

現場の環境変化に即する建設機械の
制御システム開発に関する研究

石川 貴大

電気通信大学 情報理工学研究科

博士(工学) 学位申請論文

2024年3月

現場の環境変化に即する建設機械の 制御システム開発に関する研究

博士論文審査委員会

主査 小木曾 公尚 教授

委員 田中 基康 教授

委員 金子 修 教授

委員 澤田 賢治 准教授

委員 内村 裕 教授

著作権所有者

石川 貴大

2024年3月

**Research on the development of control systems
for construction machinery to cope with changes
in the work environment.**

Takahiro Ishikawa

abstract

The construction industry has faced several problems, such as a shortage of workers, the retirement of skilled workers due to aging, low productivity compared to other industries, and a high number of fatal accidents. In order to solve these problems, remote construction, in which construction machinery is operated from remote locations, and autonomous construction employing automated construction machinery are being promoted to improve productivity and safety. However, there is a concern that the safety of remote construction may be degraded due to the deterioration of the communication environment. In particular, it is challenging to detect delays in real-time without a network monitoring system, which leads to a risk of collisions with other machines due to excessive input given by operators unaware of delays. Additionally, in autonomous construction, the environment such as the ground conditions changes over time on the construction site, which leads to the deterioration of control performance in path tracking control. From the viewpoints of safety and work efficiency, it is necessary to suppress tracking performance degradation to the reference path caused by changes in the work environment. This study aims to develop a control system for construction machinery that can cope with environmental changes during construction to improve productivity and safety in remote and autonomous construction. First, Chapter 1 summarizes the related work of remote and autonomous construction and their application to the actual construction site, and describes their respective challenges and the purpose of this doctoral thesis. Chapter 2 describes an overview of a crawler dump widely used in civil engineering sites and its operation methods. Then, a retrofit-type hydraulic control system and measurement sensors are described to realize remote and automatic control. Chap-

ter 3 describes the development of a remote control system that can be operated safely in the presence of communication delays. First, models of straight running and spin turn corresponding to the remote operation method are identified. Next, the remote control method with theoretically guaranteed stability is implemented on the crawler dump, which consists of a reference governor and a switching control system designed from the dump model. Then, it is experimentally validated that safety remote control is possible by convergence to the desired state while satisfying the input constraints in the presence of communication delays. Chapter 4 describes the development of a control system in autonomous construction to suppress the degradation of control performance caused by changes in ground conditions. First, the differential two-wheel model is applied to identify a model for automatic driving that considers the change of the ground conditions. Then, the accuracy of a ground condition estimator is validated through experiments, and a control system consisting of the ground condition estimator and a switching control system is proposed. The control performance is evaluated through simulations. Finally, Chapter 5 summarizes the conclusions of this study and discusses future works. The contributions of this study in terms of industrial application and control engineering are as follows. In the view of industrial application, the developed control system increases productivity and safety in remote and autonomous construction by coping with the environmental changes during construction, such as communication and ground conditions. In the field of control engineering, there are two contributions. Firstly, in developing the remote construction system, the method with theoretical stability guaranteed is implemented in the actual construction machinery and network environment, and experimental validation is performed. Secondly, in autonomous construction, the control system using the ground condition estimator as a soft sensor is designed, and the improvement of control performance is evaluated numerically.

概要

建設業は、人手不足や熟練技能者不足、他産業と比べ低い生産性、および多発する労働災害など様々な課題に直面している。これら課題を解決するためには、生産性と安全性を向上させる必要があり、その手段として、遠隔地から建設機械を操作する遠隔施工や自動化された建設機械が施工する自動化施工が推し進められている。しかしながら、遠隔施工では、通信環境の悪化を起因とする安全性の低下が懸念されている。特に、ネットワーク監視システムなどを用いず、遠隔操作画面の確認のみによる遅延発生の実タイム把握は難しく、遅延の発生に気づかない操作者が与えた過大な入力により、周囲の機械などと衝突する危険がある。また、自動化施工では、現場において走路状態などの環境が時々刻々と変化しており、それにより自動走行の制御性能劣化が懸念される。そのため、安全性や作業効率の観点から、作業環境の変化を起因とする目標経路への追従性能劣化を抑制することが求められる。本研究では、遠隔施工と自動化施工における生産性と安全性の向上を目的として、現場での施工中に生じる環境変化に即する建設機械の制御システムを開発する。まず、第1章において、遠隔施工と自動化施工の関連研究や現場への適用状況をまとめ、それぞれの課題と本博士論文の目的を述べる。次に、第2章において、建設機械のうち土木現場で広く用いられるクローラダンプの概要と操作方式を述べる。そして、レトロフィット型油圧制御システムと計測センサについて述べ、クローラダンプの遠隔化と自動化をおこなう。第3章では、通信遅延の存在下において、安全に操作可能な遠隔制御システムの開発について説明する。まず、遠隔操作で用いる直進走行と旋回動作のモデルを同定する。次に、リファレンスガバナおよび実機のモデルから設計した切替え制御により構成される、安定性が理論的に保証された遠隔制御手法をクローラダンプに実装する。そして、通信遅延の存在下において実機試験をおこない、入力制約を満たしつつ所望の状態に収束させることにより、安全な遠隔操作が可能であることを検証する。そして、第4章では、走路状態の変化を起因とする自動走行の制御性能劣化を抑制する制御システムの開発について説明する。まず、差動二輪モデルを応用し、走路状態の変化を考慮した自動走行時のモデルを同定する。そののち、走路状態推定器の構成とオンライン推定精度の実験的検証を実施し、走路状態推定器と切替え制御により構成される制御システムを提案する。そして、シミュレーションによる制御性能の数値的検証をおこなう。最後に、第5章において、本研究の結論をまとめ、今後の課題を議論する。本論文の貢献は、

以下に示す産業応用の観点と学術的観点がある。産業応用の観点では、現場での施工中に生じる通信や走路状態などの環境変化に対処でき、生産性と安全性の向上を達成した点である。学術的観点は、以下の2点である。遠隔施工システムの開発では、安定性が理論的に保証された手法を実際の建設機械とネットワーク環境に実装し、実機検証をおこなった点である。自動走行システムでは、構成した走路状態推定器をソフトセンサとして用いる制御系を構成し、制御性能の向上を数値的に検証した点である。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	6
1.3 構成	7
第2章 建設機械の遠隔化と自動化	8
2.1 はじめに	8
2.2 クローラダンプの概要	9
2.3 レトロフィット型油圧制御システム	9
2.4 計測センサ	10
2.5 おわりに	13
第3章 通信遅延に即する遠隔制御システム	14
3.1 はじめに	14
3.2 遠隔操作での数理モデルとパラメータ推定	15
3.2.1 直進走行モデル	16
3.2.2 旋回動作モデル	18
3.3 遠隔制御システムの構成	21
3.3.1 拘束条件と制御目的	22
3.3.2 建機側の切替え制御	23
3.3.3 操作室側のリファレンスガバナ	26
3.4 実機実験による検証	28
3.4.1 遠隔操作システムの構築	29
3.4.2 拘束条件の検証	29

3.4.3	安全性の検証	30
3.5	おわりに	35
第4章	走路状態の変化に即する自動走行システム	36
4.1	はじめに	36
4.2	走路状態の変化を考慮した数理モデル	37
4.2.1	走路状態の変化と走行特性への影響	38
4.2.2	自動走行モデル	39
4.2.3	パラメータ推定	40
4.3	走路状態推定と制御システムの構成	43
4.3.1	走路状態推定器の構成	43
4.3.2	オンライン推定精度の実験的検証	49
4.3.3	走路状態推定器を有する切替え制御	50
4.4	制御性能の数値的検証	54
4.4.1	シミュレーション設定	54
4.4.2	制御パラメータの設計	55
4.4.3	数値検証結果	57
4.5	おわりに	60
第5章	まとめ	61
5.1	結論	61
5.2	今後の課題	62
5.2.1	多様な環境変化への対応	62
5.2.2	建設機械の特性変化に即する制御システムの開発	63
5.2.3	環境モニタリングシステムの開発	64
	参考文献	65

目 次

1.1	Statistics of worker.	2
1.2	Work hours in all industries and the construction industry.	3
1.3	The number of fatal accidents in all industries and the construction industry.	3
1.4	Application of autonomous construction machines in construction site.	4
2.1	Crawler dump.	9
2.2	Retrofitted hydraulic control system.	10
2.3	Position of the sensors.	11
2.4	Coordinate in measurement.	11
2.5	Measurement sensors equipped on the dump.	12
3.1	System components for remote control.	16
3.2	Comparison of simulation results with the identified model and experimental results and Enlarged view of the experimental result in straight run.	18
3.3	Comparison of simulation results with the identified model and experimental results and Enlarged view of the experimental result in spin turn.	20
3.4	A block diagram of the network-model-free constrained control over networks.	21
3.5	MOA sets implemented on the on-board computer to locally control the dump.	24
3.6	Calculation of modified reference using MOA sets.	28
3.7	A joystick inputting references and note PC in the operation room.	29

3.8	Comparison of control over networks without reference governor. Communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in upload and download.	31
3.9	Comparison of control over networks with the reference governor. Communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in upload and download.	32
3.10	Experimental results of the straight run and spin turn with communication delay. The communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in the up- and down-link.	33
3.11	Experimental results of the straight run and spin turn with communication delays and packet losses. Communication delay is set as 4.5 (s) with a normal distribution in the up- and down-link, and packet loss is set as approximately 50 (%).	34
3.12	Gravel built up by the crawler of the dump as the crawler rotates in the counterclockwise direction.	35
4.1	Views of prepared ground.	38
4.2	Running path in straight and turn.	39
4.3	A block diagram of a two-wheel differential model of the crawler dump.	40
4.4	Comparing simulation and experimental results of velocity and yaw angle of the identified model for lever command 15 on hard and soft surfaces.	42
4.5	Comparing simulation and experimental results of the position of the identified model for lever command 15 on hard and soft surfaces.	43
4.6	Sensor data of the z-axial acceleration in each of the three classes for use in numerical verification.	44
4.7	Computation results of each statistical index for the z-axial acceleration measurements of Fig. 4.6.	46
4.8	Feature values.	47
4.9	Classifying feature data related to ground conditions.	49

4.10	A block diagram of SVM-based soft sensor involving the ground condition estimator.	49
4.11	Sensor data of the z-axial acceleration and time response of the ground condition estimator on hard surfaces.	51
4.12	Sensor data of the z-axial acceleration and time response of the ground condition estimator on soft surfaces.	51
4.13	Sensor data of the z-axial acceleration and time response of the ground condition estimator when surfaces change from soft to hard.	51
4.14	Relationship between position and target point of the dump. (a) Current posture. (b) Closest point. (c) Target posture. (d) Checkpoint for $M = 13$	52
4.15	Complete block diagram of the proposed switching control system for the crawler dump adaptive to changes in the ground surface.	53
4.16	Measured and generated signals for z-axial acceleration.	54
4.17	Ground condition pattern and reference path.	55
4.18	Simulation results for minimum and average trials using the proposed (three-mode) switching control system.	58
4.19	Simulation results for minimum and average trials using the two-mode switching control system.	58
4.20	Time responses of the ground condition estimator's output and true ground surface using the proposed switching control system.	59
4.21	Time responses of the ground condition estimator's output and true ground surface using the two-mode switching control system.	59
4.22	Histogram of $e_{\mathcal{X}}$ for 30000 control simulation trials.	59

表 目 次

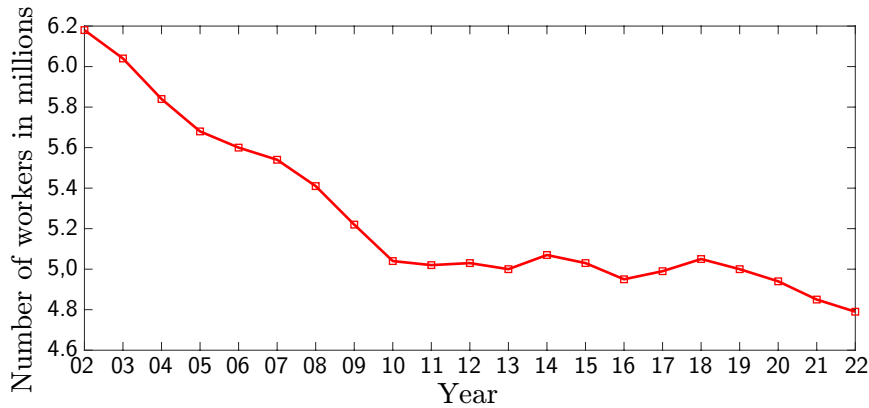
1.1	Work on automation of construction machinery employed in civil engineering construction site for each task.	5
3.1	Estimated Model Parameters for Running in a Straight Line.	17
3.2	Estimated Model Parameters for Executing a Spin Turn.	19
4.1	Parameter values obtained via parameter estimation for the two ground conditions.	41
4.2	Definition of classes.	48
4.3	Optimal hyperparameters and the classification accuracy scores for each SVM.	48
4.4	Parameter values for each class.	57
4.5	Simulation results and correct rates of SVM for each simulation. The optimal hyperparameters have the same values as listed in Table 4.3.	57

第1章 序論

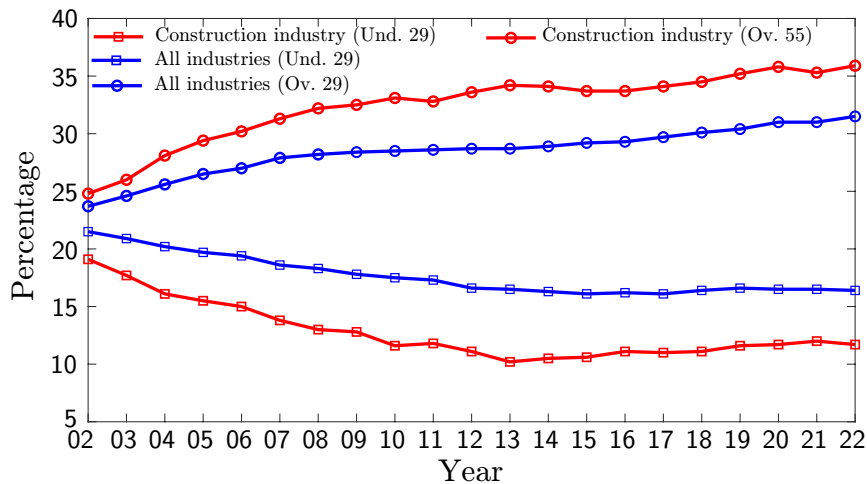
本章では、本論文の背景、目的、および構成を述べる。

1.1 背景

現在、建設業は、人手不足や熟練技能者不足、他産業と比べ低い生産性、および多発する労働災害など様々な課題に直面している。建設業の就業者数、および建設業と全産業の就業者年齢構成を Fig. 1.1 に示す [1]。建設業の就業者数は、ピーク値となる 1997 年における 685 万人に対し、2022 年において約 70% の 479 万人であり [2]、Fig. 1.1(a) に示すように年々減少の傾向にある。また、Fig. 1.1(b) に示す就業者年齢構成より、建設業は、29 歳以下の若年層が少ない一方で 55 歳以上の高齢者層が多く、全産業と比較して高齢化が顕著である。さらに、65 歳以上の就業者数が 479 万人中 81 万人と約 17% を占めており [3]、今後高齢の熟練技能者が大量離職することが予想され、就業者や熟練技能者の不足による生産性の低下が懸念されている。次に、全産業と建設業の年間実労働時間を Fig. 1.2 に示す [4]。図より、実労働時間は、減少の傾向にあるものの、全産業と比較すると長くなっている。加えて、2024 年 4 月より、建設業も許容される時間外労働時間の上限値が法律で規定されるため、労働時間のさらなる削減が求められる。また、建設業は、他の産業と比較して労働生産性が低く、製造業と比べると約半分程度となっている [3,4]。続いて、建設業と全産業の死亡災害発生件数を Fig. 1.3 に示す。図に示すように、全産業における死亡災害のうち建設業が占める割合は、約 36% であり、全産業のうち最も高い。このうち、建機による「はさまれ・巻き込まれ」や「激突され」などに分類される災害 [5] の発生件数は、2021 年において約 13% と建設業での災害の中で 2 番目に多く [6]、建機を用いた作業での安全性が課題となっている。以上のことから、建設業が抱えている問題を解決するためには、生産性と安全性を向上させる必要がある。



(a) The number of workers in the construction industry



(b) Percentage of workers aged under 29 and over 55 in all industries and the construction industry

Fig. 1.1: Statistics of worker.

建設業における生産性と安全性の向上を達成する手段として、遠隔施工と自動化施工が挙げられる。遠隔施工は、油圧制御弁やレバーの操作機構を建機に取り付けて遠隔操作可能とし、俯瞰カメラや車載カメラの映像をもとにリモコンを用いて操作し施工する手法である。遠隔地から建機を操作可能であるため、災害復旧など危険地帯での作業において安全性が向上する利点がある。さらに、一拠点からの複数現場への遠隔施工によって就業者不足の問題を解決することにより、生産性の向上も期待されている。自動化施工は、操作機構や計測センサを取り付けて建機を自動化し、操作者が与えた指示に応じて自動化建機が作業し施工する手法である。1人の操作者が複数台の建機に指示可能であることや熟練技能者同等の作業を実施できる [7] ことから生産性の向上に、また、建機稼働領域内に人の立ち入りが無いこと

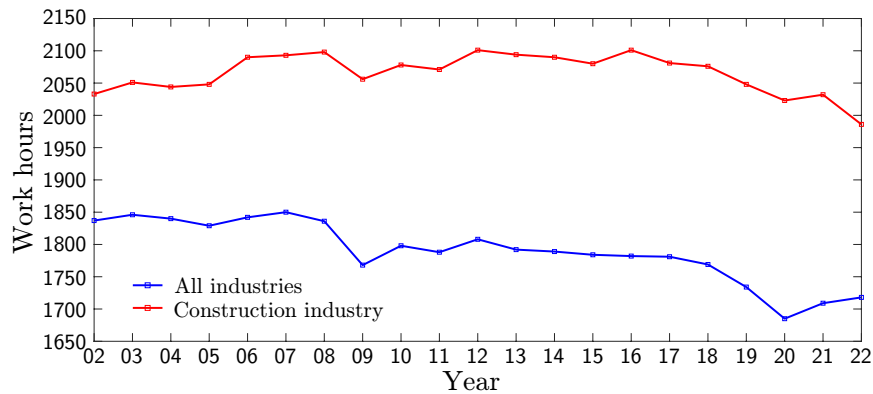


Fig. 1.2: Work hours in all industries and the construction industry.

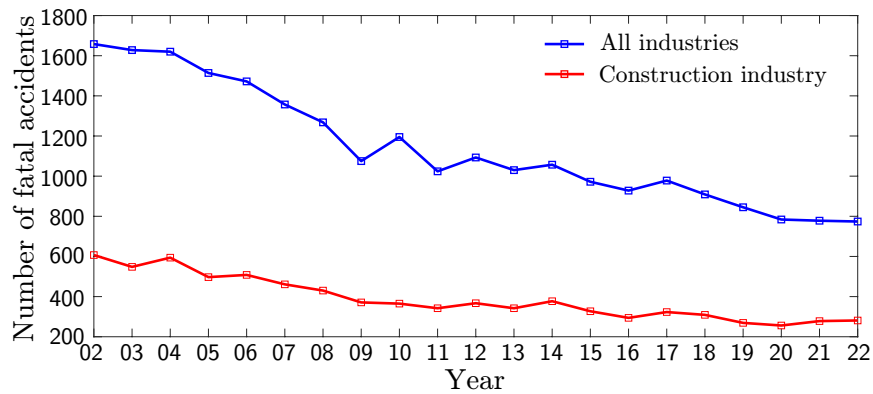


Fig. 1.3: The number of fatal accidents in all industries and the construction industry.

から安全性の向上につながると期待されている。実際に、鹿島建設が自動化建機を施工に本格適用している成瀬ダムでは、2022年10月に月間打設量の最高記録を更新しており [8]、自動化施工による生産性の向上が確認されている。さらに、遠隔操作と自動化施工を組み合わせた施工実験も実施されており [9]、将来的には、遠隔と自動を組み合わせた完全無人の現場が実現されることも期待される。

遠隔施工は、雲仙普賢岳の災害復旧をきっかけに普及してきた [10,11]。1991年に発生した雲仙普賢岳の噴火災害では、火砕流が到達する可能性のある区域において、土石流の原因となる堆積土砂の除去作業が必要となった。このとき、作業員の安全確保を目的とし、遠隔施工が実施された [12,13]。それ以降、地震、豪雨による土砂崩れ、噴火などの災害復旧作業、および福島第一原子力発電所の廃炉作業など、危険が生じる作業において遠隔施工が実施されており [14–16]、2022年10月現在、約200件の実績が報告されている [17]。さらに、月面の有人拠点建設を対象とした遠隔施工システムの構築もされている [18]。また、遠隔操作を対象とした研究も多



(a) Work in dam construction [8]

(b) Cooperative work by automated machines [37]

Fig. 1.4: Application of autonomous construction machines in construction site.

く実施されている。例えば，建機の操作アクチュエータ [19–22]，遠隔操作ロボットの開発 [23, 24]，およびヘッドトラッキングシステム [25] やコックピットなどの遠隔操作システム [26–30] といった，遠隔操作を実施する機構や操作環境を取り扱った研究がなされている。さらに，映像 [31–33] やネットワーク環境 [34] など遠隔施工時のインフラに関する研究，および操作レバーのフォースフィードバックシステム [35] や負荷情報のフィードバックによる機種切替え時の作業時間抑制 [36] など操作性の向上に関する研究も実施されている。このように，遠隔施工は，現在では危険作業での安全性向上が主目的として適用されている。また，インフラ構築や操作性向上を通じて遠隔施工の効率を向上させる取り組みも実施されており，遠隔施工のさらなる普及と生産性向上が予想される。

自動化施工は，Fig. 1.4 に示すように日本国内の建設会社を中心とした現場適用へ向けた取り組み，および自動化や自律化の達成を目的とした学術的研究が進められている。土木現場で主に用いられる建機の自動化における取り組みについて，走行の自動化 (Run)，掘削など作業の自動化 (Work)，軌道などの動作計画 (Planning)，および複数台建機での作業 (Cooperative) の対象作業ごとに文献を分類したものを Table 1.1 に示す。表において，文献番号の重複は，その文献において複数種類の自動化を対象としていることを示す。建設会社が実施している取り組みでは，鹿島建設は，ブルドーザ，振動ローラおよびダンプトラックなどを自動化しており [38, 39]，ダム現場の施工に本格適用している [40]。また，福島第一原子力発電所の高線量がれき運搬作業におけるフォークリフトとクローラダンプの自動化 [41] や，自動バッ

Table 1.1: Work on automation of construction machinery employed in civil engineering construction site for each task.

Construction machinery	Type of task			
	Run	Work	Planning	Cooperative
Dump truck	[43, 46, 55]	-	[61]	[39]
Bulldozer	[56]	[44]	[69]	[39, 45, 48, 53]
Vibration roller	[38, 42, 50, 57]	-	-	[39, 45, 53]
Backhoe	[58]	[54, 59, 62–64]	[65–67]	[37, 47, 48, 52]
Crawler dump	[41, 49]	-	-	[37, 48, 51]
Wheel loader	[60]	[68]	-	-

クハウと自動クローラダンプの協調作業 [37] など実施している。大成建設は、振動ローラ [42]、ダンプトラック [43] およびブルドーザ [44] の自動化に取り組んでおり、ダム現場への適用 [45] を実施している。大林組は、アーティキュレートダンプの自動化 [46]、自動バックハウによる有人運転ダンプトラックへの積込作業 [47]、および盛土工事の現場実証 [48] に取り組んでいる。熊谷組は、クローラダンプ [49] や振動ローラ [50] の自動化、および自動クローラダンプの協調作業 [51] を実施しており、安藤ハザマは、自動バックハウの複数台同時稼働 [52]、および自動振動ローラと自動ブルドーザの実証試験 [53] を、フジタは、バックハウの自動化 [54] に取り組んでいる。また、建機の自動化や自律化を達成するための研究もなされている。建機の自動化に着目すると、ダンプトラック [55]、ブルドーザ [56]、振動ローラ [57]、バックハウ [58, 59] およびホイールローダ [60] の自動化やダンプトラックの経路生成 [61] が実施されている。作業の自動化に焦点を当てると、バックハウの積込作業では、反復学習制御 [62]、モデル予測制御 [63]、動作速度を考慮した制御系の設計 [64] および掘削軌道計画 [65–67] が実施されている。また、ホイールローダのすくい取り動作における自動制御 [68] やブルドーザの押土経路最適化 [69] が研究されており、さらに、ディープラーニング適用による自律性向上 [70] や自動化施工における通信環境の構築 [71] も取り組まれている。このように、遠隔施工と比べると現場適用は試験的な段階であるが、自動化施工の現場適用や要素技術の開発は、着実に進んでおり、自動化施工の普及による生産性と安全性の向上が見込まれる。

遠隔施工と自動化施工を現場へ適用する場合、それぞれに対して生産性と安全性に関する課題が存在する。遠隔施工では、視覚情報の差異や通信遅延による、生産性と安全性の低下が課題となっている [72–75]。特に通信遅延では、操作画面の確認

のみにより、通信環境の悪化を起因とする遅延の発生をリアルタイムに把握することは、難しい。例えば、操作室から建機への通信路では、操作者の指令値入力に対して、指令値の建機側システムへの印可に遅延が生じ、建機の動作が遅れる状況が想定される。このとき、遅延の発生に気づかない操作者が繰り返し指令値を入力することにより、結果的に過大な入力が入可されて建機が作業エリアから逸脱し、周囲の機械や作業者と衝突する危険が想定される。このことから、遠隔施工において通信遅延への対処が求められる。自動化施工では、時々刻々と変化する作業環境に対し、自律的に対処することが求められる。現場では、土の硬さや湿潤度合いなどの環境が場所ごとに時々刻々と変化しており、それにより走行特性が変化する。そのため、走行特性の変化によって自動走行中の目標経路への追従性能が劣化し、安全性の低下、および稼働率低下による作業効率の低下が懸念される。こうした変化に事前に対処するためには、走行する箇所全域における走路状態の事前計測や走路状態を保つための定期的な整備が必要となり、コストの増加や施工効率の低下につながる。さらに、熟練技能者は、自身の経験知や勘によって対処している一方、自動化建機では、システムとして対処することが求められる。

1.2 目的

本論文では、遠隔施工と自動化施工における生産性と安全性の向上を目的として、現場での施工中に生じる環境変化に即する建機の制御システムを開発する。対象とする建機は、現場適用の観点から、土木現場で広く用いられるクローラダンプとする。遠隔施工では、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムを開発する。まず、ステップ応答法により、遠隔操作で用いる前後進の直線走行と旋回動作のモデルを同定する。次に、リファレンスガバナと同定したモデルから設計した切替え制御により構成される、安定性が理論的に保証された手法を建機の遠隔制御に実装する。そして、実機試験をおこない、通信遅延の存在下において、建機を安全に遠隔操作可能であることを検証する。自動化施工では、走路状態の変化を起因とする自動走行の追従性能劣化を抑制する制御システムを開発する。まず、差動二輪モデルを応用し、走路状態の変化を考慮した自動走行時のモデルを同定する。次に、走路状態の推定器を構成し、オンライン推定精度を実験的に検証する。そして、推定器をソフトセンサとして用いる切替え制御による制御システムを提案し、

走路状態が複数回変化する状況における追従性能を数値的に検証する。

本論文における産業応用の観点と学術的観点での貢献は、次に示す通りである。産業応用の観点では、現場での施工中に生じる環境変化に対処でき、遠隔施工と自動化施工における生産性と安全性の向上を達成できる点である。操作者が気づかない遅延の発生下でも安全に遠隔操作でき、また、自動走行中の走路状態変化による経路からの逸脱を抑制できるシステムは、生産性と安全性の向上に大きく寄与し、遠隔施工と自動化施工のさらなる普及につながると見込まれる。学術的観点は、以下の2点である。遠隔施工システムの開発では、安定性が理論的に保証された手法を実際の建機とネットワーク環境に実装し、実機検証をおこなった点である。自動走行システムの開発では、構成した走路状態推定器をソフトセンサとして用いる制御系を構成し、制御性能の向上を数値的に検証した点である。

1.3 構成

本論文の構成は、次の通りである。第2章では、本論文で用いる建機の概要、および遠隔操作と自動走行を実現するために取り付けたレトロフィット型油圧制御システムと計測センサについて述べる。第3章では、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムの開発について、実装した手法と実験結果を説明する。遠隔制御システムには、リファレンスガバナと実機のモデルから設計した切替え制御により構成される手法を応用する。この手法をクローラダンプの遠隔制御に実装し、遅延の存在下において安全に遠隔操作可能であることを検証する。第4章では、走路状態の変化を起因とする自動走行の制御性能劣化を抑制する制御システムの開発について、提案手法と有効性の検証結果を述べる。まず、走路状態の変化と曲線経路への追従を考慮したモデルを同定する。次に、走路状態推定器と切替え制御により構成される制御システムを提案する。そして、ダンプに実装した走路状態推定器のオンライン推定精度に関する実験的検証とシミュレーションによる制御性能の数値的検証を実施する。最後に、第5章において本研究をまとめ、今後の課題を議論する。

第2章 建設機械の遠隔化と自動化

本章では、本論文で用いる建機の概要、および遠隔操作と自動走行を実現するために取り付けたレトロフィット型油圧制御システムと計測センサについて述べる。

2.1 はじめに

遠隔施工や自動化施工を実施するためには、建機を遠隔化、もしくは自動化する必要がある。その手段として、専用機の調達、もしくは汎用機への後付けがある。前者は、自動化などに対応した建機 [76] をメーカーから購入する方法であり、ユーザーによる操作機構設置などの改造を必要としない一方、高コストである。後者は、汎用機に対し、レトロフィット型制御機構などを取り付けて改造する方法であり、コストや改造の容易さなどの観点から、現在の遠隔化や自動化で主流な方法である。

遠隔化を実現するためのレトロフィット型制御機構として、建機のキャビン内に取り付けたモータなどを用いてレバーを直接操作する方法 [77]、および取り付けた制御機器によって油圧バルブを操作する方法 [78] がある。前者は、取り扱いが容易である一方、機構の取付誤差が制御誤差に影響するデメリットがある。後者は、油圧バルブを扱うためユーザーでの取り付けが難しい反面、取付誤差の影響を受けないメリットがある。また、いずれの方法においても、レトロフィット型制御システムに対して遠隔操作時と同じプロトコルの信号を印可することにより、自動化を実現することも可能である。

本章では、汎用建機の遠隔化および自動化をおこなう。まず、本論文で用いる建機の概要と操作方式について述べる。次に、遠隔操作と自動走行を実現するために搭載したレトロフィット型制御システムを説明する。本論文では、制御性能の観点から、油圧バルブを操作する方法を採用する。そして、位置や方位などの姿勢情報を計測するために設置したセンサの種類と仕様を述べる。

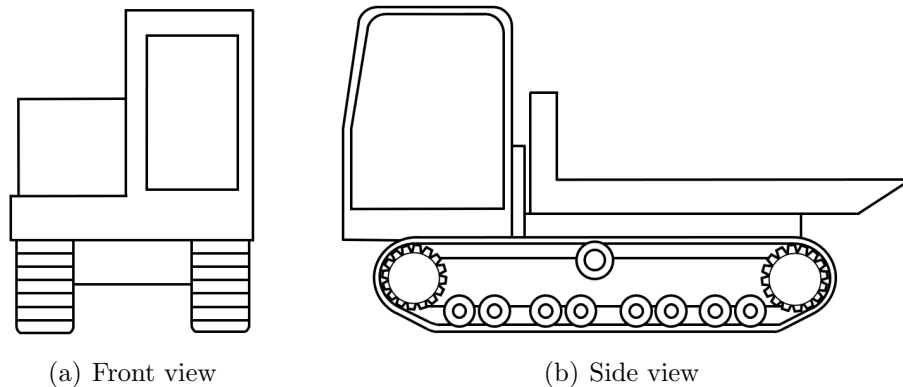


Fig. 2.1: Crawler dump.

2.2 クローラダンプの概要

本論文では、現場適用の観点から、土木現場で広く用いられる建機であるクローラダンプを対象とする。クローラダンプは、Fig. 2.1 に示すように車体の左右に履帯を有しており、土などの運搬作業に用いられる。また、履帯による接地方式のため接地圧が低く、悪路の走破性に優れている特徴がある。本論文で用いるクローラダンプの車長、車幅、および車高は、4670mm、2200mm、2680mm、車重と最大積載量は、それぞれ5410kgと3800kgであり、最大走行速度は、前後進ともに9.2km/hである。

クローラダンプは、キャビン内の操作レバーから機体の左右に有する履帯のモータを独立して操作可能である。レバーを倒す方向と量は、それぞれ履帯の回転方向と回転速度に対応する。走行の種類は、左右履帯の操作レバーを同一方向に同量倒す前後進、操作レバーを同一方向に差をつけて倒し、左右履帯の回転速度差を利用して曲がりながら走行する旋回走行、および左右レバーを反対方向に倒し、その場で回転する超信地旋回がある。

2.3 レトロフィット型油圧制御システム

クローラダンプの遠隔化と自動化を実施するため、汎用の建機に対し、油圧制御システムを後付けする。この油圧制御システムは、左右履帯モータの油圧電磁バルブを制御する機構であり、外部からバルブを-31から31の整数階調で操作可能である。ここで符号は、履帯の回転方向を示しており、正の値は、前進方向、負の値

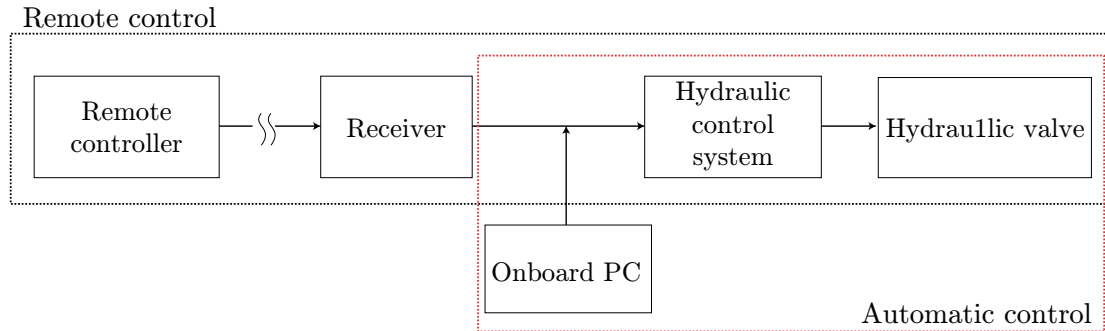


Fig. 2.2: Retrofitted hydraulic control system.

は、後進方向の回転である。

設置した油圧制御システムの構成図を Fig. 2.2 に示す。図の黒破線と赤破線は、それぞれ遠隔操作時と自動走行時に使用する機器である。遠隔操作時には、外部のリモコンから送信した操作量に応じて油圧バルブが開閉し、キャビンに搭乗することなく車体の操作が可能である。自動走行時には、車載 PC から与える操作量をもとに油圧バルブを開閉させることが可能であるため、外部からの操作を必要とせず建機内でローカルに制御系を設計できる。また、車載 PC に対して操作量を送信し、車載 PC を介して油圧バルブの動作を実施することにより、通信路上に制御系を介した遠隔操作が実現可能となる。

2.4 計測センサ

クローラダンプには、位置や角度などの姿勢を計測するセンサが設置されている。計測センサの設置位置を Fig. 2.3 に示す。

車体の位置は、GNSS 受信機 (MR-1, TOPCON) で計測した Real Time Kinematic GNSS (RTK-GNSS) とジャイロセンサ (VSAS-4GM, 東京計器) を用いて計測する。GNSS アンテナは、車体の上部に設置してあり、設置位置の緯度と経度を 10 Hz の周期で出力する。この緯度経度を平面直角座標系へ変換し、基準点からの相対位置を約 30 mm の精度で計測できる。ここで、座標系は、北方位を y 軸、東方位を x 軸の正方向とする数学座標系である。また、ジャイロセンサで計測されたロール角とピッチ角を用い、GNSS アンテナ設置位置から制御点となる機体中心への座標変換をおこなう。さらに、加速度を用いて 10Hz で計測した位置を 100Hz に補間し、位置の計測周期を向上させる。車体のロール角とピッチ角は、100 Hz の周期、および 2.0

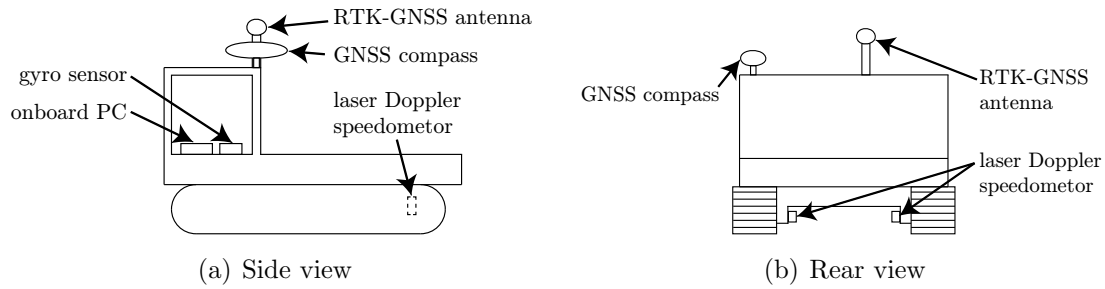


Fig. 2.3: Position of the sensors.

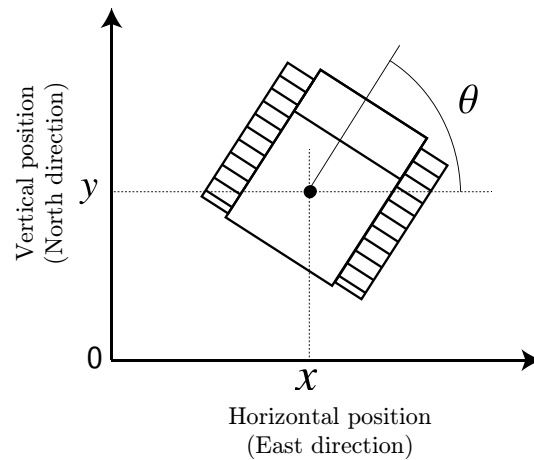


Fig. 2.4: Coordinate in measurement.

σ_{rms} の精度により計測される。 x 方向, y 方向, および z 方向の加速度は, 100 Hz の周期, $\pm 0.08 \text{ m/s}^2 \pm 1.0 \%$ の精度, そして, 0.01 m/s^2 の分解能で計測される。 車体の角度(ヨー角)は, 車体上部に設置されたGNSSコンパス(V113, Hemisphere)により計測する。 計測周期は, 10 Hz, 精度は, 0.30° である。 ここで, 車体の角度は, 数学座標系であり, 東方位を 0° として半時計周りを正とする。 姿勢の座標系を Fig. 2.4に示す。 車体の対地速度は, 左右履帯の内側に設置されたレーザードップラ速度計(MODEL2532A, アクト電子)により計測される。 計測可能な速度は, 前後進ともに 230 km/hまで, 計測可能な地面との距離は, 420 mm から 580 mm の範囲内, 精度は, 0.1%である。 位置の計測や指令値の計算は, 車載PC(ECC-E211C, Interface)上でおこなう。 車載PCのプロセッサは, Intel Core i7 620UE, メモリは, ECC付き 2GB, OSは, Debian 9.6である。 搭載したセンサを Fig. 2.5に示す。



(a) GNSS antenna



(b) GNSS receiver



(c) Gyro sensor



(d) GNSS compass



(e) Laser Doppler speedometer



(f) Onboard PC

Fig. 2.5: Measurement sensors equipped on the dump.

2.5 おわりに

本章では、まず、本論文で用いる建機の概要と操作方法について述べた。そして、その建機に対し、レトロフィット型油圧制御システム、および姿勢情報を計測するためのセンサを設置し、建機の遠隔化、および自動化を実施した。第3章と第4章では、本章で述べた建機を用い、それぞれ遠隔施工と自動施工の現場適用における課題とその解決方法について述べる。

第3章 通信遅延に即する遠隔制御システム

本章では、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムを述べる。

3.1 はじめに

現在、生産性と安全性の向上を実現するため、日本国内において遠隔施工が広く普及している。しかしながら、遠隔施工の現場適用では、通信遅延や損失を起因として安全性が低下する課題が存在する。通信路に遅延が発生すると、操作に対して建機が動作しないために操作者が過大な入力を印加し、作業エリアからの逸脱により周囲の機械や作業者と衝突する危険が生じる。そのため、安全性向上を目的として遠隔施工における通信遅延の対処が求められる。

通信遅延への対処方法として、建設業では、5Gによる通信を用いた遠隔操作が実施されている [79–82]。5Gは、高速度・低遅延という特徴から遠隔操作時の通信技術として着目されている一方、専用の基地局などが必要であり、インフラ整備の課題がある。また、制御工学の観点では、通信遅延や損失を補償するアプローチが実施されている。通信遅延を既知の定数としてモデル化できる場合、バイラテラル制御におけるスキッタリング変換を用いた安定化手法 [83]、スミス補償器の非線形制御への適用 [84]、遅延に対し反復学習制御を用いたモデルフリーの制御手法 [85]、多入力多出力系に対する遅延補償 [84] が適用されている。通信遅延が時変、未知および有界の場合、適応ファジィ制御 [86]、リアプノフ関数を用いた設計法 [87, 88]、および H^∞ フィルタ [89] が遅延の存在下における安定性を保証するために用いられている。さらに、通信遅延を扱う手法として、制御性能と拘束条件の仕様を満たすために参照入力を管理するリファレンスガバナが用いられている。リファレンスガバ

ナを用いた遅延補償では、時変遅延を定数遅延に変換する手法 [90]、長い定数遅延に対する安定性の保証 [91]、不確かな入力と出力の遅延に対する pointwise-in-time となる制約の達成 [92] がなされている。文献 [93] では、長時間の遅延と連続的な損失が生じる長距離通信での補償手法が提案されており、モデル化が困難な遅延の存在下において安定性を保証するには、制御系の不変性が有効であると主張されている。この手法は、遅延のモデルが不要であり、かつ安定性が保証されていることから、実現場におけるネットワーク環境での遠隔施工システムの開発に適していると考えられる。

本章では、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムの開発を目的とする。ここで、実用的な遠隔制御手法を構築するため、遅延と損失の特性をモデル化しない手法を採用する。また、将来的に地球と月面間での遠隔施工が期待されており [18]、地球上での遠隔施工よりも長時間の遅延が発生することから、月面の建機を地球から遠隔操作する状況を想定し、遅延を設定する。本章では、まず、開ループのステップ応答法により、ダンパのモデルを同定する。そののち、リファレンスガバナと同定したモデルから設計した切替え制御により構成される、通信遅延の存在下において安定性が理論的に保証されている遠隔制御手法 [93] をクローラダンパに実装する。そして、月面と地球間のネットワーク環境を模擬した3秒から6秒の正規分布による遅延、および一様分布に従って無作為に発生する損失を設定し、入力制約を満たしつつクローラダンパを操作者が指示した状態に収束させることにより、建機を安全に遠隔操作可能であることを実験的に検証する。遠隔操作の機器構成を Fig. 3.1 に示す。本章では、操作室のPCに接続したジョイスティックからダンパを遠隔操作する。また、遅延を設定するため、通信路に遅延エミュレータ装置を設置する。構成したシステムの詳細は、3.4.1節にて述べる。

3.2 遠隔操作での数理モデルとパラメータ推定

クローラダンパのモデルを線形時不変システムにより同定する。本章では、実際の建設現場における遠隔操作を想定し、クローラダンパの動作を直進走行モデルと超信地旋回による旋回モデルに区別し、それぞれのモデルを同定する。ここで、超信地旋回とは、左右の履帯を逆方向に動作させ、その場で車体を旋回させる方法である。同定では、ステップ応答同定ツールである MATLAB の関数 `tfest.m` により、

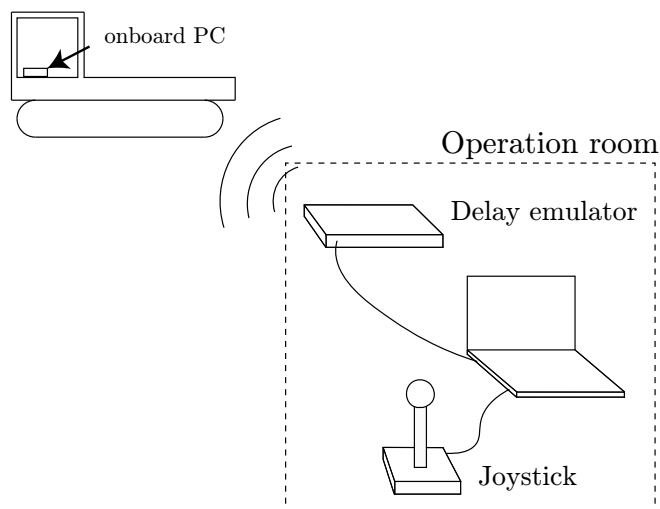


Fig. 3.1: System components for remote control.

連続時間伝達関数のモデルパラメータを推定し、各動作の線形モデルを取得する。なお、`tfest.m`では、The Instrument Variable method [94] 法を推定手法として用いる。また、履帯と土との間における静止摩擦により、レバー指令値に対し履帯が動作しない不感帯が存在するが、不感帯の帯域は、遠隔操作の指令値として取りうる値よりも十分小さいため、不感帯を無視する。

3.2.1 直進走行モデル

前後進する直進走行モデルでは、下式によりレバー指令値に対するダンプの位置が得られる。

$$\Sigma_p(s) = \frac{1.79 \times 10^{-2}}{s(1.07s + 1)}.$$

モデルの時定数とゲインを Table 3.1 に示す。ここで、パラメータ値は、実機で計測した速度に対するステップ応答同定により推定した。

直進軌道上の原点からの相対位置 x_{p1} と速度 x_{p2} を要素に持つ状態ベクトルを $x_p := [x_{p1} \ x_{p2}]^T \in \mathbb{R}^2$ と定義し、零次ホールドにより次式の離散時間状態空間モデルが得られる。

$$\begin{aligned} x_p(t+1) &= A_p x_p(t) + B_p u_p(t), \\ y_p(t) &= C_p x_p(t). \end{aligned}$$

Table 3.1: Estimated Model Parameters for Running in a Straight Line.

Lever input pair	Gain	Time constant
(17, 17)	0.0660	1.142
(18, 18)	0.0623	0.9878
(20, 20)	0.0568	0.9596
(25, 25)	0.0453	0.9407
(30, 30)	0.0376	0.8604

ここで, $t \in \mathbb{Z}_0^+ := \{0, 1, 2, \dots\}$ は, ステップであり, A_p, B_p, C_p は, 時不変の係数行列, そして, $y_p \in \mathbb{R}^2$ は, 位置と速度からなる出力である. また, $u_p := u_1 = u_2 \in \mathbb{R}$ は, 各履帯の直線走行時の制御入力であり, u_1 が右履帯, u_2 が左履帯への指令値を示す. 零次ホールドを用いて 10Hz のサンプリング周期で離散化したときの係数行列は, 次のように得られる.

$$A_p = \begin{bmatrix} 1 & 0.0946 \\ 0 & 0.9031 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0.0003 \\ 0.006 \end{bmatrix}, C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

実験データとの比較により, モデルの妥当性を評価する. 実験データは, クローラダンプの車載PCから, Table 3.1 に示す5パターンの指令値を u_1 と u_2 に入力し, 計測した. 指令値 20 と 25 を入力したときの, 位置に関する実験データとシミュレーションデータの比較, および指令値入力直後における実験データの拡大図を Fig. 3.2 に示す. ここで青線と赤線は, 実験データとシミュレーションデータを示しており, レバー指令値は, 0 s に入力した. Figs. 3.2(a), (b) より, 実験データとシミュレーションデータが概ね一致しており, 得られたモデルがクローラダンプの直進走行における挙動を表現していることが確認できる. また, Figs. 3.2(c), (d) より, むだ時間は, 約 0.4 s であり, Table 3.1 に示す時定数と比較して小さいことから, 本モデルでは, このむだ時間を無視する. なお, このむだ時間は, 油圧バルブの動特性や履帯と地面との静止摩擦などを起因としている.

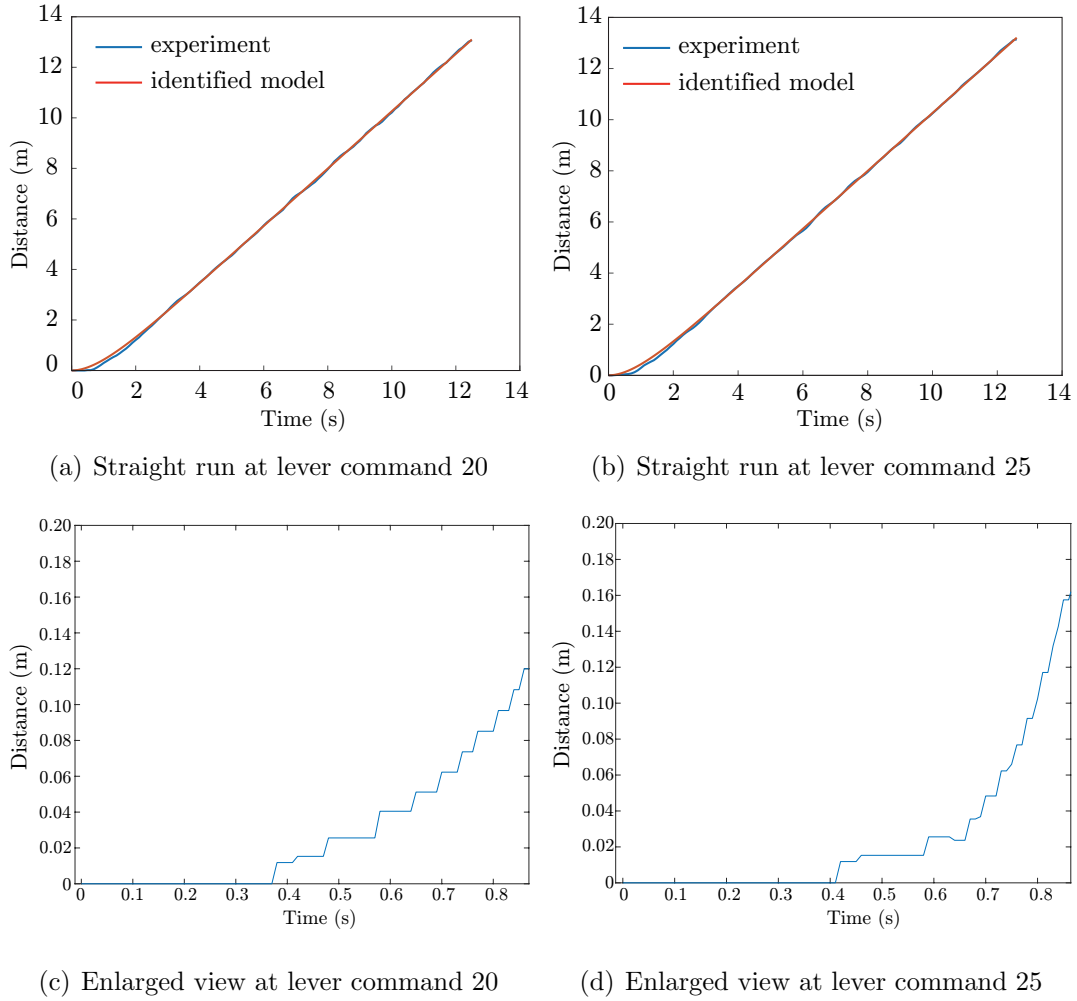


Fig. 3.2: Comparison of simulation results with the identified model and experimental results and Enlarged view of the experimental result in straight run.

3.2.2 旋回動作モデル

旋回モデルでは、左右レバー指令値の差を入力とし、回転角を出力とするモデルを以下の伝達関数で表現する。

$$\Sigma_r(s) = \frac{6.23 \times 10^{-2}}{s(9.78 \times 10^{-1}s + 1)}. \quad (3.1)$$

各パラメータを Table 3.2 に示す。ここで、パラメータ値は、実機で計測した角速度に対するステップ応答同定により推定した。

回転角 x_{r1} と角速度 x_{r2} からなる状態ベクトルを $x_r := [x_{r1} \ x_{r2}]^T \in \mathfrak{R}^2$ と定義し、

Table 3.2: Estimated Model Parameters for Executing a Spin Turn.

Direction of rotation	Lever input pair	Gain	Time constant
clockwise	(9, -9)	0.03025	1.1701
	(12, -12)	0.02432	1.1344
	(15, -15)	0.01680	1.1148
	(18, -18)	0.01465	1.1127
	(21, -21)	0.01317	1.1051
	(24, -24)	0.01202	0.9963
	(27, -27)	0.00912	0.9661
	(30, -30)	0.00505	0.9280
counterclockwise	(-9, 9)	0.03701	1.1609
	(-12, 12)	0.02601	1.1412
	(-15, 15)	0.01910	1.1361
	(-18, 18)	0.01882	1.0917
	(-21, 21)	0.01793	1.0245
	(-24, 24)	0.01210	1.0274
	(-27, 27)	0.00809	0.9812
	(-30, 30)	0.00430	0.9525

零次ホールドを用いて次式の離散時間状態空間モデルが得られる。

$$\begin{aligned} x_r(t+1) &= A_r x_r(t) + B_r u_r(t), \\ y_r(t) &= C_r x_r(t). \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 A_r , B_r , C_r は、時不変の係数行列である。また、 $u_r := u_1 - u_2 \in \mathfrak{R}$ は、左右履帯に対する指令値の差であり、 $y_r \in \mathfrak{R}$ は、回転角である。直進走行モデルと同様に、(3.1) で表現される旋回モデルを離散化すると係数行列は、以下のように得られる。

$$A_r = \begin{bmatrix} 1 & 0.0955 \\ 0 & 0.9105 \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0016 \end{bmatrix}, \quad C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

実験データとの比較により、モデルの妥当性を評価する。実験データは、クローラダンプの車載 PC から u_1 と u_2 に同じ大きさの値を逆方向に入力し、時計回りと半時計回りでそれぞれ Table 3.2 に示す 8 パターンの旋回動作を実施した。回転角の実験データとシミュレーションデータの比較、および指令値入力直後における実験データの拡大図を Fig. 3.3 に示す。ここで青線と赤線は、実験データとシミュレーションデータを示しており、指令値は、0 s に入力した。Figs. 3.3(a), (b) より、どち

らの指令値入力に対しても、約 4.0 s まで実験データがシミュレーションデータとほぼ一致している一方、約 5.0 s 以降では、シミュレーションデータとの間に差が生じている。これは、旋回時に履帯によって押された土が堆積し、回転抵抗が増加したためである。この現象は、土の状態を含め、クローラダンプと環境との相互作用に起因しており、不確実でモデル化が困難であることから、本モデルでは、この非線形性を無視する。また、Figs. 3.3(c), (d) より、むだ時間は、約 0.1 s であり、Table 3.2 に示す時定数と比較して小さいことから、本モデルでは、このむだ時間を無視する。なお、このむだ時間は、油圧バルブの動特性や履帯と地面との静止摩擦などを起因としている。

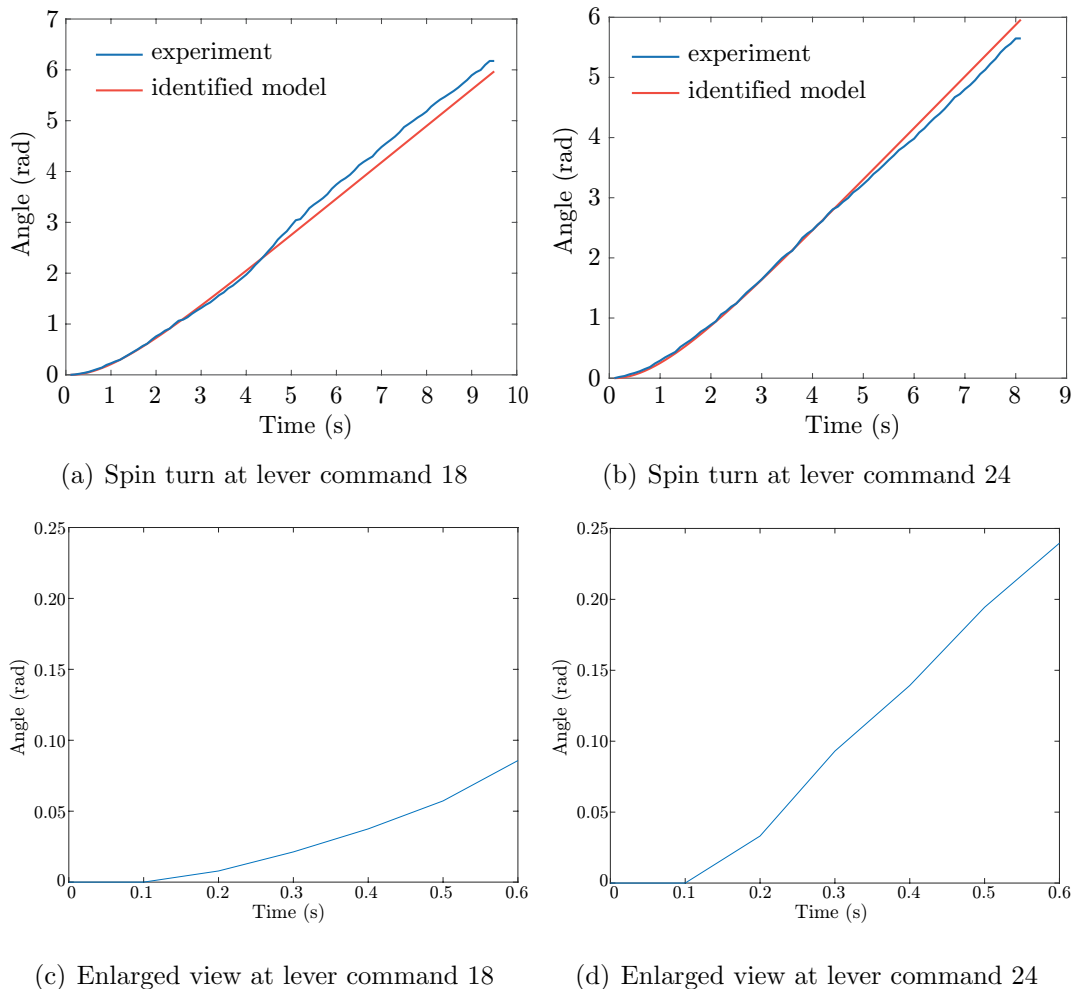


Fig. 3.3: Comparison of simulation results with the identified model and experimental results and Enlarged view of the experimental result in spin turn.

3.3 遠隔制御システムの構成

本章での目的は、通信遅延と損失の存在下において、クローラダンプを安全に遠隔操作することである。そこで制御目的を、入力となるレバー指令値が拘束を満たし、かつダンプの状態を操作者が指示した状態に収束させることとし、本節では、この制御目的を満たす制御系を構成する。制御目的の1つ目は、拘束条件の達成により、遅延の影響によって操作者が意図せず入力した過大な指令値に対し、不安定化を抑制することである。2つ目は、遠隔操作の主目的である。これら制御目的の達成により、通信遅延の存在下においても不安定化せず与えた目標姿勢へ追従する、すなわち安全な遠隔操作の実現が可能となる。

本節では、上記の制御目的を満たす遠隔操作システムの構成手順について述べる。この手法は、従来研究 [93] で提案されており、予測不能、かつモデル化が困難な通信遅延と損失が発生する状況においても、制御系の安定性、および入力が拘束条件を満たすことが理論的に保証されている。また、リファレンスガバナと最大出力許容 (MOA) 集合による不変集合を用いた切替え制御を組み合わせたインデックスフィードバック構造である [95, 96]。

遠隔制御システムのブロック線図を Fig. 3.4 に示す。図に示すように、このシステムは、建機側の切替え制御と操作室側のリファレンスガバナによって構成されており、各システムは、ネットワークを介して接続される。切替え制御は、同定したモデルと設計した制御ゲインによる MOA 集合の設計、および状態が属する MOA 集合のインデックス値に基づいた制御ゲインの切替えをおこなう。また、リファレンスガバナは、状態を MOA 集合内に維持させるよう、操作者が入力した参照値の整形と更新をおこなう。ブロック線図において、 w は、操作者がジョイスティックに

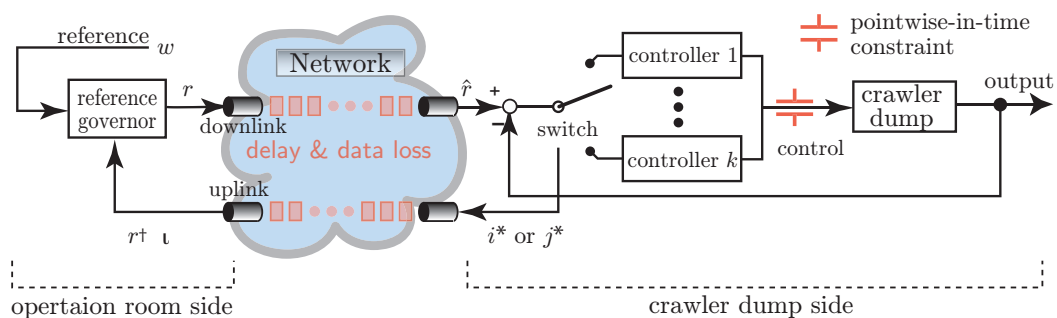


Fig. 3.4: A block diagram of the network-model-free constrained control over networks.

よって与える参照値, r は, リファレンスガバナによる整形後の参照値, \hat{r} は, ネットワークを介して建機側が受信した整形後の参照値, $l \in \{i^*, j^*\}$ は, MOA 集合のうち最小のインデックス値であり, i と j は, それぞれ直進走行と旋回に対応する. また, r^\dagger は, リファレンスガバナからダンプ側に送信されたのちリファレンスガバナへ返ってきた整形後の参照値である. ブロック線図に示すように, 制御器からリファレンスガバナに対し, インデックス値をフィードバックする構造となっており, 通信路の上りと下りに遅延と損失が生じるものとする. ここで, 上りは, 建機側から操作室側, 下りは, 操作室側から建機側への通信である.

3.3.1 拘束条件と制御目的

ダンプの安全な遠隔操作を達成するため, 入力となるレバー指令値に対し拘束条件を設定する. ここで, 実験環境のスペースと安全性の観点から, 許容される制御入力値は, 20 以下と定めた. また, レバー指令値は, 油圧制御システムの特徴から制御入力が整数値となるよう端数処理されており, 許容される制御入力の集合は, 次式により表現される.

$$\mathcal{U} := \left\{ u \in \mathbb{R} \mid \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u \leq \begin{bmatrix} 20 \\ 20 \end{bmatrix} \right\}.$$

これより, 直進と旋回の各動作における制御入力に対して以下の拘束条件が得られる.

$$u_p(t) \in \mathcal{U} \quad \forall t \in \mathbb{Z}_0^+ := \{0, 1, 2, 3, \dots, \infty\}, \quad (3.3)$$

$$u_r(t) \in \mathcal{U} \quad \forall t \in \mathbb{Z}_0^+. \quad (3.4)$$

したがって, それぞれの動作に対する制御目的は, 次の通りである. 直進走行の場合, 位置と速度からなる $w_p \in \mathbb{R}^2$ に対し, $\lim_{t \rightarrow \infty} y_p(t) = w_p$ が成立し, 制御入力が (3.3) で与えられる拘束条件を満たすことである. また, 旋回動作の場合, 回転角度の $w_r \in \mathbb{R}$ に対し, $\lim_{t \rightarrow \infty} y_r(t) = w_r$ が成立し, 制御入力が (3.4) で与えられる拘束条件を満たすことである.

3.3.2 建機側の切替え制御

建機の車載コンピュータに実装した、MOA 集合を用いた切替え制御について述べる。ここで、この制御系は、安定であることを条件とする。また、履帯と土との相互作用による影響を抑制するため、直進と旋回で異なる制御系を用いる。直進走行では、同定したモデルの精度が十分であったので、線形二次レギュレータを使用する。一方、旋回動作では、ダンパの履帯と土の相互作用による目標角度への追従誤差を抑制するため、PI 制御器を使用する。

直進走行では、同定精度の観点よりダンパのモデルを線形システムとして近似できることから、以下の状態フィードバック制御を適用する。

$$u_p(t) = F_{i^*(t)}(\hat{r}_p(t) - y_p(t)).$$

ここで、 $y_p = x_p$ であり、 $\hat{r}_p \in \mathbb{R}^2$ は、ステップ t においてネットワークを介して建機側が受信する、リファレンスガバナで整形後の参照値である。また、 $\hat{r}_p(t) = r_p(t-h)$ であり、 h は、時変の通信遅延を表す。初期状態 $x_p(0) = x_0$ での閉ループ制御系は、

$$x_p(t+1) = A_p^i x_p(t) + B_p^i \hat{r}_p(t), \quad y_p(t) = C_p x_p(t),$$

であり、 $A_p^i = A_p - B_p F_i C_p$ 、 $B_p^i = B_p F_i$ である。また、 $F_i \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 、 $i \in \{1, 2, 3\}$ は、下式によってインデックス値が定まる時間依存のゲインである。

$$i^*(t) = \min_{i \in \{1, 2, 3\}} i \quad \text{subject to } x_p(t) \in O_\infty^i(\hat{r}_p(t)). \quad (3.5)$$

上式において、 $O_\infty^i(\hat{r}_p) \subset \mathbb{R}^2$ は、次で定義される MOA 集合である。

$$O_\infty^i(\hat{r}_p) := \{x_0 \in \mathbb{R}^2 \mid u(t) = g(t; x_0, \hat{r}_p) \in \mathcal{U} \quad \forall t \in \mathbb{Z}_0^+\}.$$

ここで、MOA 集合は、 $\exists \hat{r}_p, i, x_p(t) \in O_\infty^i(\hat{r}_p) \Rightarrow x_p(t+1) \in O_\infty^i(\hat{r}_p)$ となる不変性を有し、 $u(t) = g(t; x_0, \hat{r}_p)$ が拘束条件を満たす集合である。これは、状態が一度 MOA 集合内に属すると、不変性によって集合内に留まり続けるため、拘束条件を満たし続けることを意味する。また、MOA 集合は、それぞれのゲインに対して計算可能であるため、MOA 集合を $O_\infty^1(\hat{r}_p) \subset O_\infty^2(\hat{r}_p) \subset O_\infty^3(\hat{r}_p)$ となるよう設計すると、不変性により (3.5) で示す最適化計算の結果は、 $i \in \{1, 2, 3\}$ のうち最小値となる。

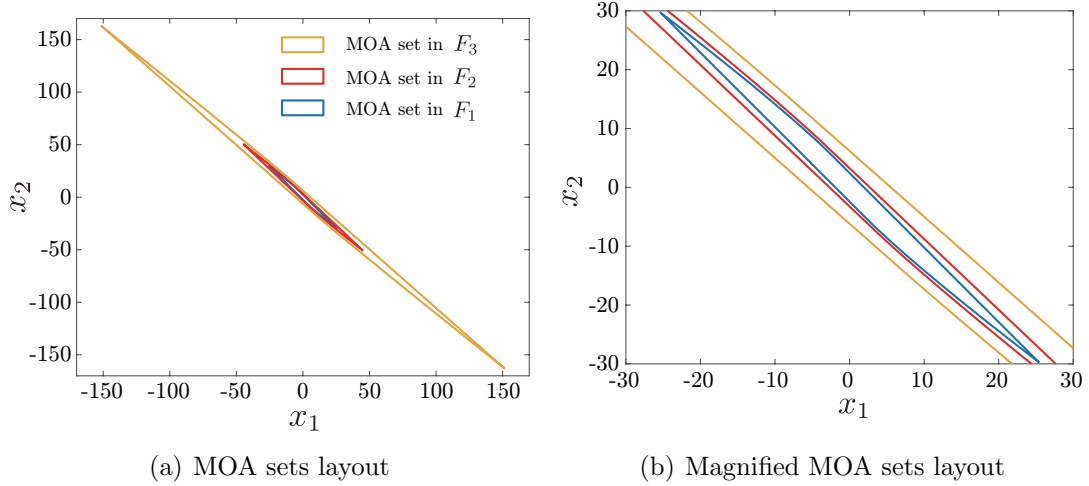


Fig. 3.5: MOA sets implemented on the on-board computer to locally control the dump.

切替え制御では、2つ以上の制御ゲインを切替えることによる制御性能の向上、およびコンピュータリソースの観点から、3つのフィードバックゲインを以下の評価関数

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{x_p(k)^T Q_i x_p(k) + u_p^T(k) R_i u_p(k)\},$$

による離散時間線形二次レギュレータを用いて設計する。 Q_i と R_i は、以下に示す設計パラメータである。

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 80 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_1 = 0.7, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_2 = 0.7, \quad Q_3 = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_3 = 3.0.$$

ここで T は、転置を示す。設計したフィードバックゲインは、次の値である。

$$F_1 = \begin{bmatrix} 10.4104 & 8.2206 \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} 7.4108 & 6.1638 \end{bmatrix}, \quad F_3 = \begin{bmatrix} 3.6139 & 3.2345 \end{bmatrix}.$$

それぞれのゲインに対し得られた、 $r_p = 0$ におけるMOA集合をFig. 3.5に示す。図に示すように、MOA集合は、凸となり、 $O_{\infty}^1(0) \subset O_{\infty}^2(0) \subset O_{\infty}^3(0)$ の包含関係を満たしている。よって、 $x_0 \in O_{\infty}^3(0) (:= \bigcup_i O_{\infty}^i(0))$ となるよう初期状態を選べば、切替え則は、入力拘束を満たし、 $r_p = 0$ に対応する集合内の点に収束するため、安全な遠隔操作が保証される。

旋回では、ダンプの回転角に対する参照値 $w_r \in \mathfrak{R}$ に対してゲインを切替える

PI制御器を用いる。その理由は、履帯と土の相互作用に起因する目標角度への追従誤差を抑制するためである。切替え制御が受信した参照値 $\hat{r}_r \in \mathfrak{R}$ を用いて誤差を $e := \hat{r}_r - y_r$ 、制御器の状態を $x_c \in \mathfrak{R}$ と定義することにより、制御系は、下式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_c(t+1) &= x_c(t) + e(t), \\ u_r(t) &= K_{Ij^*(t)}x_c(t) + K_{Pj^*(t)}e(t). \end{aligned} \quad (3.6)$$

K_{Ij^*} と K_{Pj^*} は、時変のIゲインとPゲインであり、以下の切替え則によって与えられる。

$$j^*(t) = \min_{j \in \{1,2,3\}} j \text{ subject to } \xi(t) \in O_\infty^j(\hat{r}_r). \quad (3.7)$$

ここで $\xi := \begin{bmatrix} x_r^T & x_c \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^3$ は、(3.2) と (3.6) から求められる閉ループ系の状態である。

MOA 集合は、以下に示す閉ループ系を用いて計算する。

$$\begin{aligned} \xi(t+1) &= A_{rj}\xi(t) + B_{rj}\hat{r}_r(t), \\ y_r(t) &= \bar{C}_r\xi(t). \end{aligned}$$

ここで、 $j \in \{1,2,3\}$ における A_{rj} 、 B_{rj} 、 \bar{C}_r は、

$$A_{rj} = \begin{bmatrix} A_r - K_{Pj}C_r & B_pK_{Ij} \\ -C_r & 1 \end{bmatrix}, \quad B_{rj} = \begin{bmatrix} B_rK_{Pj} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_r = \begin{bmatrix} C_r & 0 \end{bmatrix},$$

である。MOA 集合は、閉ループ系のモデルと (3.4) に示す拘束条件によって定まる。本論文では、次の3組のPIゲインを設計した。

$$K_{P1} = 90, \quad K_{I1} = 1, \quad K_{P2} = 40, \quad K_{I2} = 0.5, \quad K_{P3} = 5, \quad K_{I3} = 0.09.$$

直進走行の制御器と同様に、 $\xi(0) \in \bigcup_j O_\infty^j(r_r)$ が成り立つとき、MOA 集合の不変性により、拘束条件を満たしつつ状態が r_r に対応する集合内の点に収束する。

しかしながら、ダンパの状態を参照値 w_p や w_r に対応する定常状態に収束させるためには、不変性を保ちつつ、すなわち任意の $t \in \mathbb{Z}_0^+$ に対し、 $x(t) \notin \bigcup O_\infty^i(\hat{r}_p(t+1))$,

もしくは $\xi(t) \notin \bigcup O_\infty^j(\hat{r}_r(t+1))$ とならないように、切替え制御が受信した信号 \hat{r}_p や \hat{r}_r を、操作者が与えた参照値 w_p や w_r に一致させる必要がある。不変性を保ちつつ w_p や w_r を整形し、整形した値を参照値に一致させるよう更新するのは、リファレンスガバナの役割であり、次で述べる。

3.3.3 操作室側のリファレンスガバナ

参照値の整形と更新をおこなうリファレンスガバナについて述べる。整形と更新には、情報対 $(r^\dagger, r^\ddagger, \iota)$ を用いる。なお、表記を簡素化するため、Fig. 3.4 に示す整形前の参照値 w 、およびダンブ側が受信した整形後の参照値 \hat{r} における、直進走行と旋回動作を区別するための添え字 p と r は、省略する。また、 r^\dagger は、ダンブ側に送信したのちに返ってきた整形後の参照値、 r^\ddagger は、1ステップ前における整形後の参照値である。 $\iota \in \{i^*, j^*\}$ は、ダンブ側において、(3.5)、または(3.7)によって求められた最小インデックス値である。リファレンスガバナは、 $\iota = 1$ と $r^\dagger = r^\ddagger$ を満たす ι と r^\dagger を受信したとき、参照値の更新量を計算する。ここで、 $\iota = 1$ は、状態が最も内側の MOA 集合に属すること、すなわち $x(t) \in O_\infty^1(r^\dagger)$ を意味し、 $r^\dagger = r^\ddagger$ は、整形後の参照値をリファレンスガバナと切替え制御の両方で共有できることを示す。この $\iota = 1$ と $r^\dagger = r^\ddagger$ となるタイミングの検出、および参照値更新量の計算を適切に実施することにより、全てのステップにおいて状態を MOA 集合内に維持することが可能となる。また、通信遅延や損失により、リファレンスガバナが r^\dagger と ι を受信できない場合がある。このとき、最後に利用可能な信号を計算に用いることで遅延や損失への対処をおこなう。以上により、通信遅延や損失を起因とする、拘束条件の未達成やシステムの不安定化を防ぐことが可能となる。

更新タイミングの検出と更新量の計算手順を **Algorithm 1** と Fig. 3.6 に示す。図において、赤線と黒線は、それぞれ $O_\infty^1(r^\dagger)$ と $O_\infty^3(r^\dagger)$ となる MOA 集合であり、Fig. 3.6(a) を初期状態とする。更新タイミングは、Fig. 3.6(b) に示すように $x(t) \in O_\infty^1(r^\dagger)$ となり、かつ $r^\dagger = r^\ddagger$ となる r^\dagger をリファレンスガバナが受信したときである。このとき、不変性によって、赤線で示す内側の MOA 集合内に必ず状態が存在するため、Fig. 3.6(c) に示すように MOA 集合を移動させたとしても、状態は、黒線で示す外側 MOA 集合内に属する。そのため、下式の線形最適化問題を用い、外側の

Algorithm 1 Timing Detection and Reference Governor:

```

1: if  $w \neq r^\dagger$  then
2:   if  $r^\dagger == r^\dagger$  and  $\iota(t) == 1$  then
3:     output  $r$  given by (3.8) and (3.9)
4:   end if
5: end if
6: if  $w == r^\dagger$  then
7:   output  $w$ 
8: end if
9: goto 1
  
```

MOA 集合が内側の MOA 集合を内包する範囲で参照値の更新量を計算する。

$$\max_{0 < \alpha < 1} \alpha(t) \quad \text{subject to } x_e(r) = x_e(r^\dagger) + \alpha(t)\Delta x(t), \quad (3.8)$$

$$O_\infty^1(r^\dagger) \subset O_\infty^3(r^\dagger) \oplus \alpha(t)\Delta x(t).$$

ここで、 $\Delta x := x_e(w) - x_e(r^\dagger) \neq 0$ 、 $\alpha \in \mathbb{R}$ であり、 $x_e(r^\dagger)$ は、参照値 r^\dagger に対する閉ループ系の定常状態、 \oplus は、ミンコフスキー和である。そして、リファレンスガバナは、下式を用いて整形参照値 r を計算し、ダンパ側へ送信する。

$$r = r^\dagger + \alpha^*(t)C_*\Delta x(t). \quad (3.9)$$

ここで、 α^* は、(3.8) によって得られた最適解、 C_* は、直進走行において C_p 、旋回において \bar{C}_r である。そして、Fig. 3.6(d) に示すよう MOA 集合の更新をおこなう。この計算を繰り返すことにより、拘束条件を満たしつつ、MOA 集合の移動が可能となる。したがって、リファレンスガバナは、(3.8) と (3.9) により、時変な通信遅延と有限な損失の存在下において任意の t に対して MOA 集合の不変性を保つ、すなわち $x(t) \in \bigcup O_\infty^i(\hat{r}_p(t+1))$ 、もしくは $\xi(t) \in \bigcup O_\infty^j(\hat{r}_r(t+1))$ が成立する整形参照値 r を与えることができる。また、制御系の線形性により、 $\alpha^*(t) = 1$ が成り立つステップ t が存在する。これは、 $r = w$ となることを意味しており、それにより $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = w$ が達成される。

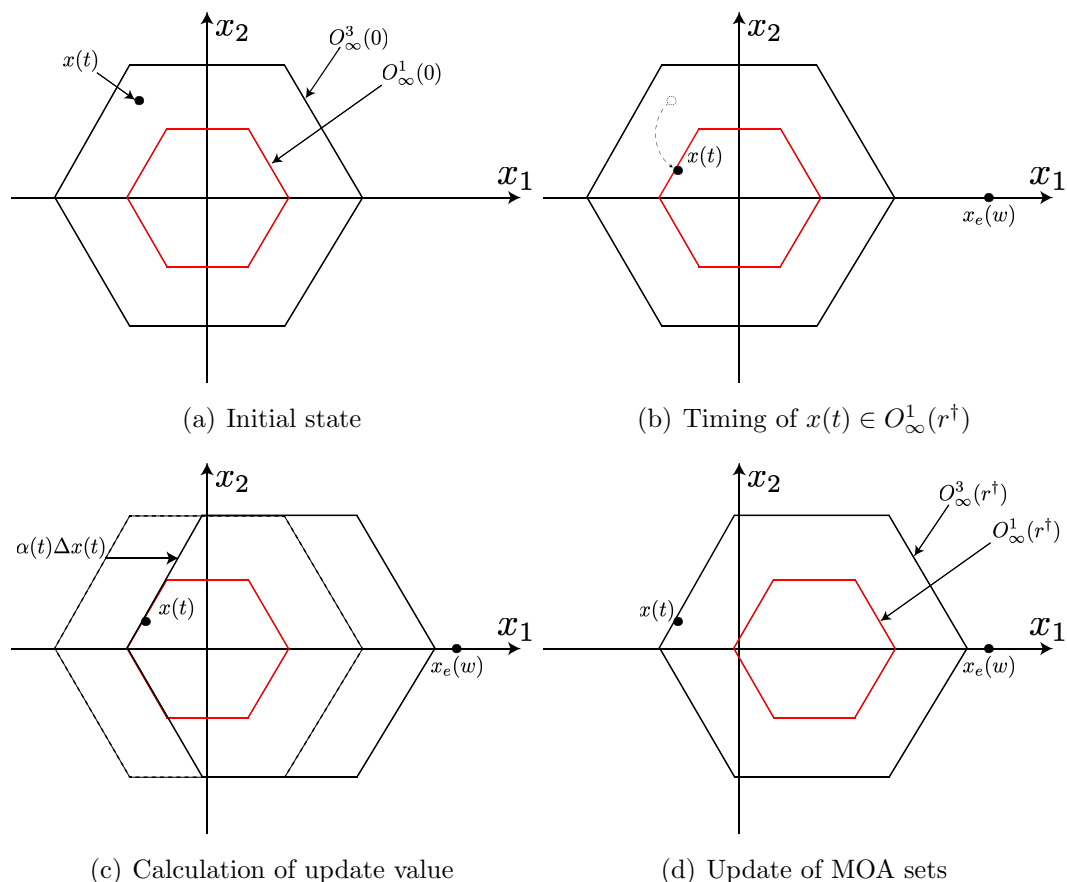


Fig. 3.6: Calculation of modified reference using MOA sets.

3.4 実機実験による検証

本節では、構成した遠隔制御システムをダンプに実装し、遅延や損失のモデルを用いることなく、入力制約を満たしつつダンプを目標地点へ操作可能であることを、実機実験により検証する。実験では、遅延エミュレータによって生成された、遅延と損失に関する2種類の通信条件を考える。1つ目の条件では、遅延を平均4.5 sと分散1.5 sの正規分布に従って生成する。2つ目の条件では、遅延に加え、一様分布に従う無作為なパケット損失が生じる設定とする。

まず、3.4.2節では、入力制約を満たすためにリファレンスガバナが不可欠であることを示し、実装した遠隔操作システムにより拘束条件の遵守が達成されることを検証する。さらに、3.4.3節では、2つの通信条件下においてそれぞれ、施工への適用を想定した操作をおこない、安全な遠隔操作が可能であることを検証する。



Fig. 3.7: A joystick inputting references and note PC in the operation room.

3.4.1 遠隔操作システムの構築

遠隔操作システムは、クローラダンプの車載PC(ECC-E211C, Interface, Debian 9.6), 操作室のPC(ThinkPad P51, レノボ, Ubuntu 16.04), および操作室PCに接続し, 操作をおこなうためのジョイスティックから構成される. 操作室のシステムを Fig. 3.7 に示す. 3.3.2 節で述べた切替え制御は, ダンプの車載PC上に, 3.3.3 節で述べたリファレンスガバナは, 操作室のPC上にそれぞれ実装される. また, ダンプと操作室のPC間は, UDPによる無線通信をおこなう. ここで, 通信遅延や損失を設定するため, 通信路において遅延と損失のエミュレータ装置 (Ethdelay2Pro, Nippon CAD) を設置する.

遠隔操作では, クローラダンプを操作室から目視可能な位置に設置し, 操作者は, 目視したダンプに対してジョイスティックを用いて操作する. 走行と旋回モードは, ジョイスティックによって切替え可能である. また, 参照値について, レバーの傾斜量は, 走行モードでは, 距離, 旋回モードでは, 旋回量にそれぞれ対応する.

3.4.2 拘束条件の検証

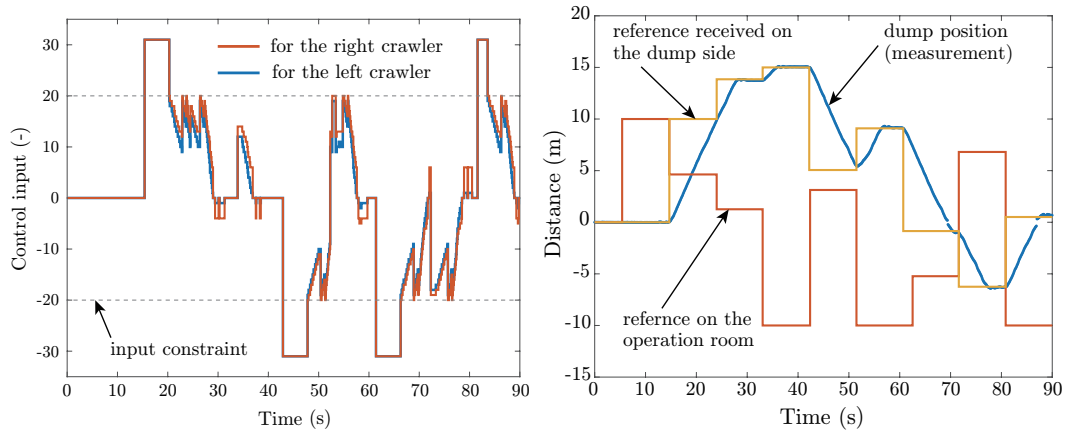
指令値が拘束条件を満たすには, リファレンスガバナが不可欠であることを検証するため, 切替え制御のみを用いる方法, およびリファレンスガバナと切替え制御を用いる方法に対し, 通信遅延の存在下において前後進の直進操作をおこなう.

切替え制御のみを用いる方法では、操作者がジョイスティックによって入力した指令値は、整形されずダンプに直接送信される。実験結果を Fig. 3.8 に示す。Fig. 3.8(a) は、レバー指令値の時間応答と入力制約を示しており、青線と赤線は、左右履帯への指令値、黒線は、入力制約である。ダンプの位置とジョイスティックによって入力された指令値の時間応答を Fig. 3.8(b) に示す。青点は、操作開始地点からのダンプの位置である。また、赤線は、操作者が入力した指令値、黄線は、車載 PC で受信した参照値である。ここで、ダンプの位置と参照値は、走行開始位置からの相対距離であり、操作者が入力した指令値は、入力時点で印可されている指令値に対する相対距離である。Fig. 3.8(a) に示すように、レバー指令値が入力制約の上限と下限を超過している。これは、操作者が通信路上で発生した遅延を予測することが困難であり、目視したダンプの挙動に対して操作することにより、過大な指令値を入力したためである。以上の結果より、切替え制御のみを用いる方法では、通信遅延の存在下において入力制約の遵守を保証できないことが確認された。

次に、リファレンスガバナと切替え制御による遠隔制御システムを用いてダンプの前後進操作をおこない、遅延発生下における入力制約の遵守について、切替え制御のみを用いた方法と比較する。実装した遠隔制御システムでは、ジョイスティックから入力された値がリファレンスガバナによって整形され、整形後の値がダンプに送信される。実験結果を Fig. 3.9 に示す。各図のラベルと凡例は、Fig. 3.8 と同一である。Fig. 3.9(a) より、レバー指令値は、入力制約の範囲内であることがわかる。これは、Fig. 3.9(b) に示すように、切替え制御のみを用いた Fig. 3.8(b) と異なり、リファレンスガバナの機能によってジョイスティックで入力された値が小さく整形されるためである。以上の実験結果より、予測できない時変遅延の存在下において入力制約を満たすためには、リファレンスガバナが不可欠であることが確認された。

3.4.3 安全性の検証

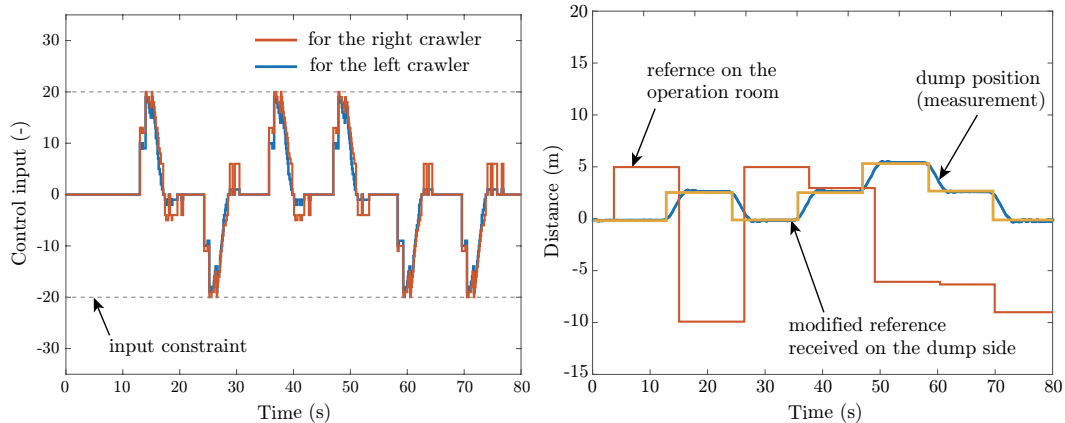
次に、施工を想定した連続操作をおこない、入力制約の達成および目標姿勢への追従による遠隔操作の安全性を検証する。遠隔操作手順は、施工における任意の場所への移動を想定し、前進、旋回および前進の連続操作をおこなう。通信遅延のみを設定した1つ目のネットワーク条件での実験結果を Fig. 3.10 に、通信遅延に加えて損失を設定した2つ目の通信条件下での実験結果を Fig. 3.11 に示す。



(a) Lever commands for left and right crawlers with only the switching control (b) Running path with only the switching control

Fig. 3.8: Comparison of control over networks without reference governor. Communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in upload and download.

まず, Fig. 3.10 に示す, 通信遅延のみを設定した1つ目のネットワーク条件での実験結果を考察する. クローラダンプの走行軌跡を Fig. 3.10(a) に, レバー指令値の時間応答と入力制約を Fig. 3.10(b) に示す. レバー指令値の時間応答において, 青線と赤線が左履帯と右履帯への指令値, 黒線が入力制約である. 直進走行におけるダンプの位置, 操作者が入力した指令値 w_p , 整形後の参照値 r_p , およびダンプが受信した整形参照値 \hat{r}_p を Fig. 3.10(c) に示す. また, 旋回動作におけるダンプの角度, 操作者が入力した指令値 w_r , 整形後の参照値 r_r , およびダンプが受信した整形参照値 \hat{r}_r を Fig. 3.10(d) に示す. ここで, 縦軸は, 操作者が制御モードを直進走行と旋回動作に設定したときの初期姿勢に対する相対値である. また, 青点, 赤線, 黄線および紫線は, それぞれ計測した位置と角度, 入力した指令値, 整形後の参照値およびダンプが受信した整形参照値を示す. そして, 切替え制御におけるインデックス値を Fig. 3.10(e) に示す. Figs. 3.10(b), (d) より, 150 s 付近において, 入力値が増加している一方, ダンプが旋回していないことが確認された. これは, Fig. 3.12 に示すように, ダンプが回転するにつれて履帯によってかき上げられた土の量が増えて回転の抵抗が増加し, 履帯と地面との相互作用がダンプの回転特性へ影響するためである. また, Fig. 3.10(e) より, 旋回動作においてインデックス値が変化しないことが確認された. これは, 更新後の状態が最も内側の MOA 集合に属しているためである. しかし, 拘束条件を満たしつつ目標角度に追従しているため, 遠隔制御システムは, 有効に機能していることがわかる. 以上の実験より, 通信遅延が発



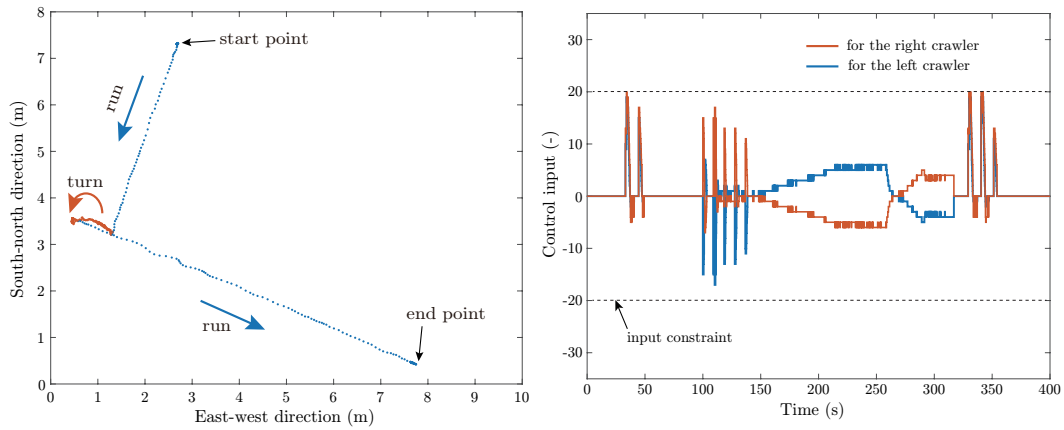
(a) Lever commands for the left and right crawlers with the reference governor (b) Running path with the reference governor

Fig. 3.9: Comparison of control over networks with the reference governor. Communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in upload and download.

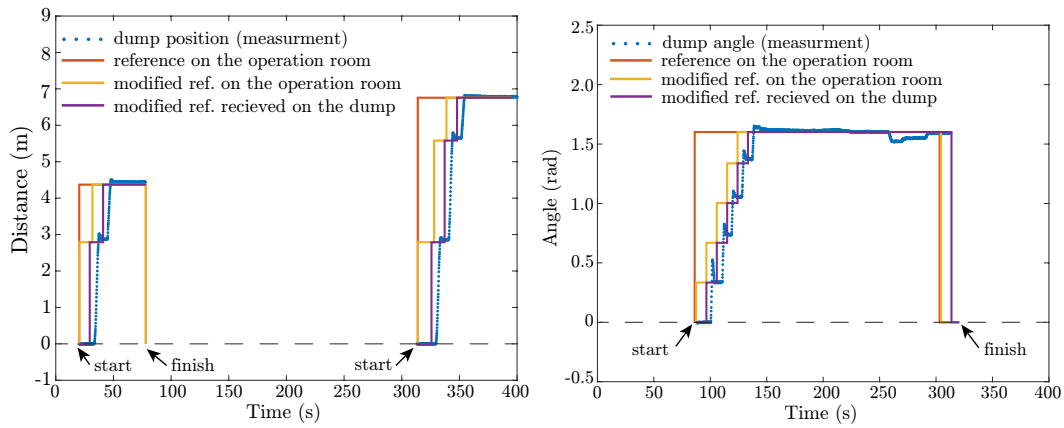
生ずる状況下において、レバー指令値が入力制約を満たし、直進走行と旋回動作において目標姿勢に追従可能であることが示された。

次に、Fig. 3.11 に示す、通信遅延に加えて損失を設定した2つ目の通信条件下での実験結果を考察する。各図のラベルと凡例は、Fig. 3.10 と同じである。Fig. 3.11(a) において、点が密集している箇所は、パケットロスが生じている箇所である。1つ目の実験結果と同様に、Fig. 3.11 より、遅延と損失が発生する場合においてもレバー指令値が入力制約を満たし、ダンプが目標姿勢へ追従していることが確認できた。

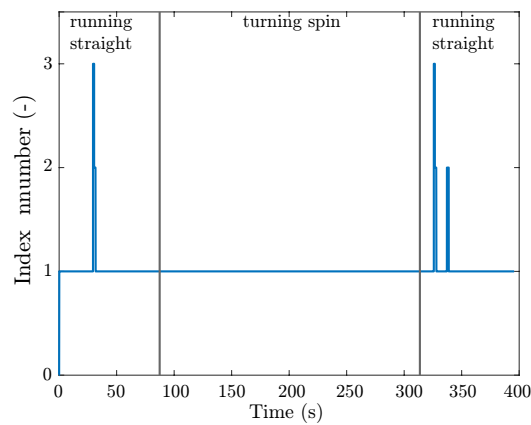
以上の結果より、遠隔制御システムは、実用的なシナリオにおいても適用可能であり、予測不可能な通信遅延や損失が発生した状況においても、拘束を遵守して位置と角度の目標値への追従ができることが結論付けられた。さらに、遠隔制御手法の設計手順は、ネットワークのモデルを含んでおらず、予測不可能な遅延や損失が発生しうる通信環境においても、拘束条件を満たしつつ、ダンプの状態を操作者が指示した状態に収束させることが可能である。



(a) Trajectory of the crawler dump (b) Lever commands for left and right crawlers

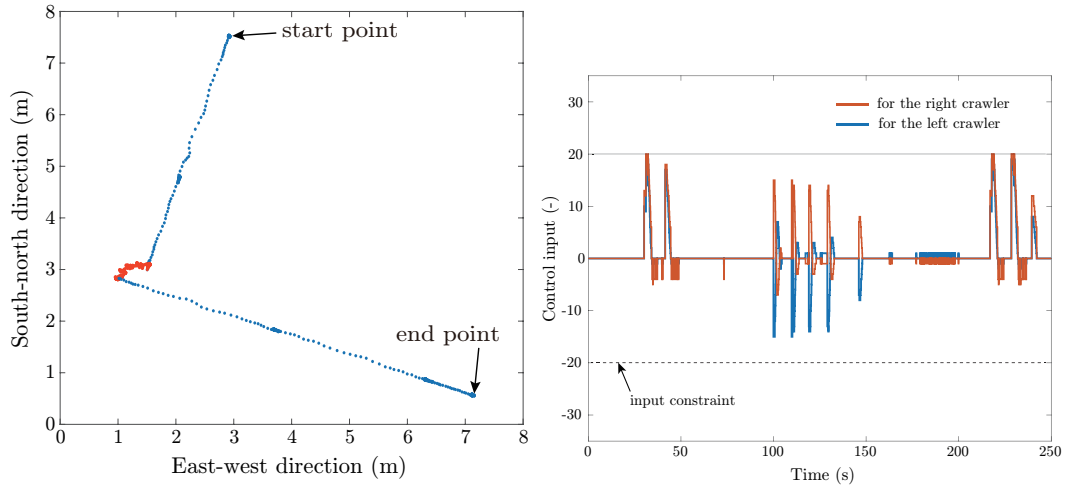


(c) Running distance on straight path (d) Rotation angle in turning spin

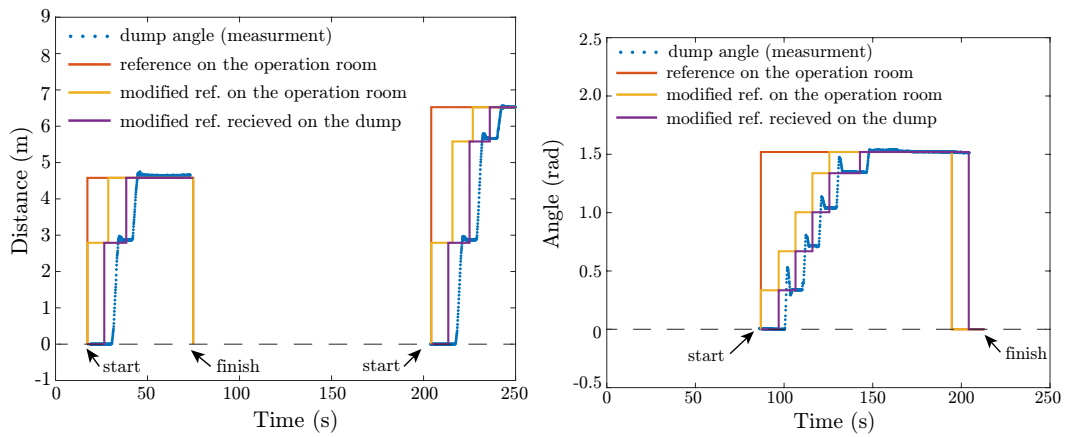


(e) Index number of switching controller

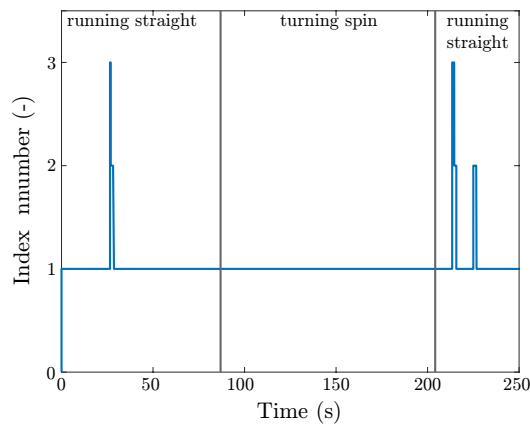
Fig. 3.10: Experimental results of the straight run and spin turn with communication delay. The communication delay is 4.5 (s) with a normal distribution in the up- and down-link.



(a) Trajectory of the crawler dump (b) Lever commands for left and right crawlers



(c) Running distance on straight path (d) Rotation angle in turning spin



(e) Index number of switching controller

Fig. 3.11: Experimental results of the straight run and spin turn with communication delays and packet losses. Communication delay is set as 4.5 (s) with a normal distribution in the up- and down-link, and packet loss is set as approximately 50 (%).



Fig. 3.12: Gravel built up by the crawler of the dump as the crawler rotates in the counterclockwise direction.

3.5 おわりに

本章では、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムを開発した。まず、遠隔操作におけるダンプの挙動を開ループのステップ応答によって同定した。次に、リファレンスガバナと同定したモデルから設計した切替え制御による手法をダンプの遠隔操作に実装した。そして、通信遅延とパケットロスを設定し、実機検証を実施した。実験では、予測不可能な時変の通信遅延とパケットロスが発生する状況下において、入力が拘束条件を満たしつつ、位置と回転角を目標値に追従可能であることを確認した。この結果より、通信遅延や損失をモデル化することなく、提案手法によって建機を安全に遠隔操作可能であることが確認された。

その一方、土の状態など環境の変化によって建機の動作特性が変化し、制御性能に影響することが確認された。こうした環境の変化に対し、遠隔施工では、視認した状況に対する操作によって対処可能であるが、自動化施工では、制御システムによって対処する必要がある。次章では、自動走行において、走路状態の変化によって生じる追従性能劣化を抑制する制御系の設計について述べる。

第4章 走路状態の変化に即する自動走行システム

本章では、走路状態の変化を起因とする自動走行の追従性能劣化を抑制する制御システムについて述べる。

4.1 はじめに

土木現場において、土の硬さや湿潤度合いなどの作業環境は、時々刻々と変化する。その例として、切土作業や盛土作業での走路状態がある。これら作業において、土の積込みや荷下ろしをおこなう場所では、作業を起因として走路の土が柔らかくなる一方、運搬経路となる工事用道路は、振動ローラで柔らかい土を締め固める転圧作業によって整備されており、走路の土が硬くなる。そのため、走行中に走路状態が変化する。こうした場所ごとの土の硬さや湿潤度合いの変化は、車両のスリップ率や姿勢制御に影響を与える [97,98]。また、バックホウの作業では、掘削場所や深さの違いによって土の硬さが変化するため、効率的な掘削軌道計画が変化する [99,100]。こうした変化に事前対処するためには、走行する箇所全域における走路状態の事前計測、および走路状態を保つための定期的な整備が必要となり、コストの増加や作業効率の低下につながる。さらに、熟練技能者は、自身の勘や経験知により対処している一方、自動化建機では、システムとして変化を検出し、対処することが求められる。

環境の変化を起因とする特性変動をシステムとして対処する研究がなされている。舗装路における自動車や移動ロボットを対象として、制御工学のアプローチでは、スライディングモード制御 [101] や適応制御 [102] などが用いられており、画像や摩擦係数の推定から湿潤度合いなどの路面状態を推定する手法 [103,104] や、加速度セ

ンサ信号から路面の平坦性を推定する手法 [105, 106] も提案されている。土木現場の環境では、バックホウでの掘削動作を対象として、土壌の変化を考慮した掘削動作の制御系設計 [107] や土の種類に関する学習方法 [108] が提案されている。また、走行時に得られた加速度信号の周波数解析による、走破性判定 [109] や転圧地盤の評価 [110] が実施されているが、これら手法では、評価が主目的であり、走行性能や制御系について言及されていない。そこで、土木現場の環境において、走行中に推定した硬さなど走路状態の違いに基づいた制御系が設計できれば、環境変化に対処可能な自動化建機走行システムの構築が可能になると考えられる。

本章では、走路状態の変化を起因とする自動走行の追従性能劣化を抑制する制御システムの開発を目的とする。走路状態の変化として、土木現場で代表的な例である硬さの違いを対象とする。まず、走路状態の変化が与える走行特性への影響について実機確認する。次に、差動二輪モデルを応用し、走路状態の変化と曲線経路への追従を考慮した自動走行時のモデルを同定する。そののち、加速度センサ信号に対する特徴量の抽出とサポートベクターマシン (SVM) [111] による走路状態推定器の構成を実施し、走路状態のオンライン推定精度を実験的に検証する。そして、走路状態推定器を有する切替え制御を提案し、走路状態が複数回変化する設定において、追従誤差の観点から提案手法の有効性を数値的に検証する。

4.2 走路状態の変化を考慮した数理モデル

建機の自動走行では、サイクルタイムや経路計画などの観点から、前章の遠隔操作で実施した直進走行と旋回の組み合わせによる走行ではなく、曲線経路へ追従する走行が求められる。また、提案する制御手法の数値的検証には、走路状態の変化を考慮した数理モデルの構築が必要となる。

本節では、硬さの異なる走路で計測した実験データを用い、数理モデルを同定する。まず、実際の現場環境において生じる走路状態の変化、およびその変化が与える建機の走行特性への影響について述べる。そののち、差動二輪モデル [112, 113] を用いた、走路状態の変化と曲線経路への追従を考慮したモデルを構築し、それぞれの走路状態についてパラメータを推定する。



(a) Hard (roller compacted) ground surface (b) Soft (uncompacted) ground surface

Fig. 4.1: Views of prepared ground.

4.2.1 走路状態の変化と走行特性への影響

本章では、走路状態の違いとして、土木現場で起こりうる変化で代表的な振動ローラによる転圧前後に着目する。転圧する前後の走路状態を Fig. 4.1 に示す。転圧した後の硬い走路を Fig. 4.1(a) に、転圧前の柔らかい走路を Fig. 4.1(b) に示す。図に示す通り、転圧前後で硬さが異なり、建機走行後における轍のつきかたに差が生じている。

走路の変化が及ぼす走行特性への影響を検証する。各走路における直進走行と旋回走行の軌跡を Fig. 4.2 に示す。左右レバー指令値に 15 を入力して直進させたときの走行軌跡を Fig. 4.2(a) に示す。Fig. 4.2(b) に示す時計回りの旋回走行では、左レバー指令値に 30、右レバー指令値に 10 を入力し、Fig. 4.2(c) に示す反時計回りの旋回走行では、左レバー指令値に 10、右レバー指令値に 30 を入力し、それぞれの走路状態で計測した。ここで、赤線と青線は、硬い走路と柔らかい走路での走行軌跡であり、水平位置と垂直位置ともに 0 の位置から走行を開始した。また、レバー指令値を入力する時間は、それぞれの走路状態で共通である。図より、直進走行では、走路状態の違いによって垂直方向の変位に差が生じていることが確認できる。また、旋回走行では、硬い走路の方がより大きく旋回していることがわかる。これら走行特性の違いは、履帯と土の間における摩擦や滑りの差などによって生じていると考えられる。以上の結果より、走路状態の変化により、クローラダンプの走行特性が変化している。次に、この走行特性の変化を表現可能なモデルの同定をおこなう。

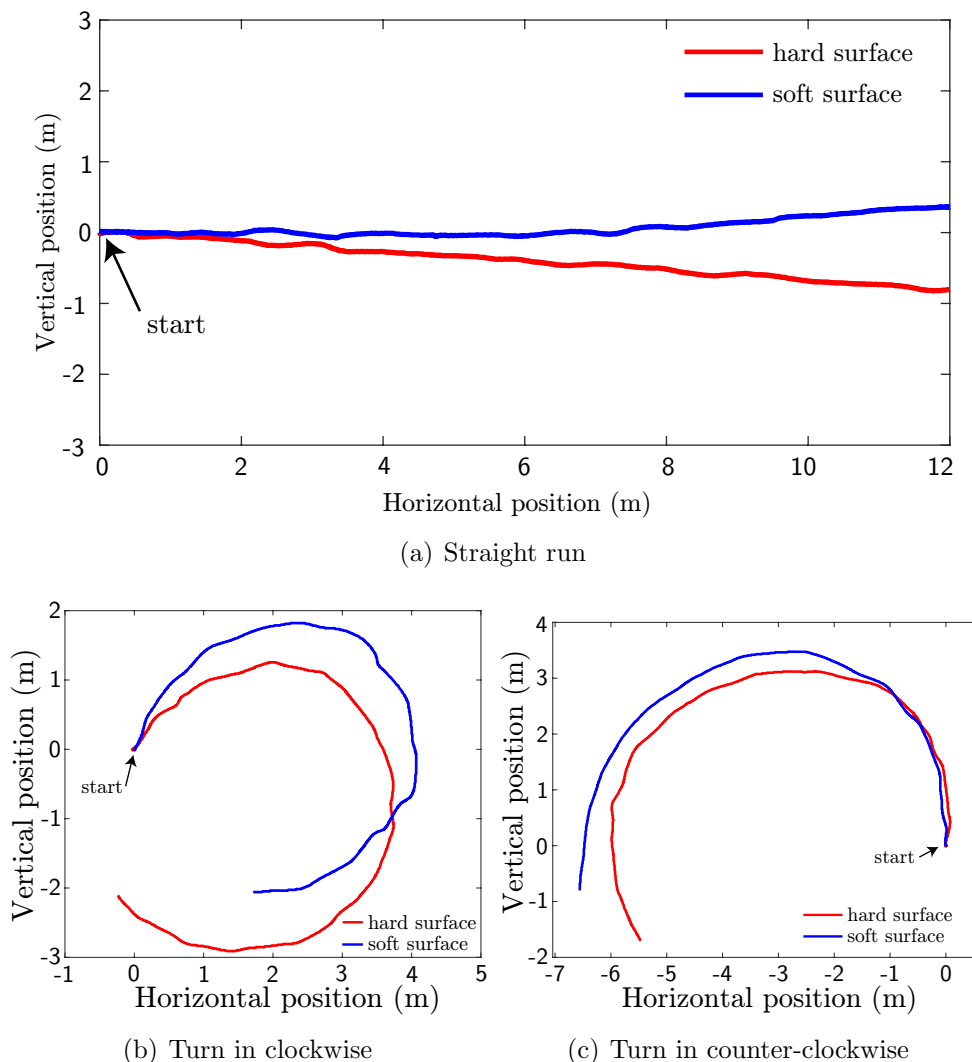


Fig. 4.2: Running path in straight and turn.

4.2.2 自動走行モデル

本章では、一次遅れモデルと差動二輪モデルにより、レバー指令値を入力としダンプの姿勢を出力とする、走路状態を考慮したモデルを同定する。ブロック線図を Fig. 4.3 に示す。制御入力でもあるシステムへの入力は、 u_1 と u_2 であり、それぞれ左履帯と右履帯のレバー指令値である。出力となる姿勢は、位置の水平成分と垂直成分である x と y 、および車体の回転角度を示す θ である。ここで、ブロック線図では、可読性向上のため時間領域と周波数領域を混せて記載している。

モデルにおいて、 v_1 と v_2 は、それぞれ左履帯と右履帯位置の対地速度を示す。左右履帯それぞれの動作について、 $u_i, v_i, i \in \mathbb{Z} := \{1, 2\}$ は、一次遅れの伝達関数

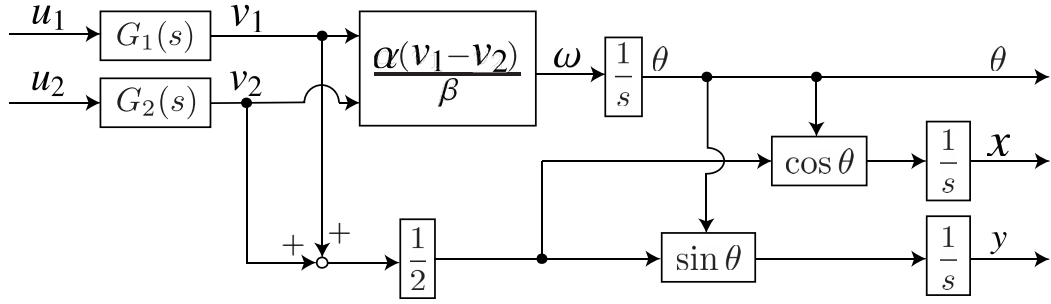


Fig. 4.3: A block diagram of a two-wheel differential model of the crawler dump.

$G_i(s)$ を用いて以下のように表現される.

$$G_i(s) := \frac{v_i(s)}{u_i(s)} = \frac{K_i}{T_i s + 1} e^{-sL_i}, \quad i \in \mathbb{Z}. \quad (4.1)$$

ここで, $T_i, K_i, L_i, \forall i \in \mathbb{Z}$ は, 時定数, ゲインおよびむだ時間であり, 左右それぞれに対し推定される. 車体の並進速度 v と角速度 ω は, それぞれ下式で与えられる.

$$v(t) = \frac{1}{2}(v_1(t) + v_2(t)), \quad \omega(t) = \frac{\alpha(t)}{\beta}(v_1(t) - v_2(t)). \quad (4.2)$$

ここで, α は, 走路状態に対応する時変パラメータである. また, β は, 左右のレーザードップラ速度計の設置位置間距離であり, 計測可能な定数である. 出力であるダンプの姿勢 (x, y, θ) は, 下式より求められる.

$$x(t) = \int_0^t v(\tau) \cos \theta(\tau) d\tau, \quad y(t) = \int_0^t v(\tau) \sin \theta(\tau) d\tau, \quad \theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (4.3)$$

ここで, モデル化が困難であるため滑りが無いと仮定し, また, 曲線経路への追従を対象とすることから, 超信地旋回をしないと仮定する. パラメータは, 走路状態に依存する時変パラメータであることから, モデルの精度を向上させるため各走路状態においてそれぞれ推定する.

4.2.3 パラメータ推定

ダンプの制御系を評価するためには, (4.1)-(4.2) に示すモデルのパラメータを適切に求めることが非常に重要となる. 本節では, ステップ応答同定により, モデルパラメータを推定する. また, β の値は, センサ間の距離を直接計測し, 1.0 m と設

Table 4.1: Parameter values obtained via parameter estimation for the two ground conditions.

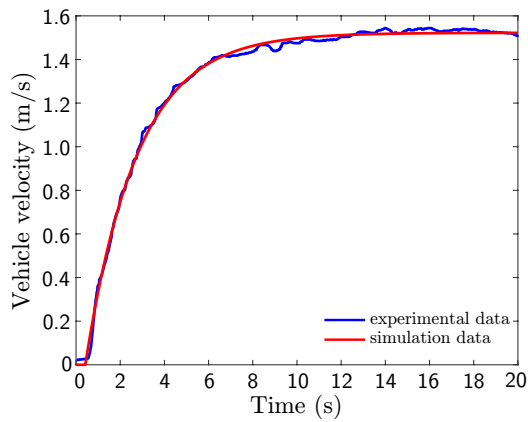
		Estimated parameters						
		T_1	T_2	K_1	K_2	L_1	L_2	α
Ground surfaces	Hard	1.18	1.16	0.36	0.33	0.20	0.20	-1.79
	Soft	1.09	1.09	0.36	0.32	0.20	0.20	1.63

定した。一方，推定するパラメータは，走路状態の変化によってパラメータの値も変化することが予想される。そこで，Fig. 4.2(a) に示す直進走行でのデータを用いて各走路状態のパラメータを推定し，走路状態の変化がパラメータに及ぼす影響を確認する。

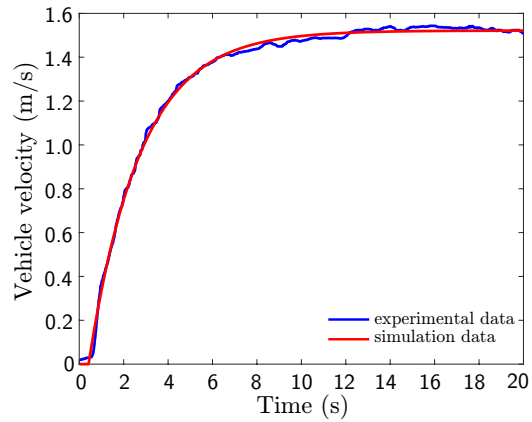
実験データとの比較により推定したパラメータを Table 4.1 に示す。速度と回転角について，実験データと推定したパラメータを用いたシミュレーションデータのステップ応答を Fig. 4.4 に示す。Figs. 4.4(a), (b) は，硬い走路状態，Figs. 4.4(c), (d) は，柔らかい走路状態での速度応答である。硬い走路と柔らかい走路における回転角を Figs. 4.4(e), (f) に示す。Fig. 4.4 において，青線と赤線は，実験データとシミュレーションデータである。また，Fig. 4.2(a) の直進走行と同様の指令値を入力したときの位置について，実験データとシミュレーションデータを Fig. 4.5 に示す。縦軸と横軸は，初期位置からの相対位置である。青線と赤線は，実験データとシミュレーションデータであり，Figs. 4.5(a), (b) は，それぞれ硬い走路と柔らかい走路での結果を示す。

まず，(4.1) のパラメータについて考察する。Figs. 4.4(a)-(d) に示すステップ応答より，むだ時間 L_1 と L_2 は，0.20 s に近似可能である。また，Table 4.1 より，柔らかい走路での時定数は，硬い走路の時定数より小さく，硬い走路においてダンピングがより速く移動できることを示している。そして， K_i と L_i は，各走路状態において大きな差がないことを確認した。次に，(4.2) のパラメータ α を考察する。Table 4.1 に示す α の値は，実験データに対する最小二乗誤差から求めた。表より， α の符号が各走路で反転しており，また，Figs. 4.4(e), (f) と Fig. 4.5 に示すように，走路状態の違いを起因として同一レバー指令値に対しダンピングが逆方向に移動している。したがって， α は，走路状態の変化による走行特性の違いを表すパラメータである。

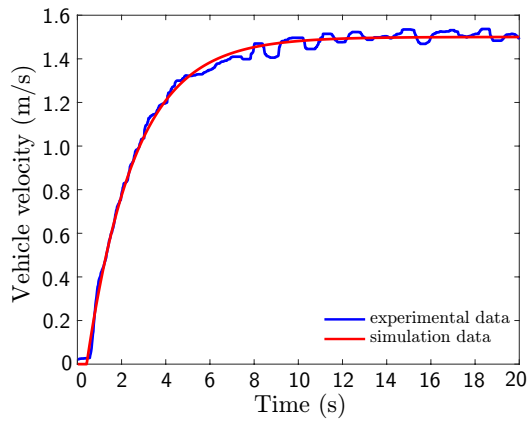
以上のパラメータ推定結果より， T_i ， K_i ， α は，走路状態に応じて変化すること



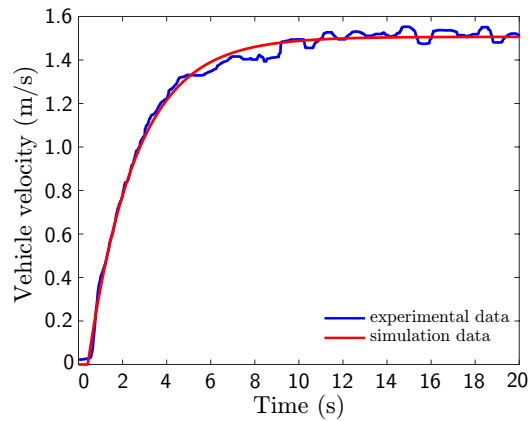
(a) Identification result of left-side velocity on a hard surface



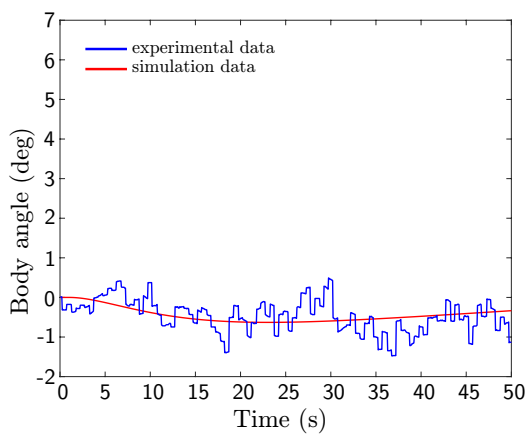
(b) Identification result of right-side velocity on a hard surface



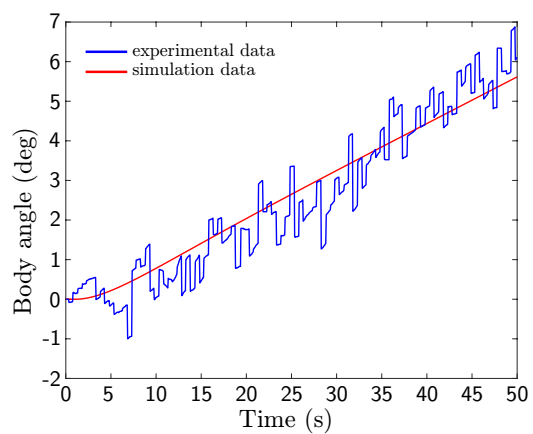
(c) Identification result of left-side velocity on a soft surface



(d) Identification result of right-side velocity on a soft surface



(e) Identification result of yaw angle on a hard surface



(f) Identification result of yaw angle on a soft surface

Fig. 4.4: Comparing simulation and experimental results of velocity and yaw angle of the identified model for lever command 15 on hard and soft surfaces.

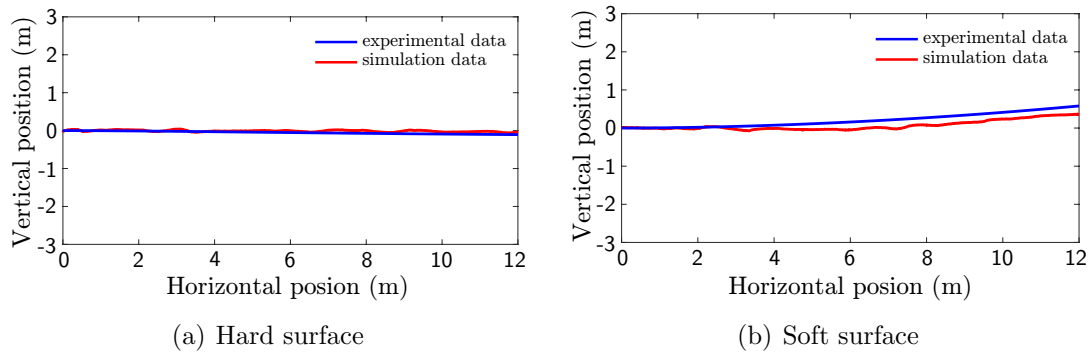


Fig. 4.5: Comparing simulation and experimental results of the position of the identified model for lever command 15 on hard and soft surfaces.

を確認した。そのため、ダンブに搭載したセンサによって走路状態を計測することが重要であり、次節で議論する。

4.3 走路状態推定と制御システムの構成

本節では、提案手法である走路状態の変化を起因とする自動走行の追従性能劣化を抑制する制御システムについて説明する。この制御システムは、ダンブが走行している走路の状態に関する推定器、および推定結果を用いた切替え制御から構成される。まず、走路状態推定器の構成手順を述べ、オンライン推定精度を実験的に検証する。そののち、走路状態の推定結果を利用した自動走行の経路追従制御則について述べる。

4.3.1 走路状態推定器の構成

熟練オペレータは、建機を操作したときの感覚から走路状態を把握し、状態に応じて操作を微調整する。また、加速度信号は、走路の平坦性や凹凸などの診断にも用いられている [105,106,109,110]。そこで、熟練オペレータの経験知を検証するため、本章では、ダンブに搭載したジャイロセンサによって計測された z 軸加速度に着目する。センサは、車載PCにRS-232Cケーブルを介して接続されており、計測した加速度信号を車載PCに対して100Hzの周期で通信する。また、本節では、Fig. 4.1に示す硬い走路と柔らかい走路それぞれでダンブを走行させ、それぞれの走路状態のデータを収集する。

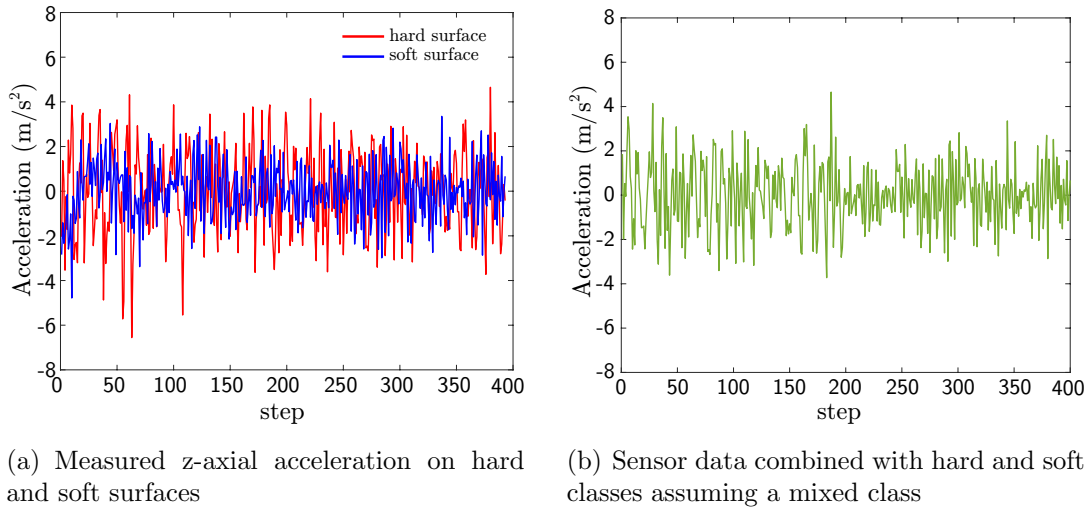


Fig. 4.6: Sensor data of the z-axial acceleration in each of the three classes for use in numerical verification.

熟練オペレータが走路状態を検知する経験知を表現するため、硬い、柔らかいおよびミックスから構成される3つのラベルを設定する。硬いと柔らかいのラベルは、Fig. 4.1に示す走路状態と一致する。また、ミックスのラベルは、硬い走路と柔らかい走路の変化における過渡状態を表す状態とする。ダンパが硬い走路と柔らかい走路上を走行した時の z 軸加速度をFig. 4.6(a)に示す。赤線と青線は、硬い走路と柔らかい走路でのデータを示し、重力加速度成分は、除去されている。図より、各走路における計測値の振幅が異なっており、 z 軸加速度は、特徴量の抽出元として使用できる可能性があることが示された。この振幅の差は、走路が硬いほど機体がより大きく振動する挙動を表現していると考えられる。ミックスのクラスでは、Fig. 4.6(b)に示すように硬い走路と柔らかい走路の計測データを組み合わせて加速度信号を構成した。

特徴量の候補として、分散と振幅スペクトルに着目する。分散は、時系列データにおける振幅の差を特徴づける値である。振幅スペクトルは、地盤状態の評価 [109,110] の他、油圧ポンプのオイル漏れ検出 [114] や建機の状態監視 [115] に用いられており、周波数領域での評価は、建機の固有振動数に着目した評価方法であると考えられる [116]。本章では、ステップ $k \in \mathcal{Z} := \{0, 1, 2, \dots\}$ における時系列センサデータ $a(k)$ から、分散と振幅スペクトルを計算する。ステップ $k \in \mathcal{Z}$ における分散 $v(k)$

は、直近 N ステップ分のデータを用いて下式により計算される。

$$v(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (a(k-i) - \bar{a}(k))^2, \quad \bar{a}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a(k-i), \quad \forall k \geq N, \quad \forall k \in \mathcal{Z}. \quad (4.4)$$

ここで、 $N = 200$ は、演算窓の長さであり、 $v(k)$ は、 $k < N$ において 0 を返す。ステップ k における振幅スペクトル $S(k; m)$ は、離散フーリエ変換で得られた値を要素数で割ることにより、次式で求められる。

$$S(k; m) = \frac{2}{N} \left| \sum_{i=0}^{N-1} a(k-i) \exp\left(-j \frac{2\pi mn}{N}\right) \right|, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (4.5)$$

ここで、 j は、複素数、 m は、ステップ k における周波数領域での要素数であり、その値は、 i と一致する。(4.4) と (4.5) の計算は、毎ステップ実行され、 z 軸加速度から分散と振幅スペクトルが得られる。また、特徴量の候補として分散が適していることを検証するため、平均 \bar{a} 、標準偏差 κ 、平均二乗誤差 r 、尖度 K 、歪度 ψ および最大値 M の統計量と比較する。各統計量は、それぞれ下式によって求められる。

$$\begin{aligned} \kappa(k) &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{a(k-i) - \bar{a}(k)\}^2}, \quad r(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{a(k-i)\}^2}, \\ K(k) &= \frac{E[\{(a(k) - \bar{a}(k))\}^4]}{\kappa(k)^4}, \quad \psi(k) = \frac{E[\{a(k) - \bar{a}(k)\}^3]}{\kappa(k)^3}. \end{aligned}$$

また、最大値 $M(k) = \max_{0 \leq k \leq N} a(k)$ であり、 E は、期待値である。Fig. 4.6 に示す加速度信号に対する各統計量の計算結果を Fig. 4.7 に示す。図において、赤線、青線、および緑線は、それぞれ、硬い、柔らかい、およびミックスのクラスを示す。各クラスの分布の観点から、特徴量の候補となりうる統計量は、標準偏差と平均二乗誤差である。この2つの統計量の計算には、分散値が用いられるため、分散は、特徴を表現するために必須の情報であることが確認された。

分散と振幅スペクトルの計算を Fig. 4.6 に示す加速度信号に対しておこない、特徴量として適しているか検証する。分散の時系列データと $k = 230$ 、 $k = 245$ および $k = 260$ の振幅スペクトルを Figs. 4.8(a), (b) に示す。図において、赤線、青線、および緑線は、それぞれ、硬い、柔らかい、およびミックスのクラスを示す。Fig. 4.8(a) より、3クラスの分散値が分かれているステップもあるが、200ステップや390ステッ

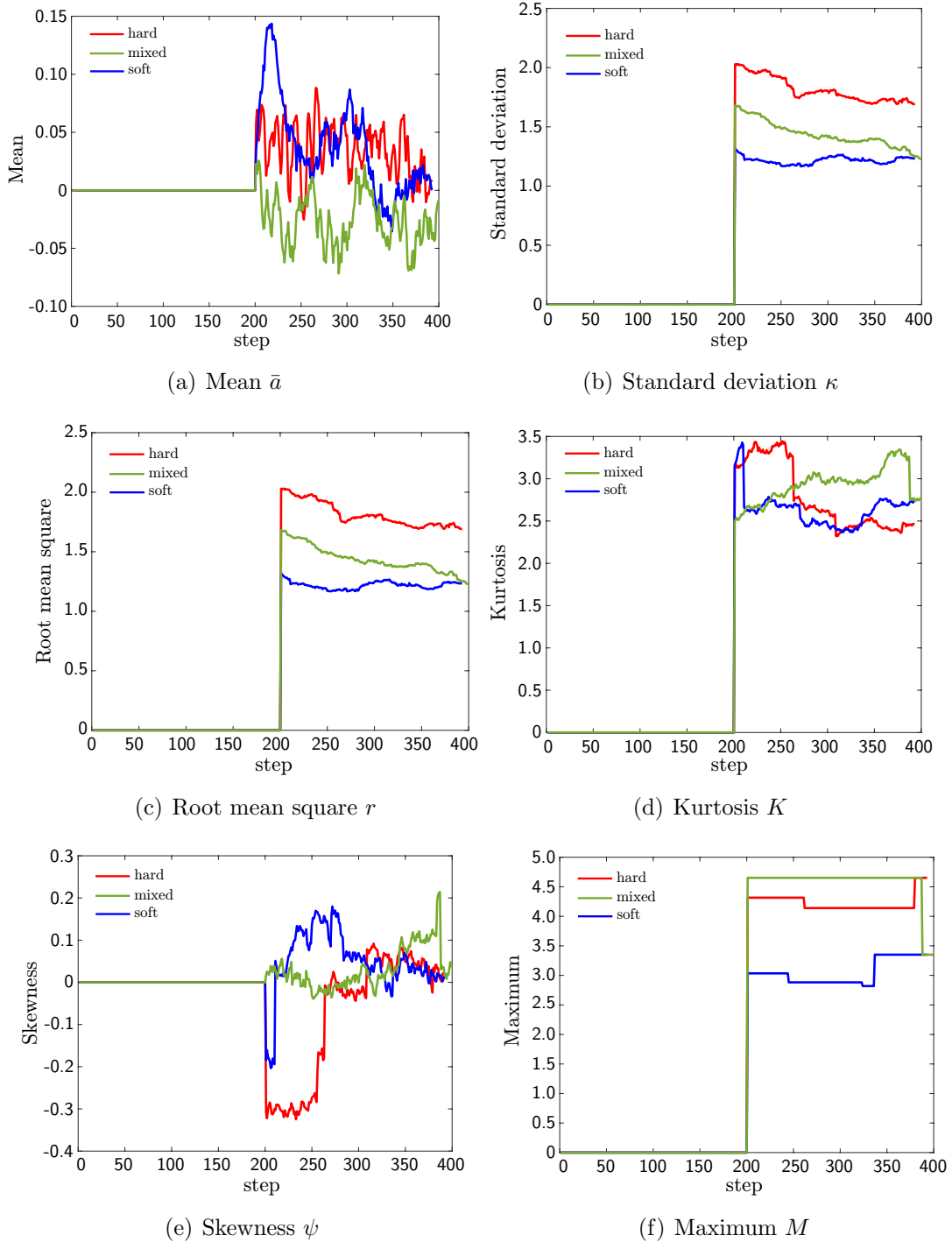
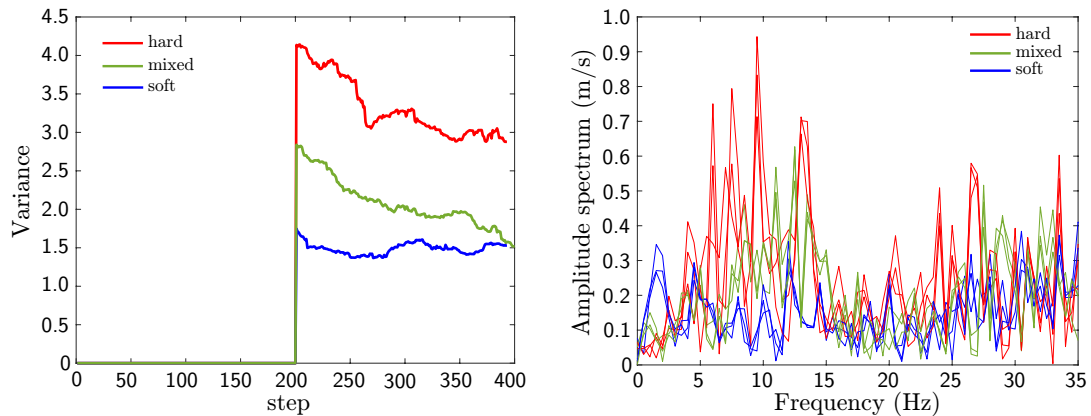
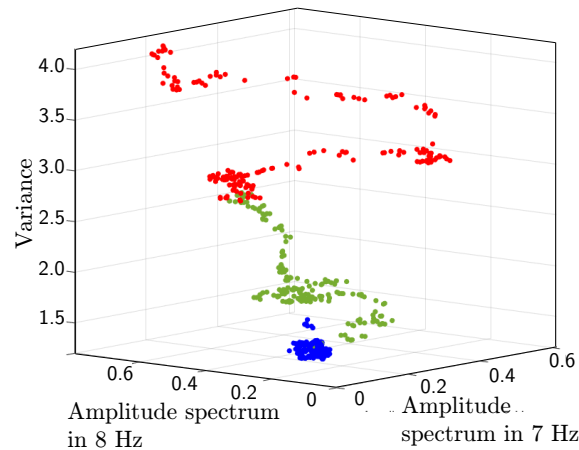


Fig. 4.7: Computation results of each statistical index for the z-axis acceleration measurements of Fig. 4.6.



(a) Variance in the z-axis acceleration

(b) Amplitude spectrum of the z-axis acceleration in 230, 245, and 260 steps



(c) Scatter plot in the feature space: training data

Fig. 4.8: Feature values.

プなどにおいて、2つの分散値がほぼ同じ値となっている。そのため、分散だけの分類は、困難である。そこで、特徴量に振幅スペクトルを追加する。Fig. 4.8(b)において、約8 Hzにおける振幅スペクトルの分布は、それぞれのクラスで分かっている。このことより、7 Hzと8 Hzの振幅スペクトルを特徴量として選択する。ここで、7 Hzと8 Hzは、 $m = 15$ と $m = 17$ に対応する。得られた分散と振幅スペクトルからなる特徴量の散布図をFig. 4.8(c)に示す。プロットされたデータは、特徴量空間においてクラスごとに分布が分かれており、抽出した特徴量が適していることを確認した。

本節では、階層型ツリー構造SVM [117,118]を用い、3クラス分類をおこなう。ツリー構造SVMは、1-vs-one法や1-vs-rest法など他の多クラスSVMよりも識別器数

Table 4.2: Definition of classes.

SVM Classes	
SVM #1	Soft other (Hard and Mixed)
SVM #2	Hard Mixed

Table 4.3: Optimal hyperparameters and the classification accuracy scores for each SVM.

	Hyperparameters		Classification accuracy (%)
	σ_i	b_i	
SVM #1	0.174	348.0	99.3
SVM #2	0.554	18651.8	99.3

が少ないため、計算効率が向上する [119]. ツリー構造 SVM は、Table 4.2 に示すように、SVM #1 と SVM #2 の SVM を 2 つ用いる. SVM における各クラスの定義を Table 4.2 に示す. それぞれの SVM では、10 分割交差検定での損失を目的関数としたベイズ推定により、Fig. 4.8(c) に示す学習データに対する損失を最小化するハイパーパラメータを求める. また、SVM による分類器は、下式で表現される.

$$D_i(Z) = \sum_{\iota=1}^{N_i} t_\iota \exp\left(-\frac{\|Z_\iota - Z\|^2}{2\sigma_i^2}\right) + b_i, \quad \forall i \in \{1, 2\}. \quad (4.6)$$

ここで、 Z は、 z 軸加速度信号から抽出した特徴量であり、 $Z := [v, S(m=15), S(m=17)]^T \in \mathbb{R}^3$ である. i は、SVM の番号を示し、 $N_1 = 52$ と $N_2 = 18$ は、サポートベクターの数である. ハイパーパラメータの σ_i と b_i 、および分類精度を Table 4.3 に示す. データの判別に用いた分類器は、 $\mathcal{H}_i = \{Z \in \mathbb{R}^3 \mid D_i(Z) = 0\}$, $\forall i \in \{1, 2\}$ で定義され、Fig. 4.9 における灰色の超平面である. 以上の結果より、各クラスを高精度で判別できており、分類器 \mathcal{H}_i , $\forall i \in \{1, 2\}$ は、 z 軸加速度信号から走路状態を推定するのに有効であることが確認された.

本章の提案手法である、構成した分類器を用いたソフトセンサである走路状態推定器を Fig. 4.10 に示す. 推定は、次の手順により実施する. まず、ダンパ走行中の z 軸加速度信号をジャイロセンサによって計測する. 直近 200 ステップ (2 秒) のセンサデータを格納し、10 ミリ秒のサンプリング周期にて分散、および 7Hz と 8Hz の振幅スペクトルをオンラインで計算し、計算した特徴量を Z にまとめる. 次に、特徴

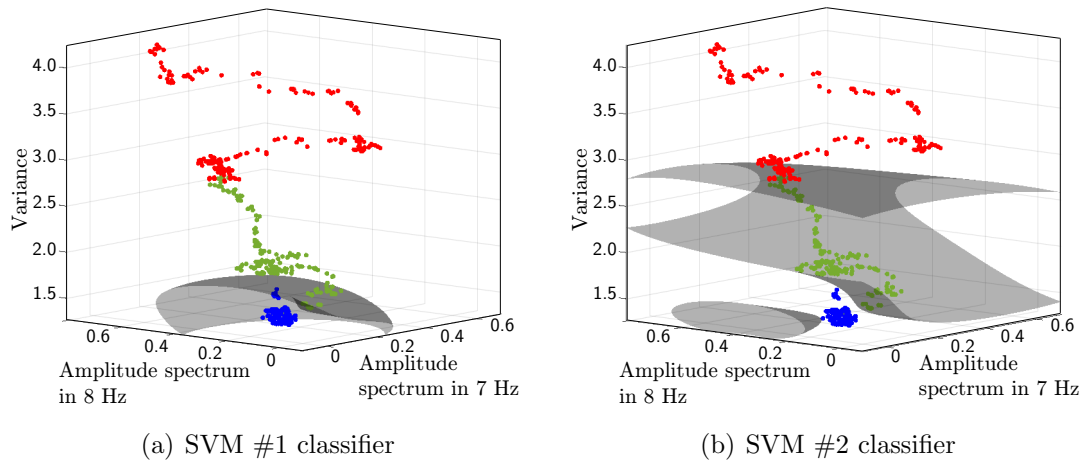


Fig. 4.9: Classifying feature data related to ground conditions.

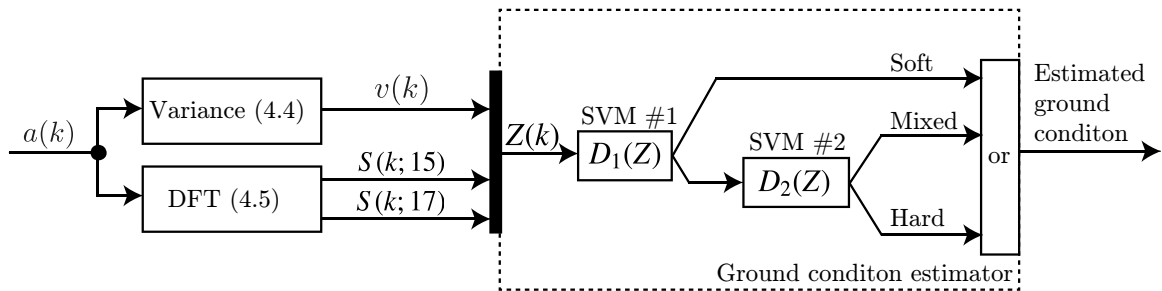


Fig. 4.10: A block diagram of SVM-based soft sensor involving the ground condition estimator.

量 Z に対し，階層型 SVM を以下の手順で実行する．まず，SVM #1 で特徴量を柔らかい走路かそれ以外に分類し，柔らかいを出力した場合，走路状態を柔らかいと推定する．それ以外を出力した場合，SVM #2 によって硬い，もしくはミックスと推定する．最後に，推定結果を制御器に出力する．

4.3.2 オンライン推定精度の実験的検証

Fig. 4.1 に示す走路状態においてオンライン推定を実施し，推定器の精度を実験的に検証する．硬いと柔らかいのクラスでは，Fig. 4.1 に示す走路上，そして，ミックスのクラスでは，柔らかい走路から硬い走路へと変化する走路上にて実験した．各クラスの推定結果を Figs. 4.11-4.13 に示す．Figs. 4.11(a), 4.12(a), 4.13(a) は，計測した加速度信号，Figs. 4.11(b), 4.12(b), 4.13(b) は，推定結果と実際の走路状態を示す．Fig. 4.13 に示すミックスのクラスは，走路状態が変化し直後の状態であるた

め、2 s を変化直後とし、2 s から 4 s を評価区間とする。

Figs. 4.11(b), 4.12(b) に示す硬い走路と柔らかい走路での推定精度は、それぞれ 100 % と 90.8 % であった。柔らかい走路での推定精度は、Table 4.3 に示す SVM#1 の推定精度よりもわずかに低いものの、両クラスの推定精度は、どちらも実機環境において十分な精度である。また、Fig. 4.13(b) に示すミックスクラスの推定精度は、100 % であった。この検証結果から、走路状態推定器は、実機環境において 90 % 以上の精度を持つことが確認された。

4.3.3 走路状態推定器を有する切替え制御

本章での制御目的は、走路状態が変化する状況下において、クローラダンプを与えられた参照経路に追従させることである。走路状態は、有限回のパターンで変化するものとし、ダンプは、走路状態を事前に把握できないとする。ダンプの姿勢と目標姿勢の関係を Fig. 4.14 に示す。参照経路は、0.1m 間隔の点群で構成される。点群は、 $\mathcal{X} \in \mathbb{R}^3$ で表され、各点群は、姿勢情報を持っている。計測されたダンプの姿勢は、 $(x, y, \theta) \in \mathbb{R}^3$ で表される。ダンプの目標姿勢 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta}) \in \mathbb{R}^3$ は、参照経路とダンプを中心とした半径 l の円との交点である。制御目的を達成するため、本章では、走路状態推定器を有する切替え制御を設計する。制御方式は、事前に設計した制御パラメータ組から、推定した走路状態に基づいてリアルタイムに選択する方式である。走路状態推定器を含めた制御系のブロック線図を Fig. 4.15 に示す。

提案する制御系は、ダンプに対する制御入力 u_1 と u_2 を計算する。制御入力は、速度指令値 u_v と旋回指令値 u_h を用いて下式で計算される。

$$u_1(t) = u_v(t) + u_h(t)\text{sgn}(\alpha(t)), \quad u_2(t) = u_v(t) - u_h(t)\text{sgn}(\alpha(t)). \quad (4.7)$$

ここで、 t は、非負の連続時間であり、車体の回転速度は、(4.7) に示すように、 u_v に対する u_h の加算と減算によって定まる。

速度指令値 u_v は、下式によって定まる。なお、旋回時の追従性能を向上させるた

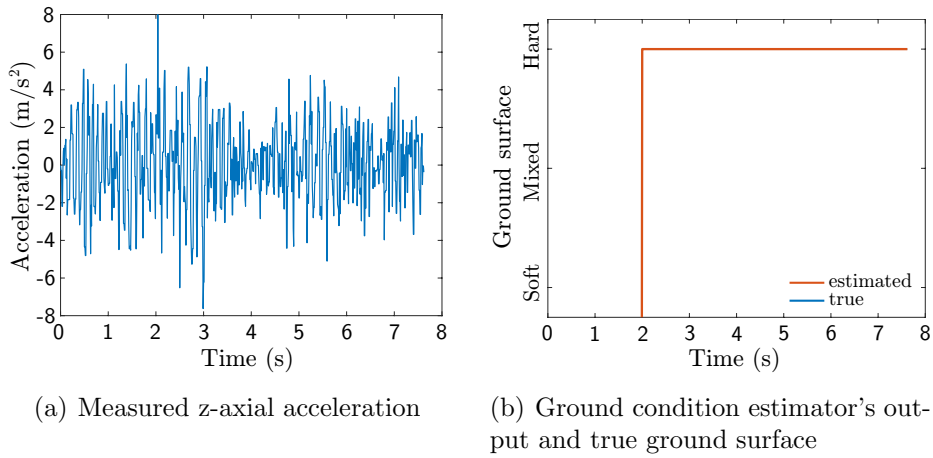


Fig. 4.11: Sensor data of the z-axis acceleration and time response of the ground condition estimator on hard surfaces.

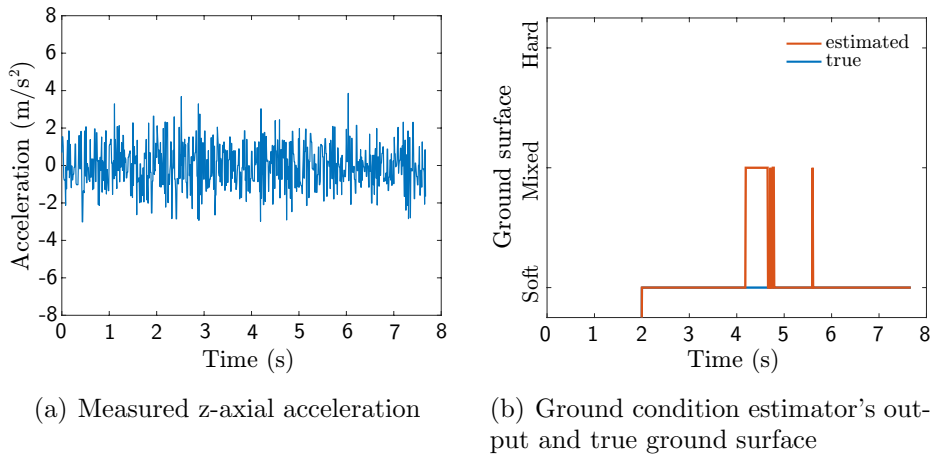


Fig. 4.12: Sensor data of the z-axis acceleration and time response of the ground condition estimator on soft surfaces.

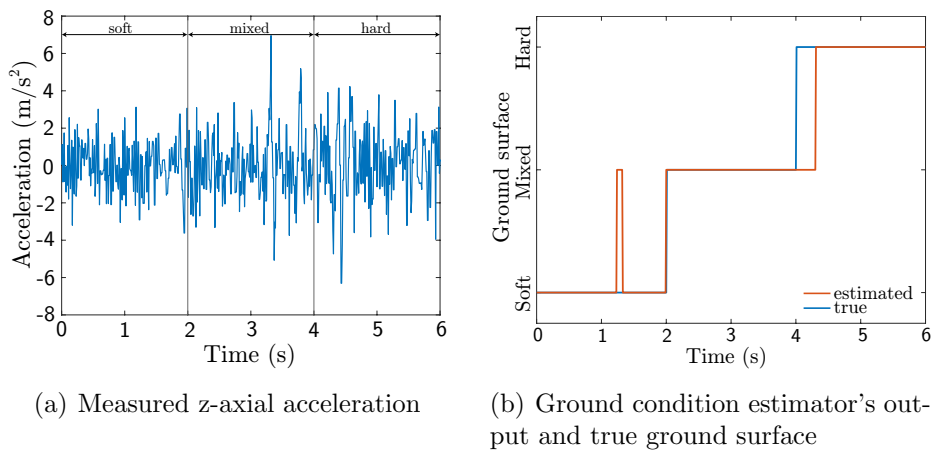


Fig. 4.13: Sensor data of the z-axis acceleration and time response of the ground condition estimator when surfaces change from soft to hard.

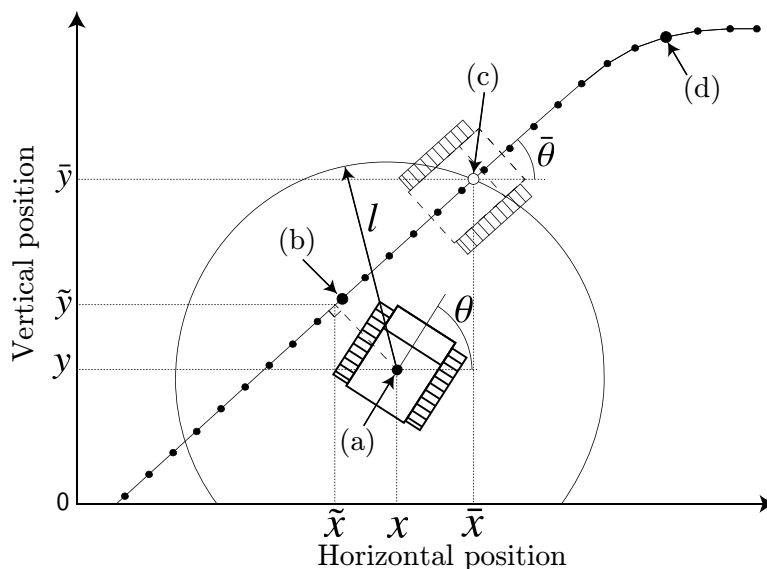


Fig. 4.14: Relationship between position and target point of the dump. (a) Current posture. (b) Closest point. (c) Target posture. (d) Checkpoint for $M = 13$.

め、旋回時の減速を実施する。

$$u_v(t) = \begin{cases} u_s(t) & \text{if } c(t) < \gamma_1 \text{ and } \phi(t) < \gamma_2 \text{ holds,} \\ u_c(t) & \text{if } c(t) < \gamma_1 \text{ and } \phi(t) \geq \gamma_2 \text{ holds,} \\ u_c(t) & \text{if } c(t) \geq \gamma_1 \text{ holds.} \end{cases} \quad (4.8)$$

ここで、 $u_s, u_c (\leq u_s)$ は、それぞれ直進時と旋回時の速度指令値であり、 c は、参照経路の曲率である。 ϕ は、Fig. 4.14 に示すチェックポイントでの目標姿勢と車体の回転角との誤差であり、 γ_1 と γ_2 は、与えられた閾値である。(4.8) について、Fig. 4.14 を用いて説明する。まず、参照点群 \mathcal{A} から、図において (b) で示される、ダンプの位置に最も近い点(最近点)を計算する。次に、点群において最近点から M 個先の点をチェックポイントとする。ここで、 M は、正の整数であり、チェックポイントは、図において (d) で示される。そして、チェックポイント前後の点に対して曲率 c を計算する。参照経路の旋回が急な時、すなわち $c \geq \gamma_1$ であるとき、速度指令値 u_v は、 u_c に設定される。ダンプが旋回を終えたとき、もし角度誤差 $\phi \geq \gamma_2$ であれば、低速での走行を続けるために速度指令値を u_c とし、そうでなければ、加速するため速度指令値を u_s とする。

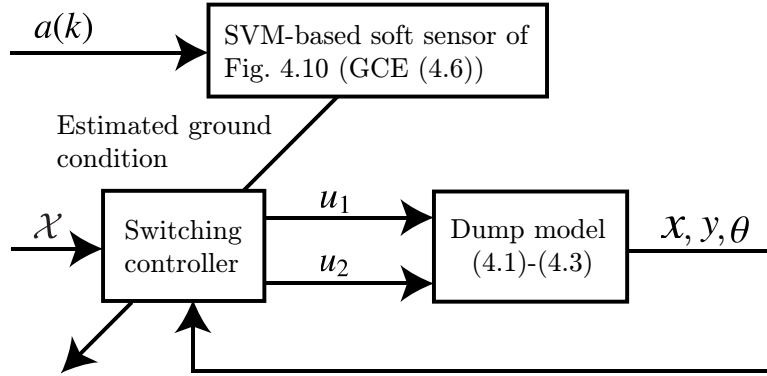


Fig. 4.15: Complete block diagram of the proposed switching control system for the crawler dump adaptive to changes in the ground surface.

車体の回転挙動を特徴づける旋回指令値 u_h は、下式によって求められる。

$$u_h(t) = K_P(t) \{x_e(t) \cos \theta_e(t) + y_e(t) \sin \theta_e(t)\} + K_I(t) \int_0^t x_e(\tau) \cos \theta_e(\tau) + y_e(\tau) \sin \theta_e(\tau) d\tau.$$

ここで、 x_e 、 y_e 、 θ_e は、金山の手法 [120] をもとに下式で求められる。

$$\begin{aligned} x_e(t) &:= (\bar{x} - x(t)) \cos \theta(t) + (\bar{y} - y(t)) \sin \theta(t), \\ y_e(t) &:= -(\bar{x} - x(t)) \sin \theta(t) + (\bar{y} - y(t)) \cos \theta(t), \\ \theta_e(t) &:= \bar{\theta} - \theta(t). \end{aligned} \quad (4.9)$$

上式において、 K_P と K_I は、時変の制御パラメータであり、 x_e と y_e は、車体姿勢と目標姿勢における水平方向と垂直方向の距離誤差、 θ_e は、車体姿勢と目標姿勢との角度誤差である。車体が時計回りに旋回する場合、 u_h が正となり、そうでない場合、負となる。

制御系の切替え則は、走路状態推定器から出力される推定値を用いる。そのため、制御パラメータ K_P と K_I 、および目標姿勢の計算で使用する l は、各クラスに対し、事前に適切な値を設計する必要がある。数値検証のため実施した、シミュレーションを通じたパラメータ設計手順は、次節で述べる。

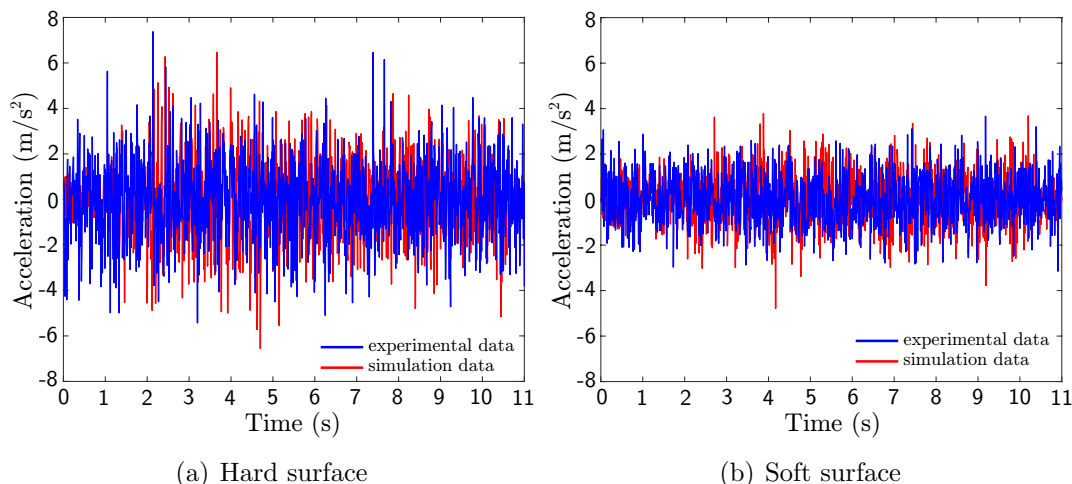


Fig. 4.16: Measured and generated signals for z-axis acceleration.

4.4 制御性能の数値的検証

本節では、提案手法である走路状態推定器を有した切替え制御の数値的検証を実施する。シミュレーションは、Fig. 4.3に示すクローラダンプのモデル、および実験結果から得られた平均と分散を用いた仮想的な z 軸加速度の信号を用いて実施する。

4.4.1 シミュレーション設定

シミュレーションでは、測定した加速度信号を統計的に模擬した仮想の信号を用いる。硬い走路と柔らかい走路の z 軸加速度について、実機での観測信号とシミュレーション信号をFig. 4.16に示す。赤線で示すシミュレーション信号は、青線で示す実験データから求めた平均と分散を用いた正規分布によって生成された。ここで、平均と分散は、硬い走路で-9.78と3.23、柔らかい走路で-9.77と1.36である。図より、シミュレーション信号は、各走路状態の観測信号に対する振幅の違いを表現できている。シミュレーションにおいて信号は、クローラダンプが走行する箇所の走路状態に応じて平均と分散を切替えて生成され、走路状態推定器に送信される。

走路状態のパターンと参照経路 \mathcal{X} をFig. 4.17に示すよう設定する。参照経路 \mathcal{X} は、直線部と旋回部の点群で構成されており、旋回半径は、10mである。このとき、(4.8)における γ_1 は、旋回半径の逆数によって計算されるため、その値が0.1となる。また、 $u_s = 15$ とし、 γ_2 と u_c の値は、試行錯誤的にそれぞれ、5.0と11に定めた。

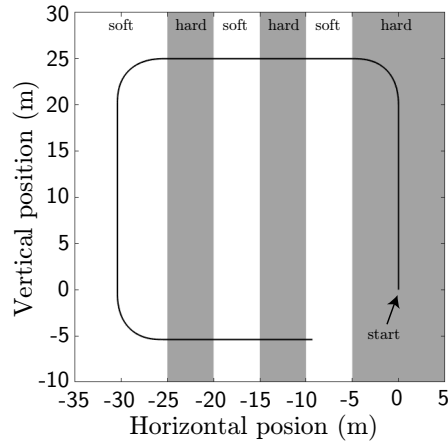


Fig. 4.17: Ground condition pattern and reference path.

制御性能は、参照経路 \mathcal{X} とシミュレーション上でのダンプ位置 (x, y) から計算される追従誤差と最大誤差により評価する。評価関数 $e_{\mathcal{X}}(x, y)$ と $m_{\mathcal{X}}(x, y)$ は、下式で表現される。

$$e_{\mathcal{X}}(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \sqrt{(x(k) - \tilde{x}(k))^2 + (y(k) - \tilde{y}(k))^2}, \quad (4.10)$$

$$m_{\mathcal{X}}(x, y) = \max_{k \in \{1, \dots, T\}} \sqrt{(x(k) - \tilde{x}(k))^2 + (y(k) - \tilde{y}(k))^2}.$$

ここで、 T は、評価区間である。評価区間は、ダンプの挙動に依存しており、シミュレーションの試行ごとに変動する。また、 $x(k)$ と $y(k)$ は、ステップ $k \in \mathcal{Z}$ におけるダンプの位置であり、全シミュレーションにおいて $x(0) = y(0) = 0$ とする。 $\tilde{x}(k)$ と $\tilde{y}(k)$ は、 $(x(k), y(k))$ から最も近い参照経路 \mathcal{X} 上の点を示す。シミュレーションは、4.3.3 節で述べたチェックポイントが定義できなくなったとき、終了する。さらに、走路状態推定器の出力に対し、推定精度も数値的に検証する。

4.4.2 制御パラメータの設計

パラメータ K_P, K_I, l は、与えられた経路に対するシミュレーションを通して設計する。パラメータ値の探索には、(4.10) に示す $e_{\mathcal{X}}$ を目的関数とする、粒子群最適化法 (PSO) を用いた。PSO は、粒子を用いて探索するため、設計する 3 つのパラメータを要素に持つ 5 つの粒子を $p_j := [K_p \ K_I \ l]^T, \forall j \in \mathcal{P} := \{1, 2, 3, 4, 5\}$ と定め

た. 各粒子の更新則は, 下式で表現される.

$$\begin{aligned} p_j(\xi + 1) &= p_j(\xi) + q_j(\xi), \\ q_j(\xi + 1) &= wq_j(\xi) + c_1r_1((p_j^p(\xi) - p_j(\xi))) + c_2r_2((p^g(\xi) - p_j(\xi))), \quad \forall j \in \mathcal{P}. \end{aligned}$$

ここで, $\xi \in \{0, 1, \dots, 120\}$ は, 反復回数であり, r_1 と r_2 は, 正規化された乱数値である. p_j と q_j は, j 番目における粒子の位置と速度であり, $p_j(0) = q_j(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ は, 全ての $j \in \mathcal{P}$ に対して共通である. 各粒子内での最良値であるパーソナルベスト p_j^p , および全粒子の中での最良値であるグローバルベスト p^g は, それぞれ以下で求められる.

$$p_j^p(\xi) = \arg \min_{p_j(\tau), \tau \in \{0, 1, \dots, \xi\}} e_{\mathcal{X}}(x, y | p_j(\tau)), \quad p^g(\xi) = \arg \min_{p_j^p(\xi), j \in \mathcal{P}} e_{\mathcal{X}}(x, y | p_j^p(\xi)).$$

ここで $e_{\mathcal{X}}(x, y | p_j)$ は, j 番目のパラメータ候補値 p_j を用いてシミュレーションを実施し, (4.10) により求めた追従誤差である. また, $w = 0.75$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.75$ は, 試行錯誤的に定めた PSO のパラメータである. PSO の反復終了後, すなわち $\xi = 120$ におけるグローバルベスト $p^g(120)$ を用いて, 適切なパラメータ値を定める.

硬いと柔らかいのクラスでの制御パラメータ値は, 推定器の出力を走路状態に対応する値に固定し, PSO ベースの手法により設計した. ミックスのクラスでは, Fig. 4.17 に示す走路状態のパターンに対し, 提案した走路状態推定器を有する制御手法を用いて PSO ベースの設計手法を実施した. ここで, ミックスのクラスは, 走路状態の過渡状態を表現するため, 評価対象は, 走路状態が変化してから 300 ステップの制御出力とする. つまり, 評価関数は, 以下で表される.

$$e_{\mathcal{X}}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{1}{300} \sum_{k=k_i}^{k_i+299} \sqrt{(x(k) - \tilde{x}(k))^2 + (y(k) - \tilde{y}(k))^2}. \quad (4.11)$$

ここで, k_i は, i 番目の走路状態パターンを切替えたステップである. なお, 今回のパターンでは, シミュレーションを通して走路状態が 9 回変化する. 各クラスに対する設計したパラメータ値を Table 4.4 に示す. パラメータ l に着目すると柔らかい走路で値が最も大きい. これは, 柔らかい走路では, 硬い走路と比べて旋回時の抵抗が大きく, 旋回開始部分のより手前で旋回操作をすることにより, 所望の経路に追従させるためと考察される.

Table 4.4: Parameter values for each class.

		Control Parameters		
		l	K_P	K_I
Ground conditions	Hard	1.40	1.20	0.11
	Mixed	1.76	1.20	0.13
	Soft	1.93	1.04	0.15

Table 4.5: Simulation results and correct rates of SVM for each simulation. The optimal hyperparameters have the same values as listed in Table 4.3.

Switching control		e_x	m_x	Estimation accuracy (%)				# of trials less than 0.16 (%)
				for the entire Total	for each class			
				Hard	Soft	Mixed		
Proposed (Three-mode)	minimum	0.10	0.40	82.1	85.7	93.6	66.7	33.9
	average	0.16	0.66	89.1	99.0	95.4	70.3	
Two-mode	minimum	0.12	0.40	84.9	77.6	90.8	-	16.8
	average	0.17	0.71	85.7	79.5	90.7	-	

4.4.3 数値検証結果

本節では、提案手法である3モード切替え制御の制御性能と走路状態推定精度を検証する。そして、硬い走路と柔らかい走路に対応する制御パラメータを持つ、2モード切替え制御と比較する。参照経路と走路状態の変化パターンは、共通であり、制御パラメータは、Table 4.4に示す値を用いる。30,000回のシミュレーション結果に対する、追従誤差、最大誤差、各クラスの走路状態推定精度、および追従誤差の平均スコアを上回った試行回数の割合をTable 4.5に示す。表より、提案手法における最良スコアと平均スコアの追従誤差は、2モードの切替え制御よりも優れている。さらに、シミュレーションを通して制御系の不安定な挙動は、観測されなかった。

提案手法と2モード切替え制御について、追従誤差の最良スコアと平均スコアの応答をFigs. 4.18-4.19に示す。それぞれのスコアに対する走行軌跡の比較をFigs. 4.18(a), 4.19(a)に、参照経路からの偏差をFigs. 4.18(b), 4.19(b), およびFigs. 4.18(c), 4.19(c)に示す。赤線と緑線は、それぞれ最良スコアと平均スコアの結果である。図より、 e_x と m_x の値は、ダンプの参照経路からの偏差に対応していることがわかる。提案手法と2モード切替え制御に対し、走路状態推定器の出力をFigs. 4.20-4.21に示す。Figs. 4.20(a), 4.21(a), およびFigs. 4.20(b), 4.21(b)は、最良スコアと平均スコアでの推定結果を示す。図において、赤線と青線は、推定器の出力と真値となる状態である。走路状態推定器の精度は、図示した4つのシミュレーション結果において、大

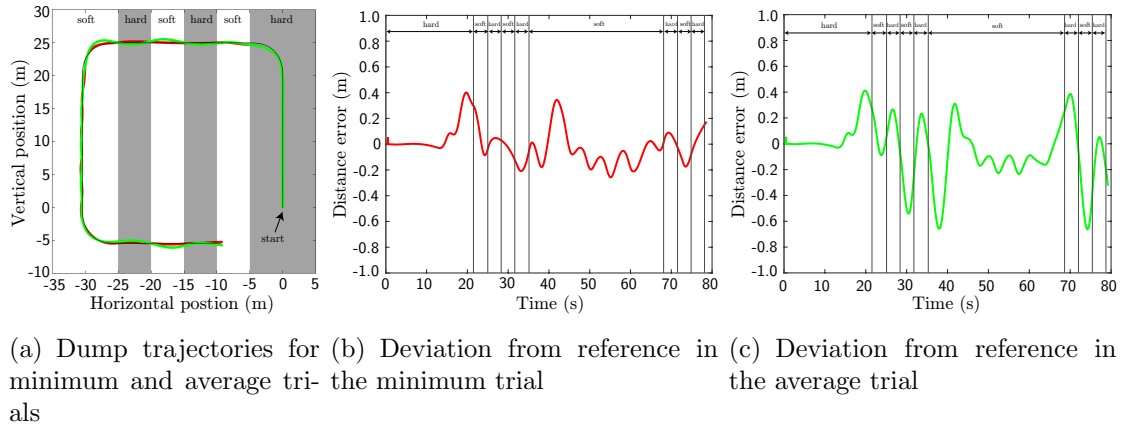


Fig. 4.18: Simulation results for minimum and average trials using the proposed (three-mode) switching control system.

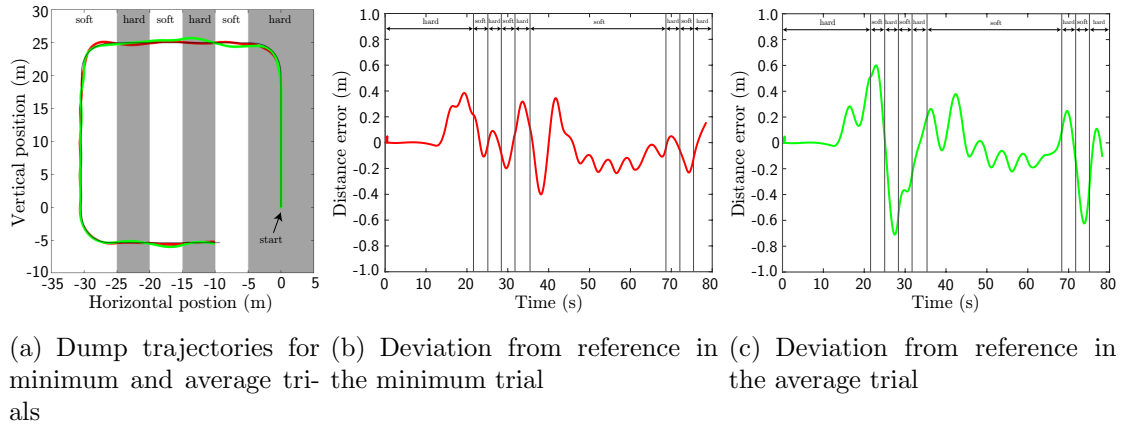


Fig. 4.19: Simulation results for minimum and average trials using the two-mode switching control system.

きな差が発生していないことが確認された。最後に、全シミュレーション試行に対する e_x のヒストグラムを Fig. 4.22 に示す。横軸と縦軸は、 e_x の値と頻度である。ヒストグラムのバーにおいて、青色と橙色は、提案手法と2モード切替え制御の結果である。ヒストグラムより、提案手法の結果は、2モード切替え制御よりも追従誤差が小さいことが確認できる。以上の結果から、提案手法によって走路状態の変化による経路追従制御の性能劣化を抑制していることが確認された。

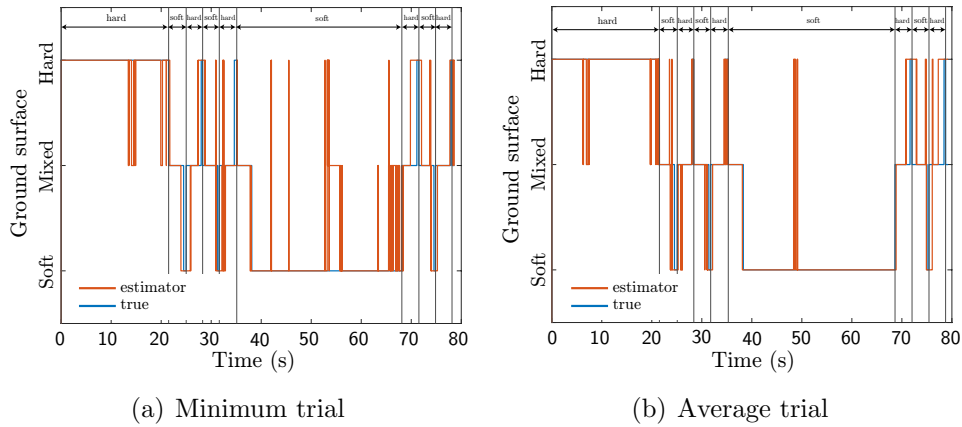


Fig. 4.20: Time responses of the ground condition estimator's output and true ground surface using the proposed switching control system.

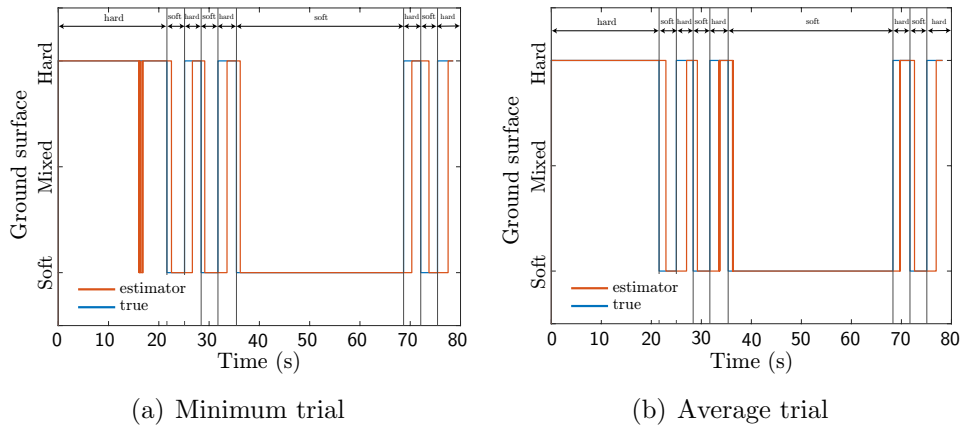


Fig. 4.21: Time responses of the ground condition estimator's output and true ground surface using the two-mode switching control system.

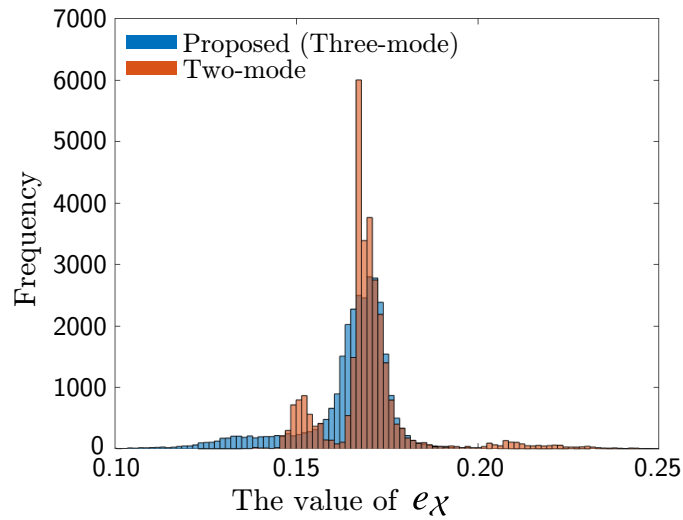


Fig. 4.22: Histogram of e_χ for 30000 control simulation trials.

4.5 おわりに

本章では、走路状態推定器を有する切替え制御を提案し、シミュレーションによって有効性を検証した。まず、実験データを用いてダンプの挙動を同定し、走路状態の変化によって走行特性やモデルパラメータが変化することを確認した。次に、計測した加速度信号を用いて、硬い、柔らかいおよびミックスの状態を出力する走路状態推定器をSVMによって構成し、オンライン推定精度を実験的に検証した。そののち、得られた分類器による走路状態推定器を有する3モードの切替え制御を提案し、シミュレーションを通して有効性を検証した。シミュレーションは、走路状態が複数回変化する設定で実施し、追従誤差の観点から提案手法の制御性能を統計的に評価した。また、2モード切替え制御と比較し、提案手法によって性能が向上することを検証した。以上の結果に基づき、本章は、走路状態が変化する状況において、提案手法によって追従性能が向上することを結論づけた。

第5章 まとめ

本章では、本博士論文の結論をまとめ、今後の課題を議論する。

5.1 結論

本博士論文では、遠隔施工と自動化施工における生産性と安全性の向上を目的とした、現場での施工中に生じる環境変化に即する建機の制御システムを開発した。遠隔施工を対象として、通信遅延の存在下において安全に操作可能な遠隔制御システムを開発し、実験的検証をおこなった。また、自動化施工を対象として、走路状態の変化を起因とする経路追従制御の性能劣化を抑制する制御システムを開発し、制御システムの数値的検証を実施した。

第1章では、遠隔施工と自動化施工について、関連研究や現場への適用状況をまとめ、それぞれの課題と本博士論文の目的を述べた。

第2章では、本論文で用いた遠隔操作と自動走行が可能なクローラダンプについて述べた。まず、土木現場で広く使われるクローラダンプのスペックと操作方法を述べた。そして、建機に設置したレトロフィット型油圧制御システム、および位置や方位などを計測するセンサの仕様や計測精度について述べ、クローラダンプの遠隔化と自動化を実施した。

第3章では、通信遅延の存在下において安全に操作できる遠隔制御システムの開発をおこなった。まず、ステップ応答法により、前後進と旋回の遠隔操作で用いる動作のモデルを同定した。次に、リファレンスガバナと同定したモデルを用いて設計した切替え制御からなる手法をクローラダンプの遠隔制御に実装した。そして、実機試験を通し、入力指令が拘束条件を満たしつつ目標値に追従しており、遅延の存在下において安全に遠隔操作可能であることを検証した。

第4章では、走路状態の変化による性能劣化を抑制する制御システムを開発した。

まず、差動二輪モデルを応用し、走路状態の変化を考慮したモデルを同定した。次に、走路状態推定器を構成し、走路状態のオンライン推定精度を実験的に検証した。そして、走路状態推定器を有する切替え制御を用いた制御システムを提案し、シミュレーションにより有効性を検証した。シミュレーションでは、走路状態が複数回変化する設定において、提案手法により追従性能が向上することを確認した。

以上より、本論文では、現場での施工中に生じる環境変化に即する建機の制御システムを開発した。産業応用の観点では、本論文で開発したシステムにより、現場での施工中に生じる環境変化に対処でき、遠隔施工と自動化施工における生産性と安全性の向上が達成できた点が貢献である。操作者が気づかない遅延の発生下でも安全に遠隔操作可能であり、また、自動走行中の走路状態変化による目標経路への追従性能劣化を抑制できるシステムは、生産性と安全性の向上に大きく寄与し、遠隔施工と自動化施工のさらなる普及につながると見込まれる。また、学術的には、遠隔制御システムの開発において、安定性が理論的に保証された手法を実際の建機とネットワーク環境において実装し、実機検証をおこなった点、および自動走行制御システムにおいて、構成した走路状態推定器をソフトセンサとして用いる制御系を構成し、制御性能の向上を数値的に検証した点が貢献である。

5.2 今後の課題

今後の課題を以下に述べる。

5.2.1 多様な環境変化への対応

本論文において、遠隔制御システムでは通信遅延を、自動制御システムでは、2種類の硬さに関する走路状態を対象とした。しかし、実際の現場では、本論文で対象としていない環境変化も数多く存在する。例えば、走路状態に着目すると、含水率の違い、土や岩など走行する地盤の種類、および不陸状態の違いなどがあり、それにより、走行特性が変化することが予想される。また、遠隔操作においても、走路状態の違いによって操作の応答特性が変化し、制御性能が劣化することも考えられる。そのため、本論文で構成した制御システムをより汎用的にするためには、こうした様々な環境変化に対応することが必要となる。

そこで、本論文で構成した走路状態推定器を拡張し、多様な環境変化への対処を目指す。推定器の構成では、硬さの異なる走路状態の違いによって生じる加速度信号の差に着目し、特徴量の抽出を実施した。加速度信号は、岩や不陸の多い箇所を走るときは、機体がより振動するため振幅が大きくなり、ぬかるんだ箇所などを走るときは、振幅が小さくなることが予想される。そのため、本論文で実施した手法と同様に、加速度信号をもとにした走路状態の推定が有効であると予想される。今後、建機走行時における振動のモデリングなどを通じて、多様な環境変化が及ぼす建機の走行への影響を解析し、物理的解釈を実施する。そして、様々な環境での走行データ計測、特徴量抽出、および走路状態推定器の構成に取り組み、多様な環境変化への対処を目指す。

5.2.2 建設機械の特性変化に即する制御システムの開発

本論文では、通信遅延や走路状態の変化といった、施工中に生じる外的な環境変化に即する制御システムを開発した。しかし、建機には、油圧特性の変化などを起因とする動作特性の内的な変化が存在する。実際に、バックホウにおいて、作業機の単体動作と複数作業機の複合動作では、動作速度が異なることが確認されている。こうした建機の特性変化を起因とする制御性能の劣化を抑制することにより、遠隔施工と自動化施工での生産性や安全性のさらなる向上につながると考えられる。さらに、現場における、作業可能な範囲の特性変化であれば施工を継続させたいというニーズにも応えることが可能になると考えられる。

今後、建機の特性変化に即する制御システムの開発に取り組む。方法として、作動油の流量や油圧など、建機の内部状態を用いた制御系の設計を検討する。流量や油圧をパラメータとして陽に含むモデルを構成し、パラメータの分布を用いた建機の状態監視システムを構成することにより、特性変化の度合いに応じた制御器を選択することが可能となる。さらに、ゲインスケジューリング制御や適応制御を応用することも有効であると考えられる。今後、現場での稼働データや実験データの解析によるモデルの構成と制御系設計に取り組み、建機の特性変化が発生した状況での制御性能向上を目指す。

5.2.3 環境モニタリングシステムの開発

本論文における遠隔制御手法では、履帯と地面との環境的な相互作用による制御性能への影響が確認された。この相互作用は、柔らかい土の上では大きくなり、硬い土の上では小さくなることが予想される。また、自動制御システムでは、特徴量抽出の理由から、実際に走路状態が変化して検出するまでの遅れが発生する。これらに対し、環境の状態を事前に把握することができれば、制御系での対処が可能となる。さらに、システムとして構成することにより、作業の効率化にもつながると考えられる。

そこで、今後の課題として、環境モニタリングシステムの開発をおこなう。モニタリングシステムの構成には、本論文で提案した走路状態推定器を応用する。複数台の建機が同時に作業する状況において、各建機がローカルに推定した走路状態をサーバ上のデータベースに送信することにより、施工フィールド全体の走路状態を記録したマップを作成することができる。そして、各建機が走行予定場所の状態を取得することにより、走行前に状態を把握することができ、制御ゲインを事前に切替えるなど制御系での対処が可能となる。今後、システムの構築、およびシミュレーションや現場での検証に取り組み、遠隔施工と自動化施工のさらなる生産性向上を目指す。

参考文献

- [1] 厚生労働省, “建設業デジタルハンドブック”, <https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html>, 2022.
- [2] Statistics Bureau of Japan, “Employed person by industry(12th and 13th revision industrial classification),” <https://www.stat.go.jp/english/data/roudou/lngindex.html>, 2022.
- [3] 総務省統計局, “労働力調査年報”, <https://www.stat.go.jp/data/roudou/report/2022/index.html>, 2022.
- [4] 厚生労働省, “毎月勤労統計調査”, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/30-1a.html>, 2023.
- [5] —, “労働災害事例・ヒヤリハット一覧事例”, <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/hiyari/anrdh00.html>, 2023.
- [6] 建設業労働災害防止協会, “建設業における死亡災害の工事の種類・災害の種類別発生状況”, https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/statistics/construction/r03.html, 2021.
- [7] S. Miura, I. Kuronuma, and K. Hamamoto, “Next generation construction production system: On automated construction machinery,” in *Civil Engineering Conference in the Asian Region*, 2016.
- [8] 鹿島建設, “成瀬ダム堤体打設工事で、月間打設量の国内最高記録を樹立”, <https://www.kajima.co.jp/news/press/202212/23c1-j.htm>.
- [9] —, “月面での建設機械の遠隔操作・自動運転を目指した 遠隔施工実験の実施について”, <https://www.kajima.co.jp/news/press/202105/18c1-j.htm>.

- [10] K. Chayama, A. Fujioka, K. Kawashima, H. Yamamoto, Y. Nitta, C. Ueki, A. Yamashita, and H. Asama, “Technology of unmanned construction system in japan,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 4, pp. 403–417, 2014.
- [11] 茂木, 山元, “無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動”, 計測と制御, vol. 55, no. 6, pp. 495–500, 2016.
- [12] 古賀, “雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工”, 砂防学会誌, vol. 52, no. 4, pp. 64–68, 1999.
- [13] 松井, “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.
- [14] 山岡, 青木, 天野, 久保, “地域の災害復旧に貢献した無人化施工技術 (国道480号)～地方整備局所有遠隔操作機械を活用した緊急工事～”, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-43, 2015.
- [15] 石坂, “災害復旧のための無人化施工技術の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 38, no. 3, pp. 245–248, 2020.
- [16] 立石, 植木, “企業からみた福島第一原子力発電所災害への対応”, 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 2, pp. 151–153, 2014.
- [17] 無人化施工協会, “全国実績一覧”, http://www.kenmukyou.gr.jp/works/works_list.php, 2022.
- [18] 若林, 須藤, 稲垣, 森本, 星野, “宇宙遠隔操作技術と地上自動化技術の融合による遠隔施工システムの実現～月面拠点建設に向けて”, 自動制御連合講演会講演論文集, vol. 60, pp. 1244–1249, 2017.
- [19] T. Sasaki, T. Nagai, and K. Kawashima, “Remote control of backhoe for rescue activities using pneumatic robot system,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, pp. 3177–3182.

- [20] P. Pratumswan, S. Hutamarn, and W. Po-ngaen, “A development of tele-controller for hydraulic excavator,” in *7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2012, pp. 2123–2126.
- [21] A. A. Yusof, M. N. A. Saadun, H. Sulaiman, and S. A. Sabaruddin, “The development of tele-operated electro-hydraulic actuator (T-EHA) for mini excavator tele-operation,” in *2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation*, 2016, pp. 1–6.
- [22] D. Kim, K. W. Oh, D. Hong, J. Park, and S. Hong, “Remote control of excavator with designed haptic device,” in *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008, pp. 1830–1834.
- [23] K. Nagatani, G. Y. K. Akiyama, K. Yoshida, Y. Hada, S. Yuta, T. Izu, and R. Mackay, “Development and field test of teleoperated mobile robots for active volcano observation,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 1932–1937.
- [24] S. Kim, C. H. Kim, Y. C. Seo, S. H. Jung, G. S. Lee, and B. S. Han, “Development of tele-operated mobile robot in nuclear power plants,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 34, no. 4, pp. 239–244, 2001.
- [25] Q. H. Le, J. W. Lee, and S. Y. Yang, “Remote control of excavator using head tracking and flexible monitoring method,” *Automation in Construction*, vol. 81, pp. 99–111, 2017.
- [26] Q. H. Le and S. Yang, “Study on the architecture of the remote control system for hydraulic excavator,” in *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, 2011, pp. 941–945.
- [27] H. Yamada, T. Kawamura, and K. Ootsubo, “Development of a teleoperation system for a construction robot,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 1, pp. 110–111, 2014.
- [28] 近藤, 倉鋪, 吉灘, “建設ロボットの遠隔操作のための投影型広視野ディスプレイ”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2P1-E04, 2019.

- [29] R. Sekizuka, M. Ito, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Y. Kurita, “Evaluation system for hydraulic excavator operation skill using remote controlled excavator and virtual reality,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2019, pp. 3229–3234.
- [30] 西浦, 中嶋, 倉爪, “レトロフィット型バックホウ遠隔操縦システムの開発”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 1P1-C07, 2022.
- [31] R. Sato, M. Kamezaki, M. Yamada, T. Hashimoto, S. Sugano, and H. Iwata, “Experimental investigation of optimum and allowable range of side views for teleoperated digging and release works by using actual construction machinery,” in *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2019, pp. 788–793.
- [32] 筑紫, 森山, 藤井, 田村, 山川, 永谷, 坂井, 千葉, 山本, 茶山, 山下, 浅間, “遠隔操作オペレータの要求仕様に基づいたバックホウ盛土作業のための映像自動提示”, *精密工学会誌*, vol. 86, no. 2, pp. 164–170, 2020.
- [33] 橋本, 山田, 新田, 山内, 油田, 野末, 上原, “遠隔操作建設機械への俯瞰映像システムの導入について”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 1P2-D09, 2019.
- [34] T. Yoshimoto, H. Yoshida, T. Innami, K. Ohashi, H. Furuya, and N. Mori, “Improving workload of long-distance remote construction through a wlan and the internet,” in *16th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference*, 2019, pp. 1–6.
- [35] R. Sekizuka, M. Ito, C. Raima, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Y. Kurita, “Force feedback design of operation levers considering the characteristics of human force perception to improve hydraulic excavator operability,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 926–938, 2022.
- [36] M. Nagai, M. Ito, C. Raima, S. Saiki, Y. Yamazaki, and Y. Kurita, “Load information feedback method for teleoperated hydraulic excavators considering switching to different classes,” in *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2023, pp. 1–6.

- [37] 浜本, 三浦, 内村, 丸田, 小木曾, 若林, 保中, 星野, “遠隔操作と自動制御の協調による遠隔施工システムの実証”, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-351, 2019.
- [38] 浜本, 黒沼, 大塩, 小熊, 三浦, “振動ローラ自動転圧システムの開発とダム工事への適用”, 土木建設技術発表会, 2015, pp. 198–203.
- [39] 三浦, 真下, “鹿島における DX 戦略と建設生産 DX としての A⁴CSEL”, 建設マネジメント技術, vol. 7, pp. 56–63, 2021.
- [40] 菅井, 三浦, 出石, 青木, 浜本, “自動化施工システムの台形 CSG ダム工事への適用 (その 2)”, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-53, 2022.
- [41] 三浦, 黒沼, 浜本, “放射線環境下における建設機械の自動運転システム”, 建設機械施工, vol. 67, no. 4, pp. 81–84, 2014.
- [42] 市村, 後藤, 青木, 城本, 佐々木, “路面転圧作業と締固め度管理の一貫した自動化の実証”, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-669, 2022.
- [43] 遠藤, 青木, “55t 級ダンプトラック HD465 を用いた自動化リジッドダンプの開発”, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-51, 2022.
- [44] 中居, 佐野, 若山, 佐藤, 中村, “自律制御型ブルドーザの開発”, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-785, 2023.
- [45] 大成建設, “協調運転制御システム「T-iCraft®」を南摩ダム本体建設工事に導入”, https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2022/220803.8896.html.
- [46] 望月, 杉浦, 森田, 平塚, 塩野, “アーティキュレートダンプトラックの自律運転システムの開発”, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-666, 2022.
- [47] H. Yoshida, T. Yoshimoto, D. Umino, and N. Mori, “Practical full automation of excavation and loading for hydraulic excavators in indoor environments,” in *IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering*, 2021, pp. 2153–2160.
- [48] 大林組, “大規模土工事の無人化に向けて、福島県飯舘村における盛土工事で実証開始”, https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220422_1.html.

- [49] 坂西, “不整地運搬車 (クローラキャリア) の自動走行技術の開発”, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-687, 2018.
- [50] 竹下, 天下井, 櫛田, 志賀, “転圧作業における自律走行式振動ローラの有効性検証”, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-609, 2022.
- [51] H. Hatamoto, K. Fujimoto, T. Asuma, Y. Takeshita, T. Amagai, A. Furukawa, and S. Kitahara, “A study on an autonomous crawler carrier system with ai based transportation control,” in *the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2020, pp. 530–537.
- [52] 武石, 伊藤, 土井, 野田, “自動運転ショベルの複数台同時稼働・管理による省人化”, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-762, 2023.
- [53] 武石, 千野, “建設機械の自動運転システムの開発と現場実証”, 安藤ハザマ研究年報 Technical research report of Hazama Ando Corporation, vol. 8, p. 6, 2020.
- [54] 伏見, “後付け型遠隔操縦装置「ロボ QS」の自動化に関する基礎開発”, フジタ技術研究報告, no. 57, pp. 1–6, 2021.
- [55] T. Komatsu, Y. Konno, S. Kiribayashi, K. Nagatani, T. Suzuki, K. Ohno, T. Suzuki, N. Miyamoto, Y. Shibata, and K. Asano, “Autonomous driving of six-wheeled dump truck with a retrofitted robot,” *Field and Service Robotics*, pp. 59–72, 2021.
- [56] G. Peng, H. Duan, Z. Tan, Y. Zhou, J. Li, B. Hu, and C. Zhou, “Construction path tracking and pose estimation of unmanned bulldozer,” *Automation in Construction*, vol. 154, p. 105015, 2023.
- [57] Y. Jiao, R. Zhao, Y. Chen, S. Jiao, and X. Zhang, “A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction,” *Automation in Construction*, vol. 152, p. 104883, 2023.
- [58] S. Liu, Z. Hou, T. Tian, Z. Deng, and L. Guo, “Path tracking control of a self-driving wheel excavator via an enhanced data-driven model-free adaptive

- control approach,” *IET Control Theory Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 220–232, 2020.
- [59] D. Sun, I. Baek, S. Hwang, S. Lee, S.-K. Lee, S. Jang, C. Ji, J. Han, and C. Han, “Sensor-based straight-line control of the end-point of a typical retrofitted hydraulic excavator,” *Automation in Construction*, vol. 120, p. 103385, 2020.
- [60] R. Song, Z. Ye, L. Wang, T. He, and L. Zhang, “Autonomous wheel loader trajectory tracking control using LPV-MPC,” in *American Control Conference*, 2022, pp. 2063–2069.
- [61] T. Akegawa, K. Ohno, S. Kojima, K. Yamada, W. Go, T. Suzuki, S. Kiribayashi, T. Komatsu, N. Miyamoto, T. Suzuki, Y. Shibata, K. Asano, K. Nagatani, and S. Tadokoro, “Path planning of the turning back of an autonomous large-scale six-wheeled dump truck for loading/leaving sediment based on backhoe work,” in *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2022, pp. 511–518.
- [62] J. Jongluxmanee, O. Kohei, and M. Yamakita, “Iterative learning control for soil loading operation of excavator,” in *12th Asian Control Conference*, 2019, pp. 621–626.
- [63] F. A. Bender, S. Göltz, T. Bräunl, and O. Sawodny, “Modeling and offset-free model predictive control of a hydraulic mini excavator,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 1682–1694, 2017.
- [64] A. R. Enes and W. J. Book, “Optimizing point to point motion of net velocity constrained manipulators,” in *49th IEEE Conference on Decision and Control*, 2010, pp. 6415–6420.
- [65] Z. Yao, S. Zhao, X. Tan, W. Wei, and Y. Wang, “Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms,” *Automation in Construction*, vol. 152, p. 104916, 2023.

- [66] J. Huh, J. Bae, D. Lee, J. Kwak, C. Moon, C. Im, Y. Ko, T. K. Kang, and D. Hong, “Deep learning-based autonomous excavation: A bucket-trajectory planning algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 38 047–38 060, 2023.
- [67] J. Zhao, P. Tan, Y. Hu, M. Tian, and X. Xia, “Autonomous excavation trajectory generation for trenching tasks based on skills of skillful operator,” in *International Conference on Mechanical and Electronics Engineering*, 2022, pp. 134–138.
- [68] O. Azulay and A. Shapiro, “Wheel loader scooping controller using deep reinforcement learning,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 24 145–24 154, 2021.
- [69] 田邊, 孫, 中谷, 内村, “深層強化学習による施工機械の経路最適化”, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), vol. 139, no. 4, pp. 401–408, 2019.
- [70] K. You, C. Zhou, and L. Ding, “Deep learning technology for construction machinery and robotics,” *Automation in Construction*, vol. 150, p. 104852, 2023.
- [71] K. You, G. Peng, L. Ding, Q. Dou, Z. Wu, and C. Zhou, “Smart t-box of unmanned earthwork machinery for internet of vehicles,” *Automation in Construction*, vol. 144, p. 104589, 2022.
- [72] 山口, 吉田, 石松, “遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する実態調査”, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004.
- [73] 橋本, 新田, “災害時の復旧工事に求められる技術について”, 日本ロボット学会誌, vol. 38, no. 3, pp. 226–229, 2020.
- [74] 伊藤, 坂野, 藤野, 安藤, “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.
- [75] 茂木, 藤野, 西山, 油田, “建設機械の搭乗操作と遠隔操作における作業時間の実態について”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, VI-669, 2015.

- [76] 小松製作所, “コマツ、ホイールローダー WA470 トンネル仕様車自動化対応車両を開発 -鹿島建設が進める山岳トンネル工事を対象とした自動化施工システムに協力-”, <https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2021/20211014>.
- [77] 小松, “空気圧ゴム人工筋肉を用いた油圧ショベル用無線遠隔操縦ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 38, no. 7, pp. 592–595, 2020.
- [78] 建設業労働災害防止協会, “無人化施工支援システム (HRC system・車両カメラ system)”, https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/entry/003569.html.
- [79] 小松製作所, “-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>.
- [80] 田口, 山下, 山本, 原, “ホイールローダ遠隔操作システム (Tunnel RemOS-WL) の開発”, 西松建設技報, vol. 45, pp. 1–6, 2022.
- [81] 古屋, “建設機械の遠隔施工における 5G の導入”, 建設機械施工, vol. 70, no. 7, pp. 40–44, 2018.
- [82] 堀尾, 蔵多, 岡本, 古屋, “5G 高速通信システムによる建設機械遠隔操作技術”, 建設機械施工, vol. 71, no. 12, pp. 28–33, 2020.
- [83] R. Anderson and M. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” in *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 1, 1988, pp. 131–138.
- [84] A. Maddi, A. Guessoum, and D. Berkani, “Design of nonlinear pid-smith predictor controllers with large time delays,” in *Third World Conference on Complex Systems*, 2015, pp. 1–4.
- [85] W. Ai, X. Zhu, and T. Peng, “A model-free control method for big time delay system based on improved iterative feedback tuning,” in *IEEE International Conference on Control and Automation*, 2009, pp. 264–269.

- [86] W. Gao, Y. Li, G. Liu, and T. Zhang, “An adaptive fuzzy smith control of time-varying processes with dominant and variable delay,” in *American Control Conference*, vol. 1, 2003, pp. 220–224.
- [87] Y. He, M. Wu, G. Liu, and J. She, “Output feedback stabilization for a discrete-time system with a time-varying delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 10, pp. 2372–2377, 2008.
- [88] T. Hamdi, I. Amri, D. Soudani, and M. Benrejeb, “Delay-dependent stability criteria for neutral systems with a varying delay,” in *International Conference on Electrical Engineering and Software Applications*, 2013, pp. 1–5.
- [89] Y. He, Q. Wang, and C. Lin, “An improved H_∞ filter design for systems with time-varying interval delay,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 53, no. 11, pp. 1235–1239, 2006.
- [90] Q. H. Li, W. N. Xie, T. Liu, and Z. Y. Qi, “Reference governor for second order constrained linear systems with small input time delays,” in *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 03, 2013, pp. 1022–1027.
- [91] M. M. Nicotra, T. W. Nguyen, E. Garone, and I. V. Kolmanovskiy, “Explicit reference governor for the constrained control of linear time-delay systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, no. 7, pp. 2883–2889, 2019.
- [92] N. Li, S. Geng, I. V. Kolmanovskiy, and A. Girard, “An explicit reference governor for linear sampled-data systems with disturbance inputs and uncertain time delays,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 1–1, 2022.
- [93] K. Kogiso and K. Hirata, “A remote control technique for constrained linear systems: An index feedback approach,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2007, pp. 3029–3035.
- [94] J. D. Angrist and A. B. Krueger, “Instrumental variables and the search for identification: From supply and demand to natural experiments,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 15, no. 4, pp. 69–85, 2001.

- [95] E. G. Gilbert and K. T. Tan, “Linear systems with state and control constraints: the theory and application of maximal output admissible sets,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 9, pp. 1008–1020, 1991.
- [96] K. Hirata and M. Fujita, “Set of admissible reference signals and control of systems with state and control constraints,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, 1999, pp. 1427–1432.
- [97] C. Lee, K. Hedrick, and K. Yi, “Real-time slip-based estimation of maximum tire-road friction coefficient,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 454–458, 2004.
- [98] S. C. Behera, D. Mohapatra, G. K. Choudhary, and G. Chaudhary, “A comparative study of different yaw stability control strategies with different road condition and handling maneuver,” in *International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques*, 2016, pp. 1036–1041.
- [99] D. A. Bradley and D. W. Seward, “The development, control and operation of an autonomous robotic excavator,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 73–97, 1998.
- [100] P. Egli, D. Gaschen, S. Kerscher, D. Jud, and M. Hutter, “Soil-adaptive excavation using reinforcement learning,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9778–9785, 2022.
- [101] H. Chih-Lyang and H. Wu, “Hybrid fuzzy sliding-mode under-actuated control for trajectory tracking of mobile robot in the presence of friction and uncertainty,” in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2012, pp. 1–8.
- [102] K. Sato, M. Yanagi, and K. Tsurut, “Robust adaptive trajectory control of nonholonomic mobile robot with compensation of input uncertainty,” *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 6, no. 3, pp. 273–286, 2012.

- [103] P. Speth and M. Buchholz, “Combined estimation of vehicle slip angle and lateral tire forces with an unscented kalman filter with outlier detection,” in *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2019, pp. 2963–2968.
- [104] L. Cheng, X. Zhang, and J. Shen, “Road surface condition classification using deep learning,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 64, p. 102638, 2019.
- [105] P. M. Harikrishnan and V. P. Gopi, “Vehicle vibration signal processing for road surface monitoring,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5192–5197, 2017.
- [106] B. Y. Amirgaliyev, K. K. Kuvatov, and Z. Y. Baibatyr, “Road condition analysis using 3-axis accelerometer and gps sensors,” in *IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 2016, pp. 1–5.
- [107] 岡田, 山本, 土井, 小岩井, 山下, “自動運転ショベル掘削動作のデータベース駆動型モデル予測制御系の設計”, システム制御情報学会論文誌, vol. 35, no. 6, pp. 145–152, 2022.
- [108] T. Osa, N. Osajima, M. Aizawa, and T. Harada, “Learning adaptive policies for autonomous excavation under various soil conditions by adversarial domain sampling,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 5536–5543, 2023.
- [109] 日浦, 筑紫, ルイ笠原, 永谷, 千葉, 茶山, 山下, 浅間, “小型建機の走行による振動に基づいた地盤のコーン指数推定”, 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 2021, pp. 2265–2270.
- [110] 藤山, 建山, “振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法”, 土木学会論文集, no. 652, pp. 115–123, 2000.
- [111] B. E. Boser, I. M. Guyon, and V. N. Vapnik, “A training algorithm for optimal margin classifiers,” in *5th Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory*, 1992, pp. 144–152.

- [112] A. Jha and M. Kumar, “Two wheels differential type odometry for mobile robots,” in *3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization*, 2014, pp. 1–5.
- [113] S. A. Raziei and Z. Jiang, “Nonlinear model predictive motion control of differential wheeled robots,” in *IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2018, pp. 443–450.
- [114] H. Tang, W. Yang, and Z. Wang, “A model-based method for leakage detection of piston pump under variable load condition,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99 771–99 781, 2019.
- [115] S. Cao, S. Liu, Y. Shi, Y. Pan, L. Han, and Y. Yang, “A semi-supervised support vector machines approach for condition monitoring of construction equipment,” in *IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*, 2022, pp. 192–196.
- [116] 橋本, 梶田, 藤野, 建山, “振動ローラの機械仕様に関する研究”, 土木学会論文集, vol. 68, no. 12, pp. 42–50, 2006.
- [117] S. K. Sahu, A. K. Pujari, V. R. Kagita, V. Kumar, and V. Padmanabhan, “GP-SVM: Tree structured multiclass SVM with greedy partitioning,” in *International Conference on Information Technology*, 2015, pp. 142–147.
- [118] X. Yuan, W. Lai, T. Mei, X. Hua, X. Wu, and S. Li, “Automatic video genre categorization using hierarchical svm,” in *International Conference on Image Processing*, 2006, pp. 2905–2908.
- [119] P. Ranganathan, A. Ramanan, and M. Niranjan, “An efficient and speeded-up tree for multi-class classification,” in *IEEE 6th International Conference on Information and Automation for Sustainability*, 2012, pp. 190–193.
- [120] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, “A stable tracking control method for an autonomous mobile robot,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, 1990, pp. 384–389.

謝辞

本研究の遂行にあたり、日ごろから多くのご指導とご鞭撻を頂きました小木曾公尚教授に心より感謝申し上げます。学部4年から現在に至るまで長きにわたってご指導頂き、社会人博士として研究の機会を与えて頂きました。また、指導教員として多くのご助言、ご指導を頂いた金子修教授、澤田賢治准教授に深く感謝申し上げます。ご多忙の中、本博士論文の審査委員をお引き受けくださった電気通信大学 田中基康教授、芝浦工業大学 内村裕教授に深く感謝いたします。

本博士論文は、鹿島建設株式会社技術研究所で実施した研究の成果、および JST イノベーションハブ構築支援事業に基づく JAXA 宇宙探査イノベーションハブとの共同研究における成果の一部をまとめたものです。社会人博士として研究の機会を与えて頂き、多くのご助言を頂きました鹿島建設株式会社技術研究所 三浦悟博士、浜本研一博士に心より感謝いたします。特に、浜本研一博士には、本研究を始めるきっかけを与えて頂き、筆者の企業研究者として礎となる重要な教えを幾度となく賜りました。また、鹿島建設株式会社技術研究所 先端・メカトロニクスグループ、鹿島建設株式会社 機械部自動化施工推進室の皆様には、本研究の遂行に際し、技術面のみならず精神面からも多大なるサポートを頂きました。心より感謝いたします。

小木曾研究室の皆様には、研究の遂行にあたり、様々な刺激やご助言を頂きましたこと、心より感謝申し上げます。

最後に、社会人博士として進学するにあたって私生活の面で支えてくれた、両親、妻、わが子に感謝の意を捧げます。

関連論文の印刷公表の方法及び時期

論文（査読付き）

1. T. Ishikawa, M. Masuda, S. Uda, K. Yokoyama, K. Hamamoto, and K. Kogiso, "Constrained remote control of construction machine with time-varying delay and packet loss," *Advanced Robotics*, vol 37, Issue 1-2, pp. 46-60, 2023(2章, 3章に関連).
2. T. Ishikawa, K. Hamamoto, and K. Kogiso, "Trajectory tracking switching control system for autonomous crawler dump under varying ground condition," *Automation in Construction*, vol 148, p. 104740, 2023(2章, 4章に関連).

研究業績

論文（査読付き）

1. T. Ishikawa, Y. Nishiyama, and K. Kogiso, "Characteristic extraction for model parameters of McKibben Pneumatic Artificial Muscles," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 11, no. 4, pp. 357-364, 2018.
2. T. Ishikawa, M. Masuda, S. Uda, K. Yokoyama, K. Hamamoto, and K. Kogiso, "Constrained remote control of construction machine with time-varying delay and packet loss," *Advanced Robotics*, vol 37, Issue 1-2, pp. 46-60, 2023.
3. T. Ishikawa, K. Hamamoto, and K. Kogiso, "Trajectory tracking switching control system for autonomous crawler dump under varying ground condition," *Automation in Construction*, vol 148, p. 104740, 2023.

国際会議（査読付き）

1. T. Ishikawa, Y. Nishiyama, and K. Kogiso, "Parameter extraction for identifying product type of McKibben Pneumatic Artificial Muscles," in *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp. 1935-1940, 2017.
2. A. Okabe, T. Ishikawa, K. Kogiso, and Y. Nishiyama, "Efficient PSO-based algorithm for parameter estimation of McKibben PAM model," in *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp. 1414-1419, 2017.
3. T. Ishikawa, K. Kogiso, and K. Hamamoto, "Fault analysis of aging McKibben Pneumatic Artificial Muscle in terms of its model parameters," in *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp. 398-403, 2018.
4. M. Masuda, K. Yokoyama, S. Uda, T. Ishikawa, K. Hamamoto, and K. Kogiso, "Implementing index-feedback remote control in crawler carrier dump," in *SICE Annual Conference*, pp. 1734-1736, 2019.
5. T. Ishikawa, K. Hamamoto, S. Nakamura, S. Miura, "Application of automatic

- control for crawler dump,” in *SICE Annual Conference*, pp. 1745-1748, 2019.
6. T. Ishikawa, K. Hamamoto, and K. Kogiso, ”Numerical investigation of cyber-attacks on autonomous construction machine,” in *IFAC World Congress*, pp. 5035-5038, 2023.

国内会議（査読無し）

1. 石川，岡部，西山，小木曾，”McKibben 型空気圧ゴム人工筋の製品種別に関する識別器の構成”，第 3 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム，1B1-1，2016.
2. 岡部，石川，小木曾，”探索初期点の範囲指定による空気圧ゴム人工筋モデルパラメータの推定効率化”，第 3 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム，1B1-2，2016.
3. 石川，西山，小木曾，”McKibben 型空気圧ゴム人工筋モデルの特徴的なパラメータの抽出”，第 59 回 自動制御連合講演会，FrA4-1，2016.
4. 岡部，石川，小木曾，”人工筋モデルのパラメータ推定精度に関する考察”，第 59 回 自動制御連合講演会，ThC4-5，2016.
5. 石川，小木曾，浜本，”パラメータの変動と劣化の関係性に関する考察”，第 60 回 自動制御連合講演会，SuD1-5，2017.
6. 石川，浜本，小木曾，”走路の状態変化を考慮した建設機械の軌道追従制御”，第 9 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，3G2-5，2022.
7. 石川，浜本，小木曾，”自動化建設機械の走路状態推定に関する実験的考察”，第 10 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，2M8-3，2023.