

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21287

研究課題名（和文）空間類似性に基づくサイバーフィジカル空間認識知能データベース構築

研究課題名（英文）Construction of Database for Intelligence Recognition of Cyber-Physical Spaces Based on Spatial Similarity

研究代表者

天野 辰哉（Amano, Tatsuya）

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：40906898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：公共空間において詳細かつパーソナルな空間デジタルツインの実現にむけ、LiDARをはじめとする3次元計測センサから得られるデータの解析により、人の移動や行動やモノの位置などをリアルタイムに捉えて3次元マップを構築する技術、ならびにそのマップ上での情報共有を可能とするパーソナル空間情報基盤を構築する技術の開発を進めた。特にLiDARを用いた堅牢な人物追跡技術を提案するとともに、広域の人物移動のデータ化を目的とし、視野の重複がないように分散配置されたLiDARからの全域の人物軌跡の再構築手法を提案した。本手法はモバイル分野における著名国際会議PerCom2023に採録された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタルツインは都市などの3次元空間モデル上に、IoT技術で得られた空間データを紐づけることで効率的な知識共有や解析を可能にするものであり、都市規模でのデジタルツインの実現に向けた動きが急速に進んでいる。一方、拡張現実（AR）やロボットの社会浸透のためには、より詳細なパーソナル空間で人・モノ・空間の状況を扱える新しいデジタルツインが必要となる。本研究では3次元測域センサや深度カメラおよびARデバイスからのセンシングデータ解析により、人の挙動やモノの位置などをリアルタイムに捉えるとともに、人とモノの関係性理解を通して、マイクロかつパーソナルなデジタルツイン空間を構築する技術を確立する。

研究成果の概要（英文）：Towards realizing detailed and personal digital twins of public spaces, we have advanced the development of technologies to construct a three-dimensional map that captures people's movements, behaviors, and object locations in real time, based on the analysis of data obtained from three-dimensional measurement sensors such as LiDAR, and to construct a personal spatial information infrastructure that enables information sharing on that map. We have proposed a robust person tracking technique using individual LiDARs, and a method for reconstructing the entire trajectory of people from a wide area with no overlapping field of view from distributed LiDARs, aiming at digitizing people's movements in a wide area. This methodology has been accepted in the renowned international conference in the mobile field, PerCom2023.

研究分野：モバイル・パーベイシブコンピューティング

キーワード：空間認識 人物追跡 LiDAR デジタルツイン 3次元点群

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

Society 5.0 目標実現のためには IoT 技術を駆使して実世界 (フィジカル空間) データを仮想的な世界 (サイバー空間) に集積し、サイバー空間上での AI 解析を可能にする「デジタルツイン」構築が不可欠である。例えば国土交通省が整備するデジタルツイン基盤「Project PLATAU」ではサイバー空間上に再現された都市モデル上に交通や人流、イベント情報、災害状況といった都市活動に関わる様々なデータを重畳し 3 次元空間上で紐づけることにより、効率的な知識や情報の共有・解析を可能にし、「都市のデジタルトランスフォーメーション」実現を目指している。高度なセンシング能力をもつ自律運転車が様々な周辺認識データを集約して共有するいわゆるダイナミックマップもデジタルツインの一種である。また研究開始当初では特に、COVID-19 パンデミックにより、オフィスや大学、飲食店、電車・バス・客船内など、パーソナルな空間における人々のソーシャルディスタンスや密集度、マスク着用や人とのモノとの接触などの状態を正確に捉え共有することの重要性は急速に高まっていた。しかしながら、我々周辺のパーソナルで動的な屋内空間をセンシングし 3 次元空間モデルを生成する技術、ならびにそれを活用したデジタルツイン構築技術は未だ確立されていない。

### 2. 研究の目的

パーソナル空間でのデジタルツイン実現に必要な技術を研究開発する。人物の移動や行動に関わるデジタルツインでは、プライバシー保護が課題となる。そこで RGB カメラとは異なり、色情報を保持しない LiDAR やデプスカメラを用いる。これらの 3 次元計測センサから得られるデータの解析により、人の移動や行動やモノの位置などをリアルタイムに捉えて 3 次元マップを構築する技術、ならびにそのマップ上での情報共有を可能とするパーソナル空間情報基盤を構築する技術を確認する。屋内人流のデジタルツイン構築などの事例を通してアプローチの有効性を評価する。

### 3. 研究の方法

デジタルツインにおいてはすべてのデータを紐づける高精度かつ動的な 3 次元の物理空間モデルが必要となる。これに対し、本研究の目指す空間センシングとマッピング技術を以下の要素で構成する。

- ・**人物検出・動作追跡技術**: 3 次元測域センサ LiDAR やデプスカメラなどを利用した高精度センシングを行い、得られる点群情報を高速に処理・加工することで、高精細な 3 次元空間モデル生成・人検出を行う。同時に 3 次元位置推定技術を開発し、認識と組み合わせることで高度な人やモノの位置や属性をマッピングする。また複数の分散配置された LiDAR による空間全体のセンシング技術開発を進める。

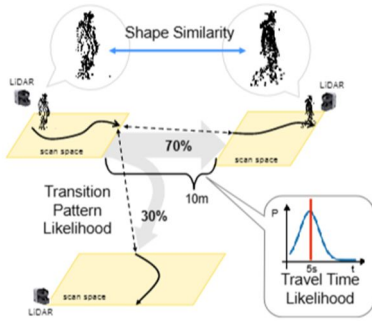
- ・**空間意味理解**: 上記で得られたオブジェクトの位置や属性などから、その状況把握を行う技術を創出する。特に、人や物のインタラクション検出により、それらの関係性を理解し、例えば人がどのようなモノを触ったり使ったりしているかなどを検出する。

大阪大学箕面新キャンパスのスマートキャンパス化プロジェクトにおいて、キャンパスビル全域に設置された 3 次元 LiDAR により収集される 3 次元点群データを用いて人物の検出や追跡の性能を評価する。

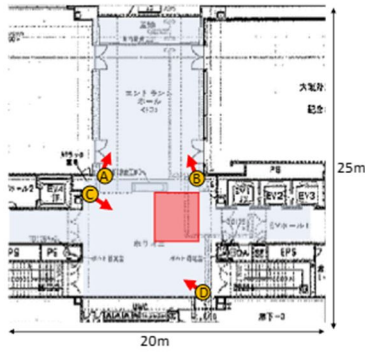
### 4. 研究成果

(1) LiDAR を用いた広域の人物デジタルツイン(空間データベース)の構築の要素技術として、個々の LiDAR の計測エリアにおいて人物追跡する手法 [1] を提案した。提案手法では、得られた 3 次元点群に対して背景差分処理および Euclidean Clustering を適用して、個々の人物の点群のかたまり(人物セグメント)を得る。各人物セグメントについてそのバウンディングボックスの位置、サイズ、速度を状態とするカルマンフィルタによりトラッキングを行う。既存のトラッキング手法の場合、複数の人物が接近するなどして観測された人物セグメントが合体したり、あるいはオクルージョンなどの影響で個々の人物セグメントが分裂して複数のセグメントとして観測されたりする場合がある。これに対して、提案手法では、観測セグメントとその観測の前フレームまでから予測される次のフレームの人物セグメント状態(トラックレット)の整合性をもとに、前述したセグメントの合体と分裂を検出する。検出した結果をもとに、カルマンフィルタの更新に利用するセグメントを補正する。これによって、3 次元点群の不完全性に対して堅牢な人物検出・追跡を実現した。大阪市梅田エリアの繁華街において、9 台の LiDAR で計測された広域の点群を用いて追跡手法の精度を評価した。その結果 Multi-Object Tracking に用いられる CLEAR 指標中の MOTA において、提案手法が既存手法に対して 4.7%の向上が見られた。

(2) 個々の人物の詳細な行動認識技術として、コロナ禍という社会情勢を受け、スマートフォンとスマートウォッチを用いた手の動き検出(顔・口・鼻へのタッチ行動)の検出技術を開発した。提案手法では LSTM-Autoencoder を用いたリアルタイムな行動認識を行う。



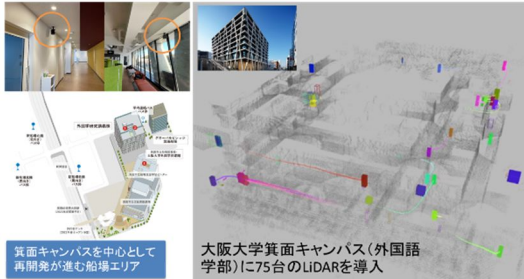
測領域の接続関係とその遷移時間の履歴に基づいて、離れた2つの軌跡が同一人物の移動により生成された確率を求める。この確率を人物点群からの類似度と合わせることで、最終的に軌跡が同一人物によるものであるかを判定する。



この人物軌跡再構成手法の評価のため、評価実験を行った。大阪大学箕面新キャンパスの1F エントランスホールにおいて設置された4台のLiDARにより3次元点群を取得した。左図の黄色点が設置LiDARの位置と向き、青色で示された領域が計測範囲を表す。また図の赤枠で示した領域をLiDARの不可視領域であると設定し、人物軌跡をセグメントに分割した。4日間にわたって人物軌跡を収集し、人物軌跡のマッチング精度においてF値0.91を達成した。なおこの人物軌跡構成手法に関する研究成果はモバイル・パーベイシブコンピューティング分野におけるトップカンファレンスであるIEEE PerCom2023に採録されている(採択率15%)。

(4) 前述した2つの研究成果を活用し、複数の実証実験を実施した。大阪大学箕面キャンパスビル全体のデジタルツインプラットフォームを構築している(下記左図)。キャンパスビルの食堂・教室・廊下・ピロティなどに計75台のLiDARを設置し、建物内の人物の移動や行動のデータを個人特定できない形で収集している。これらのデータはキャンパスの空調管理や混雑緩和などスマートキャンパス化のための基盤として今後も活用を進める。

人の位置が物理・仮想空間で完全同期。スマートビルディングに向けた人移動・行動デジタルツイン(大阪大学新箕面キャンパス)



9台のLiDARセンサを設置し、大阪大学と(株)HULIXが協働で駅前歩行者空間の人流変化を計測  
国土交通省「デジタル社会に対応したエリアの価値向上 取組み事例・アイデア集」掲載  
なんば駅周辺道路空間再編社会実験における人流計測

また南海電鉄(南海電気鉄道株式会社)と大阪市が実施したなんば駅周辺の道路網再編社会実験に協力し、駅前の歩行者天国化による影響調査のための、広域人流計測を、提案するシステムにより実施した(上記右図)。本実証は大阪大学発のスタートアップ企業HULIX(株式会社HULIX)と連携して進めた。ここでのLiDARを用いた本計測に関する取り組みは、朝日放送(朝日放送テレビ株式会社)および関西テレビ(関西テレビ放送株式会社)で報道された。また国土交通省の「デジタル社会に対応したエリアの価値向上 取組み事例・アイデア集」に掲載されている。

<引用文献>

[1] Masakazu Ohno, Riki Ukyo, Tatsuya Amano, Hamada Rizk, Hirozumi Yamaguchi, Privacy-preserving Pedestrian Tracking using Distributed 3D LiDARs, In Proceedings of The 21st International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2023), pp.43-52.  
[2] Riki Ukyo, Tatsuya Amano, Akihito Hiromori and Hirozumi Yamaguchi, Pedestrian Tracking in Public Passageway by Single 3D Depth Sensor, In Proceedings of the 2022 IEEE International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems Co-located with IEEE PerCom 2022, pp. 581-586

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 右京 莉規, 天野 辰哉, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫	4. 巻 63
2. 論文標題 公共空間における三次元点群の不完全性に対して堅牢な歩行者トラッキング手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1361 - 1370
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hamada Rizk, Tatsuya Amano, Hirozumi Yamaguchi, Moustafa Youssef
2. 発表標題 Smartwatch-Based Face-Touch Prediction Using Deep Representational Learning
3. 学会等名 International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 右京莉規, 天野辰哉, 廣森聡仁, 山口弘純, 守屋充雄
2. 発表標題 複数LiDARによる大規模三次元点群を用いた歩行者トラッキング手法の実装と評価
3. 学会等名 研究報告モバイルコンピューティングと新社会システム (MBL)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 天野辰哉, 水本旭洋, 山口弘純, 松田裕貴, 藤本まなと, 諏訪博彦, 安本慶一, 中村優吾, 田上敦士
2. 発表標題 新生活様式におけるコミュニティ形成のためのサイバーフィジカル空間共有基盤の設計開発
3. 学会等名 第29回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 天野辰哉, 山口弘純, 東野輝夫
2. 発表標題 サイバーフィジカル空間における歩行者の日和見識別手法
3. 学会等名 マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riki Ukyo, Tatsuya Amano, Akihito Hiromori and Hirozumi Yamaguchi
2. 発表標題 Pedestrian Tracking in Public Passageway by Single 3D Depth Sensor
3. 学会等名 IEEE International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems Co-located with IEEE PerCom 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ohno Masakazu, Ukyo Riki, Amano Tatsuya, Rizk Hamada, Yamaguchi Hirozumi
2. 発表標題 Privacy-preserving Pedestrian Tracking using Distributed 3D LiDARs
3. 学会等名 The 21st International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2023),
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 天野辰哉, 右京莉規, 山口弘純, 守屋充雄
2. 発表標題 3次元LiDARを用いたキャンパスビル全域での人流と行動のセンシングプラットフォーム構築と運用
3. 学会等名 研究報告モバイルコンピューティングと新社会システム (MBL)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野 真和, 右京 莉規, 天野 辰哉, Hamada Rizk, 山口 弘純
2. 発表標題 3次元点群を用いた時空補間的アプローチに基づく人物軌跡構成法の提案
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02022) シンポジウム
4. 発表年 2022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
---------	---------