

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14801

研究課題名（和文）無人化施工のための建設機械の機能の自律化

研究課題名（英文）Autonomization of Construction Machinery Functions for Unmanned Construction

研究代表者

筑紫 彰太（Chikushi, Shota）

近畿大学・工学部・講師

研究者番号：60756047

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：地震や台風などの自然災害が発生した際、被害のさらなる拡大を防ぐために、調査や復旧作業を迅速に行い、被害を最小限に抑えることは極めて重要である。しかしながら、二次災害の危険性から人の立ち入りが困難な現場も存在する。本研究の目的は災害時の緊急対応から中長期的な復旧作業における無人化施工システムの構築である。目的の無人化施工システムの構築に向けて、災害対応時の【計測】、【移動】、【作業】において、無人建機のオペレータが介入可能な範囲で“機能の自律化”を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次災害の危険性がある災害現場において、オペレータの判断のみで無人建機やロボットの遠隔操作を行うことは困難であり、オペレータを支援するための“機能の自律化”が必要とされている。“機能の自律化”とは、オペレータを支援することを目的にメインの意思、行動決定は遠隔操作で人が行い、その行動決定に従って部分的に無人建機やロボットを自律化させることである。これまでの無人化施工や東日本大震災の災害対応や原子力発電所の事故対応で必要とされたのは、遠隔操作可能な機器であり、本申請が対象とする機能の自律化を行った遠隔操作型の無人建機やロボットは社会的意義、学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In the event of natural disasters such as earthquakes or typhoons, it is extremely crucial to swiftly conduct investigations and recovery operations to prevent further expansion of the damages and minimize the impact. However, there are situations where human access is challenging due to the risk of secondary disasters. This research aims to establish an unmanned construction system for emergency response during disasters and medium to long-term recovery operations. To achieve the goal of constructing an unmanned construction system, "autonomization of functions" will be implemented within the scope where operators of unmanned construction machinery can intervene during disaster response, including measurement, movement, and operations.

研究分野：ロボット工学

キーワード：無人化施工 建設ロボット 遠隔操作 機能の自律化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震や台風などの自然災害が発生した際、被害のさらなる拡大を防ぐために、調査や復旧作業を迅速に行い、被害を最小限に抑えることは極めて重要である。しかしながら、このような災害現場では、土砂崩れ等の2次災害の危険性から人の立ち入りが困難な現場も存在する。そのような現場では遠隔操作型の無人建機やロボットを用いた無人化施工が有効である。このような災害対応における無人化施工では、1つ目に災害の状況を把握するための【計測】、2つ目に不整地を走行して目的地に行くための【移動】、3つ目に目的地での【作業】が必要になる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は災害時の緊急対応から中長期的な復旧作業における無人化施工システムの構築である。目的の無人化施工システムの構築に向けて、災害対応における【計測】、【移動】、【作業】において、オペレータが介入可能な範囲で機能の自律化を行う。これまでの無人化施工は、雲仙普賢岳での災害復旧に関する研究開発や有珠山噴火時の災害復旧工事などの事例がある。しかしながら、これらは中長期的な復旧作業であり、最も危険な災害発生直後には焦点が当てられていない。それらに対して本研究は、災害時の緊急対応から中長期的な復旧作業に焦点を当て、無人建機オペレータの支援のための機能の自律化を行い、無人化施工における一連のシステムを構築するものである。これらの背景、目的から本申請課題では、【計測】、【移動】、【作業】に関する研究を行った。

### 3. 研究の方法

#### 【計測】に関する研究の方法

##### 災害対応ロボットの消費電力推定

災害対応ロボットがミッションを効率的に遂行するためには、長時間・長距離の連続稼働は欠かせない。また、どこでどのくらい電力を消費するかを事前に把握する消費電力推定が必要になる。そこで、本研究では、ニューラルネットワークによる消費電力推定手法を構築した。本手法は、初めに、実環境を災害対応ロボットで走行することで学習用データを収集する。一般的なロボットの場合、移動ロボットに指令速度、指令角速度を入力し、モータを駆動して、ロボットを走行させる。このとき、モータへの印可電圧は、モータドライバによって定電圧が印可されており、走行時は、機械部品、走行する路面の種類、状態、傾斜、移動ロボットへの指令速度、指令角速度によって、モータの電流値が変動する。そこで、ロボットへの制御入力である指令速度、指令角速度及び、モータへの印可電圧、消費電流を学習用データとして収集する。次に、収集した学習用データで消費電力を推定するためのモデルをニューラルネットワークで学習する。ニューラルネットワークへの入力は、指令速度、指令角速度として、出力は、モータの消費電流とする。このモータの消費電流に印可電圧を乗することで消費電力を推定する。次に、シミュレーション環境において、消費電力を推定したい地形を災害対応ロボットで走行し、その際に得られる移動ロボットの指令速度、指令角速度を学習済モデルに入力することで災害対応ロボットがこれから走行する地形における駆動系の消費電力を推定する。最後に、シミュレーション環境を走行したときと同じ制御入力を災害ロボットに与え、実環境を走行することで学習用データと同じデータ構造のテスト用データを取得する。

#### 【移動】に関する研究の方法

##### UGVの移動時の転倒回避

災害対応において、不整地に入ったUGVは転倒や故障で停滞することなく帰還する必要がある。不整地走行において、UGVが転倒を回避するためには、能動的に重心を移動させることが重要となる。そこで、本研究では、不整地走行時のUGVの姿勢変化による転倒回避手法を提案した。転倒回避手法は、力学シミュレーションを用いて、UGVが不整地を走行した場合の走行安定性を定量的に評価する。この走行安定性の評価に基づき、勾配ベクトルを用い、現在の重心からどの方向へ重心を動かせば走行安定性が向上するかを算出する。そして、算出された重心の移動方向から重心の目標位置を決定し、それに基づいてUGVに搭載したマニピュレータを動作させ、不整地における走行安定性の向上、UGVの転倒を回避する。

#### 【作業】に関する研究の方法

##### 災害現場でのロボット運用を検証可能なシミュレーション環境の構築

災害現場は、土砂の移動や地形変化が生じる環境であり、実機のみで手法の有効性を検証することは不可能である。また、災害現場で取り扱う土砂は、土に含まれるパラメータが変化することで、土砂特性が異なり、建設ロボットでの掘削方法や複数異種の建設ロボットでの掘削、積載、運搬の方法論が異なる。これらの背景から、本研究では、災害現場でのロボット運用を検証可能なシミュレーション環境を構築した。また、災害現場での複数異種の建設ロボットの運用に向けて、効率的な研究開発が可能な設計概念として、システムアーキテクチャを構築した。また、提案するシステムアーキテクチャを用いて、シミュレーション環境で複数異種の建設ロボットに

よる協働作業を行い、リアルタイム性の検証、ならびに、提案するシステムアーキテクチャの適用可能性の評価した。

#### 4. 研究成果

##### 【計測】に関する研究成果

###### 災害対応ロボットの消費電力推定

提案手法の有効性を確認するため、実機実験を行った。本実験では、学習用データとテスト用データの地形と路面は、同じ状態として、ロボットが走行し、学習・テスト用データを収集した。このとき、ロボットへの指令速度、指令角速度、駆動系の消費電流を学習・テスト用データとして収集した。駆動系の印可電圧は、モータの定格電圧とした。テスト用データは、学習用データと異なるタイミングで収集したデータとし、学習用データを用いてニューラルネットワークでの学習を行った後にテスト用データで検証した。ニューラルネットワークは、入力層1層、中間層3層、出力層1層の全結合で構成した。入力層は、ロボットの直進方向の指令速度、回転軸周りの角速度の2入力とし、各中間層のニューロン数は10個とした。出力層は、駆動系の推定消費電流を出力する構成とし、モータの定格電圧を乗することで駆動系の消費電力を推定した。

実験結果を図1に示す。図1(a)は、学習用データで、青線が指令速度、緑線が指令角速度を表す。図1(b)の灰線は、移動ロボットに、図1(a)の指令速度、指令角速度を与えて走行したときの、駆動系の消費電力を表す。これらのデータを使用してニューラルネットワークでの学習を行った。図1(c)ならびに図1(d)の灰線は、図1と同様で、実消費電力量は、6.74 kWsとなった。図1(d)の赤線は、学習済モデルに、図1(c)の指令速度、指令角速度を入力したときの駆動系の消費電力の推定結果を表し、推定消費電力量は、6.51 kWsとなった。実験結果から確認できるように、移動ロボットの走行に対して、駆動系の消費電力を推定できることを確認した。また、実消費電力量6.74 kWsに対して、推定消費電力量6.51 kWsとなり、誤差3.3%の精度で消費電力量を推定できることを確認した。

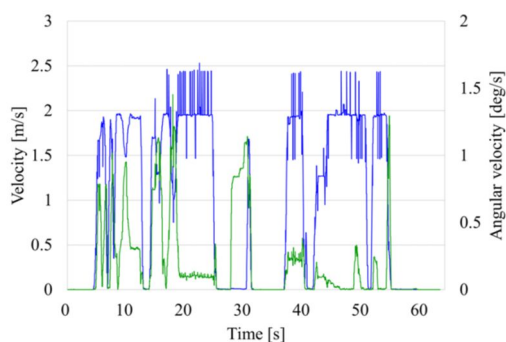


図1(a)

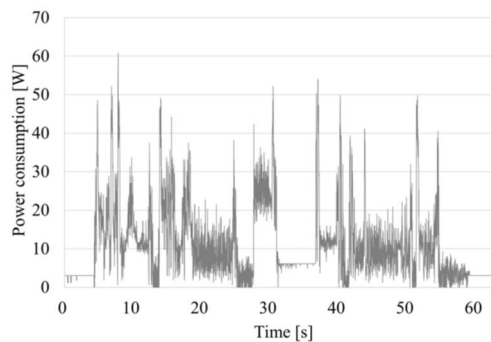


図1(b)

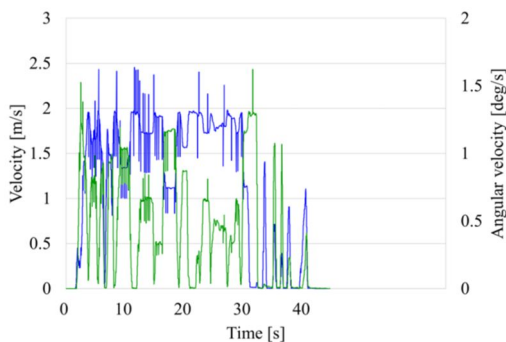


図1(c)

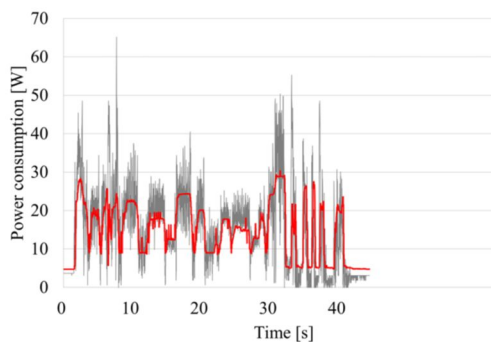


図1(d)

##### 【移動】に関する研究成果

###### UGVの移動時の転倒回避

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション環境において検証した。シミュレーションは、図2(a)に示すような実際の無人化施工現場を想定し、図2(b)に示す地形で検証した。本検証では、図2(b)のの区間をUGVが移動した際の転倒回避について検証した。UGVは、姿勢を変化させない手法と地形によって姿勢を変化させる提案手法で走行した。姿勢を変化させない手法は、(i)UGVの重心が中央に位置する重心中央姿勢、(ii)重心が前方に位置する重心前方姿勢、(iii)重心が後方に位置する重心後方姿勢の3パターンで検証した。シミュレーションで検証した結果、(a)重心中央姿勢、(b)重心前方姿勢、(c)重心後方姿勢は、転倒した。一方で、(d)提案手法は、転倒を回避した。このときのUGVの転倒安定余裕をそれぞれ図2(c)~(f)に示す。実験結果から、提案手法を適用した場合も、不連続に傾斜角が変化する区間において、安定性の指



標の値が小さくなっており転倒の危険性が高まっているが、姿勢を変化させることで、走行安定性を向上させ、転倒を回避している。以上のように、一定の機体姿勢で走行した場合、転倒が生じる地形において、提案手法を適用して走行した場合、転倒回避可能なことを確認した。したがって、提案手法を適用し姿勢を変化させることで、UGVの転倒を回避することが可能であることを確認した。



図 2(a)

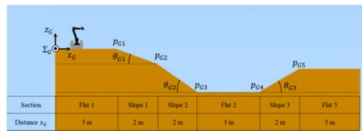


図 2(b)

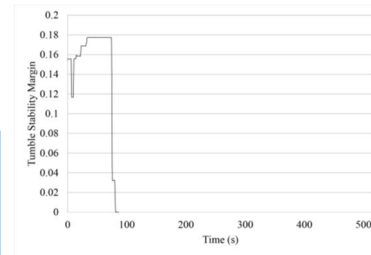


図 2(c)

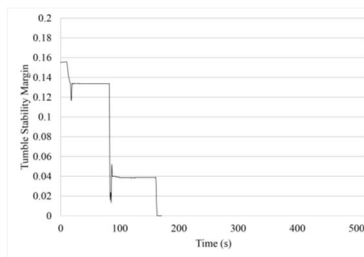


図 2(d)

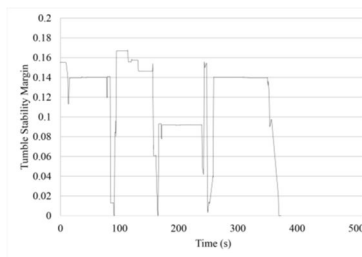


図 2(e)

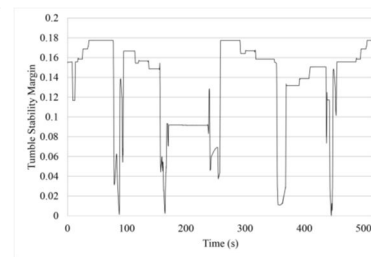


図 2(f)

### 【作業】に関する研究成果

災害現場でのロボット運用を検証可能なシミュレーション環境の構築

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション環境において検証した。シミュレーション実験は、対象とする協働作業を掘削、積載エリアでの土砂の掘削、積載、放土エリアへの土砂の運搬、放土エリアでの放土のタスクとした。シミュレーション実験の環境を図 3(a)に示す。土砂の掘削、積載、運搬、放土のタスクにおいて、土砂を掘削、積載するショベルを1台、土砂を運搬、放土するダンプトラックを4台の計5台を1チームとして、合計4チーム、20台で検証した。

実験結果を図 3(b), (c)に示す。図 3(b)のグラフは、シミュレーション開始から各チーム4台目のダンプトラックに土砂を積載完了するまでの大域的な区間の物理演算に関する処理の1フレームあたりの処理時間を表す。図 3(c)のグラフは、大域的な区間の映像描画に関する処理の1フレームあたりの処理時間を表す。全てのグラフの横軸は時間、縦軸は1フレームあたりの処理時間を表す。これらの実験結果から、図 3(b)の大域的な区間の物理演算に関する処理の1フレームあたりの平均処理時間は、0.0166秒、となった。また、図 3(c)の大域的な区間の映像描画に関する処理の1フレームあたりの平均処理時間は、0.0164秒、となった。これら実験結果から、リアルタイムよりも遅い処理が瞬間的に生じるものの、シミュレーション開始から各チーム4台目のダンプトラックに土砂を積載完了するまでの大域的な区間、土砂掘削、旋回、積載の極所的な区間のどちらの場合でも平均処理時間は、リアルタイム性を満たしていることを確認した。したがって、20台のシミュレーション建設ロボットで、4箇所の土砂掘削、積載、土砂放土が行われる土工環境においては、提案するシステムアーキテクチャが適用可能であることを確認した。

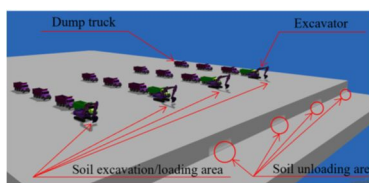


図 3(a)

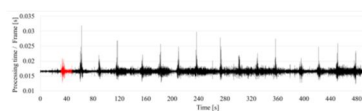


図 3(b)

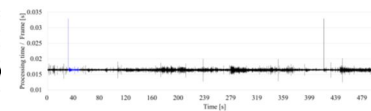


図 3(c)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shota Chikushi, Kenji Kimura, Jonghyun Ahn and Kazuo Ishii
2. 発表標題 Development of a Sphere Motion Measurement System and Evaluation of the Roller Arrangement Requirement
3. 学会等名 The 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筑紫彰太, 木村憲二, 安鍾賢, 石井和男
2. 発表標題 球体運動計測システムを用いた球体搬送制御のためのローラ・球体の順運動学の評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筑紫彰太, 木村憲二, 安鍾賢, 石井和男
2. 発表標題 ローラ・球体の運動学特性に基づいた球体搬送機構の設計
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筑紫彰太, 末岡裕一郎, 谷島諒丞, 小松廉, 池本有助, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一
2. 発表標題 土工環境における複数異種の建設ロボット運用のためのシステムアーキテクチャの提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筑紫 彰太, 濱崎 峻資, 永谷 圭司, 浅間 一, 李 敏赫, 鈴木 雄二
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる移動ロボットの駆動系の消費電力推定
3. 学会等名 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 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日浦 愛子, 筑紫 彰太, ルイ笠原 純ユネス, 永谷 圭司, 千葉 拓史, 茶山 和博, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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 (SI2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関