

3D-LiDARによる作業員位置情報取得の高精度化

山田昇吾

High Precision Acquisition of Worker Location Information at Construction Sites Using 3D-LiDAR

Shogo Yamada

Abstract

This study aims to obtain information on the locations of workers at a construction site using 3D-LiDAR. We developed a real-time tracking system with multiple 3D-LiDAR units around a site. Furthermore, the system extracts only moving objects from the difference in the environmental point cloud. Experiments were conducted indoors and at actual construction sites. As a result, we found that the detection accuracy of workers in an environment with many obstructions decreased. Furthermore, some events specific to construction sites, such as the misidentification of materials as workers, were identified as drawbacks to be addressed in future studies. In contrast, the tracking rate of workers who could be recognized was 96%.

概要

工事現場での作業員位置情報の把握は、安全管理の手段として多くの用途が考えられる。作業員位置情報の計測方法としてビーコンやGNSSなど様々な機器の活用が研究されているが、機器によって一長一短がある。こうした中で本研究は高精度位置情報の取得を重視して、3D-LiDARを用いた工事現場での作業員位置情報の取得および追跡を行うシステムを構築した。本システムを用いて実際の工事現場での検証実験を行った結果、作業員位置情報の検出に関して追跡率は96%であった。一方、工事現場のような遮蔽物の多い環境下では、作業員位置情報の検出に関する課題も明らかとなった。今後、工事現場に適した作業員検出アルゴリズムの検証および改良を進める。

1. はじめに

工事現場内の作業員の位置情報を把握することで、重機との接触防止や受傷者の検知などの安全管理が可能となる。また、現在研究が進められている重機の自動運転化技術においても、重機の移動ルートを設定させるために周辺で働いている作業員の位置情報を把握することは必要となる。

このような背景から、作業員の位置情報の計測方法として、ビーコン、GNSS、カメラによる画像認識、LiDARによる点群取得など様々な方法が研究されている。ビーコンは安価かつ軽量というメリットがある一方、位置情報の分解能がメートル単位であるといったデメリットが存在する。GNSSは高精度測位が可能である一方で、屋内での測位には不向きであることや、受信機の軽量化が課題となっている。画像認識は、計測精度もよく、非接触での計測が可能であるといったメリットがある一方、背景と移動体が類似色である場合の分離の難しさや、照明による明暗差に影響されてしまうといった課題がある。LiDARを用いた点群取得では、高精度な位置情報が非接触で計測でき、画像認識と異なり色や照明の影響を受けないといったメリットが存在する。一方で、点群として取得するため、各作業員の区別が難しく、追跡する際に工夫が必要となるといった課題が挙げられる。以上のと

おり、各計測方法には一長一短があり、目的別に方法を使い分ける必要がある。

本研究では工事現場における高精度な位置情報データの取得および追跡を目的とし、非接触かつ屋外の明暗差の影響を受けないことから3D-LiDARを用いて作業員位置情報計測システムの構築を行う。工事現場に複数台の3D-LiDARを設置し連携させることで作業員の追跡を試みる。

計測手段として本研究ではハンディ型3D-LiDARと固定型3D-LiDARの2種類を使用しているが、本稿では以降、ハンディ型3D-LiDARのことをハンディ型LiDAR、固定型3D-LiDARのことを固定型LiDARまたは単にLiDARと表記する。

2. 作業員位置計測システムの概要

2.1 システムの構成

本研究では作業員位置計測用に複数台のLiDARを使用する。計測システムはオフライン処理とオンライン処理の2つに分けられる。一連の計測フローをFig. 1、オフライン処理でのシステム構成をFig. 2、オンライン処理でのシステム構成をFig. 3に示す。

オフライン処理では、ステップ1 (Fig. 1内の①)に対応。以降、各ステップに対応した図内の番号を記載)として、

ハンディ型LiDARを用いたNDT-SLAM¹⁾による全体環境点群の生成を行う。なお、本稿ではハンディ型LiDARで取得した空間全体の環境点群を全体環境点群、各固定型LiDARで取得した局所的な空間の環境点群を局所環境点群と記す。

ステップ2 (②) では作業員計測用の固定型LiDAR1台にて得られる計測点群を合成することにより局所環境点群を生成し、この作業をLiDARの数だけ行う。そして、全体環境点群と各局所環境点群をマッチングすることで後の処理で得られる作業員位置情報を全体環境点群上の座標値に変換する際に用いる剛体変換行列を得る。以上の工程までをオフライン処理で行う。

次にオンライン処理では、ステップ3 (③) として、オフライン処理で生成された局所環境点群と逐次取得される点群を用いて背景点群と移動体点群を切り離し、作業員の点群の抽出を行う。さらにそこからクラスタリングによって追跡対象を分類し、追跡対象の重心位置を算出する。ここでの重心位置は各LiDAR座標系での重心位置であるため、オフライン処理にて算出された剛体変換行列により座標変換することで、全体環境点群上の座標値として重心位置を得る。

こうして各LiDARにより得られた作業員の重心位置座標を一方向通信により効率的かつ高速にデータを送り出せるUDP通信にてリアルタイムで集約し、ステップ4 (④) として、Joint Probabilistic Data Association Filter²⁾ (以下、JPDAF) と呼ばれる推定手法を用いることで複数作業員の追跡を可能とする。次節より各ステップの詳細を述べる。

2.2 オフライン処理

2.2.1 全体環境点群の生成 本計測システムでは、計測の前段階として計測空間の全体環境点群を生成する。ハンディ型LiDARを用いて移動体がない環境下において点群の取得を行い、NDT-SLAMにより空間全体の環境点群を生成する。NDT-SLAMとは取得した点群をボクセルに分割し、ボクセル内に存在する点群を正規分布で定義することでボクセル単位での環境点群生成を行う手法である。Fig. 4にNDT-SLAMで得られた点群の例を示す。

2.2.2 局所環境点群の生成 作業員位置計測のため固定型LiDARを計測空間周辺に複数台設置する。計測の前段階として、このLiDARにて事前に移動体がない環境下での点群取得を行い、得られたすべての点群を合成することにより局所環境点群を生成する。この局所環境点群は、全体環境点群とのマッチングにより局所環境点群から全体環境点群座標系への変換行列を算出することのほか、計測時に逐次取得される点群との差分により作業員の点群を抽出する際に用いられる。Fig. 5に局所環境点群の例を示す。

2.2.3 マッチングによる剛体変換行列の算出 生成した局所環境点群をNDT-SLAMによる全体環境点群のボクセル内の正規分布によって、同一の位置で重ね合わ

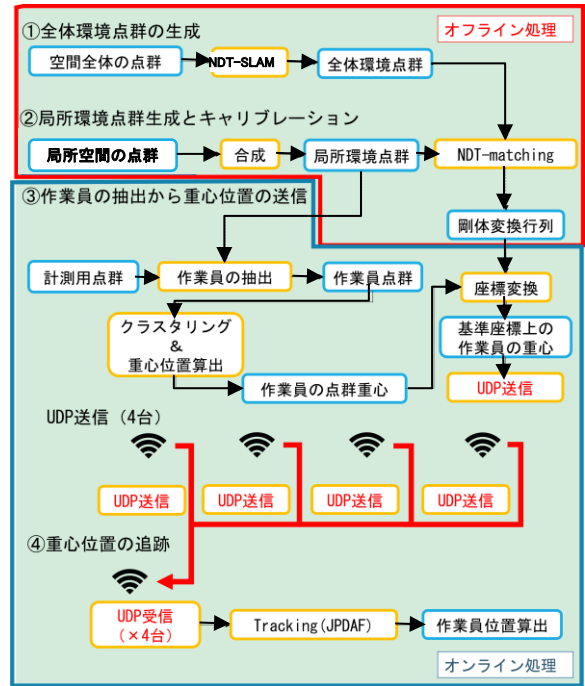


Fig. 1 計測フロー
Measurement Flow

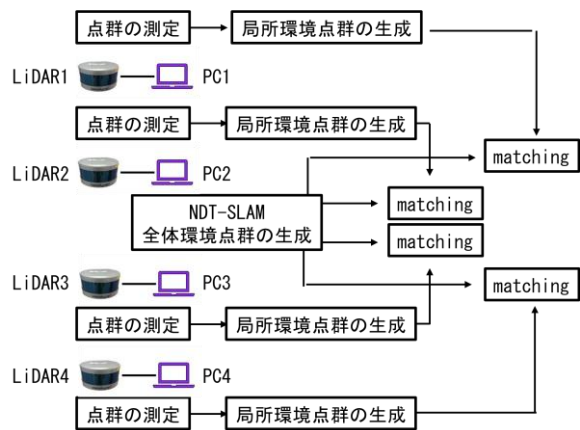


Fig. 2 オフライン処理でのシステム構成
Offline System

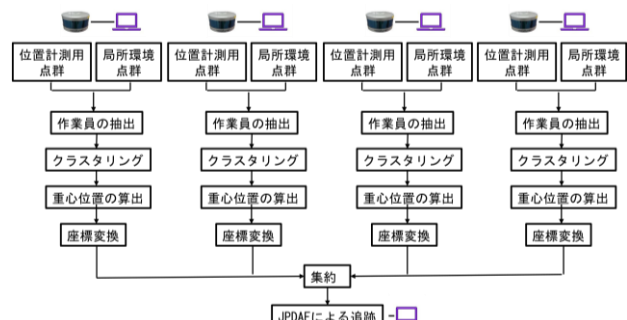


Fig. 3 オンライン処理でのシステム構成
Online System

せるNDT-matching¹⁾を用いてマップマッチングを行う。Fig. 4の全体環境点群およびFig. 5の局所環境点群を用いてマッチングした結果をFig. 6に示す。図中の黒丸と赤丸はそれぞれの原点を表す。これにより、剛体変換行列を算出し、後の処理で得られる作業員位置情報を全体環境点群上の座標値に変換することが可能となる。

2.3 オンライン処理

2.3.1 局所環境点群からの作業員の抽出

作業員の抽出では、実時間で取得する点群から、地面や壁、資材、機材といった固定物の点群を除去すればよい。本研究での抽出方法は、局所環境点群と逐次取得する位置計測用点群をそれぞれボクセルに分割し、ボクセル内の点群数を比較する方法である。ボクセルに分割した局所環境点群および位置計測用点群の模式図をFig. 7に示す。

ボクセルを青枠のように分割し、ボクセル内に存在する点群を青丸で示している。位置計測用点群の各ボクセル内の点群と局所環境点群の各ボクセル内の点群を減算し、残った点群の数が閾値以上の点群が作業員の点群となる。ここでは、閾値を3とした場合の例を示しており、Fig. 7に示すように、減算後の点群が3個以上残っている3つのボクセル(図中赤枠のボクセル)内の合計10個の点群(図中赤丸の点群)が作業員を構成する点群となる。

2.3.2 全体環境点群上の作業員位置座標の算出

クラスタリングにはユークリッド距離を用いた閾値設定を採用した。前節の処理で得られた作業員を構成する点群のうち、点同士の距離が閾値未満の固まりを一つのクラスタとして分類する。Fig. 8に例として室内実験の結果を示す。図中の赤いボールは手前の障害物により計測対象が隠れてしまう現象であるオクルージョンの検証のため

設置している。また、各作業員のクラスタについて、その重心座標を算出し、これを作業員の位置座標とする。

算出された位置座標は各LiDARを基準とした座標系であるため、統一した座標系への変換が必要となる。ここで、2.2.3項で算出した剛体変換行列を用いることで、全体環境点群の原点を基準とした座標系へと統一できる。

2.3.3 個別の作業員の追跡

本研究では、複数のLiDARから得られた作業員の重心位置に基づいて最終的な位置座標の算出を行う。しかし、複数のLiDARが同じ作業員を観測した場合、キャリブレーションの誤差や、作業員の身体の中の側面を計測したかによって位置座標の算出位置がずれる可能性がある。したがって、一時刻前の位置座標を考慮した位置座標の推定値に基づいた確率的な重み計算によって、複数の重心位置から最終的な位置座標の算出をする手法であるJPDAFを用いて作業員の追跡を行った³⁾。また、JPDAFには検知レベル、削除レベルといったパラメータがある。検知レベルは、ある計測周期内に作業員として検知された回数が閾値以上であれば検知するというパラメータである。削除レベルはその逆で、ある計測周期内に作業員として検知されなかった回数が閾値以上であれば削除するというパラメータである。このパラメータを計測環境に合わせて調整することで最適な追跡が可能となる。

3. システム検証実験

3.1 実験概要

本実験は構築した一連のシステムの挙動の検証を目的とする。東京都市大学敷地内の広場にて、LiDARを4台、12m四方の四隅に設置し、その中を作業員に見立てた歩

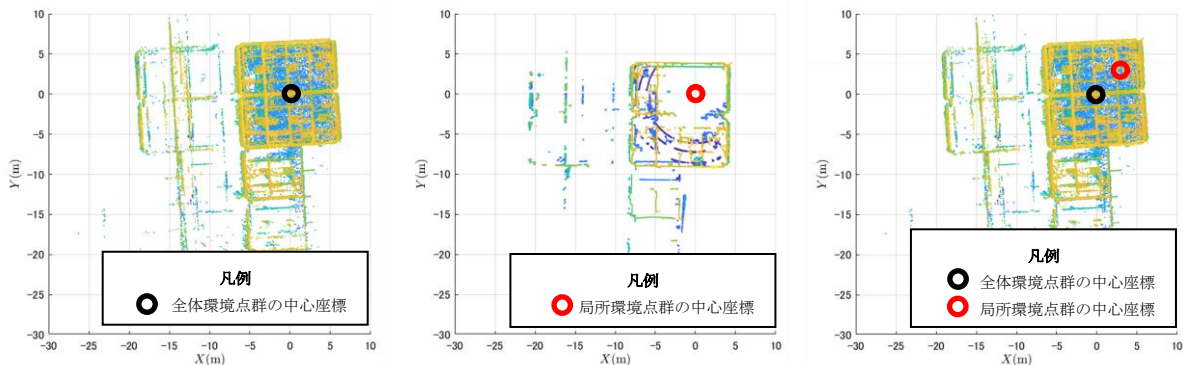


Fig. 4 全体環境点群

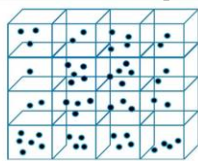
Fig. 5 局所環境点群

Fig. 6 マッチング結果

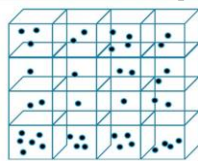
Overall Map

Partial Map

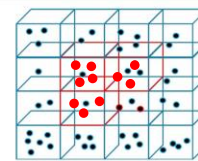
Matching Result



位置計測用点群 (背景と移動体を含む)



局所環境点群 (背景点群)



位置計測用点群と局所環境点群の差分
(赤枠ボックス内の赤点部分)

Fig. 7 作業員点群抽出の模式図

Schematic Diagram of Worker Point Cloud Extraction

行者6人が動き、追跡が可能かを検証した。Fig. 9に実験の様子と、LiDARにより抽出した歩行者の点群を示す。なお、写真と比較しやすいよう、点群画像は地面に対して垂直から見た断面図として表している。写真内の歩行者に付与した番号と点群画像内の各クラスターに付与した番号は対応している。LiDARから遠い場所では点群が疎になっているものの、歩行者の抽出は問題なくできていることが分かる。

3.2 結果と考察

ある時刻 t での歩行者の追跡結果をFig. 10に、時刻 t から1秒経過した時刻 $t+1$ での追跡結果をFig. 11に示す。なお、水平方向の移動が分かりやすいよう平面図で示す。各図の黄丸はLiDARの位置を示し、赤丸は各LiDARで観測した重心位置、緑四角はその重心位置をもとに算出した歩行者位置を示す。さらに各歩行者にはIDが付与されている。また、各歩行者位置から延びる線は時刻 t と $t+1$ の差分から導いた速度を示しており、線の長さが速さに対応している。算出された歩行者の位置1個所に対して、各LiDARによって観測した最大4つの重心位置が近傍に存在している。ID番号4の歩行者を例にとると、時刻 t では重心位置は3つ検出されているのに対し、時刻 $t+1$ では1つだけ検出されている。これは、他歩行者によりLiDARから隠れる形となってしまった為である。しかし、重心位置の検出が1つだけでも、歩行者位置は算出されており、問題なく追跡ができています。

実験結果より、12m四方の配置間隔で、遮蔽物のない環境下であれば問題なく計測が可能なが分かった。LiDARの特性上、有効距離範囲内でも距離が遠くなればレーザー間隔が空き、得られる点群数が減ることから追跡が難しくなる可能性がある。今後、追跡の有効距離や状況に合わせた最適な設定や配置の検討を行う。

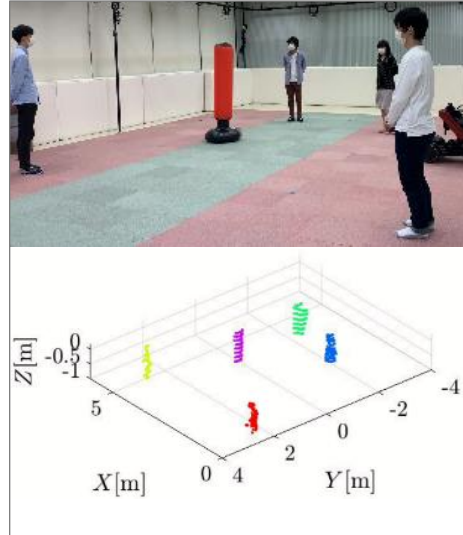


Fig. 8 クラスタリング結果
Clustering Result

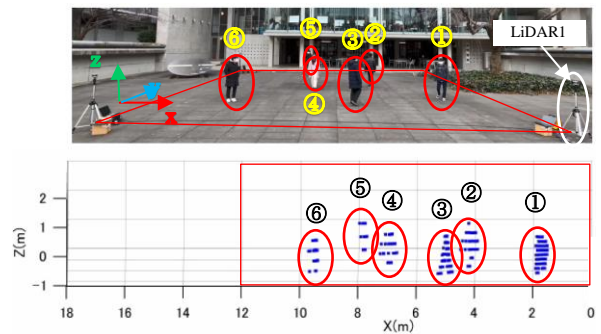


Fig. 9 実験の様子とLiDARによる歩行者の抽出
Experiment and Extraction of Pedestrian by LiDAR

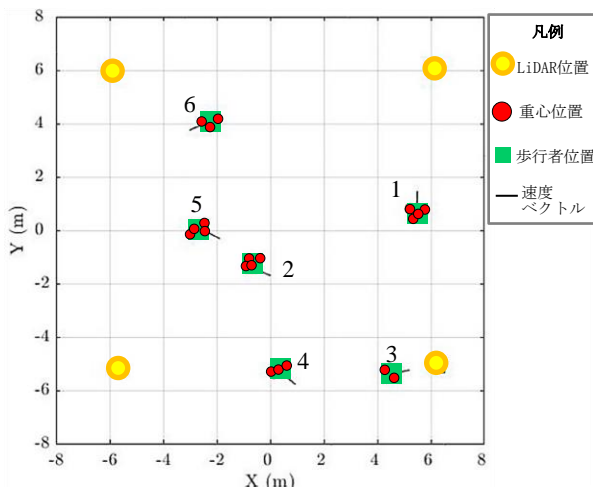


Fig. 10 追跡結果 (時刻 t)
Tracking Result (time: t)

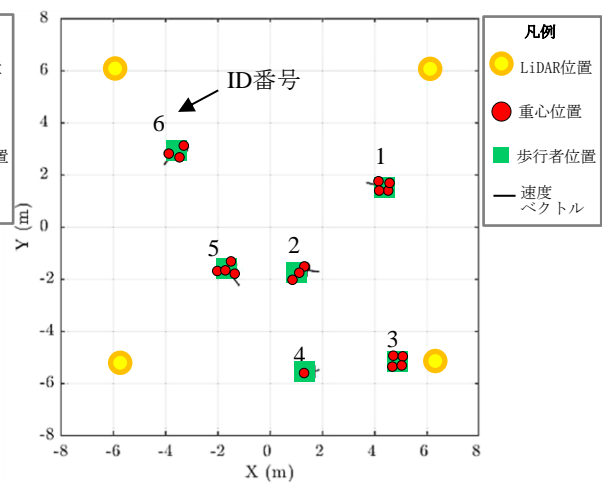


Fig. 11 追跡結果 (時刻 $t+1$)
Tracking Result (time: $t+1$)

4. 工事現場における検証実験

4.1 実験概要

実際の建設現場を対象とした検証実験を行った。工事現場の様子をFig. 12に示す。橙色枠内が計測範囲で約25 m×30mの範囲となっている。赤丸の個所にLiDARを3台設置した。実験環境は鉄筋やクレーンなどの遮蔽が多い動的環境であった。設置したLiDARの高さは計測範囲の床面から約5mで、計測範囲側に前傾するように30度傾けた状態で計測を行った。なお、全体環境点群は計測範囲の床面から約3mの高さから取得を開始したため、基準座標系も地上から3m部分が原点となる。

4.2 結果と考察

4.2.1 全体環境点群の生成と局所環境点群のマッチング

Fig. 13にハンディLiDARで取得した全体環境点群を示す。また、Fig. 14にLiDAR1におけるマッチングの結果を示す。Fig. 14の全体環境点群には設置したLiDARの場所をL1-L3と記した。ここでは、座標系の補正結果と全体環境点群を比較しやすくするため、同一の範囲を赤枠で示す。Fig. 14のマッチング前の局所環境点群では点群が傾いており、座標系が一致していない。一方で、マッチング後では、傾きおよび座標を修正したことで、座標系が一致していることがわかる。

4.2.2 作業員の検出と追跡

Fig. 15に3台のLiDARで取得したある時刻での作業員の追跡結果を示す。このとき、赤い点が重心位置を示し、緑の四角がターゲットとして検出された作業員の位置を示す。座標(18,20)および(20,23)付近の作業員A、作業員Bをみると、複数の重心位置に対してターゲットを1人として作業員位置を検出できており、JPDAFが有効に機能していると考えられる。

作業員位置に対して、重心位置が一つのみの場合が多くみられる。これは3章の実験と異なり、工事現場実験では計測範囲が広く遮蔽物もあるため、一人の作業員に対して一台のLiDARでしか検出ができていないことを示す。しかし、多くの場合検出が一台のみでも作業員の追跡は行えた。一方で、作業員の重心位置があるにもかかわらず作業員位置の検出がされていないケースも見られた。

これはJPDAFの検出レベルが最適に調整されていなかったと考えられる。検出レベルの閾値を下げることで作業員の検出率は上がる一方で、資材等の点群をターゲットとして検出してしまう可能性がある。この閾値の調整は工事現場という計測環境特有のノウハウとして今後の課題となる。

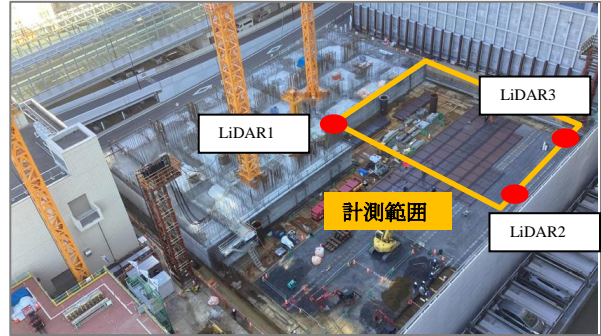


Fig. 12 実験空間の様子
Experimental Space

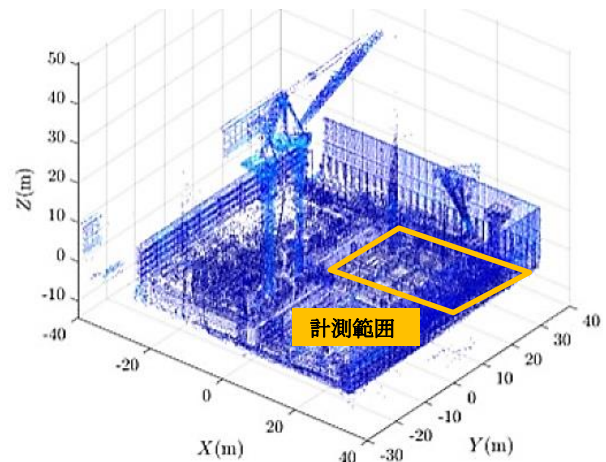


Fig. 13 全体環境点群
Overall Map (Three Dimensions)

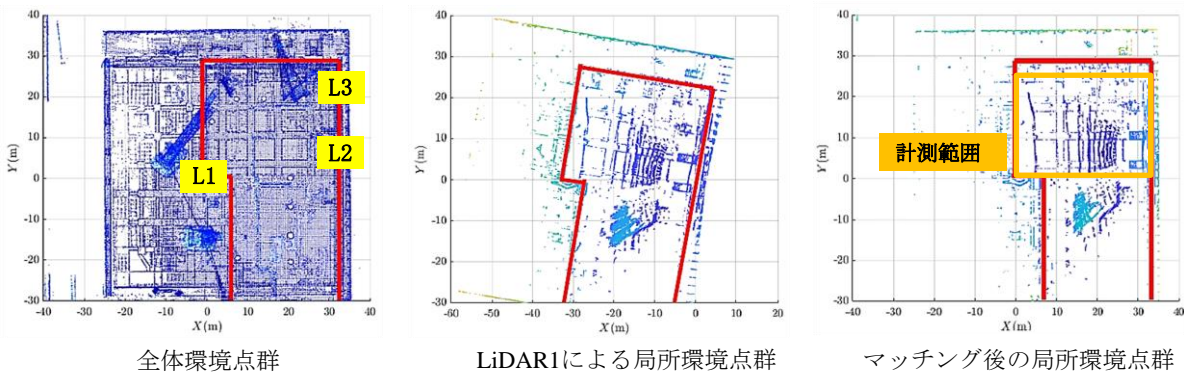


Fig. 14 マッチング結果
Matching Result

4.2.3 作業員の追跡率 検出した作業員の追跡率について分析を行った。対象エリアはFig. 12の黄枠内のエリアで、対象者数は16名であった。ここでは追跡率を、「作業員位置座標を取得し追跡できた時間 T_a 」を「作業員の点群データが計測された時間 T_b 」で除した値としている。全体の追跡率は $\sum T_a = 1046[sec]$ に対し $\sum T_b = 1090[sec]$ で、96%であった。また、各作業員において上記の処理を行い、個別の追跡率をまとめたものをTable 1に示す。作業員6は一瞬点群の計測が途絶えたが、JPDAFでは一時刻前の位置座標をもとに推定値を出しているため、一瞬計測が途絶えても推定値によって位置の補間を行うことができる。また、作業員14は計測範囲端での計測だったため追跡率が他と比べて低い。補間時間の閾値は遮蔽物が多いかなど計測環境によって異なるため、本閾値の設定は今後の課題となる。

5. まとめ

本研究では、工事現場での高精度な作業員位置情報の取得および追跡を目的とし、LiDARを用いた計測システムを構築した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 複数のLiDARを用いて作業員の点群を計測し、その重心位置からJPDAFにて作業員位置を算出し追跡する人流計測システムの構築を行った。
- 2) 実際の工事現場において作業員位置計測の検証実験を行い、96%の追跡率を実現し、本システムが工事現場のような計測環境でも有効であることが確認できた。
- 3) 一方で、工事現場特有の遮蔽物の多さによる計測機器の配置方法の問題や、資材のような作業員以外の物体を誤検出するといった課題も明らかとなった。

本稿では背景点群と作業員点群を切り離し、作業員点群を抽出する過程の精度検証はできていない。そのため今後点群抽出のアルゴリズムの検証および改良を進める。また、本システムは安全管理のほか出退勤管理や、駅等の改修工事における仮設動線計画にも寄与すると考えられ、これらへの活用検討も進める。

謝辞

本研究の実施にあたり、東京都市大学の野中謙一郎教授よりご協力および貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

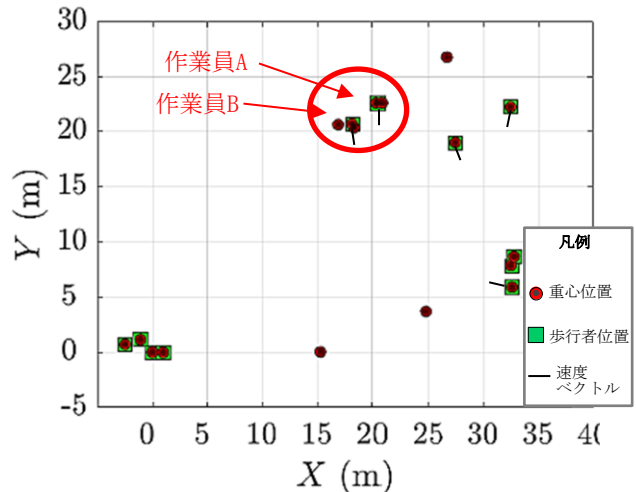


Fig. 15 追跡結果
Tracking Result

Table 1 作業員ごとの追跡率
Tracking Rate Per Worker

【追跡 T_a /点群データ T_b 】		【追跡 T_a /点群データ T_b 】	
作業員1	[171/186] 88%	作業員9	[55/55] 100%
作業員2	[18/18] 100%	作業員10	[90/92] 98%
作業員3	[80/83] 96%	作業員11	[42/42] 100%
作業員4	[56/58] 98%	作業員12	[338/348] 97%
作業員5	[24/29] 83%	作業員13	[23/25] 92%
作業員6	[32/32] 100%	作業員14	[6/11] 55%
作業員7	[21/21] 100%	作業員15	[24/27] 89%
作業員8	[8/8] 100%	作業員16	[55/55] 100%

参考文献

- 1) Magnusson, M., Lilienthal, A., and Duckett, T.: Scan registration for autonomous mining vehicles using 3d-ndt, Journal of Field Robotics, Vol. 24, pp. 803-827, 2007.10
- 2) Bar-Shalom, Y., Daum, F., and Huang, J.: The probabilistic data association filter, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 29, No. 6, pp. 82-100, 2009.12
- 3) Kikuchi, T., Nonaka, K., and Sekiguchi, K.: Moving Horizon Estimation with Probabilistic Data Association for Object Tracking Considering System Noise Constraint, J. Robot. Mechatron., Vol. 32, No. 3, pp. 537-547, 2020