

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13810

研究課題名（和文）緊急災害対応における無人化施工のためのオペレータ支援システム

研究課題名（英文）Operation Assist System for Unmanned Construction at Disaster Response Site

研究代表者

藤井 浩光（FUJII, Hiromitsu）

千葉工業大学・先進工学部・准教授

研究者番号：30781215

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）：本研究は、遠隔操作型の無人建機を災害対応の現場へ迅速に投入する上での課題に取り組んでおり、特に無人建機の遠隔操作者（オペレータ）の作業支援システムの構築を目的としている。本研究では、課題を（1）測量：現場における環境情報の取得と提示、（2）計画：地形変化に基づく計画の立案、（3）稼働：災害現場における建機の安全な移動のための相互の状態認識および作業の効率的な実施の3つのサブタスクに分割した。それぞれのサブタスクにおいて独立して稼働するシステムを構築し、実際の建機を用いた検証実験を行うことで有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、災害発生直後の迅速な対応を目的とした、応急作業を行うオペレータの支援を目的としている。近年、2011年の東日本大震災や2016年の熊本地震などをはじめとし、相次ぐ自然災害に対する復旧作業や、それらに伴う2次災害の対応措置などにおいても、人の立ち入ることのできない危険な現場での瓦礫の除去などには、無人建機の活用の必要性は高く、本研究の社会的意義は大きい。また、本研究では課題を複数のサブタスクに分割することで多角的に解決しようと試みており、個々の技術はモジュールとして独立して利用可能である。そのため、本課題の成果の適用範囲は広く他分野へも応用可能であり、学術的にも有用である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the problems when unmanned teleoperating construction machineries are fielded into disaster response sites are tackled. In particular, an operation support system for operators of the unmanned construction machineries is proposed. In our approach, the mission is divided into three subtasks below, and each subtask is solved severally. 1) Pre-measurement: obtainment of environmental properties at sites and its visualization, 2) Planning: Preparation of an operational plan based on the measurement results and 3) Execution: obtainment of other machineries' status for the construction machineries to safely move at the disaster sites and to efficiently work. We constructed subsystems for each subtask, which work independently, and evaluated performance of the systems in experiments using actual construction machineries.

研究分野：ロボットビジョン、建設ロボットの知能化

キーワード：建設ロボット 建機の知能化 画像処理 点群処理 センサフュージョン

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、遠隔操作ロボットの導入を推進する産業分野として、無人建機を用いた施工が注目されている。特に災害対応の現場では、迅速かつ安全に復旧作業を行うために無人建機の遠隔操作による作業が求められる。例えば、2011年の東日本大震災など、相次ぐ自然災害に対する復旧作業や、それに伴う福島原子力発電所の廃炉措置などにおいても、人の立ち入ることのできない危険な現場での瓦礫の除去などには、無人建機の活用が必要であった。特に無人建機による遠隔操作で期待されるのは災害発生直後の対応であり、災害発生直後には、例えば建機による土嚢の設置や土砂に埋没した家屋の掘出などの作業が必要となる。これらの作業においては、2次災害を避け被害の拡大を防ぐだけではなく、初動の迅速さが極めて重要となる。

そのような状況下において、無人建機の遠隔操作者（オペレータ）には各フェーズにおける適切な意思決定が求められる。しかし、災害現場の地形は過去の地形図と大きく変わり、また倒木や瓦礫が散乱し、ぬかるみなどの軟弱土壌も存在する。そのような過酷な環境の中で、遠隔操作のオペレータが適切な判断を行うことは極めて困難である。初動の迅速さが極めて重要な災害対応の現場において、これら一連の対応を短時間で行うことが可能な、無人建機のオペレーションを支援するシステムが必要とされている。

災害対応の現場は、例えば土砂崩れや陥没、地割れなどによって大きく地形が変化している可能性があるため、過去に得られた現場の地図とは異なる未知の環境である。そのため、建機のオペレータは、現場における環境の属性情報を獲得・評価し、環境中の土砂や倒木など除去すべき対象の形状や体積を獲得するとともに建機の投入・搬出計画を立て、その計画を複数の建機で協調して実施する必要がある。すなわち、(1) 測量：現場における環境情報の取得と提示、(2) 計画：地形変化に基づく計画の立案、(3) 稼働：災害現場における建機の安全な移動のための相互の状態認識および作業の効率的な実施が重要となる。

2. 研究の目的

無人化施工に関する研究は、1991年の雲仙普賢岳の噴火後の対応における砂防ダムの建設などに関連して盛んに行われてきており、既に実際の現場へも投入されている技術も多数存在する。しかし、それらは被災後の復旧や、地滑りや土砂崩れなどによる被害の拡大の防止を主としたものであり、本研究が必要性を主張する災害発生直後の迅速な対応を目的とした、応急作業を行うオペレータの支援システムとは異なる。本研究では、上記(1)～(3)のフェーズにおいて現場におけるオペレータの意思決定を支援するための、情報提示を行うシステムの構築を目的とする。

3. 研究の方法

本課題では、上記(1)～(3)について、それぞれ以下のアプローチで検討を行った。

(1) 測量：現場における環境情報の取得と提示

災害対応現場においては環境の地図など3次元情報を事前に取得することが必要である。さらに環境中に存在する熱源や水溜りを避けるために、それらの存在や位置を把握する必要がある。本課題では、それらの物理量を環境属性情報として3次元的可視化する。

特に具体的な例として、水系物質の吸光波長帯を観測可能な近赤外線カメラと、温度を測定可能な赤外線カメラ、偏光情報を取得可能な偏光カメラを用いる。例えば、近赤外線カメラでは水系物質を検出可能であり、偏光カメラでは水面の反射の影響を軽減することができるため、移動ロボットの運用において深刻な問題となる溜水の回避などに利用可能である。これらの異なる複数のセンサを、3次元距離情報を取得可能なRGB-DカメラやLight Detection and Ranging (LiDAR)などの測距センサと組み合わせたマルチモーダルセンシングシステムを構築する。

まず、異なる複数のセンサ情報を重畳するためには、センサ間の座標系の統一が必要不可欠である。そこで、①異なる複数のセンサ間のキャリブレーション手法を構築する。特に、上記のような特殊用途のセンサは一般的な可視光カメラと比較して、視野角や解像度が著しく低いという問題がある。本課題では、視野角の小さなカメラセンサに対しては精密に動作可能な電動雲台などを用いて角度制御を行うことで視野を拡大する。また広い視野を持つカメラセンサに対しては、3次元点群の位置情報を用いてPnP (Perspective n-Point)問題を解くことにより提示映像上の位置ずれを低減させる(図1)。その上で、②それぞれ視野角や解像度が異なるセンサを

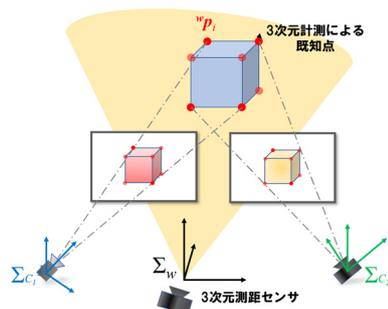


図1：センサフュージョンの原理

統合することで環境中の属性情報を 3 次元的に提示可能なシステムを構築し、実験でその性能を検証する。

(2) 計画：地形変化に基づく計画の立案

建機を現場に投入する際には、まず環境の変化の規模を知る必要がある。例えば、環境中の土砂や倒木など除去すべき対象の形状を獲得し、その上で投入すべき建機の台数などを事前に見積もる必要がある。本課題では、現場の 3 次元スキャン情報から地表の土砂体積を高速かつ高精度で計測する手法を構築する。さらに、得られた密な 3 次元点群から土砂の体積を求め、搬出に必要なトラックの台数見積もりが可能な手法を構築する。

昨今の現場は、レーザを放射状に照射することで広範囲の 3 次元計測を行う LiDAR が広く用いられている。しかし、この原理の LiDAR は、遠距離の対象物を計測した際に得られる点群情報が疎となる問題や、本課題が想定するような広大な現場を計測するには射程距離や視野角が不足するという問題がある。本課題では、①LiDAR の姿勢を制御することで密な点群を獲得可能な計測システムの構築を行う (図 2)。特に、緊急時に迅速にシステムを立ち上げるためには汎用性が重要となるため、市販の LiDAR とパンチルト雲台を組み合わせて構築可能なシステムを目指し、それらの座標系の統合に必須となるキャリブレーションの手法も構築する。次に、②異なる複数の位置における計測結果を統合することで広範囲の計測を行うことが可能な計測の方法論を構築する。Visual Odometry による移動量の推定と確率的な点群位置合わせ手法を組み合わせることで、オンサイトで実施可能な高速かつ高精度な点群の統合を実現する。最後に、③得られた広範囲の密な点群を用いて土砂の体積を推定する手法を構築し、搬出に必要なトラックの台数の見積もりを実現する。3 次元点群をボクセル化し柱状に分割することで、高速に土砂体積を推定できる手法を独自に構築する。搬出に必要なトラック台数の見積もりには、土木建築現場において熟練作業者が用いる測量法を自動化することで算出する。以上の推定の速度と精度は一般にトレードオフの関係にあるが、本課題ではこれらを決定するパラメータ群を陽に調整可能とし、国土交通省の示す要項に基づき具体的な値を決定するアプローチをとる。

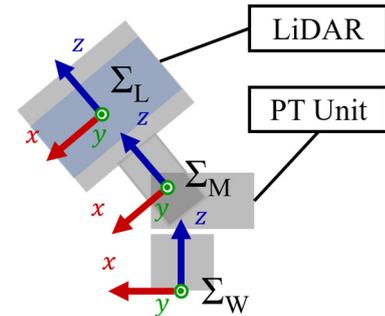


図 2：角度制御可能な LiDAR システム

(3) 稼働：安全な移動のため相互状態の認識、および作業の効率的な実施

現場での作業を遂行するためには、投入された複数の建機同士が協調して作業を行う必要がある。例えば、代表的な作業に油圧ショベルと土砂ダンプトラックの協調による土砂積み込み作業が挙げられる。土砂積み込み作業では、ダンプトラックの位置姿勢を正確に知ることが重要であり、特に遠隔操作による作業では油圧ショベルに対する相対的な位置姿勢を獲得する必要がある。従来はトータルステーションや GNSS を用いて建機の位置姿勢を取得していたが、本課題の想定する環境ではそれらの設備は得られるとは限らない。そこで、油圧ショベルに搭載したセンサ群のみを用いてダンプトラックの位置姿勢推定が可能な手法を構築する。さらに油圧ショベルで土砂の積み込みを行う際に、ダンプトラックの荷台へ積載可能な土砂の量を判断するため、バケット内の土砂体積を掘削の度にオンラインで推定可能な手法を構築する。

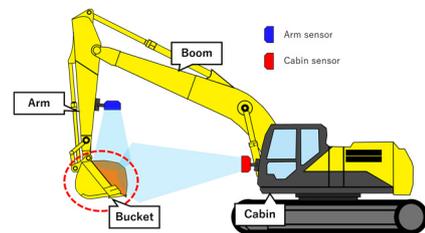


図 3：バケット内土砂量推定システム

具体的には、①画像認識と 3 次元点群の形状マッチングを組み合わせることでダンプトラックの位置姿勢を推定する手法を構築する。緊急時の現場には様々な積載量のダンプトラックが投入されることが想定されるが、一般に単眼カメラから取得された画像ベースの認識技術では、スケールの不定性が残る。そのため、似た形状で積載量の異なるダンプトラックに対しては、侵入を検知することは可能であるが、荷台までの距離を正確に知ることは困難である。この問題に対して、本課題では上記 (2) における①で構築した LiDAR システムに可視光カメラを統合することで解決する。画像認識により検出されたダンプトラック領域に相当する 3 次元点群情報を抽出し、その形状からダンプトラックの位置姿勢を実スケールで推定する。車両認識には、自動運転用途で開発された高精度な車両識別器を、独自に用意した建機用のデータセットで追加学習し再構成したものを用いる。位置姿勢推定には、ダンプトラックの荷台部に注目し、車両形状を長方形近似することで高速に形状マッチングを行う手法を用いる。また、②油圧ショベルに取り付けた複数の距離画像センサを用いることでバケット内の土砂体積を逐次推定可能なシステム (図 3) を構築する。油圧ショベルのブーム・アーム・バケットからなる作業装置の各リンクに IMU を取り付け、作業装置の姿勢を推定する。特に、各リンク長を現場で即時的に獲得するために、画像中のマーカ位置の検出と順運動学を用いて最小二乗法によるキャリブレーション手法を提案する。さらに、IMU による作業機械の姿勢情報と上記 (2) における③で提案し

た土砂体積推定手法を組み合わせることで、バケット内の掘削土砂量のオンサイト推定手法を構築する。

4. 研究成果

本課題の実施期間では、上記の課題(1)～(3)について、それぞれ以下の成果を達成した。

(1) 測量：現場における環境情報の収集

近赤外線カメラ、赤外線カメラ、偏光カメラから得られる画像情報を、測距センサから得られる3次元点群情報に重畳し提示可能なマルチモーダルセンシングシステムを構築した。まず、近赤外線カメラをRGB-Dカメラと組み合わせた計測系(図4)を構築し、福島第一原子力発電所のプラント内環境を想定した檜葉遠隔技術開発センターなどでの実験を行った。この実験では特に低解像度で視野角の小さい近赤外線カメラ(128×128 pixel)を、一般的な高解像度のRGB-Dカメラ(1280×720 pixel, FOV H: 85.2deg, V: 58deg)の映像に重畳するために、RGB-Dカメラの画角内で近赤外線カメラを掃引し統合した。結果として、RGB-Dカメラと近赤外線カメラの重畳におけるテクスチャの位置ずれは、数10mm～100mm程度であることを確認した。また、赤外線カメラおよび偏光カメラを用いたシステムも構築し、検証実験を行った。高解像度のセンサ同士の重畳において、位置ずれの小さい情報提示が可能であることを確認した(図5)。これらの成果は、第20回・第21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(SI2019, SI2020)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021(ROBOMECH2021)などで報告した。

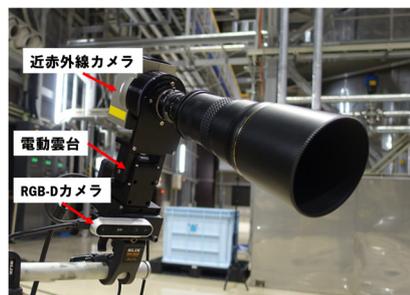


図4：センシングシステム

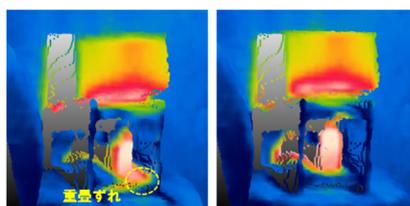


図5：重畳における位置ずれの比較
従来手法(左)、提案手法(右)

(2) 計画：地形変化に基づく計画の立案

現場の3次元スキャン情報から地表の土砂体積を高速かつ高精度で推定可能なシステム(図6)を構築した。実際の建機を用いた検証実験を行い、提案システムで取得した密な3次元点群(図7)から土砂の体積を求め、搬出に必要なトラックの台数見積もりを行った。その結果、提案手法は従来のトータルステーションによる計測結果と比較して誤差を約5.8%に抑えられていることを確認した。また2t土砂ダンプトラックを想定した検証では、誤差無く台数を見積ることができた。これらの成果は、ROBOMECH2019やSI2019などの学会で継続的に報告を行い、日本機械学会関東支部若手優秀講演賞や日本機械学会若手優秀講演フェロー賞などの賞を受けた。最終的な成果報告は、日本機械学会誌の学術論文として掲載が決定している。

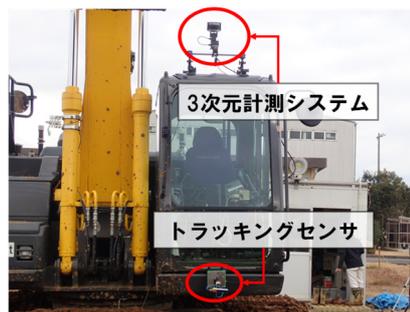


図6：建機搭載型の計測システム

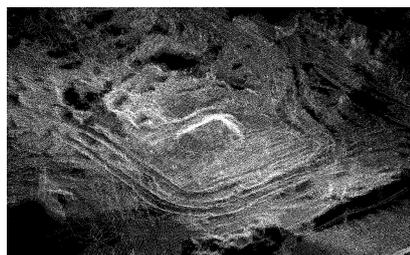


図7：計測結果の3次元点群

(3) 稼働：安全な移動のため相互状態の認識、および作業の効率的な実施

油圧ショベルに搭載したセンサ群のみを用いてダンプトラックの位置姿勢を推定可能な手法を構築した。さらに油圧ショベルによる土砂の積み込みにおいて、バケット内の土砂体積を掘削の度にオンサイトで推定可能なシステム(図8)を構築した。ダンプトラックの位置姿勢推定については、実機を用いた検証実験を行い、油圧ショベルに対して約10mの遠方から3mの近距離に近づくまでの進入における性能を評価した。その結果、土砂積み込みに必要な許容誤差の範囲で位置姿勢の推定が可能であることを確認した。また、バケット内の土砂体積推定についても提案したシステムによりオンサイトで推定が可能であることを確認した。これらの成果は、SI2019, ROBOMECH2020・2021, 第26回ロボティクスシンポジウムなどで建設ロボティクス分野の基礎技術として報告した。



図8：バケット内土砂量推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KAWAMATA Kenta, FUJII Hiromitsu, HATAKEYAMA Yuta, DOMAE Masato, MORIMOTO Takaaki, IZUMIKAWA Takeya	4. 巻 -
2. 論文標題 Wide-range sediment volume estimation by pointclouds from multiple viewpoints for soil loading task	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川又 健太, 畠山 佑太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 バックホウによる掘削作業のための移動型距離センサを用いた複数視点からの土砂量推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野 秀哉, 筑紫 彰太, 藤井 浩光, 田村 雄介, 永谷 圭司, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 遠隔操作ロボット走行時におけるアーム制御による転倒回避
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山 佑太, 川又 健太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 土砂自動積み込みのための画像認識と点群位置合わせによるダンプトラックの位置姿勢推定
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川又 健太, 畠山 佑太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 土砂積み込み作業のための複数視点から計測した点群データの位置合わせによる広範囲土砂量推定
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野 秀哉, 筑紫 彰太, 藤井 浩光, 田村 雄介, 永谷 圭司, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 遠隔操作ロボット走行時における機体の姿勢変化による転倒回避
3. 学会等名 第19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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠山 佑太, 川又 健太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 土砂積み込み作業の自動化のための点群位置合わせによるダンプトラックの位置姿勢推定
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第25期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川又 健太, 畠山 佑太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 バックホウによる掘削作業のための測距データのボクセル化を用いた土砂堆積量の推定
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第25期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山 佑太, 川又 健太, 堂前 雅仁, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 土砂自動積み込みのための統計的処理を用いた面検出によるダンプトラックの位置姿勢推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堂前 雅仁, 川又 健太, 畠山 佑太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 相対的に移動する複数の搭載型RGB-Dセンサの統合によるバックホウの掘削土砂量推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原 岬, 藤井 浩光, 河野 仁, 池 勇勲
2. 発表標題 水の近赤外線吸光特性を用いた水系領域の3次元提示
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野 祥平, 藤井 浩光
2. 発表標題 遠隔施工のためのGNSSとマーカを用いたカルマンフィルタによる複数建機の位置推定
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島山 佑太, 川又 健太, 堂前 雅仁, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 土砂自動積み込みのための車両認識と形状マッチングを用いたダンプトラックの位置姿勢推定
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堂前 雅仁, 島山 佑太, 守本 崇昭, 泉川 岳哉, 藤井 浩光
2. 発表標題 バックホウ作業装置の動的姿勢計測による多視点からのバケット内掘削土砂体積の推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長坂 拓海, 藤井 浩光, 河野 仁, 池 勇勲
2. 発表標題 環境情報の3次元提示のための距離センサを用いた異種複数センサ統合
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
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
---------	---------