

令和 6 年 4 月 29 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04291

研究課題名（和文）建機と作業員の協調作業における生産性と安全性を両立する危険予測メカニズムの解明

研究課題名（英文）Clarification of the hazard prediction mechanism for both productivity and safety in collaborative work between construction vehicles and workers

研究代表者

中川 雅史（Nakagawa, Masafumi）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：10415721

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：都市土木へのICT建機導入によって安全性と生産性を同時に高めるにあたり、(A)作業の危険度を定量化するための仕組みの構築のために、(a)マルチレイヤ空間モデルを利用した施工状況整理、(b)都市土木における従来型施工の課題と解決策の整理、(c)センサ外付けICT建機の構築、(d)作業員への新しい安全教育方法の構築を実施した。また、(B)作業員と建機の協調作業での生産性と安全性の評価のために、(e)施工空間のモデリングによる危険予測の実証、(f)技術者を対象とした定量的危険予測の利用可能性の検証、(g)模擬施工現場および実施工現場での実証と検証、(h)危険予測へのフィードバックの検証を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

施工現場への3D計測や情報通信技術（ICT）の導入においては、定量的な危険の把握が必須となるが、生産性と安全性という、一見相反する条件を同時に解決する境界線を探ることで、定量的な危険予測を技術者が受容するメカニズムを明らかにする必要がある。本研究は、都市土木へのICT建機導入によって安全性と生産性を同時に高めるにあたり、都市土木の施工空間における作業の危険度をどのように定量化できるか、作業員と建機の協調作業での生産性と安全性をどのように評価できるか、という学術的な問いにもとづき、都市土木における施工の生産性と安全性を両立するための方法論を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For the improvement of on-site construction works in urban civil engineering, we conducted (a) technical issue extraction on on-site construction process using a multi-layer spatial model, (b) technical issue extraction on conventional on-site construction process in urban civil engineering, (c) design and installation of 3D sensors mounted on an ICT construction vehicle, and, (d) design of a safety education program for on-site construction workers, for “(A) design of a methodology for safety visualization of on-site works using construction vehicles.” We also conducted (e) quantitative hazard prediction by construction space modeling, (f) usability of the quantitative hazard prediction, (g) demonstration and verification of proposed methodology in on-site experiments, and, (h) verification of feedback to the hazard prediction, for “(B) evaluation of productivity and safety in collaborative works between workers and construction vehicles.”

研究分野：土木工学

キーワード：ICT建機 LIDAR モデリング 地理情報システム 動体抽出 動体追跡 危険度予測

1. 研究開始当初の背景

国内では、建設生産システム全体の効率化を図るため、3D計測や情報通信技術(ICT)を施工現場へ導入する取り組みが進められている。近年では、測量用レーザースキャナやドローンの活用による施工現場の情報化や、ICT建機(施工支援機能や通信機能等を持つ建設機械)による無人化施工の事例が多い。一方で、現在研究開発が進められているICT建機は、都市土木への適用が容易ではない。その理由は、ICT建機が、良好な衛星測位環境と無人環境を想定しているためである。都市土木は、劣悪な衛星測位環境と有人環境下での土木施工であり、都市部における道路上の狭い作業帯内での建機と作業員の近接作業を主とする。都市土木の施工空間は多様な地物と建機が近接する(図1)。無人環境と比較して施工空間内で動的に変化する地物が多く、建機の操縦には職人的技術が要求される。さらに、熟練技術者の不足によって発生する建機災害は、重篤な人身災害だけでなく、工事中断や損害賠償も含めて、生産性を著しく低下させる要因となる。施工現場の安全性と生産性を同時に高めるにあたっては、危険予知活動がすでに取り組みされているが、極めて定性的である。都市土木の施工現場へのICT建機の導入においては、センシング技術により定量的に危険を把握する必要がある。これらを踏まえ、都市土木の施工空間における作業の危険度をどのように定量化できるか、作業者と建機の協調作業での生産性と安全性をどのように評価できるか、という項目が本研究の問いである。



図1. 都市土木施工現場

2. 研究の目的

施工現場への3D計測や情報通信技術(ICT)の導入においては、定量的な危険の把握が必須となるが、生産性と安全性という、一見相反する条件を同時に解決する境界線を探ることで、定量的な危険予測を技術者が受容するメカニズムを明らかにする必要がある。本研究は、都市土木へのICT建機導入によって安全性と生産性を同時に高めるにあたり、①都市土木の施工空間における作業の危険度をどのように定量化できるか、②作業者と建機の協調作業での生産性と安全性をどのように評価できるか、という学術的な問いにもとづき、都市土木における施工の生産性と安全性を両立するための方法論を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、(1)作業の危険度を定量化するための仕組みの構築、(2)作業者と建機の協調作業での生産性と安全性の評価を通じ、提案手法が建機施工のみならず、建機との協調空間での人の行動理解がより深化できるか調査研究した。本研究で開発した手法、および、本研究課題の研究方法を図2に示す。

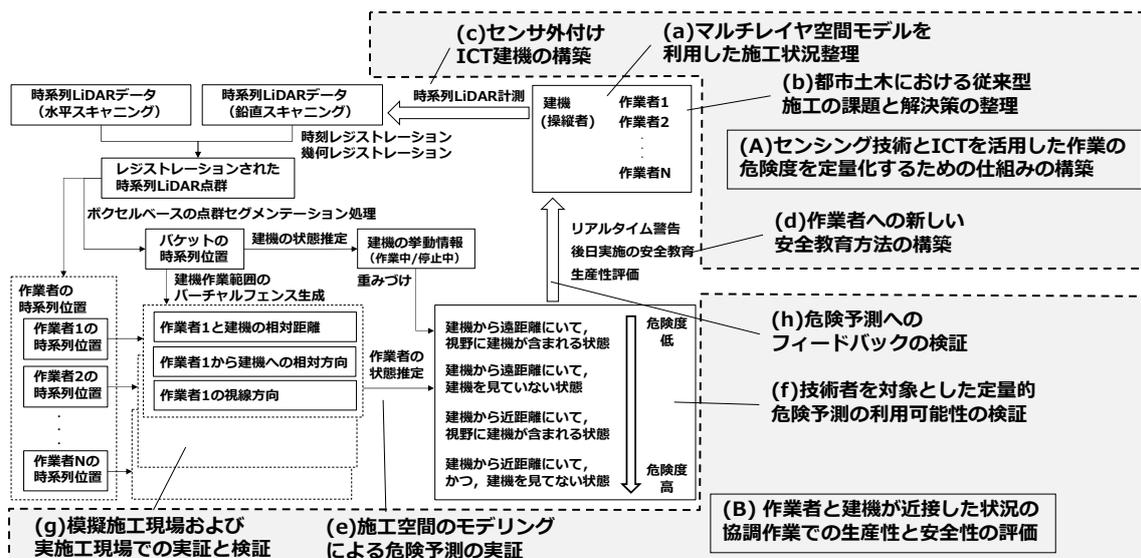


図2. 本課題の研究手法

本研究では、(1)作業の危険度を定量化するための仕組みの構築 に関する取り組みとして、(a) マルチレイヤ空間モデルを利用した施工状況整理、および、(b)都市土木における従来型施工の

課題と解決策の整理, (c)センサ外付け ICT 建機の構築, (d)作業員への新しい安全教育方法の構築 を実施した. また, (2)作業員と建機の協調作業での生産性と安全性の評価 に関する取り組みとして, (e)施工空間のモデリングによる危険予測の実証, (f)技術者を対象とした定量的危険予測の利用可能性の検証, (g)模擬施工現場および実施工現場での実証と検証, (h) 危険予測へのフィードバックの検証 を実施した.

(1)作業の危険度を定量化するための仕組みの構築

点群処理の概要を図3に示す. 入力データは建機に搭載したLiDARで取得した時系列点群とし, 作業の危険度を定量化するためのパラメータを時系列点群から抽出する. 本研究で諸技術を融合し, 独自性・創造性を高くした要素としては, 危険の予測 (安全と危険の分類) に利用する機械学習のほかに, ジオフェンシングと施工空間モデリングが挙げられる. ジオフェンシングとは, 空間上に設定した仮想領域 (バーチャルフェンス) に人やモノの出入りを判定し, この判定情報をきっかけに, 情報や機械を能動的に制御する技術である. 本研究では, 時系列点群からの複数作業員の抽出処理に加えて, 移動体からの動的な仮想領域設定と作業員の追跡にもとづくジオフェンシングを実現し, 作業の危険度を定量的かつ動的に判定する仕組みの一部とした.

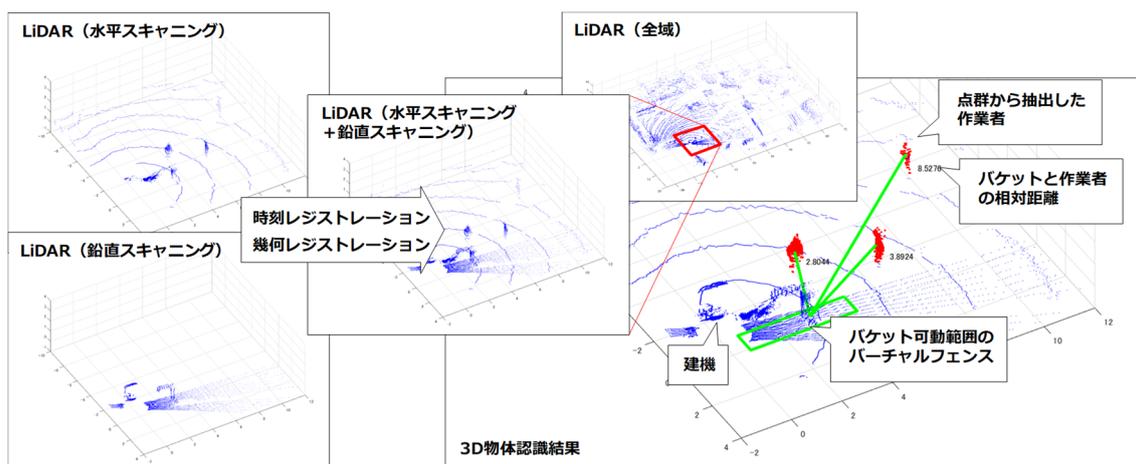


図3. 点群処理の概要

(2)作業員と建機の協調作業での生産性と安全性の評価

独自性・創造性を高くした要素のひとつである施工空間モデリングでは, まず施工空間を4つのモデル (地物モデル, 領域モデル, 動的モデル, 危険予測モデル) で再現した. 地物モデリングでは, 地物の位置情報を主とした幾何モデルを扱った. 領域モデリングでは, 施工空間を Outdoor, Semi-outdoor, Semi-under ground, Under ground に分類し, セル空間モデルとして扱った. 動的モデリングでは, 地物の動きを扱った. これらのモデル間を連携し, 危険予測モデリングにおいて, 作業員と建機の相対距離, 作業員の相対移動方向, および, 作業員から建機 (バケット) への視線方向 (視線ベクトル) を入力するパラメータとして, 建機動作や作業員動作, 施工による環境変化における危険度予測を扱った (図4).

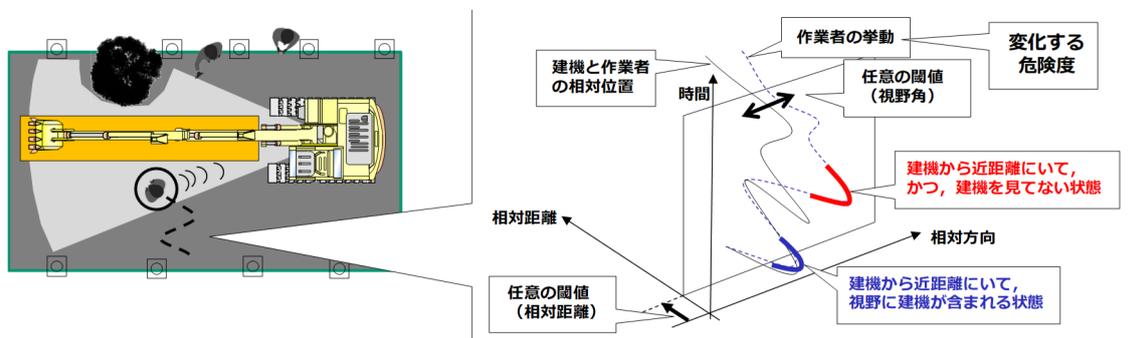


図4. 危険予測モデリング

4. 研究成果

(1)研究の主な成果

①作業の危険度を定量化するための仕組みの構築

建機に搭載した計測システムを図5に示す. 計測システムは主として, 施工空間を広域で計測するために水平スキャニングをする LiDAR (VLP-32C, Velodyne) と, 建機掘削空間を計測するために鉛直スキャニングする LiDAR (VLP-16, Velodyne) を組み合わせた. LiDAR には, 対象を面的計測するために, 複数チャンネルでスキャニングする多層 LiDAR を採用した. またサブセンサ群として, 掘削エリアの補測のためのフロントカメラや LiDAR (Horizon, Livox) を搭載した.

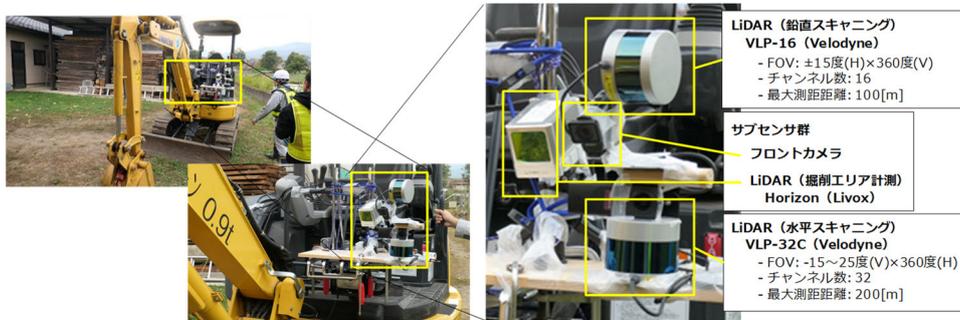


図 5. 建機搭載した計測システム

建機に搭載した計測システムで取得した模擬作業員 3 名 (ID1, ID2, および, ID3) の時系列点群から得られた推定結果の一部 (60 秒分) を図 6 に示す. 図中の 1) は, 模擬作業員 3 名の時系列位置情報 (2D) を可視化した結果である. 図中の 2) は, 縦軸を建機 (バケット) と各作業員の相対距離, 横軸を時間として, 1) で得た結果を可視化した結果である. 図中の 3) は, 作業員 ID1 の移動方向, および, 作業員 ID1 から建機 (バケット) への視線方向を可視化した結果である.

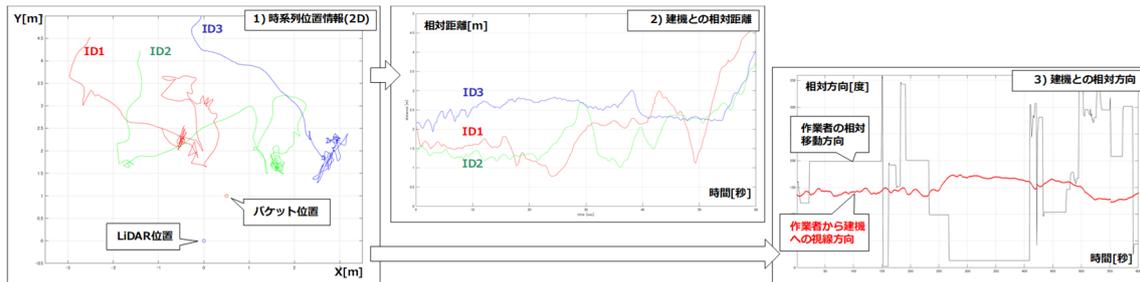


図 6. 時系列点群から得られた推定結果の一部 (60 秒分)

② 作業員と建機の協調作業での生産性と安全性の評価

実務での安全管理方針にもとづいて, 作業員と建機との相対距離が十分にあることと, 作業員が建機を見ていることを主評価項目とした. 作業員と建機の協調作業においては, 作業員と建機との相対距離が十分にあれば, 安全性を十分に確保できるが, 生産性 (作業性) が落ちる. また, 狭隘な施工空間での作業においては, 作業員が建機と近接していたとしても, 作業員と建機操縦者が相互に認識できていれば十分な安全性を確保できるため, 作業員が建機を見ていることを評価に加味する. さらに, 建機の動作の有無も評価に加味する. 作業員と建機の協調作業での生産性と安全性の評価の対象となる作業員の挙動と建機の挙動の組み合わせ例を図 7 に示す.



図 7. 作業員の挙動と建機の挙動の組み合わせ例

作業員と建機の協調作業での生産性と安全性を定量評価するにあたって, 入力パラメータは, 作業員と建機の相対距離, 作業員の相対移動方向, 作業員から建機 (バケット) への視線方向 (視線ベクトル) である. 時系列位置情報 (相対距離) からの危険度評価をした結果を図 8 に示す. 作業員と建機の相対距離に対して, 任意の閾値処理を適用することで, 単なる接触・衝突回避の表現が可能である. しかしながら, 作業員と建機が近接したシーンで安全性が確保されている状態における安全性および危険度の再現は十分ではないため, 作業員と建機の相対距離に, 作業員の相対移動方向と視線ベクトルの情報 (図 9) を付加して安全性を総合的に評価した (図 10).

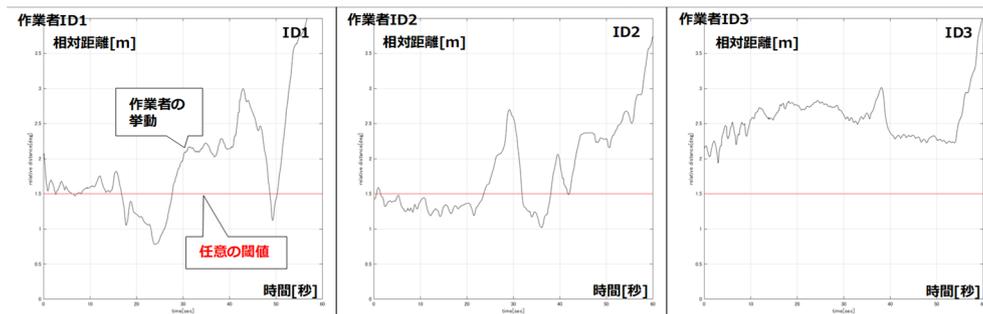


図 8. 時系列位置情報からの危険度評価 (相対距離)

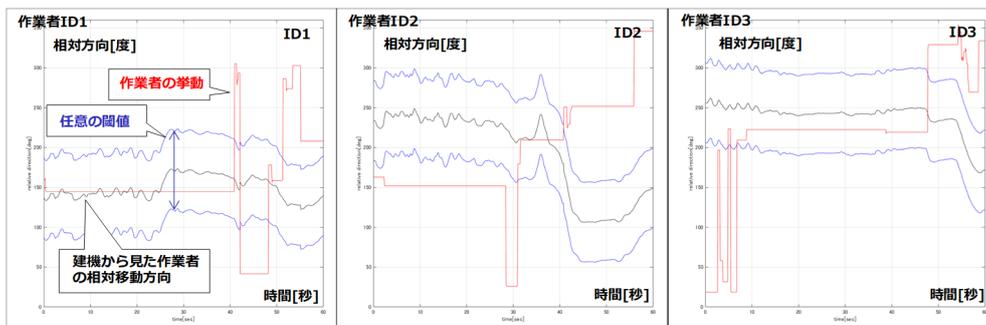


図 9. 時系列位置情報からの危険度評価 (相対移動方向と視線ベクトル)

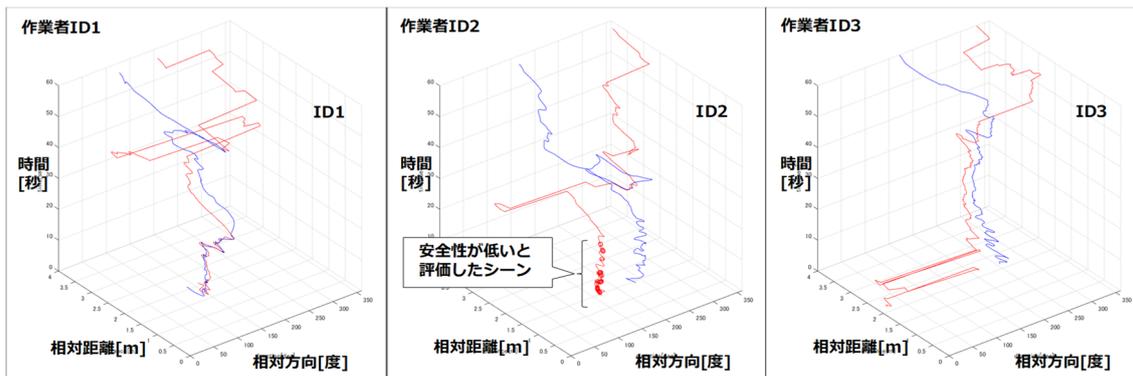


図 10. 時系列位置情報からの危険度評価 (総合評価)

(2)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

大局的には、本研究は BIM (Building Information Modeling) 分野に関わる研究である。BIM とは、3D 計測や情報通信技術 (ICT) を施工現場へ導入し、建設プロセス全体を最適化するというワークフローである。新規構造物を対象とした BIM では、手作業による 3D モデル作成が適用されることが多い。近年の国際学会では、レーザー計測などの 3D 計測により BIM データを生成する scan-to-BIM や、地理空間情報と BIM データを接続する GeoBIM というフレームワークが議論されている。本研究は、scan-to-BIM や GeoBIM に関わる研究である。国内における BIM は、建築分野では BIM、土木分野では BIM/CIM (Construction Information Modeling) と区別されており、土木分野における BIM/CIM の取り組みは、i-Construction と呼称されている。ICT 建機は i-Construction を構成する一部である。既往研究と本研究の差異を表 1 に示す。本研究は、BIM を都市土木に適用するための必要要素となる研究であり、膨大な社会インフラの維持管理の面で社会貢献性が高い運用技術を実現できる。

表 1. 既往研究と本研究の差異

キーワード	既往研究	本研究
BIM	<ul style="list-style-type: none"> 手作業による 3D モデル作成 	<ul style="list-style-type: none"> 時空間データの自動処理 危険予測を主とした施工空間モデリング
ICT 建機	<ul style="list-style-type: none"> ほぼ障害物のない環境での無人化施工 高い熟練度が必要な作業を初心者が可能とする施工支援 	<ul style="list-style-type: none"> 多くの地物が近接・密集する施工現場における建機利用の安全性と生産性の向上を目的とした施工支援
ジオフェンシング	<ul style="list-style-type: none"> 手作業による静的仮想領域設定 	<ul style="list-style-type: none"> レーザー計測による動的な仮想領域設定

(3)新たな知見と今後の展望

本研究には、定量的な危険予測を技術者が受容するのか明らかにした成果にもとづき、迅速な作業を求める生産性の向上と、慎重な作業を求める安全性の向上という、一見相反する条件を同時に解決する境界線を探るアイデアに学術的特色がある。本研究では、単なる衝突回避にとどまらず、レーザー計測、動体追跡、物体認識、地理情報システム、および、施工技術を融合したセンシング技術により、作業の危険度を機械学習で定量化するメカニズムにより、作業者と建機が近接する協調作業の高度化手法を新たに提案した。相対距離や視線ベクトルなどの計測値にもとづいた危険予測手法の構築と検証をしたが、実験をとおして得られたその他の知見として、作業者や建機操縦者の心理バイアスの定量化なども検討可能になることが挙げられる。

建機関連の研究は多く報告されているが、ほとんどの先行研究は無人環境における建機自体の高度化に関する内容である。作業者と建機が近接した協調作業で生産性と安全性を高めるアプローチは従来にない試みであった。提案手法は建機への外付けシステムとして実用化できるため、従来型の非 ICT 建機を短期間かつ低コストで ICT 建機化できるという結果を得られる。また、技術者が定量的な危険予測を受容するメカニズムは汎用性が高いことに着目すると、工場や自動運転、農業分野の高度化へも展開可能である。

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 0件）

1. 著者名 中川雅史, 浪江宏宗, 田口雅邦	4. 巻 32
2. 論文標題 LiDARとBLE測距による施工空間における動体識別	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用測量論文集	6. 最初と最後の頁 45,54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 尾崎凱, 中川雅史
2. 発表標題 施工現場における移動体可視化のための建機搭載複合LiDARを用いた物体認識
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gai Ozaki, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Visualization and Object Recognition of Construction Space using Dual 3D Laser Scanners Mounted on Construction Vehicle
3. 学会等名 The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎凱, 中川雅史, 田口雅邦
2. 発表標題 建機搭載LiDARによる水平・鉛直スキャニングでの施工空間可視化
3. 学会等名 日本写真測量学会, 令和4年度年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouki Kurita, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Model-Based Reconstruction of Underground Pipes from Point Clouds for Construction Information Modeling
3. 学会等名 South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gai Ozaki, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Motion Object Recognition Using Range Images Acquired from Point Clouds
3. 学会等名 South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川雅史, 尾崎凱, 栗田航貴, 田口雅邦
2. 発表標題 施工空間で取得したLiDARとBLE測距による動体認識
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 的場日菜, 尾崎凱, 小原海翔, 山口友一朗, 夏目裕太, 中川雅史
2. 発表標題 建機搭載カメラを用いた施工現場の作業者マッピング
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田航貴, 中川雅史
2. 発表標題 施工現場におけるBLE測距の安定性に関する検証
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田航貴, 中川雅史
2. 発表標題 埋設管施工におけるSfM/MVS点群を用いた掘削構内の3Dモデリング
3. 学会等名 令和3年度年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Eshima, Arata Nagasaka, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Evaluation of Wireless Transmission for 3D-LiDAR Point Cloud Processing
3. 学会等名 The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Gai Ozaki, Masafumi Nakagawa, Masahiro Miyo
2. 発表標題 Object Recognition and Tracking using 3D Laser Scanners mounted on a Construction Vehicle
3. 学会等名 Asian Conference on Remote Sensing 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Arata Nagasaka, Hirohito Ito, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Spatiotemporal Accuracy Guarantee of Point Clouds for Urban Digital Twin
3. 学会等名 Asian Conference on Remote Sensing 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長坂新, 中川雅史
2. 発表標題 デジタルツインのためのモバイルスキャナの時空間精度保証
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎凱, 中川雅史, 三代雅博
2. 発表標題 施工現場の安全性向上のための複合LiDARによる物体認識および追跡
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江島佑亮, 長坂新, 中川雅史
2. 発表標題 3D-LiDAR同時利用のための点群無線伝送における遅延の評価
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長坂新, 齋藤菜奈子, 中川雅史
2. 発表標題 都市空間へのデジタルツイン適用のための点群の時空間レジストレーション
3. 学会等名 日本写真測量学会・令和5年度年次学術講演会発表論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎凱, 中川雅史
2. 発表標題 設現場における安全性向上のための建機搭載複合LiDARを用いた物体認識
3. 学会等名 日本写真測量学会・令和5年度年次学術講演会発表論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江島佑亮, 長坂新, 中川雅史
2. 発表標題 3D-LiDAR点群の無線伝送における遅延の検証
3. 学会等名 日本写真測量学会・令和5年度年次学術講演会発表論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Arata Nagasaka, Masafumi Nakagawa
2. 発表標題 Spatiotemporal Guarantee of Mobile Scanners in Urban Space for Digital Twin
3. 学会等名 The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Gai Ozaki, Masafumi Nakagawa, Masahiro Miyo
2. 発表標題 Object Recognition and Tracking Using Composite LiDAR on Construction Vehicles to Improve Safety at Construction Sites
3. 学会等名 The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室Webページ[RESEARCHES] http://www.db.shibaura-it.ac.jp/~nakagawa/web/researches.htm
--

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
---------	---------