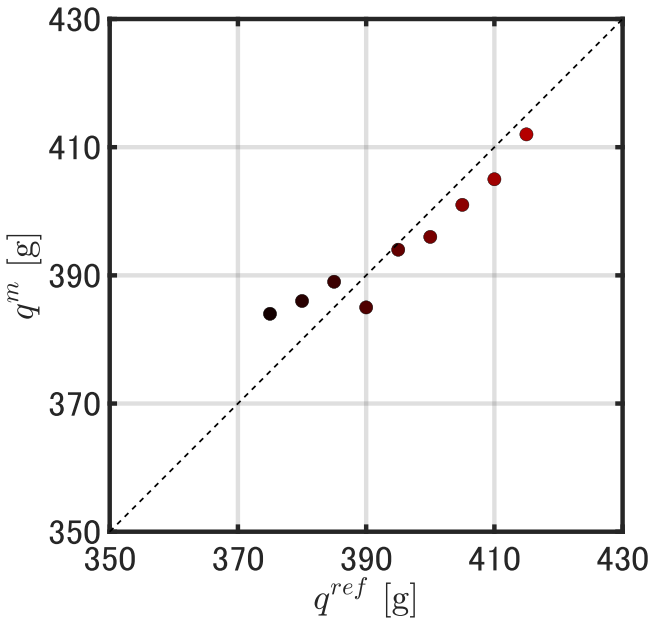


Fig.4.19: q^m for q^{ref} = 375 g - 415 g using the fine grained soil.

4.5 おわりに

本章では，掘削距離に関する自律制御系のために，ドラッグ距離を制御パラメータとした土砂の掘削量を達成する自律制御を提案した．その中で，オンラインでの掘削量推定を達成するために，バケットが土砂にした仕事に着目し，掘削量と掃引体積の関係に基づく新たな掘削モデルを設計した．この提案手法を用いた目標量掘削実験を行い，平坦な土砂に対して掘削目標量に近い量を掘削し，提案手法の有効性を確認した．



第 5 章

土砂の特性変化に対する自律制御系のロバスト性検証

5.1 はじめに

本章では，第 4 章で提案した自律制御系が土砂の特性が変化する非平坦な土砂への掘削においても適用可能であることを検証する．掘削作業では，ダンプトラックへの積み込み作業や溝堀作業のために複数回の掘削を連続して行うものであり，作業者は各掘削において作業効率を高めるためにバケットを満杯にしようとする．この複数回の掘削作業において，熟練者は負荷を小さくするために，深さを浅くし，ドラッグ距離を長い掘削を行う傾向にあることが報告されている [81]．このような掘削においては，Fig. 5.1 のように 1 回目の掘削は平坦な土砂に対して行い，2 回目以降はその前の掘削で生成された盛り土を含む非平坦な土砂に対して掘削を行うことになる．よって，2 回目以降の掘削の土砂表面は非一様な形状となるため，操作者は土砂の挙動を予測しづらくなり，バケットを満杯にするために油圧ショベルを過剰に動かすこととなり，エネルギー効率の低下が予想される．文献 [81] において，2 回目以降の掘削では，作業経験が浅い未熟練者は熟練者と比較して低エネルギー効率な操作を行っている．

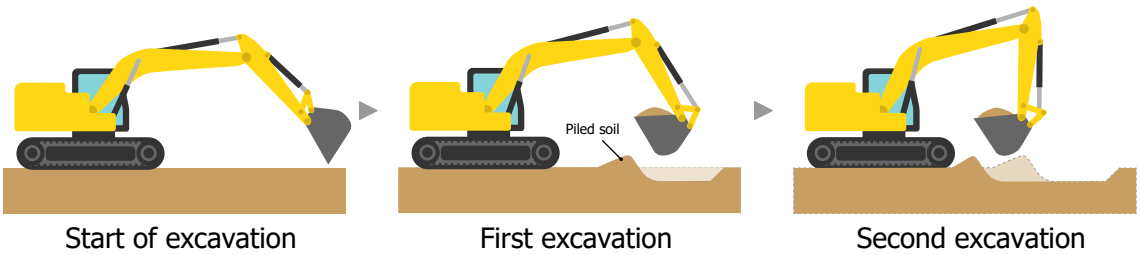


Fig.5.1: Multiple excavation.

提案手法ではバケットの仕事率から土砂の形状推定を行うことから，提案手法を適用すれば 2 回目以降の掘削においても高い作業効率で適切な掘削量を達成できると期待される．まず，平坦な土砂と非平坦な土砂における掘削量と仕事の関係の差異を実験により確認するとともに，提案する掘

削モデルが適用可能か検証する．次に，非平坦な土砂に対して提案手法による実験検証を行い，土砂の特性変化に対する提案手法のロバスト性を確認する．

5.2 平坦と非平坦土砂の掘削における差異

非平坦土砂への掘削における仕事と掘削量の関係と高エネルギー効率な掘削を実現するために提案手法が有効かを確認するために，4.4 章と同様の油圧ショベルを模したロボット (Fig. 4.3) を用いた掘削による実験検証を行った．中粒の平坦土砂 (Fig. 4.4(a)) と非平坦土砂に対して掘削距離が異なる軌道を用いて掘削を行い，掘削終了時の仕事 w^m や掘削量 q^m を計測した．w^m や q^m の計測は，4.4 章と同様の方法で行った．掘削軌道として Fig. 5.3 の (i) から (iv) の時系列データを用意し，掘削距離が異なる軌道として (i)(ii)，非平坦土砂を形成する軌道として (iii)，バケット最大量を掘削する軌道として (iv) を用いた． 実験手順を説明する．平坦土砂への掘削においては，

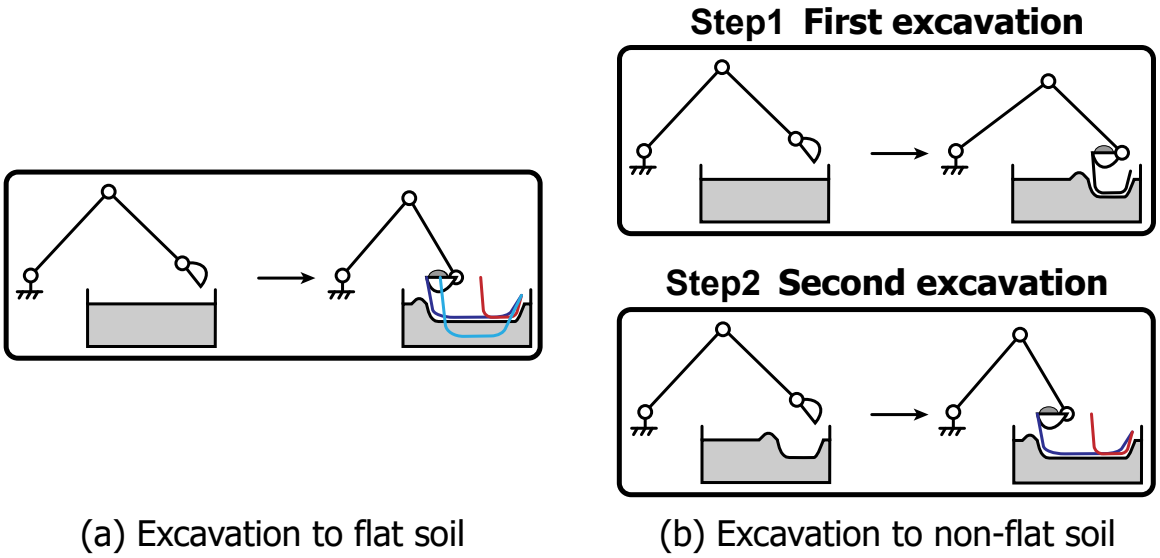


Fig.5.2: Experimental procedure for comparison of excavation between to flat and non-flat soil.

Fig. 5.2(a) のように平坦土砂に対して軌道 (i)(ii)(iii) による掘削を行った．非平坦土砂への掘削においては，Fig. 5.2(b) のように，まず平坦土砂に対して軌道 (iv) による掘削を行い，非平坦土砂を形成した後に，Fig. 5.3 における軌道 (i)(ii) による掘削を行った． 軌道 (i)(ii)(iii) の w^m と q^m の実験結果を Fig. 5.4 に示す． 平坦土砂への掘削の結果を'*'，非平坦土砂への掘削結果を' ○' で

Table 5.1: The values of the parameters used in the second excavation to the medium grained soil.

Parameter	ρ [kg/m^3]	α [kg/(m $\cdot$ s^2)]	v_{max} [m^3]	r_0 [−]
Value	1.32 $\times 10^3$	4.69 $\times 10^3$	3.07 $\times 10^{-4}$	0.300

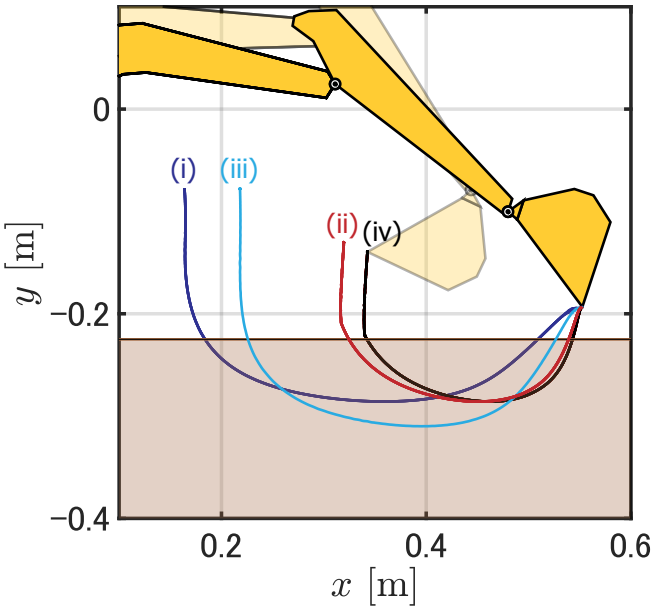


Fig.5.3: Trajectories used in the experiment.

表し，軌道の種類を Fig. 5.3 における軌道の色で表す．また，Table 5.1 の同定パラメータによる式 (4.13) を黒色破線，その 99% 信頼区間を灰色領域で表し，軌道 (i)(ii)(iii) でのバケット内土砂を写真で示す．軌道 (i)(ii) において，非平坦土砂への掘削結果は，同軌道であっても掘削される土砂が少ないため平坦土砂への掘削よりも仕事及び掘削量が少なくなっているが，同定曲線付近に分布しており，非平坦土砂への掘削においても掘削モデルにより仕事と掘削量の関係を表現可能であるといえる．軌道 (ii) の非平坦土砂への掘削結果が 99% 信頼区間外であるのは，Fig. 5.5 のように掘削 1 回目の軌道 (iv) で生じた盛り土を少ない x 軸方向の仕事で掘ったためである． エネルギー効率の観点において，青色領域内データの掘削は掘削量が軌道 (iii) の写真のようにバケット最大量 ρv_{max}(掘削量の収束値) に近いためエネルギー効率が低く，逆に赤色領域内データの掘削はエネルギー効率が高いことを表している．掘削においては，Fig. 5.4 の緑色領域のように高エネルギー効率かつ適切な量を掘削する，つまり高作業効率であることが求められる．非平坦への掘削において，Fig. 5.4 の緑色領域のような掘削を実現するためには，掘削距離が軌道 (i) と (ii) の間となる軌道で掘削する必要がある．以上より，高エネルギー効率且つ高作業効率な掘削の実現には，土砂の状況に応じて適切な距離で掘削することが重要であり，我々の提案手法が活用できる．

5.3 実験検証

非平坦土砂に対して提案手法の有効性を検証するために，4.4 章と同じ装置と土砂を用いて実験検証を行った．Fig. 5.2(b) のように，まず非平坦土砂を形成するために固定軌道で掘削を行い，その後，目標掘削量 q^{ref} を設定し，提案手法の自律制御系を用いて非平坦土砂への掘削を行い，掘削

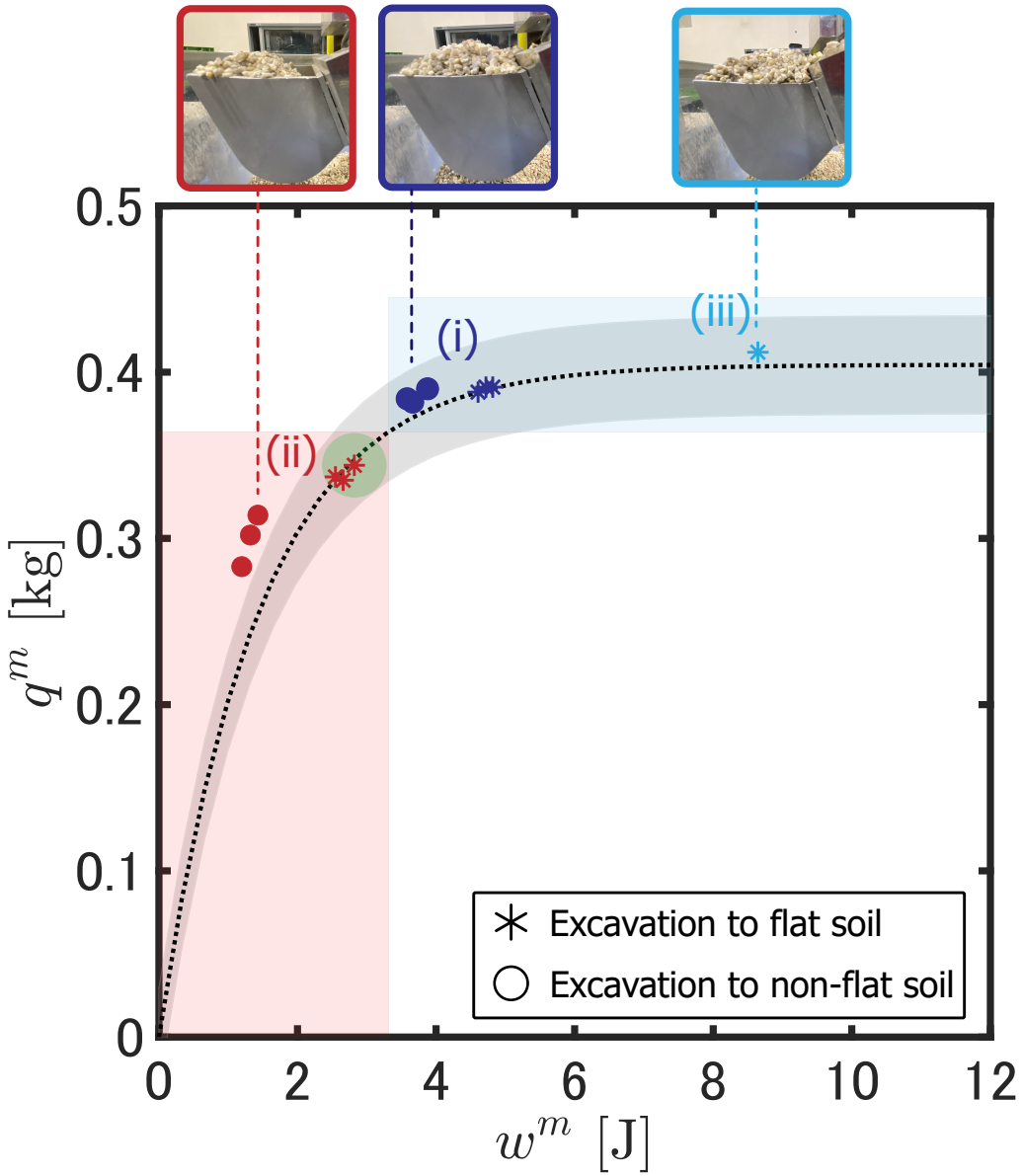


Fig.5.4: Relation between workload and soil weight on experiment of excavation between to flat and non-flat soil.

終了時のバケットが掬い上げた掘削量 q^m を測定した．また，比較として Fig. 5.2(a) のように，同じ q^{ref} を設定し，提案手法の自律制御系を用いて平坦土砂への掘削を行い，q^m を測定した．q^{ref} は，Fig. 5.4 の緑色領域となるように 325 – 365 g の 5 g 刻みの 9 種類とした．また，基本の掘削軌道の生成器として，基本掘削軌道をアトラクタとして埋め込んだベクトル場を用いた非線形力学系 [57] を用いた．実験時に設定したパラメータを Table 5.2 に示す．ただし，ΔT はサンプリングタイム，r_0 は拡大係数の初期値である．

掘削 1 回目後の非平坦土砂が一様に形成されているかを確認するために LiDAR を用いて容器の

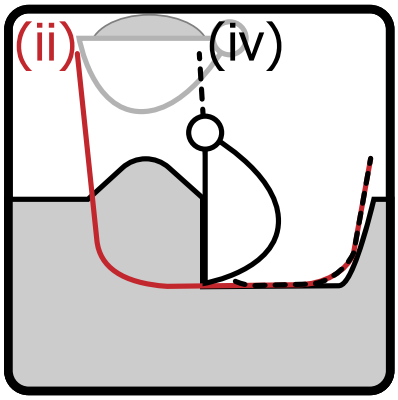


Fig.5.5: scooping phase in trajectory (ii).

Table 5.2: The values of the parameters used in the second excavation to the medium grained soil in the experimental verification of the proposed method.

Parameter	ρ [kg/m^3]	α [kg/(m $\cdot$ s^2)]	v_{max} [m^3]	ΔT [s]	r_0 [–]
Value	1.35 $\times 10^3$	4.65 $\times 10^3$	3.07 $\times 10^{-4}$	5.00 $\times 10^{-3}$	0.300

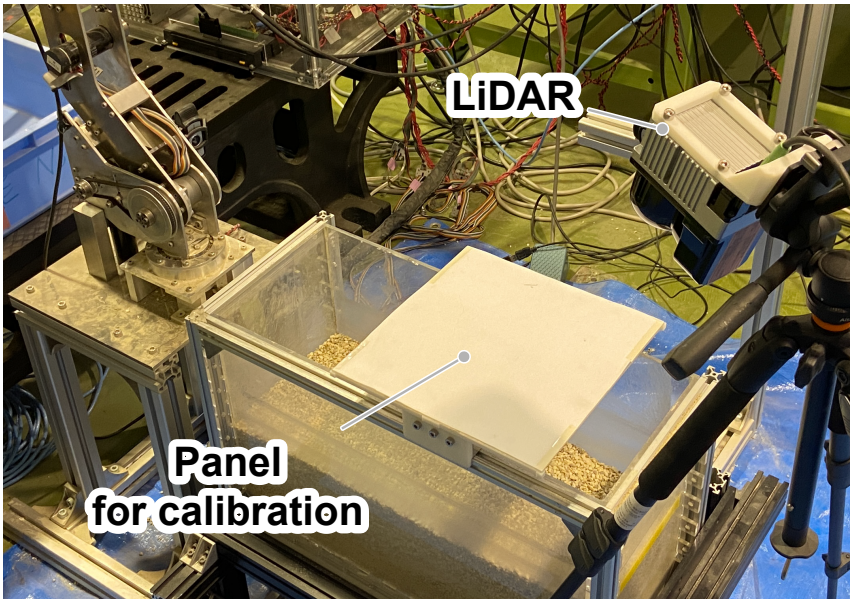


Fig.5.6: Equipment for measuring the shape of the soil surface.

上から土砂表面の計測を行った．LiDAR により計測された土砂表面の点群例を Fig. 5.7 に示す．LiDAR により計測された土砂表面の点群を白色点群，土砂容器を白い直方体で示す．土砂表面の点群の内，赤色点群のように掘削領域である関心領域を設定し，その領域の点群の y 軸と z 軸座標で平均化を行い，平面 $z = 0.4$ に射影した赤色曲線である平均土砂表面を求めた．各 q^{ref} の実験における形成された平均土砂表面を Fig. 5.8 に黒色実線で示す．各 q^{ref} における平均土砂表面は，高

さ方向にばらつきはあるが同様な非平坦形状であるといえる． この非平坦土砂に対して，q^{ref} を

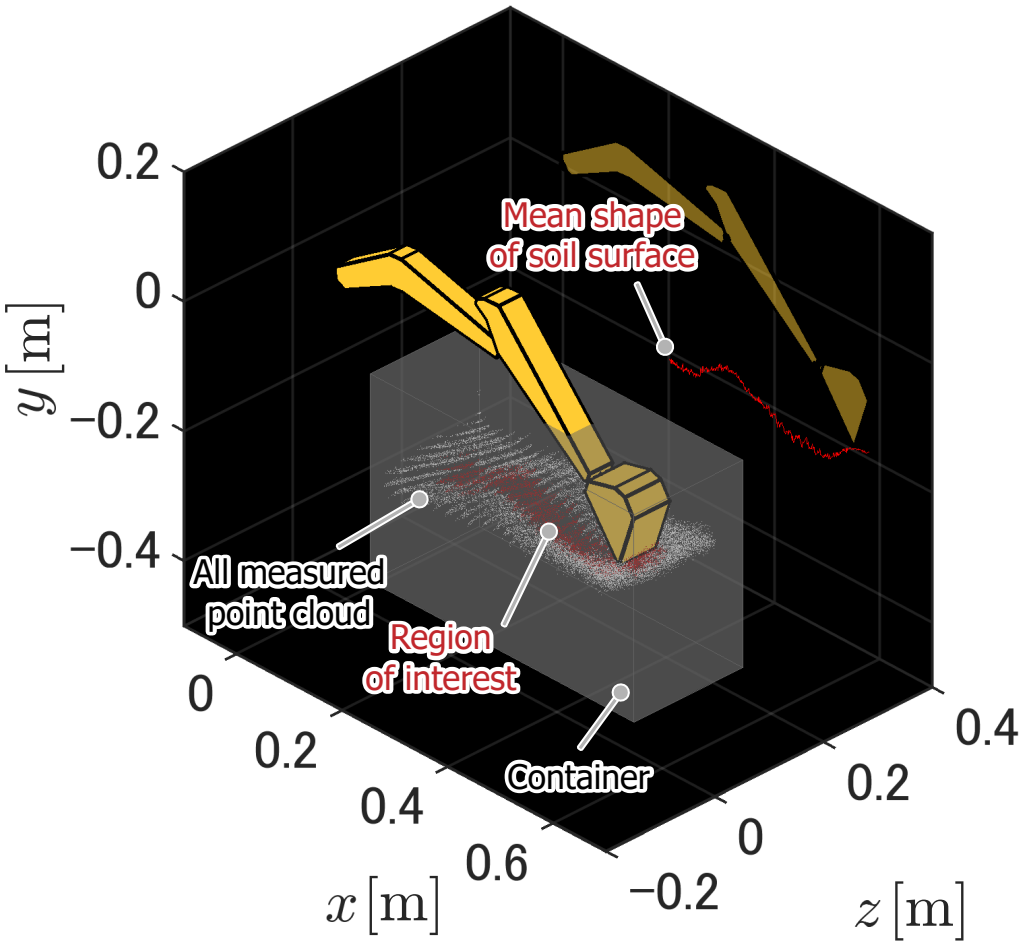


Fig.5.7: Example of point cloud of soil surface measured by LiDAR.

設定して自律掘削を行ったときの r の時間変化を Fig. 5.9(a) に q^{ref} に，バケット手先軌道を Fig. 5.9(b) に q^{ref} ごとに色を分けて示す．各線における実線部は自律制御が機能していることを表し，細線部は細線は r が変化しても掃引体積が変化しない掬い上げの段階に入り掘削距離が変化していないことを表している．

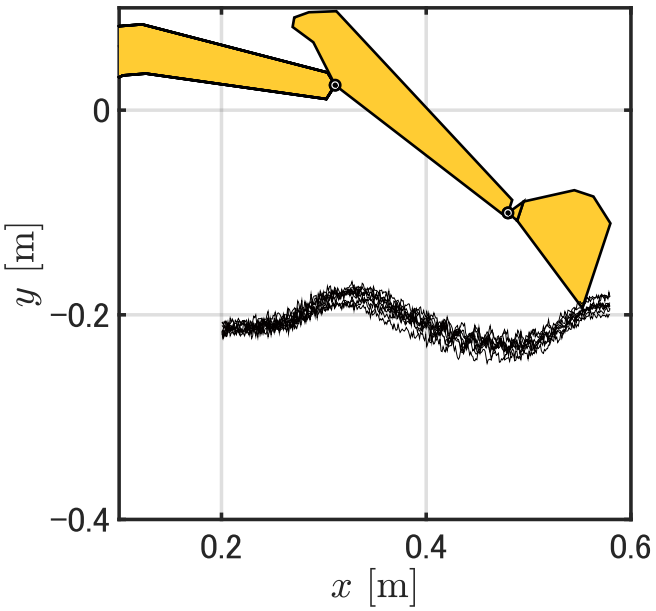
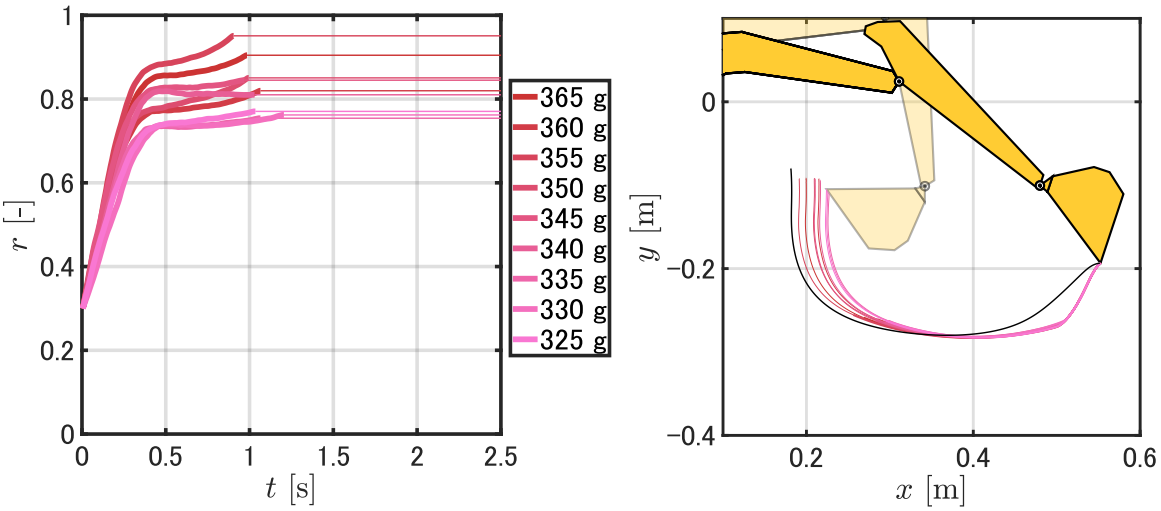


Fig.5.8: Mean shape of soil surface measured by the Lidar before second excavation for each q^{ref}.



(a) Time variety of r (b) Trajectories of bucket

Fig.5.9: Comparison of the trajectories of the second excavation changing $\hat{r}$ with each q^{ref} by the autonomous control system.

Fig. 5.9 より，q^{ref} が大きくなればなるほど，掘削中に拡大係数が上昇し，掘削距離が長くなっていることが確認でき，提案手法によって目標掘削量に応じて掘削距離が変化していることが分かる．w^{ref} に対する w^m の時間変化を Fig. 5.10 に Fig. 5.9 に対応した色の線で，w^{ref} を青色の破線で示す．加えて，Fig. 5.10 に平坦土砂に対して同じ q^{ref} を設定して自律掘削を行ったときの w^m

を灰色の線で示す．Fig. 5.11 より，各 q^{ref} において非平坦土砂や平坦土砂に関わらず最終的に w^m が w^{ref} に収束しており，提案手法により q^{ref} に対応した w^{ref} への制御が実現できている． q^{ref}

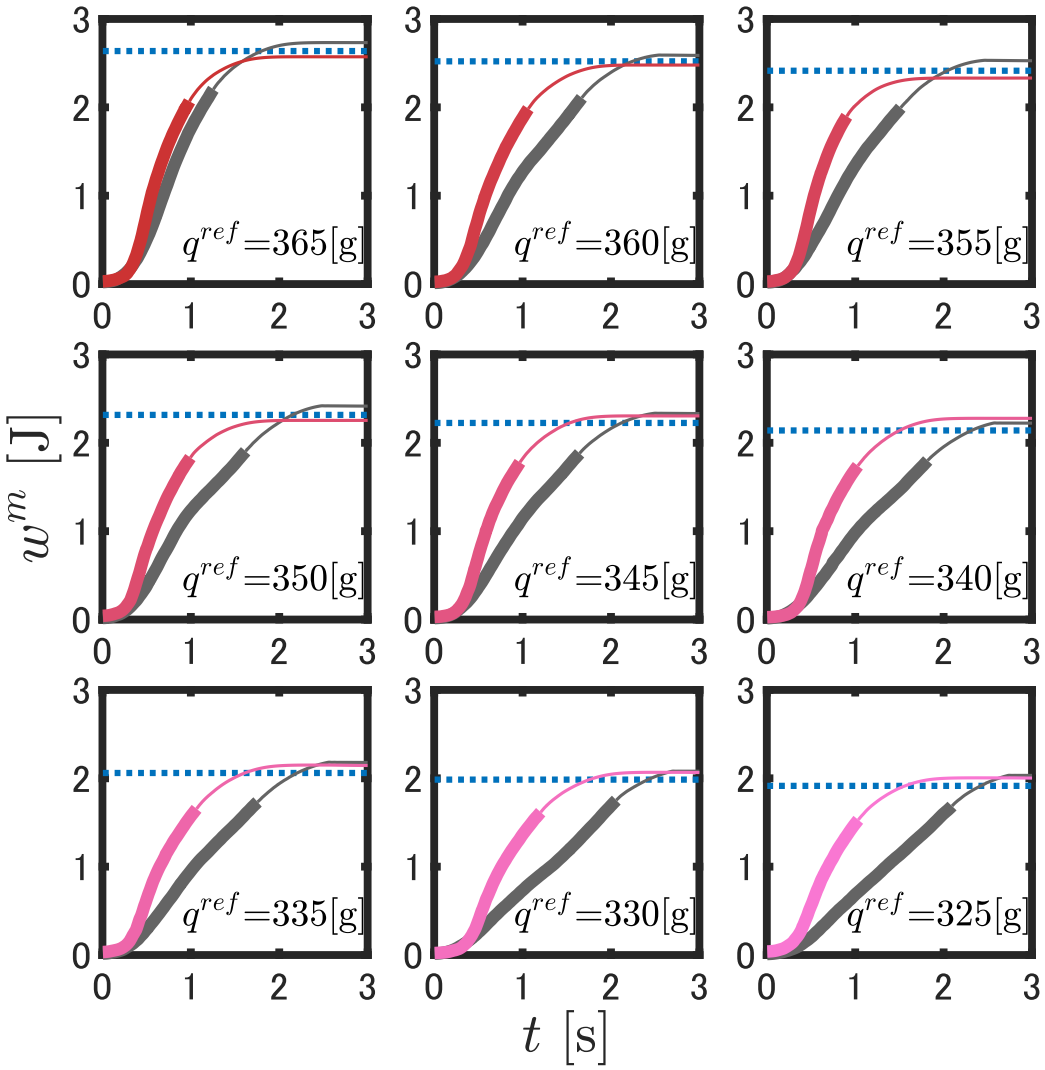


Fig.5.10: The time variations of w in the excavations to the flat and non-flat soil for each q^{ref}.

Table 5.3: Root mean square error σ for q^{ref}.

	Flat	Non-flat
σ[g]	3.14	6.52

に対する q^m を Fig. 5.11 に Fig. 5.9 に対応した色の’○’で示す．加えて，Fig. 5.11 に平坦土砂に対して同じ q^{ref} を設定して自律掘削を行ったときの結果を灰色の’○’で示し，平坦及び非平坦土砂への自律掘削の q^{ref} に対する二乗平均誤差平方根 σ を Table 5.3 に，平坦自律掘削の 99% 信頼区間を Fig. 5.11 に灰色領域で示す．Fig. 5.11 における非平坦土砂のデータ分布から，q^m は q^{ref} に対して近い値であり，提案手法により目標掘削量を実現できている．ただし，Table 5.3 より平坦

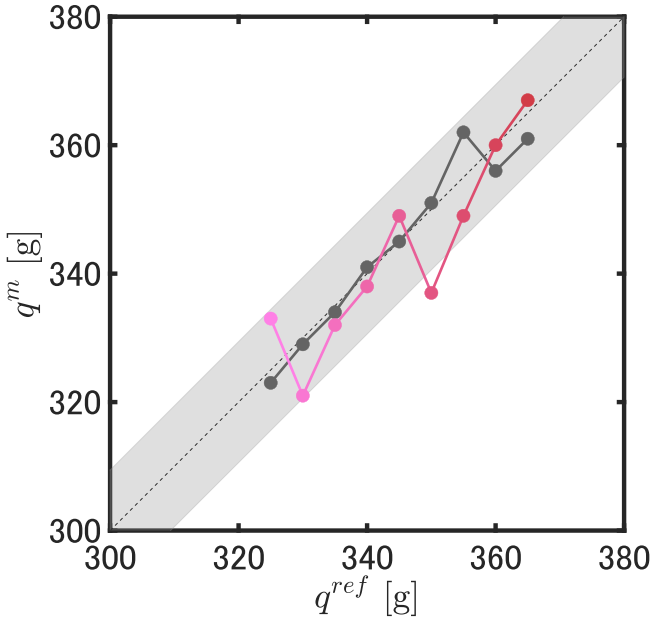


Fig.5.11: q^m for q^{ref} in the excavations to the flat and non-flat soil.

土砂の場合と比べて非平坦の場合の方が σ が約 2 倍大きくなっている．これは，Fig. 5.9(b) での破線部の自律制御が機能しない掘削で掬い取れられる土砂の表面において Fig. 5.8 のように高さ方向にばらつきがあり，そのばらつきが q^m に影響したためだと考えられる．これらの結果から，

(1) 提案手法により，掘削 2 回目の非平坦土砂の場合も適切な距離で掘削を行い，高エネルギー効率で適切な量を掘削可能である．
(2) 提案手法において，非平坦土砂の掘削は，バケットが掬い上げる際の盛り土砂により目標掘削量に対する二乗平均誤差平方根が平坦土砂の掘削よりも大きくなる．

がわかる．

5.4 おわりに

本章では，土砂の特性変化に対する提案手法のロバスト性を確認した．まず，平坦な土砂と非平坦な土砂における掘削量と仕事の関係の差異を確認し，2 回目以降の掘削に該当する非平坦な土砂への掘削においても掘削モデルが適用可能であることを示し，次に，非平坦な土砂に対して提案手法による実験検証を行い，土砂の特性が変化した場合においても目標量に近い量を掘削可能であることを確認した．

第 6 章

結論

6.1 研究の成果

本論文では，無人化施工における油圧ショベルの掘削作業を対象として，人の入力を許容する人間機械協調掘削を実現するために，場であるアトラクタを用いた人の操作介入を前提とした掘削の自律制御系の高性能化を行った．この自律系において，人の操作を表現する掘削深さ，掘削速度，掘削距離に関する自律制御系の設計手法を提案し，人の操作に近い掘削の自律制御系を達成した．また，掘削距離に関する自律制御系の設計においては，簡易な掘削モデルを提案した．

2 章では，まず先行研究で提案された掘削深さの半自律制御系を用いて実験検証を行い，有効性を確認した．主な成果は以下の通りである．

1. アトラクタを利用し時間の拘束を持たない自律制御系の設計を行った．また，インデックス値を用いることで，深い掘削と浅い掘削，および，その中間的な軌道を生成する自律制御系とした．
2. バケットの負荷に基づいてインデックス値を変化させることで連続的に掘削動作が遷移し，人の操作に近い自律制御系が設計できることを実験により検証した．
3. 上記を人の自律モデルとみなし，拡張カルマンフィルタを用いてインデックス値を推定することで人の操作が介入可能な半自律制御を設計した．
4. 半自律制御系によりバケットの負荷を低減させる掘削が可能であることを実験により示した．
5. 実験により，掘削深さの自由度だけでは岩との衝突等の緊急時における対応が困難であることや，掘削途中で掘削を終えることができず，無駄な距離を掘削してしまうという知見を得た．

掘削深さの半自律制御系では，岩との衝突等の緊急時における対応が困難である問題があった．このことから，3 章では，掘削深さの半自律系に対して掘削速度の操作自由度を追加した半自律制御系を設計し，油圧ショベルを模したリーダ・フォロワ系による実験検証を行い，その有効性を確認した．主な成果は以下の通りである．

1. アトラクタを軌道への収束と流れによる要素分割したベクトル場の設計手法を提案し，これ

らをつなぐコントローラの設計手法を提案した．これにより，収束と流れの自由度カップリングを実現した．

2. 掘削の深さと速度に関する操作自由度で設計した自律制御系と人の操作モデルに対して，拡張カルマンフィルタを用いて自律系と人操作を合わせた半自律制御系を提案した．
3. 油圧ショベルを模したリーダ・フォロワ系を用いて，以下の実験検証を行った．
   (a) 提案手法によって設計したコントローラを用いた実験により，インデックス値による軌道の変化，および速度の変化が実現できることを検証した．
   (b) 提案手法で設計したコントローラを用いて，リーダ・フォロワ系による実験検証を行い，人の操作介入でフォロワ側が障害物との衝突から復帰可能であることを確認した．

掘削深さの半自律制御系の実験検証より，無駄な距離を掘削し続ける問題があった．このことから，4 章では，適切な掘削距離で適切な量を掘削する自律制御系実現のために，掘削距離 (ドラッグ距離) を制御パラメータとした土砂の掘削量を達成する自律制御を提案し，油圧ショベルを模したロボットを用いて実験検証を行い，その有効性を確認した．主な成果は以下の通りである．

- バケットが土砂にした仕事と掃引体積間の幾何学的関係に基づき，仕事と掘削量に関する微分方程式とその解を導出した．これは，簡易なモデルであり，モデルにおける 2 つの未知パラメータは容易に同定できる．更には，提案モデルが予備実験結果と整合性を持つことを確認した．
- 提案モデルに基づき，ドッラグ距離を変化させることで目標掘削量を達成する油圧ショベルの制御手法を提案した．
- 油圧ショベルを模したロボットを用いた掘削実験を行い，粒度の異なる 2 種類の土砂条件下で提案手法のが有効であることを示した．加えて，提案手法は土砂高さの推定を含むことから，提案手法が異なる土砂高さ条件下でも適用可能であることを実験により示した．

掘削作業において，1 回目の掘削では平坦な土砂への掘削となり，2 回目以降の掘削では非平坦な土砂への掘削となり，この掘削においては土砂の特性が変化する．このことから，5 章では，第 4 章で提案した自律制御系が土砂の特性が変化する非平坦な土砂への掘削においても適用可能であることを検証した．

1. 2 回目の掘削として，非平坦土砂に対して時系列データによる掘削を行い，非平坦への掘削においても提案手法のモデルが有効であることを確認した．加えて，高エネルギー効率かつ高作業効率な掘削を実現するためには，土砂の状況に応じて適切な距離で掘削することが重要であり，我々の提案手法が活用できることを確認した．
2. 提案手法で設計した自律系を用いて非平坦土砂に対して掘削を行い，提案手法が土砂の特性が変化する掘削においてもロバストであり，高エネルギー効率 n な目標掘削量を実現可能であることを確認した．

これらの提案手法を実際の油圧ショベルへ応用することで，2,3 章の掘削深や速度の操作自由度を持つ自律制御系においては，通常時は適切なバケット負荷による掘削を行うことで正確な作業となり作業効率が上がり，また緊急時には人の操作介入を行うことで施工の安全性が向上することを期待できる．また，4,5 章においては適切な距離で適切な量を掘削することから，作業効率だけではなく，エネルギー効率の向上も期待できる．燃料価格が上昇している [82] 昨今においては，非常に価値がある．更には，ICT 施工技術を将来的に月面等での建設活動で応用することを視野に入れた「宇宙建設革新プロジェクト」が行われており，このような月面などのエネルギー効率が重要視される施工においても，提案手法の活用が期待できる．

6.2 今後の課題と展望

まず，2,3 章においては，設計した半自律制御系では，人が操作しない場合入力が 0 となり，停止命令となる問題がある．この課題に対しては，新たにインデックスの速度に関するダイナミクスを設計することで解決可能である．また，操作者が操作後の軌道が分からない問題がある．この課題に対しては，ディスプレイや HMD に軌道を描画することで，対処可能である．

次に，4,5 章においては，掘削モデルにおいて適用可能な対象がドライな土砂のみであり，現実世界ではウェットな土砂の作業現場もあることから，ウェットな土砂への適用拡大が実用面で必要である．そのためには，モデルに粘性要素を導入することで対処可能であると考えており，本研究と同様にウェットな土砂に対する掘削実験によりデータドリブンな形での導出を考えている．ただし，ウェットな土砂の再現性の確保は困難であるため，まずはこちらから解決する必要がある．加えて，アルゴリズムで用いる基本軌道によって掘削可能な量が限定されるため，広範囲の目標掘削量を設定することが困難であった．これを解決するためには，掘削中に掘削距離だけではなく，掘削深さも同時に変化させる必要があり，設計した土砂掘削モデルが軌道の深さ方向への変化に対して適用可能か検証する必要があり，その結果によっては，水平方向の仕事だけではなく垂直方向の仕事を考慮したモデルの再設計が必要であると考えている． モデルにおける未知パラメータ (土砂の密度や掘削抵抗) においては，掘削中に地層等の環境の変化により，変化することが予想される．それに対処するためには，掘削ごとに得られた新たなデータを用いて，逐次最小二乗法などによって，パラメータを更新する方法を考えている．また，掘削量の制御系が自律制御系に留まっており，人の操作によって掘削量が変化する力学系を設計する必要がある．1 回の掘削中に掘削量の調整は入力時間が短く，操作者も操作困難であることから，ダンプトラックへの積み込み作業などの数回の掘削作業計画において，目標値を調整することを考えている．

最後に，提案手法を実際の油圧ショベルに実装する上での課題と展望を示す．まず，油圧システムにおいては無駄時間等の制御系を不安定にする要素があることから，それらを考慮した安全な位置制御系を達成する必要がある．次に，掘削量制御においてバケットが土砂にはたらいた仕事を計測する必要があるが，これは油圧ポンプの圧力から計測可能であると考えている．



参考文献

参考文献

[1] 総務省. 労働力調査. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200531&kikan=00200&tstat=000000110001, 2023 年 11 月 09 日参照.

[2] 一般社団法人日本建設業連合会. 建設業デジタルハンドブック/建設業の現状/4. 建設労働. https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html#link13, 2023 年 11 月 09 日参照.

[3] 国土交通省不動産・建設経済局. 最近の建設業を巡る状況について【報告】. https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001428484.pdf, 2023 年 11 月 09 日参照.

[4] 国土交通省総合政策局建設経済統計調査室. 令和 5 年度 (2023 年度) 建設投資見通し. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600870&tstat=000001017180&cycle=8&year=20231&month=0&result_back=1&tclass1val=0, 2023 年 11 月 15 日参照.

[5] 国土交通省. 令和５年版 国土交通白書/第 ii 部 国土交通行政の動向/第 4 節社会資本の老朽化対策等. https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r04/hakusho/r05/html/n2140000.html, 2023 年 11 月 15 日参照.

[6] 一般社団法人全国建設業協会. 地域建設業による災害対応の状況. https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001320547.pdf, 2023 年 11 月 16 日参照.

[7] 国土交通省. 震災で道路を歩くこともできなかった時. https://www.mlit.go.jp/common/001085181.pdf, 2023 年 11 月 16 日参照.

[8] 内閣官房. 国土強靱化. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/index.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[9] 国土交通省. 大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化. https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_pp.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[10] 国土交通省. 令和 4 年版 国土交通白書 2021/第 2 章危機による変化の加速と課題等の顕在化/第 2 節災害リスクの増大や老朽化インフラの増加. https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r04/hakusho/r05/html/n2140000.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[11] 総務省. 情報通信白書令和 4 年版/第 1 部 特集情報通信白書刊行から 50 年〜ICT とデジタ

ル経済の変遷〜/第 1 節今後の日本社会における ICT の役割に関する展望/（1） 生産年齢人口の減少. https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd121110.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[12] 国土交通省. ICT の全面的な活用. https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[13] 国土交通省中部地方整備局. 建設 ICT とは？ https://www.cbr.mlit.go.jp/kensetsu-ict/ict-toha.html, 2023 年 11 月 16 日参照.

[14] 日本産業標準調査会. Jis a 8403-1 土工機械－油圧ショベル－第１部：用語及び仕様項目.

[15] 総務省. 建設機械とは/ショベル各部の名称と動き. https://www.kobelco-kenki.co.jp/company/recruit/2024/products/machine/shovel.html, 2023 年 11 月 25 日参照.

[16] 日本産業標準調査会. Jis a 8919 土工機械－操縦装置.

[17] 日本キャタピラー. CAT 建機 研究所/油圧ショベルの基本 得意な作業や必要な免許など. https://www.nipponcat.co.jp/blog/general/excavators.html, 2023 年 11 月 26 日参照.

[18] 松井宗広. 雲仙普賢岳における無人化施工について. 砂防学会誌, Vol. 47, No. 1, pp. 51–53, 1994.

[19] 近藤高弘, 青木浩章, 宮崎裕道. 建設業における無人化施工の現状と将来. Technical Report 44, 大成建設技術センター報, 2011. ROMBUNNO.19.

[20] 日本キャタピラー. 国内初 後付け可能な遠隔操作キット cat command（コマンド）リモートコントロールキット. https://www.nipponcat.co.jp/ict/command.html, 2023 年 11 月 29 日参照.

[21] KOMATSU. -安全で生産性の高いスマートでクリーンな未来の現場の実現を加速- 建設機械向け遠隔操作システムを開発，お客さまへの提供を開始. https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2023/20230414, 2023 年 11 月 29 日参照.

[22] KOMATSU. K-dive. https://www.kobelco-kenki.co.jp/dx/kdive.html, 2023 年 11 月 29 日参照.

[23] HITACHI. 遠隔操作ソリューションに対応した油圧ショベル rbt シリーズを発売. https://www.hitachicm.com/global/ja/news/press-releases/2023/23-11-07/, 2023 年 11 月 29 日参照.

[24] ARAV. 遠隔操作. https://www.remotecontrol.arav.jp/modelv/, 2023 年 11 月 27 日参照.

[25] 佐藤貴亮, 藤井浩光, Alessandro Moro, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下淳, 淺間一. 無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発. 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, pp. 14–00031–14–00031, 2015.

[26] 佐藤隆哉, 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, pp. 19–00066–19–00066, 2019.

[27] 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.

[28] 山田宏尚. 建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 6, pp. 400–403, 2015.

[29] 橋本毅, 山内元貴, 新田恭士. 無人化施工への hmd の活用について. 国土交通省国土技術研究会 (Web), 第 2019 巻, pp. 4.40–4.43, 2019.

[30] 橋本毅, 山内元貴, 新田恭士. 無人化施工における hmd を用いた画像表示システムの効果. 建設機械 (Construction Machinery and Equipment), pp. 25–29, 2020.

[31] Masaru Ito, Yusuke Funahara, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and 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.

[32] Masaru Ito, Chiaki Raima, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita. Effects of machine instability feedback on safety during digging operation in teleoperated excavators. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 28987–28998, 2021.

[33] S.E. Salcudean, K. Hashtrudi-Zaad, S. Tafazoli, S.P. DiMaio, and C. Reboulet. Bilateral matched impedance teleoperation with application to excavator control. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 6, pp. 29–37, 1999.

[34] Gong Mingde, Yang Bin, and Yamada Hironao. Performance experiment of a hydraulic force feedback teleoperation robot based on position and rate control. In *2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 87–90, 2010.

[35] 山田宏尚, 武市教児, 武藤高義. 遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 651, pp. 3664–3671, 2000.

[36] 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. 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 34, No. 4, pp. 85–91, 2003.

[37] Kouki Hayashi and Takayuki Tamura. Teleoperation performance using excavator with tactile feedback. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2759–2764, 2009.

[38] 龍大村上, 清泰長谷川, 太郎大橋. 機能的電気刺激を用いた遠隔操縦システム. 計測自動制御学会論文集 = Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 36, No. 12, pp. 1132–1137, 12 2000.

[39] Dongmok Kim, Jongwon Kim, Kyouhee Lee, Cheolgyu Park, Jinsuk Song, and Deuksoo Kang. Excavator tele-operation system using a human arm. *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 2, pp. 173–182, 2009.

[40] Dongmok Kim, Kyeong Won Oh, Chang Seop Lee, and Daehie Hong. Novel design of haptic devices for bilateral teleoperated excavators using the wave-variable method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, pp. 223–230, 2013.

[41] 豊田晃央. 災害復旧用ゴム人工筋肉駆動型遠隔操縦ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 8, pp. 600–606, 2015.

[42] 萬徳昌昭, 宮元洋, 堀之内義博, 松井宗廣, 櫻井一也, 岡村祐介, 吉田貴, 小川正博. 砂防における無人化施工技術の発展にむけて事態調査・アンケート結果に基づく-考察. 砂防学会研究発表会概要集, pp. B.142–B.143, 2013.

[43] Dominic Jud, Gabriel Hottiger, Philipp Leemann, and Marco Hutter. Planning and control for autonomous excavation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No. 4, pp. 2151–2158, 2017.

[44] Filippos E. Sotiropoulos and H. Harry Asada. A model-free extremum-seeking approach to autonomous excavator control based on output power maximization. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 1005–1012, 2019.

[45] Paul J.A. Lever, Fei-Vue Wang, Deqian D. Chen, and Xiaobo Shi. Autonomous robotic mining excavation using fuzzy logic and neural networks. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 1, pp. 957–962, 1995.

[46] X. Shi, P.J.A. Lever, and F.-Y. Wang. Fuzzy behavior integration and action fusion for robotic excavation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 3, pp. 395–402, 1996.

[47] Xiaobo Shi, P.J.A. Lever, and Fei-Yue Wang. Experimental robotic excavation with fuzzy logic and neural networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 957–962 vol.1, 1996.

[48] 鮫島誠, 藤井敏, 末岡淳男. ファジィ理論による油圧ショベルの自動掘削. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 650, pp. 3328–3335, 2000.

[49] 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 山口崇, 油田信一. 動作計画と制御に 3 次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発. 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 8, pp. 488–497, 2012.

[50] Hiroshi Yamamoto, Masaharu Moteki, Hui Shao, and Takashi Ootuki. Development of autonomous excavation technology for hydraulic excavators. In *2009 ICCAS-SICE*, pp. 2226–2229, 2009.

[51] John McCarthy and Patrick J. Hayes. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In B. Meltzer and D. Michie, editors, *Machine Intelligence 4*, pp. 463–502. Edinburgh University Press, 1969. reprinted in McC90.

[52] 佐藤圭祐. 極小点のないボテンシャル場を用いたロボットの動作計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 702–709, 1993.

[53] 辻敏夫, 千種和幸, 金子真. 人工ポテンシャル場の変形を用いた移動ロボットの軌道生成法. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 597, pp. 1905–1911, 1996.

[54] Perry Y. Li and Roberto Horowitz. Passive velocity field control approach to robot contour

following. In *Proceedings of the Japan USA Symposium on Flexible Automation*, Vol. 1, pp. 25–32, 1996.

[55] Songhao Yin and Masaki Yamakita. Passive velocity field control approach to bicycle robot path following. In *2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, pp. 1654–1659, 2016.

[56] Masaki Yamakita and Fumihiko Asano. Extended passive velocity field control with variable velocity fields for a kneed biped. *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 2, pp. 139–168, 2001.

[57] M. Okada, K. Tatani, and Y. Nakamura. Polynomial design of the nonlinear dynamics for the brain-like information processing of whole body motion. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, Vol. 2, pp. 1410–1415 vol.2, 2002.

[58] 三木あや, 岡田昌史. 人の操作モデルに基づいた掘削ロボットの半自律制御系の設計. 第 35 回日本ロボット学科学術講演会, pp. 2G2–02, 2017.

[59] 三木あや. 人の操作モデルに基づいた掘削ロボットの半自律制御系の設計. 修士論文, 2017.

[60] 足立修一, 丸田一郎. カルマンフィルタの基礎. 東京電機大学出版局, 2014.

[61] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT Press, 2005.

[62] 岩野航平, 岡本裕, 舛屋賢, 岡田昌史. マスタスレーブ系での可変アドミッタンスによる力覚伝達と掘削作業への応用. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, No. 1P2-E06, 2019.

[63] S. Dadhich, U. Bodin, and U. Andersson. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*, Vol. 68, pp. 212–222, 2016.

[64] Erfan G Nezami, Youssef MA Hashash, Dawei Zhao, and Jamshid Ghaboussi. Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 31, No. 9, pp. 1147–1162, 2007.

[65] Svanberg Andreas, Larsson Simon, and Mäki Rikard. Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid fe-dem granular material model. *Computational Particle Mechanics*, Vol. 8, pp. 825–843, 2021.

[66] T. Ishi and M. Okada. Real-time soil model for shape estimation and prediction considering bucket-soil interaction. In *35th Annual conference of the Robotics Society of Japan*, Vol. 2017, pp. 2E1–02, 2017.

[67] Ryan J. Sandzimier and H. Harry Asada. A data-driven approach to prediction and optimal bucket-filling control for autonomous excavators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 2682–2689, 2020.

[68] Qingkai Lu, Yifan Zhu, and Liangjun Zhang. Excavation reinforcement learning using geometric representation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 4472–4479, 2022.

[69] A. R. Reece. Paper 2: The fundamental equation of earth-moving mechanics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, Vol. 179, No. 6, pp. 16–22, 1964.

[70] 畠昭治郎. 油圧ショベル構の解明 I(その 1), 1961.

[71] 村山朔郎, 畠昭治郎. 土の切削強度の新測定法. 材料試験, Vol. 4, No. 24, pp. 381–387, 1955.

[72] 室達朗, 深川良一, 渡辺裕明. 軟岩におけるバケット系油圧ショベルの刃先作用力こ関する実験的研究. 土木学会論文集, Vol. 1993, No. 462, pp. 73–81, 1993.

[73] S. Singh. Learning to predict resistive forces during robotic excavation. In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 2102–2107, 1995.

[74] Yuming Zhao, Jian Wang, Yi Zhang, and Chao Luo. A novel method of soil parameter identification and force prediction for automatic excavation. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 11197–11207, 2020.

[75] Pascal Egli, Dominique Gaschen, Simon Kerscher, Dominic Jud, and Marco Hutter. Soil-adaptive excavation using reinforcement learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 9778–9785, 2022.

[76] KOMATSU. ICT 油圧ショベル. https://kcsj.komatsu/ict/smartconstruction/lineup/excavator, 2023 年 11 月 29 日参照.

[77] Takamichi Yuasa, Masato Ishikawa, and Satoshi Ogawa. An optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, No. 6, pp. 1248–1254, 2021.

[78] 日本産業標準調査会. Jis a 8403-4:2012 (iso 7451:2007) 土工機械－油圧ショベル－第 4 部: バケットの定格容量.

[79] 畠昭治郎. 建設機械学,8. 土の油圧ショベル構. 鹿島出版会, 1987.

[80] 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. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 583–593, 2005.

[81] 境田右軌, 中後大輔, 川端邦明, 淺間一. 1p1-m07 熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削作業解析 : シミュレーションによるスキル解析 (建設・解体ロボット・メカトロニクス). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2007, pp. _1P1–M07_1–_1P1–M07_2, 2007.

[82] 経済産業省資源エネルギー庁. 日本のエネルギー 2022 年度版「エネルギーの今を知る 10 の質問」/2. 経済性/原因 1：燃料価格. https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/002/, 2023 年 11 月 30 日参照.

研究発表

発表論文

[1] 岡田昌史, 岡本裕, 舛屋賢, 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(2020), pp. 19-00320, DOI:10.1299/transjsme.19-00320

[2] Yutaka OKAMOTO, Masafumi OKADA, Dynamical modeling of excavation based on bucket workload and control of excavated soil weight, Mechanical Engineering Journal, pp. 23-00200(2023), DOI:10.1299/mej.23-00200

口頭発表

[1] ○岡本裕, 舛屋賢, 岡田昌史, 拡張カルマンフィルタを用いた人モデルの推定と半自律制御, 第36 回日本ロボット学会学術講演会, 3F1-05(2018)

[2] ○岡本裕, 舛屋賢, 岡田昌史, アトラクタの要素分割に基づく掘削の軌道と速度のハイブリッド自律制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2019), 1P2-E03

[3] ○岡本裕, 舛屋賢, 岡田昌史, 非線形力学系を用いた掘削の操作自由度の設計と制御, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会 (2019)

[4] ○岡本裕, 岡田昌史, 土壌への仕事に着目した掘削距離と掘削量のモデル化と目標掘削量を実現する自律制御系設計, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 1F1-04(2020)

[5] ○岡本裕, 岡田昌史, 実験データに基づいた掘削量-掘削距離のモデル化と評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2021), 2P2-A07

[6] ○岡本裕, 岡田昌史, 目標掘削量実現のための土砂掘削モデルと実験検証, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 2G4-02(2021)

[7] ○岡本裕, 岡田昌史, 目標掘削量実現のための土砂掘削モデルに基づいた自律制御系設計, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 4H3-03(2022)

[8] ○岡本裕, 岡田昌史, エネルギー効率向上のための目標掘削量を実現する自律制御系の実験検証, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 3G4-05(2023)

その他 (論文)

[1] 岡田 昌史, 岡本 裕, ベクトル場を利用した倒立振子の平衡多様体への安定化コントローラ設計, 日本機械学会論文集, 2020, 86 巻, 884 号, p. 19-00167, DOI:10.1299/transjsme.19-00167

その他 (発表)

[1] ○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 (2018), 2A2-E15

[2] ○岩野航平, 岡本裕, 舛屋賢, 岡田昌史, マスタスレーブ系での可変アドミッタンスによる力覚伝達と掘削作業への応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2019), 1P2-E06

謝辞

本研究は，数多の人様のお支えの上に成り立っております．本研究を進めるにあたり，終始精力的なご指導と数多くの提案や助言を頂いた東京工業大学 岡田昌史教授に深甚なる感謝の意を表します．学部 4 年から博士卒業にかけて，研究の基礎から人に伝わる発表の仕方，難問や課題に対しての思考法等，研究者としての多くの技術を学ばせて頂きました．

東京工業大学 土方亘准教授には，ゼミ等で研究の本質に関するご指摘と助言を賜わり，研究内容をより深いものにすることができました．ここに感謝の意を表します．

宮崎大学 舛屋賢准教授には，研究手順に関して言細やかなご指摘をいただき，研究を滞りなく実施することが可能となりました．ここに感謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたり，有益なご教示とご討論を賜りました東京工業大学工学院 遠藤玄教授，東京工業大学工学院 山北昌毅准教授，東京工業大学工学院 菅原雄介准教授に深く御礼申し上げます．

この研究は，小松製作所によって支援いただきました．ここに感謝の意を表します．株式会社小松製作所開発本部 ICT システム開発センタ GM 市原将志氏，同センタ 松井貴聖氏, 浅羽研亮氏, 永田紀孝氏, 大路航平氏の皆様には，建設業の現場での実作業の側面からの助言や討論によって，本研究をより実用的なものに発展させることができました．ここに感謝の意を表します．

岡田・土方研究室同研究グループの岩野航平君，森本虹太君，大場航君，塩田和陽君の皆様には，ミーティング等での議論により私の研究を超えた幅広い知識を深めることができました．ここに感謝の意を表します．

東京医科歯科大学 市川健太助教においては，学部 4 年生から去年まで同級生として切磋琢磨し，趣味などの日常会話や修士卒業旅行の山手線沿い徒歩一周等共に楽しい時間を過ごすことができました．ここに感謝の意を表します．

岡田・土方研究室の学生の皆様には，ゼミや日頃の研究生活において貴重な意見や新たな刺激を頂きました．ここに感謝の意を表します．

最後に，家族や親戚関係者の皆様には，生活費から生活用品まで惜しみのないご支援を頂き，研究生活に集中することができました．また，心ある応援と激励により研究を最後までやり通すことができました．ここに感謝の意を表します．