(37) Bluetooth ビーコン位置管理システムへの AI 分析の適用

佐藤　功一[1]・鈴木　雅登[2]・石田　仁[3]・藤田　真司[4]

[1]正会員　ペンタテクノサービス株式会社 技術部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: satou-k@penta-techno.co.jp

[2]正会員　ペンタテクノサービス株式会社 技術部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: suzuki-ma@penta-techno.co.jp

[3]正会員　五洋建設株式会社　ICT 推進室（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: hitoshi.ishida@mail.penta-ocean.co.jp

[4]正会員　五洋建設株式会社　ICT 推進室（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）

建設現場では GNSS を用いた車両や作業員などの移動体の位置情報管理が行われているが，地下空間などの閉鎖空間では GNSS が受信できないため，RFID やビーコンなど受信器の位置を利用して間接的に位置を推定することが一般的である．しかしながら，この方法では電波の受信強度が遮蔽物や移動体の向きなどの影響を受け，検出結果が不安定となる場合が多々ある．本研究では，Bluetooth ビーコンを用いて検出した位置データを AI 分析することによって，位置推定の安定性を向上させるシステムを考案した．また，山岳トンネル工事におけるセントル内での作業員の位置推定に適用し，提案したシステムの実用性を確認した．

Key Words: *Mounain Tunnel, Non-GNSS condition, Positioning, Bluetooth Beacon, AI*

1.　はじめに

現在，建設現場においては GNSS が普及し，車両や作業員の位置情報の取得に活用されている状況であるが，トンネル坑内などの地下空間では GNSS が受信できず，RFID やビーコンなど受信器の位置を利用して間接的に位置を推定することが一般的である．RFID やビーコンを設置した車両や作業員などの移動体の位置情報を推定する場合，一般的に移動体と受信器との距離を電波強度から推定する．しかしながら，この方法では電波の受信強度が遮蔽物や移動体の向きなどの影響を受けるため，実際の現場運用においては位置推定結果が不安定となる場合が多々ある．本研究では，Bluetooth ビーコンのデータを AI 分析することによって位置推定の安定性を向上させるシステム考案し，山岳トンネル現場におけるセントル内作業員の位置推定に適用し，システムの実用性について検証を行った（**図–1** 参照）．



図–1　現場セントル写真

2.　システム概要

本システムは，複数の受信器が捕捉したビーコンの電波強度を分析することにより位置推定を行うシステムである．既存の位置管理システムでは，電波の複雑な反射や遮蔽物の影響で，電波強度と距離の関係が常に変動してしまう上に，ビーコンの装着者の向きが変わるだけでも，受信器に届く電波の強度が変動するため，ビーコン

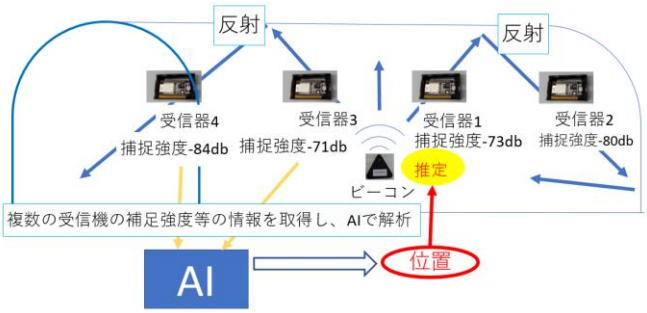


図-2　位置管理システム

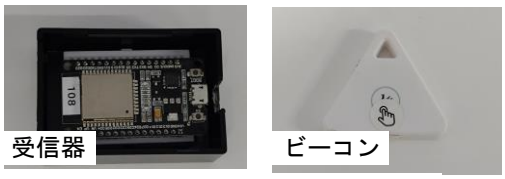
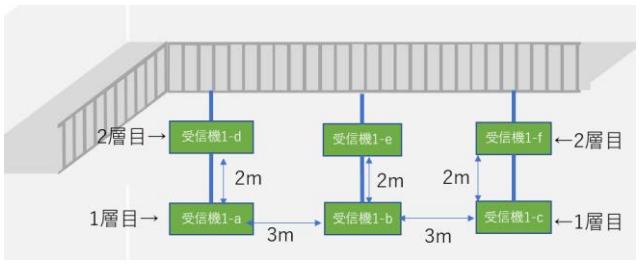


図-3　使用機材



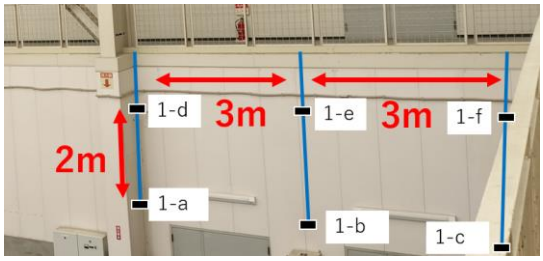


図-4　受信器の配置（ケース 1）

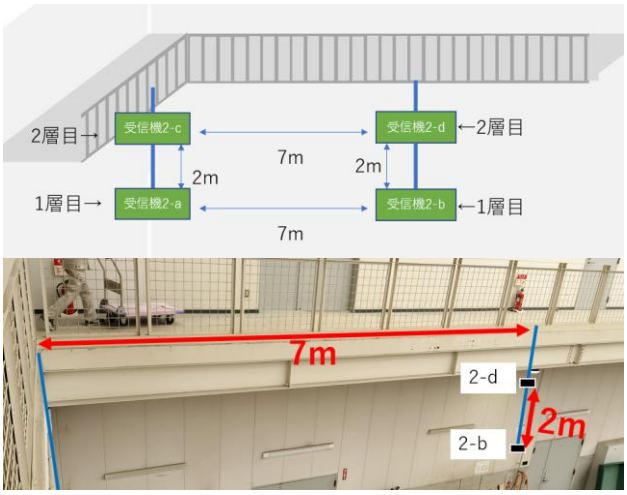


図-5　受信器の配置（ケース 2）

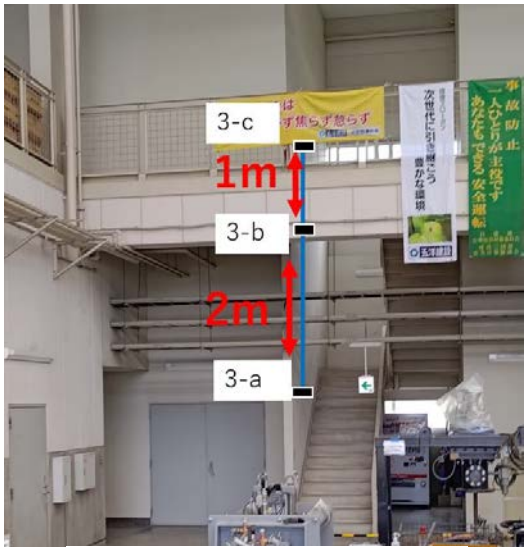


図-6　受信器の配置（ケース 3）

の実位置と大きく離れた場所にビーコンがあると判別してしまう課題があった．そのため複数の受信器が捕捉した電波強度の全てを使って AI 分析を行うことにより，誤判定の頻度を低減し，より安定性の高い位置推定を行うようにした（図-2 参照）．

本システムの受信器には，現在広く普及している Arduino と同じ開発環境を利用でき，かつ Wi-Fi と Bluetooth を内蔵している ESP32 を選定した．送信器としては Bluetooth ビーコンを使用した（図-3 参照）．

3.　事前検証

(1)　事前検証環境

実現場への適用に先立ち，実験室内にて位置検出精度の事前検証を行った．事前検証では，実現場のセントルサイズ（3 層構造高さ 7m，セントル内通路幅 7m，延長 10.5m）を想定し，高さ方向に 3 個，幅方向に 2 個，長さ方向に 3 個の受信器を配置した．

図-4～図-6 に受信器の配置位置と配置場所の実験室写真を示す．図-4 はセントル延長方向，図-5 はセントル通路幅方向，図-6 はセントル高さ方向の再現検証を想定した受信器配置である．

実験時のビーコンの実位置特定は，ビーコンを携帯した作業員の状況を撮影した動画により行った．

(2)　検証内容

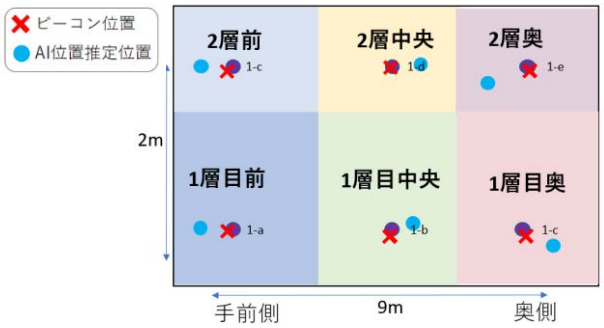
検証ケースとして，以下の 3 ケースを設定した．

ケース 1：同一階層内の位置判別（図-4 の配置）

ケース 2：セントル内の道路中心線を挟んだ左右位置判別（図-5 の配置）

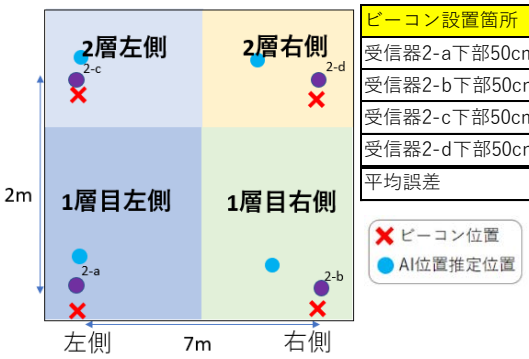
ケース 3：階層間における上下位置判別（図-6 の配置）

それぞれのケースにおいて作業員は，ビーコンを受信器の付近（同一地点または鉛直下部 50cm）に保持し，ビーコン位置が変わらない 5 分間のデータから推定位置を求めた．



ビーコン設置箇所	AI位置推定との差
受信器1-a	1.12m
受信器1-b	0.45m
受信器1-c	1.03m
受信器1-d	0.29cm
受信器1-e	0.46m
受信器1-f	1.43m
平均誤差	0.79m

図-7　ケース 1 の AI 分析結果



ビーコン設置箇所	AI位置推定との差
受信器2-a下部50cm	1.649m
受信器2-b下部50cm	2.34m
受信器2-c下部50cm	0.8m
受信器2-d下部50cm	2.71m
平均誤差	1.87m

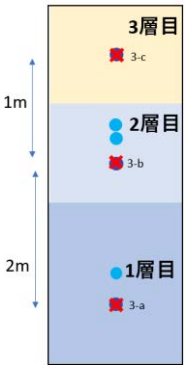
図-8　ケース 2 の AI 分析結果

(3)　AI 分析

AI 分析手法としては，ビーコンの座標値を予測するため，回帰分析を選定した．また，回帰分析には線形モデルと非線形モデルの二つの手法が存在するが，本試行の適用現場であるセントルでは電波の反射状況や障害物が多く，このような状況では線形モデルでは予測が難しいため，非線形モデルの勾配 ブースティング回帰（LightGBM）を選定し，本試行用に処理用プログラムを作成した．

AI の推定位置と実位置の離隔距離（斜距離）を誤差として算定した．なお，分析に使用したデータは 5 分間計測したデータの平均値である．確認結果を図-7～図-9 中に表で示す．平均誤差は各受信器から算出された誤差の平均値である．ケース 1 は平均誤差 0.79m，ケース 2 は平均誤差 1.87m，ケース 3 は平均誤差 0.53m の結果が得られた．なお，分析に用いたデータから使用したビーコンの電波は，約 10m 先の受信器でも十分に検出できていることも併せて確認している．

4.　現場適用結果



ビーコン設置箇所	AI位置推定との差
受信器3-a	0.55m
受信器3-b	0.37m
受信器3-c	0.68m
平均誤差	0.53m

図-9　ケース 3 の AI 分析

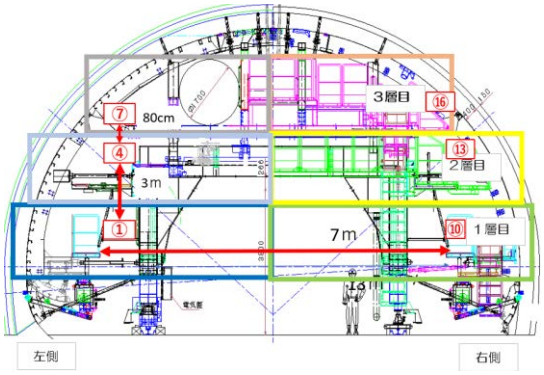


図-10　セントル内の受信器設置状況（正面図）

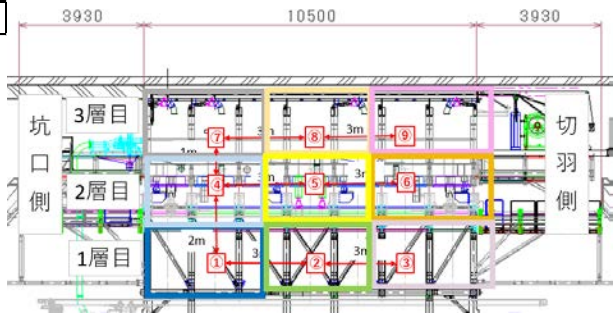


図-11　セントル内の受信器設置状況（側面図）

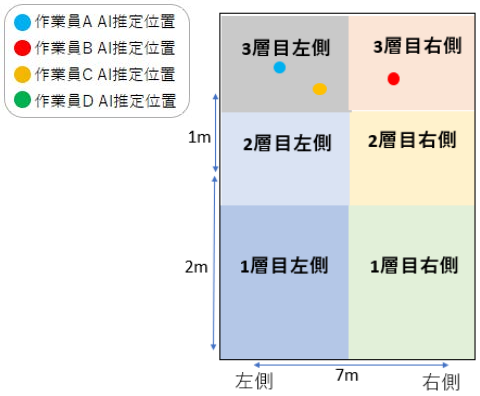
(1)　現場適用

事前検証結果の電波到達距離から，セントル内に配置した受信器からセントル内を移動するビーコンの電波は十分に捕捉可能と考えられること，また，受信器を設置する区間を高さ 1m，幅 3.5m，長さ 2m で分割し，エリア毎に管理することで，作業員の居るエリアの推定が十分に行えると判断し，現場適用した．

ビーコンはセントル内で覆工コンクリート打設を行う作業員が携帯した．セントルの大きさは事前検証の想定とほぼ同様のため，受信器は事前検証と同様の間隔に配置し，18 の分割エリア毎に作業員の居るエリアを推定した．図-10 と図-11 に分割エリアとその受信器の配置（丸数字で表記）を示す．

(2)　AI 分析

AI 分析を行い，ビーコンの位置推定結果と実際の作業員が設定したエリア内に居たかどうかの比較を行った．



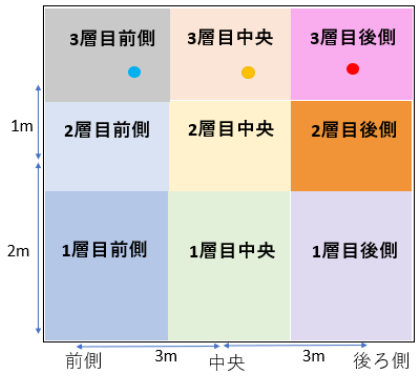


図-12　AI位置推定結果　状況1（左側：正面，右側：側面）

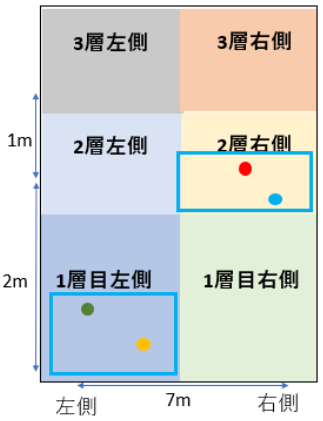


図-13　AI位置推定結果　状況2

表-1　作業員位置のAI推定と実際の対比

状況No	AIによる位置推定結果	実際の位置	対比結果
1	セントル3層目前方左側エリアに1名，中央左側エリアに1名，後方右側エリアに1名	セントル3層目前方左側エリアに1名，中央左側エリアに1名，後方右側エリアに1名	合致
2	セントル1層目左側2名，2層目右側2名作業	セントル1層目左側2名，1層目右側2名作業	不一致
3	作業員不在	作業員不在	合致

(3)　分析結果確認

図-12，図-13 に AI 分析による位置推定結果，表-2 に AI 分析結果と作業員の居たエリアとの対比結果を示す．対比結果をまとめると，以下になる．

- 作業員がセントル左側，右側のどちら側に居るかの判別可能．
- 作業員が 3 層目か 1 層目または 2 層目に居るか判別は可能．ただし，状況 2 の結果から右側で 1 層目に居たのか 2 層目に居たのかの判別はできなかった．理由として，右側 1 層目は機械が多数配置されており，これらが電波を遮蔽および反射させた影響が考えられる．
- 作業員がセントル内に入っていない状況 3 の結果より，作業員の在・不在の把握が可能．

本システムにより，全長 10.5m，通路幅 7m のセントル内の作業員の位置（エリア）が概ね把握できることが分かった．

5.　考察

事前検証環境では本システムの位置推定精度は 1～2m 程度であったが，セントルや足場のように電波の遮蔽物が多い箇所では，電波の遮蔽や反射が AI 分析時のノイズとなり，位置推定精度が落ちる可能性が高い．この遮蔽物の影響は，予備計測などで事前に把握できれば，受信器の配置位置の変更で解消可能と考えられる．

また，今回の現場においては教師データを用いらずに AI 処理を実施したため，教師データを用意することで位置推定精度の向上を望めると考えているが，実際の現場においては教師データが必ずしも用意できるとは限らないため，教師データを取得出来る現場にて AI に学習を行い別現場に展開する事などで，位置推定精度の向上につながると考えている．さらに，データの蓄積が進めば，AI 処理の際の説明変数の追加も位置推定精度の向上に有効な方法になると考えている．

6.　おわりに

本研究で考案した Bluetooth ビーコン，簡易受信器，AI 分析を用いたシステムにより，山岳トンネル工事のセントル内における作業員の居るエリアを概ね把握することができた．一部のエリアで位置把握が十分な精度でできなかったが，受信器の配置方法の改善によって解消できると考えている．また，位置推定精度の向上には AI 処理方法を改善することが重要と考えており，説明変数の追加や教師データを取得出来る現場にて学習を行わせることなどにより位置推定精度を向上させることが可能と考えている．今後は AI 分析手法の改善を行い，教師データがない現場においても高精度な位置検出が行えるように試行を重ねて行きたい．

謝辞：本研究は 2022 年度国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の助成を受けた．また，実施にあたり，国土交通省九州地方整局八代河川国道事務所から多大なご協力を受けた．ここに記して感謝の意を表す．

参考文献

1)　中村 泰広，有坂 壮平，天野 和洋，戸澤 清浩，村上 武志，坂井 智裕，藤本 健治郎：工事車両運行実績データの見える化・分析・活用方法―新 桂沢ダムの原石運搬道路での実施事例／，土木学会第 74 回年次学術講演会，VI-992，2019.