

トンネル用建設機械による労働災害防止に関する研究

清水 尚憲*1, 濱島 京子*1, 大幢 勝利*2, 北條理恵子*1

本研究では、トンネル施工現場において発生している建設機械と作業者との接触災害を防止するために、ICT 機器を利用した安全管理支援システムである支援的保護システム(SSS)を提案する。SSS とは、残留リスクを対象とし、作業者の注意力のみに頼らない確実性の高い安全作業支援が可能となるシステムである。SSS の構成要素として、インパルス方式の超広帯域無線 (Ultra Wide Band, UWB)、ビーコンセンサあるいは TOF (Time of flight) 方式を用いた 3D レーザーレーダーといった様々な位置情報センサの精度を検証した。その結果、①UWB は精度よく位置情報が獲得できるが、金属物等の周囲環境により対策が必要であること、②ビーコンセンサは、手軽で実用的ではあるが、精度が UWB より低い位置情報を獲得するのに用いるには課題が多く残る結果となった。しかしながら、バイタルサインの獲得用への使用が期待されること、③3D レーザーレーダーに関しては、作業者と建設機械の位置情報は捉えることができたが、必要要件のいくつかは録画後の解析での達成にとどまり、リアルタイム計測においては、課題が残る、ということが明らかとなった。今後、得られた結果をもとに、現場の特色に合わせた SSS の開発が望まれる。

キーワード: トンネル施工工事現場, ICT, time of flight 方式, 3D レーザーレーダー, 支援的保護システム

1. はじめに

数々の労働災害統計でも明らかなように、製造業における事故数は、建設業に比較し 1/3~1/4 程度と非常に低い¹⁾。様々な事情や条件が異なるものの、製造現場における機械安全の考え方が建設業に应用されれば、従来の安全面の問題点が解消される可能性は大きいと思われる。我々は、製造業における安全の考え方・方策・対策をトンネル施工現場に導入し、有効性を検証することを目的に本プロジェクトを遂行した。

はじめに、製造現場における機械安全の実情を述べる。従来の機械安全では、International Organization for Standardization (ISO) 12100:2010/Japanese Industrial Standards (JIS) B 9700:2013 であるところの「機械類の安全性—設計のための一般原則」の安全規格に基づき安全確保のためのリスク低減方策が図られている²⁾。その原則は、本質安全設計、安全防護及び付加保護方策、使用上の情報提供の 3 ステップメソッドである。このような体系化した安全規格で機械安全は管理されてはいるが、今日の製造現場における生産形態が、統合生産システム (Integrated Manufacturing System: IMS) に移行しつつあるため、新たな問題も生じている。すなわち、作業者が機械の可動部を停止させず近接した

状態で運転確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃、除去等を行う、いわゆる危険点近接作業³⁾が生じている。この場合は、IMS 内にある機械を動かしながら、稼働領域内で行う作業も生じるため、現存の機械の安全規格の原則のみでは十分にリスクが低減できない現状がある。さらに、今までは機械単体の保護装置の付与によりリスク低減を行っており、IMS 導入以前の安全対策としては有効性が認められてきたが、機械の組み合わせによる IMS の形態下では、単体の機械それぞれのリスク低減対策を行ったとしても、低減できないリスクが新たに発生する可能性がある。これらの問題が IMS で生じているにもかかわらず、ISO11161:2017「統合生産システムにおける安全性」においては、危険点近接作業における有効な安全確保の手段を提供していない。また、ユーザが現場で実施しているリスク低減方策の中には、人の注意力に大きく依存しているものが依然として見受けられる。そのため、不確定性が大きく、作業者にヒューマン・エラーが発生すると、期待しているリスク低減効果が得られずに重篤な災害が発生する結果となっている。

以上のことから我々は、現在の生産現場の実情に合わせた新たなリスク低減戦略として、“支援的保護システム (Safeguarding Supportive System: SSS)”を構築した⁴⁾。SSS は、製造者が ISO 12100/JIS B 9700 の 3 ステップメソッドで低減した後の残留リスクを対象とし、適切な Information and Communication Technology (ICT) 機器を組み合わせ、人の注意力のみに依存することなく確実性の高いリスク低減効果を得ることを可能にする。これにより、資格 (ライセンス) と権限 (能力, スキル) を持った人のみが、その資格と権限に応じ

*1 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ。

*2 同 研究推進・国際センター。

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 清水尚憲

E-mail: shimizu@s.jniosh.johas.go.jp

た作業を行う。すなわち、作業員 ID と作業内容（対象機械）が合致した時のみ作業の実行が許可される。そのため、ヒューマン・エラー発生に対する危険側エラーを大幅に減らすことができる。但し、SSS は、すでに実施している教育・訓練・管理等の“保護方策”が存在していることが前提であり、これらの代替手段ではない。

このように、我々は製造現場を標的とし SSS の開発を行ってきた。しかしながら、冒頭で述べたように、建設業における労働災害は依然として発生数が少なくなく、対策も十分とは言えない状況にある。特に、トンネル建設工事中の作業現場における安全は、ほとんどが作業員の注意力により維持されているのが現状である。また、一旦事故が発生すれば、非常に重篤な災害となる。

そこで、本研究では、トンネル建設現場に SSS を導入し、リアルタイムでのモニタリングシステムの構築を目指した。これが実現すれば、次が可能となる。

- ・視界不良であっても、建設機械が作業員と接触する災害の防止
- ・坑外の事務所において、建設機械と作業員とについて入出坑の確実な管理
- ・バイタルデータによる過酷環境下にある作業員の精神的、身体的安全の確保。

本稿では、トンネル施工現場において発生している建設機械と作業員との接触災害防止するための安全管理支援システムである SSS について、特に建設機械及び作業員の位置情報システムの開発及び評価に焦点を当てた実験の結果を報告する。SSS によって、残留リスクを対象とし、作業員の注意力のみに頼らない確実性の高い安全作業支援が可能となる。加えて、リアルタイムなモニタリング装置導入後のリスク低減効果の定量的評価法も紹介する。

2. 実験報告

1) 実験1 高温多湿環境下における支援的保護システムの構築 (UWBセンサの検討)

1)-1 背景

本実験では、内部でロボットと洗浄機が稼働している高温多湿環境下の作業現場で実験を行なった。当該現場では作業員と機械が交錯する区域がある。実験条件を変えて、障害物の影響による精度の変化を確認した。

1)-2 方法

建設現場で多用されるアルミニウム合金製可搬式作業台（以下、作業台と称す）のレンタル業を営む企業 A 社の 2 つの作業台自動洗浄ライン（以下、ラインと称す）を実験現場とした。

ラインは、自動洗浄機、ベルトコンベア、搬送用ロボットから構成されており、観察窓付き小部屋（16m×7m）内部に、ライン 1 とライン 2（図 1）が平行に配置されていた。ライン開始部と終末部には、ラインの間に挟まれる形で搬送用ロボットがそれぞれ一台ずつ置かれて

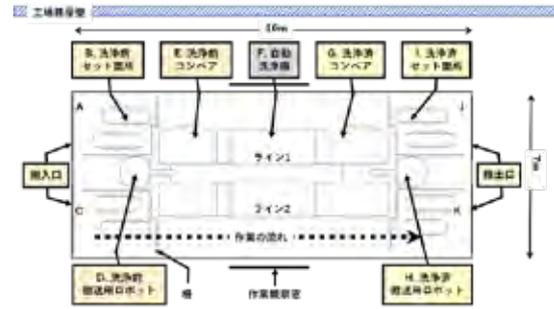


図 1 自動洗浄ラインレイアウト図

いた。

作業内容は、以下のとおりであった。搬入口（図 1A）の前面に作業員が台車に積み重ねた作業台 5 台を運ぶ。搬入口のシャッターを開け、洗浄前セット箇所（図 1B）に台車ごと作業台を運び入れる（写真 1）。洗浄前セット箇所に台車を 2 台入れ、シャッターを閉める。次に、図 1C の搬入口からも同様に作業台を搭載した台車 2 台を入れ、シャッターを閉める。洗浄前搬送用ロボット（Motoman-GP88, 安川電機, 福岡, 図 1D, 写真 2）が、アルミ合金製可搬式作業台用特製エンドエフェクタ（写真 3）に付属のカメラで作業台を認識し、1 台ずつ作業台を掴み、ライン上の洗浄前搬送コンベア（図 1E）に乗せる。作業台は、洗浄前コンベアから自動洗浄機（図 1F）に運ばれ、内部で噴射される温水と洗剤で洗浄されたのち、洗浄済搬送コンベア（図 1G）を経てライン終末まで運ばれる。ライン終末地点で、洗浄済搬送用ロボット（図 1H）により、洗浄済セット箇所（図 1I）に積み上げられる。ライン 1 の搬出口（図 1J）及びライン 2 の搬出口（図 1K）にあらかじめ 2 台ずつ設置した台車に洗浄後の作業台がそれぞれ 5 台ずつ積み上げられると、作業員が搬出口のシャッターを上昇させて台車を運び出す。搬送用ロボットは、ライン 1 及びライン 2 の作業台を交互に掴むようにプログラムされていた。搬送用ロボットにはインターロックがかかっており、稼働中はシャッターの開閉ができない設定となっていた。洗浄前後のセット箇所とベルトコンベア及び搬送ロボットは約 80cm の高さの柵で仕切りがされていた。一つの作業



写真 1 洗浄前セット箇所に、台車に積み上げたアルミ合金製可搬式作業台を搬入する様子



写真 2 洗浄前セット箇所から見た洗浄前搬送用ロボット（手前の青い物体）



写真 3 アルミ合金製可搬式作業台用特製エンドエフェクタ

台を台車からラインに乗せ、洗浄を経て台車に乗せられるまでの時間は、2分程度であった。

SSS の位置情報把握のためのセンサシステムには、測位精度が高く、かつ高速の距離測定が実現可能な 7.25～10.25GHz の帯域を使用するインパルス方式の超広帯域無線 (Ultra Wide Band, UWB) を使用した。移動器は UWB アクティブ RFID タグ (写真 4 左, スタートキットタグ 72BE, 株式会社日本ジー・アイ・ティー, 滋賀県) を使用し, 同社の UWB 固定器 (写真 4 右, スタートキットアンカー 1017) が使用された。UWB は, 最近ではデータ通信よりもセンサとして広く応用されており, GPS と同じ原理で屋内に設置している 3 個以上の UWB 固定器 (リーダ) と計測対象の UWB アクティブ RFID タグとの距離を信号到来時間により位置を特定する。インパルス方式の UWB は, ナノ秒以下の非常に短いパルス幅の電波を使用して高速通信を行うことで高い精度の測定が可能である。UWB は, Wi-Fi 等とは異なる独自の帯域で通信するため, 電波干渉が起らず, 風, 温度, 明るさ等の外乱にも影響を受けにくく安定し



写真 4 超広帯域無線 (Ultra Wide Band, UWB) アクティブ RFID タグ (移動機) と UWB 固定機

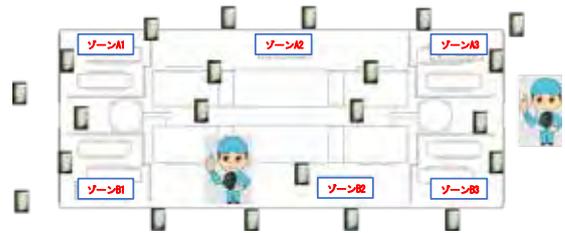


図 2 自動洗浄ラインの UWB 固定器の配置

た通信が可能である。さらに, 送信出力が VCCI の電磁波ノイズの数を与えないといわれており, 今後は医療分野における生体データの収集や通信にも使用可能とされている。固定器は小部屋の内部に 11 か所, 外部に 12 か所配置した (図 2)。本実験で使用した 2 台の UWB アクティブ RFID タグには 2 名の作業者の ID や権限等の情報がそれぞれ内蔵されており, タグにより作業者の特定が可能であった。

本作業に従事する作業員は A 社の社員 2 名であり, 通常は作業台の搬入出を業務とする。両名とも, 労働安全衛生法第 59 条・同規則第 36 条において義務づけられ, 安全衛生特別教育規定第 18・19 条に指定された内容で「産業用ロボット作業員特別教育」を受講修了している。本実験においては, 小部屋内での仮想的清掃作業に従事した。人の位置検出の検出精度を確認するために, 自動洗浄ラインのうちライン 1 をゾーン A, ライン 2 をゾーン B に分け, さらに各ゾーンを, 洗浄前セット箇所, 自動洗浄機を中心に 2 つのベルトコンベア, 及び洗浄後セット箇所からなる 3 つの分割ゾーンに分けた (図 3)。搬送用ロボットは, 中央から上部をゾーン A, 下部をゾーン B とした。

実際の作業現場では, 洗浄用の温水の水蒸気が絶えず発生しており, 見通しが良好とはいえない状況であった。また, 搬送用ロボットのエンドエフェクタ付属のカメラに水滴がつくため, 定期的なライン内でのカメラ清掃作業が発生する状況である。そこで, 位置計測のため, 清掃作業を仮想し, ライン内に立ち入り実験を行った。初めに 1 名の作業者が, ゾーン A1 から入場, A2 を通過して A3 にて清掃作業を行った。その後, ゾーン A3 から A2 を通り, A1 から退場した。次に, ゾーン B1 から入場し, B2 を通り, B3 にて清掃作業を行った。清掃作業後, ゾーン B3 からゾーン B2 を通り, ゾーン B1 から退場した。以上の動作を行った時刻を記録した。次に, 複

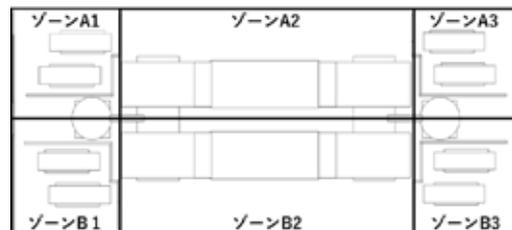


図 3 自動洗浄ラインのゾーン分割模式図

数の作業者が同時に作業をした場合の位置計測の精度確認のため、作業員2名がそれぞれ同時にゾーンA及びBにて清掃作業を行った。すなわち、1人目の作業員はゾーンA1から入場、A2を通過し、A3にて清掃作業を行った後、A3からA2を通り、A1から退場した。同時に、2人目の作業員は、ゾーンB1からB2を通り、B3にて清掃作業を行い、逆の経路を辿り、B1から退場した。

入場から退場までの時間を計測し、ゾーンAとゾーンBの比較を行った。また、作業員の動線軌跡のうち、逸脱回数を計測し、それぞれのゾーンを比較した。逸脱回数とは、作業員が小部屋の内部にいるにも関わらず、動線軌跡の記録では小部屋の外に存在していることと定義した。

1)-3 結果

単独の作業員の動線軌跡をゾーンマップ上に描いたものを図4に示す。進入経路は図中矢印で示した。作業員は、ゾーンB1から入場した後、清掃作業を経て59秒後に退場し、直ちにゾーンAに入場した後、その57秒後に退場した。両ゾーンともに、動線軌跡及び作業時刻の記録も途切れることなく記録されており、UWBシステムのデータを用いると作業員の位置測位のみならず作業時間、作業時刻を正確に測定できることが確認された。ゾーンAとゾーンBの間には、作業時間には差がみとめられず、同じ速度で作業を行っていた。しかしながら、測位の精度に関しては、ゾーンBに比較してゾーンAの逸脱回数が多く見られ、特にA2及びA3で逸脱が顕著にみとめられた。

次に、作業員2名で同様の動作を同時に行った場合の作業員位置測位実験(図5)では、1人目の作業員が、ゾーンA1から入場した後、84秒後に退場した。2人目の作業員は1人目の作業員の入場19秒前にゾーンBに入場後、その95秒後に退場したことが確認された。複数の作業員がそれぞれ異なるUWBアクティブRFIDタグを携帯した状態であっても、固定器が、それぞれの動線軌跡を途切れることなく正確にとらえ、時刻も同時に記録可能であることが確認された。しかしながら、測位の精度に関しては、単独作業員の場合と同様に、ゾーンAにおける逸脱回数が頻発しており、逸脱が顕著であった分割ゾーンも、単独作業員の場合と同様にA2及びA3であった。一方、1人目の作業員がゾーンAを左から右へ歩いた際に、動線軌跡の記録では、誤計測箇所が発生した。

このような小部屋外に逸脱する動線軌跡が得られた原因を検証するために、単独条件下でゾーンBの柵外を歩行する検証も行った。作業員がラインの終末に移動すると、誤った位置測位が発生することが確認された(図6)。

1)-4 考察

作業員が単独で作業した場合には、Aの動線軌跡が概ね計測できたが、ゾーンBの領域に比べ、ゾーンAでは動線軌跡の記録に乱れが生じていた。実際には小部屋

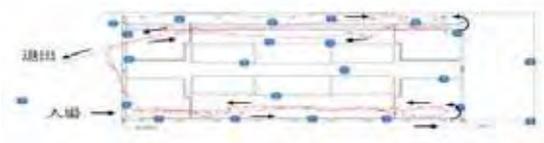


図4 単独作業員による動線軌跡記録

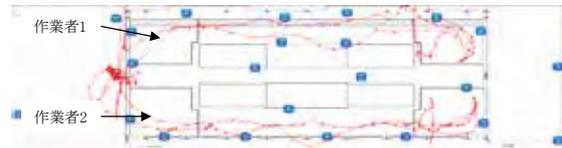


図5 作業員2名による動線軌跡記録(逸脱記録が多かったもの)



図6 単独作業員による柵外歩行の記録

内部で作業をしていたにも関わらず、動線軌跡では小部屋内部から飛び出して記録される誤計測が生じた。小部屋は工場の屋内に設置されており、ゾーンA側は工場家屋の壁側に接していたため、観察窓側付近に鉄骨支柱が多く設置されていた。そのため、この金属の鉄骨支柱が電波の反射を生じさせ、作業員の位置測位に影響を与えていると考えられる。複数の作業員が同時に作業を行った場合は、作業の記録そのものは滞りなく記録が可能であったが、逸脱に関しては単独作業の場合よりも多く見られ、精度が低下していることが示唆された。

一方、複数作業員の場合に誤計測箇所が発生した現象は、測位固定局からの測距値が実際よりも長い距離で計測されたことによる。原因は、測位固定局から作業員の間へ搬送用ロボットが設置されており、ロボットが稼働した時、作業員1が金属のロボットアームと金属の自動洗浄機の影に隠れ、UWB固定局が電波の直接波を受信することができなくなり、反射波を受信したためと思われる。すなわち、作業員と固定局の間に障害物が入ると、直接波の遮蔽が起きることが示唆される。

本実験の計画段階では、作業員が洗浄機室の柵外を歩行することを想定しておらず、UWB固定局を洗浄機室柵外に設けなかった。小部屋を突き破る誤った位置測位はこれが原因と推測された。より精度の高い測位結果を得るためには、固定機の数を増加し動線の両側からの測位を可能にすることが重要であると思われる。今後は、周囲の金属物の所在等の環境条件と作業動線を考慮した固定機の配置が重要となる。

1)-5 結論

a. UWB アクティブ RFID システムにより、作業員がゾーンをいつどのように移動したのか、動線軌跡が適切な設置と運用によりおおむね正確に計測できることを

確認した。

- b. 複数の作業員による同時作業も UWB アクティブ RFID システムにより測位可能であることが確認された。
- c. 本実験は、建屋、自動洗浄装置、搬送用ロボット等の電波反射が大きいとされる金属物の多い電波環境であったが、作業員の測位は比較的良好であったといえる。
- d. システムの精度は、作業場の電波伝搬環境に依存することが明らかとなった。実験前に UWB 固定局と移動局のプレ測位試験を行う、固定器数を増加する等の対策で改善することが明らかとなった。
- e. 作業員の動線軌跡が、誤計測により途切れてしまう、通信経路の遮蔽が起これ反射波を受信して搬送用ロボットのエリアに動線データの軌跡が飛び出す等の対策には、作業員の測距データから動線軌跡データを測位マップに描く際に座標上に禁止エリアを指定する機能の追加等のソフトウェアの改善が有効であることがわかった。
- f. 鉄骨支柱に電波が反射して位置測定に影響を与えることへの対策としては、電波吸収体を取り付けることが考えられる。
- g. 重要な測定箇所には、固定局を多く取り付けることで、作業員の動線軌跡の精度を上げることが可能であると考えられる。

2) 実験 2 モバイルロボットの存在する現場での実験

2)-1 背景

新しいリスク低減方策として、ビーコンセンサを用いた SSS の構築を目的とした。ビーコンを選択した理由としては、作業員のバイタルデータのリアルタイムな検出の可能性を考慮したものである。これにより、万が一作業員の健康状態に変化が生じた場合であっても、迅速な救出が可能となる。また、熱中症や脱水症状、その他の身体的異常の早期発見・早期対処も可能となる。

本実験では新たに構築したビーコンセンサによる位置情報システムの精度の検証を行う。また、実用化の目的が立ち、適用した場合に作業性の悪化がないかどうかを確認するため、移動機の存在する作業現場における作業効率への影響の有無を、行動分析学的手法にて確認した。

ビーコンセンサの精度の検証実験では、トンネルの形を模した形状に受信機を配置し、位置情報の確度を精査するとともに、他の位置情報システムである UWB センサシステムの検証結果との精度比較を行った。作業員の作業効率に関する実験では、行動分析学的介入を行い、PC 上でのボタン押し作業による作業効率に対する介入の有効性検証に関する実験を行った。

2)-2 方法

実験協力者： 社会人 10 名（男性 5 名，女性 5 名）

実験用作業現場： 労働安全衛生総合研究所機械安全システム実験棟内にトンネル建設現場を仮想した縦 10m×横 5m の作業現場を作成した（図 7）。

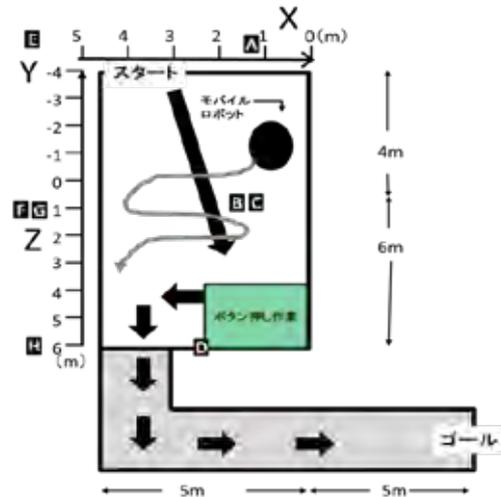


図 7 労働安全衛生総合研究所機械安全システム実験棟内のトンネル建設現場を仮想した作業現場



写真 5 トンネル内で使用する建設機械を想定したモバイルロボット。ロボット本体（左）及び搬送荷物上部にビーコンセンサを取り付けた後のロボット（右）

実証実験用現場には、トンネル内で使用する建設機械を想定し、モバイルロボット（写真 5 左、オムロン LD-OEM、オムロン株式会社、京都）を導入した。モバイルロボットは、製造現場で使用する場合には、通常 1.35～1.8m/sec.での走行が推奨されているが、ビーコンセンサの通信環境では追従が不能な状況が生まれたため、0.9m/sec.での使用となった。実験協力者の位置確認のため、一部機能を改造したビーコンセンサシステム（写真 5 右、株式会社 WHERE、東京）を使用した。計測のため、実験現場は、1m 間隔で Y 軸 10 区画、X 軸 5 区画に仮想的に分割した。ロボットのホームポジション座標は (0, 0) とした。ロボット上部には搬送用荷物を搭載し、その上にビーコンセンサを配置した。ビーコンセンサシステムは、固定の受信用アンテナ 8 個（図 7 中の A～H、写真 6 左）及び各実験協力者が着用する保護帽に内蔵の送信用タグ（写真 6 右）から構成された。受信機 C 及び G はトンネルの形状を考慮し、他よりも高い位置に設置した。作業員及びモバイルロボットの位置の推測には、最も電波強度の高い固定器 3 つを選択する 3 点観測法が用いられた。

ビーコンセンサシステムと先行研究（実験 1 参照）で

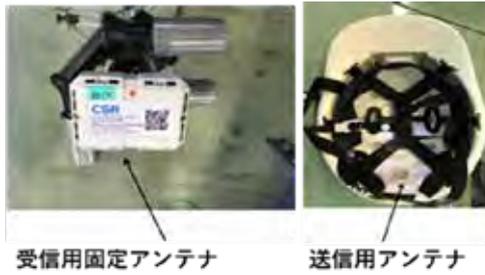


写真6 ビーコンセンサシステムの受信用固定アンテナ（左）及び各作業者着用の保護帽に内蔵された送信用アンテナ（右）

用いたUWBセンサシステムとの精度の比較の検証のために作業現場を1L, 1R, 2L, 2Rに4分割した(図8)。ビーコンセンサシステムのログ画面(写真7左)と定点カメラの映像(写真7右)を比較し、ビーコンセンサが示すエリアと実際のエリアが一致するか否かを検証した。

行動分析学的実験の手順: 実験がスタートすると実験協力者はボタン押し作業場に行き、椅子に座り机上のPC画面に現れるボタンを押す(図9上)。10回押し終えたら通路を通り、ゴールへ向かう。ここで1試行が終了となり、終了後は自記式アンケートに回答したあとに再びスタート地点に戻り、次の試行を行った。実験協力者はこの作業をそれぞれ10試行繰り返し行った。トンネル建設現場における作業(建設機械の操作等)を想定したが、本実験では実際の作業ではなく、短い時間で作業時間を測定可能にするためにPC上でボタンを押す作業を行った。ボタン押し実験の作業の流れ及びPC画面の模式図を図9下に示した。

行動分析学的介入の効果検証のため、実験協力者をフィードバックあり群とフィードバックなし群にそれぞれ5名に分けた。フィードバック条件群においては、

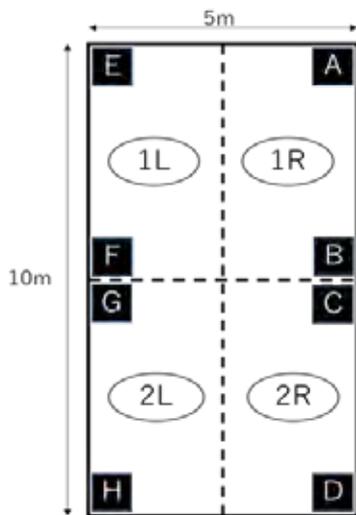


図8 ビーコンセンサとUWB比較用に分割した実験現場



写真7 コンセンサシステムのログ画面（左）と定点カメラによるモバイルロボット映像（右）

ボタン押し作業にかかった時間がPC画面上にある「Time」ボタン位置に表示された。また、1試行が終わる毎に報酬を与えた。一方、フィードバックなし条件群では、ボタン押し作業の時間は表示されず、報酬も10試行がすべて終了した時点で10個まとめて与えた。報酬は、異なる種類のティーバッグを詰め合わせた籠から好みものを選択する方法を採用した。フィードバックあり群、フィードバックなし群のそれぞれの総時間を比較して、フィードバックの効果を検証した。

スタートボタンを押してから10回目のボタンを押すまでにかかった時間をボタン押し作業の反応時間、ロボット稼働時と非稼働時のスタートからゴールまでを総時

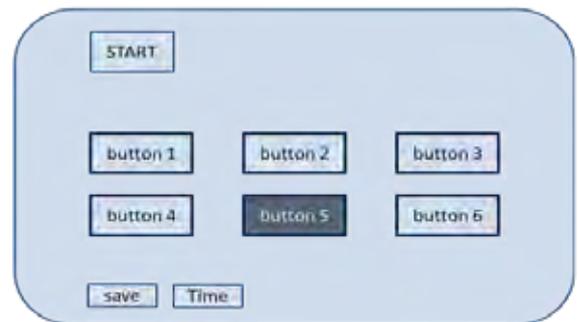
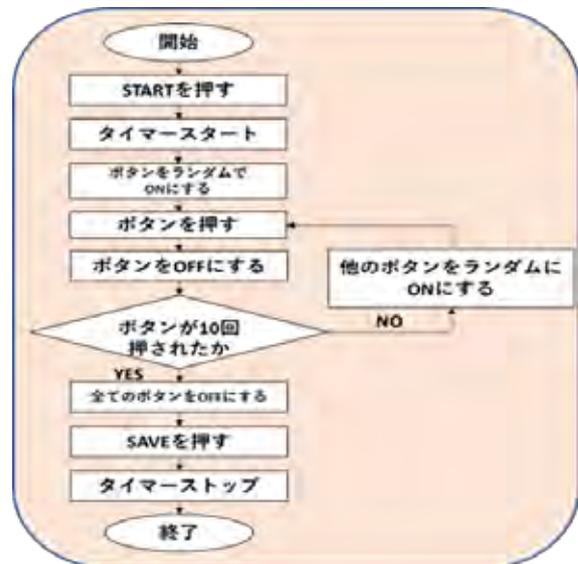


図9 ボタン押し実験の作業の流れ(上)及びPC画面の模式図(下)

表 1 ボタン押し実験の総時間

フィードバック	ロボット稼働	平均時間[s]
なし	あり	41.97
	なし	41.33
あり	あり	46.00
	なし	45.79

間として算出した。

ボタン押し作業課題の開発にあたり、言語は C#, 開発ソフトは Microsoft Visual Studio Community 2017 Version 15.5.0 を使用した。作業中のボタン押し反応の測定時間は 0.1 秒ごとにカウントした。

2)-3 結果

ビーコンセンサの精度の検証実験：ログデータを 5 秒間隔で抜き出し、ビーコンセンサのログ画面と定点カメラの映像を比較した。ログ画面と定点カメラでの存在検地をおこなった結果、①ログ画面と定点カメラで同じエリアに存在している、②ログ画面と定点カメラで存在エリアに一つ「ズレ」が生じている（隣のエリアに存在している）、③全く別のエリアにいる、の 3 つ分類し、すべての存在位置を 100% とし、それぞれの分類における割合を算出した。その結果、①同じエリアに存在する割合は 42%、②隣のエリアに存在する割合は 41%、③全く別のエリアに存在する割合は 17% であった。

行動分析的介入実験：ボタン押し実験の総時間はフィードバックあり群では 46.6 秒、フィードバック無し群では 41.6 秒であり、両群間に差が認められた（表 1）。作業現場にモバイルロボットがいる場合は、フィードバックあり条件群では平均 85.98% に減少したが、フィードバックなし条件群では平均 97.12%、フィードバックあり条件群が有意にボタン押し時間が短縮した。

フィードバックあり群及びフィードバック無し群のどちらにおいても、ロボット稼働の有無による有意な差は認められなかった（データなし）。

フィードバックあり群、フィードバックなし群の各群における実験協力者 5 名の総時間の平均の推移を図 10 に示す。また、1 回目の試行を 1 とした総時間の割合の

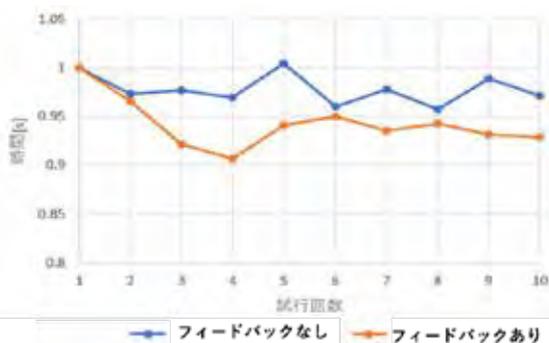


図 10 総時間の平均の推移

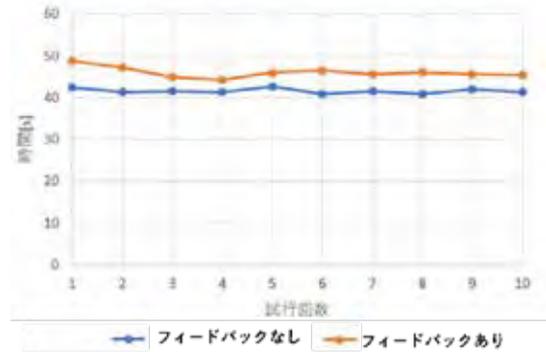


図 11 総時間の割合の変化

推移を図 11 に示す。

総時間の平均の時間的推移には両群間に差はみとめられなかった。しかしながら、図 11 に示すように、フィードバック条件群の総時間の割合の変化については、フィードバックなし群と比較して有意に大きいという結果が得られた。

2)-4 考察

ビーコンセンサの精度については、安全を担保するシステムとしては十分な精度が出なかった。先行実験において使用した位置計測システムである UWB では 80% の精度で実験協力者の移動軌跡を記録することができた。しかしながら、UWB は導入コストが高く、タグが大きいというデメリットがある。SSS では、作業者の位置情報の他に体温や脈拍などのバイタルサインをセンシングし、作業者の熱中症や体調不良を検知することを将来的には想定している。そのため、UWB に比べて導入コストが安く、タグが小さいビーコンセンサの方が SSS の必要要件を満たしているといえる。今後は、固定器の数を増やす等の対策を行い、精度を上げて行く必要があると思われる。

行動分析学介入実験においては、フィードバックあり条件群では、試行回数が進むごとに作業時間が短縮することが明らかとなった。また、作業を行った際にフィードバックを与えることで作業効率も上がる可能性が示唆された。この結果は、作業に関して即時に何らかのフィードバックを与えると作業がより効率的に行える可能性が示唆されたものである。

今回の実験ではロボットの存在の有無が作業に影響を与えることはなかった。今回用いたロボットの条件であれば、人の作業に影響を与えないことが示唆された。しかしながら、今回の実験では、センサの設定と実験環境条件が合致せず、モバイルロボットを通常よりも遅い速度で用いたため、今後はモバイルロボットの速度も考慮した条件で検証を行っていく必要がある。また、ロボットの大きさが実験協力者の行動に影響を与える可能性も考えられるため、今後は異なるサイズでの実験も行う必要があると思われる。

作業時の即時のフィードバックを与えることで、より効率的な作業が可能になることが示唆された。SSS 導入時に報酬の種類、大きさや頻度を変化させ、さらに検証

を進めることで、実際の作業現場において安全な行動を増やしつつ作業効率の強化を図ることが可能となる。また、繰り返しの操作を行うことで、システムへの慣れ等を定量的に評価することも今後必要であると思われる。

各条件群の平均総時間には差がみとめられたが、実験の時間的制限から、実験協力者のフィードバックあり条件群は全員女性であり、フィードバックなし群は全員男性になってしまったため、性別による差が出てしまった可能性もあると考えられる。今後は、性別による差が出ないように各群の性別のバランスを考慮し、さらなる検証を行う必要がある。

本実験で用いたボタン押し作業は、試験的ではあるものの、作業効率を測定する有用な課題であるといえる。今後は、さらに様々な実証実験現場で適用可能になるように改良を加えていく予定である。また、より実際の作業に近い課題の構築も念頭に開発を進めていく必要がある。

作業に関しては、何らかのフィードバックを与えると作業がより効率的に行えることが示唆された。作業現場における SSS 導入に対する使い勝手の評価方法として、行動分析学的評価が果たす役割が大きいことが明らかになった。

3) 実験 3 トンネルにおける 3D レーザーレーダーによる位置計測の実験 - ロストの検証

本実験では、SSS の構成要素として隙間のない計測が可能となる Time of flight (TOF) 方式を用いた 3D レーザーレーダーを使用し、従来困難とされていた対象物の形と大きさの識別の精度を検証した。TOF 方式とは、距離測定の一つの方法であり、物体からの反射の時間差により計測するものである。

3)-1 背景

本研究では、SSS を建設・土木業、特にトンネル建設現場に導入し、安全確保の有効性検証を行うことが最終目的である。現在までの実験で、SSS を構成する機械と作業者の位置情報把握のための機器選択を行ってきたが、今回は、画像による行動モニタリングシステムの機能性の検証を行った。リスク低減効果の検証に必要なリスクポイント評価のための検証ステップとして、ア) 作業員 1 人または建設機械 1 台、イ) 作業員複数人及び建設機械 1 台、ウ) 作業員複数人及び建設機械複数台の環境が想定できるが、本実験では、糸口としてア) の作業環境における位置把握性能検証を行った。検証項目として、人と建設機の検知と判別の可能性、加えて検知物体を人と機械に判別できるかどうか、及び位置情報の精度、すなわち物体をロストなく検知し、検知物体を同一人物としてトラッキングできるかどうかを行動モニタリングシステムで検討して表 2~4 に示す。なお、表の中の記号は、○：解析が可能であった。×：解析が不可能であった。△：解析が条件付きで可能であったことを示す。

表 2 作業員と建設機械の特定

機能	解析	課題
人の検知	○	分裂体を人と認識
重機の検知	○	サイズのみでの分類ではミスが発生

表 3 特定した作業員と建設機械を検知し続ける

機能	解析	課題
重機の判定	○	人の判断で後
旋回中心を求める	△	サイズのみでの分類ではミスが発生
旋回半径を求める	○	重機種別の認識が必要

表 4 作業員と建設機械の距離計測

計測環境	測定対象	検出対象	ICT機器
高温多湿、定置式の機械、複数作業員	作業員	作業員の固体識別、作業員の位置と移動	UEBアクティブタグ
広大領域、移動機械、複数作業員	作業員、機械	作業員の固体識別とバイタルサイン	ビーコンセンサ
広大領域、高温多湿、粉塵環境、移動機械、複数作業員	作業員、機械	作業員と移動機械の固体識別、作業員の位置と移動軌跡、移動機械の位置と最大可動範囲	3Dレーザーレーダー

3)-2 方法

実証実験は、建設会社 A 社の山岳トンネル施工現場で行われた。トンネル坑内には掘削用建設機械やコンクリート吹き付け車が作業員と同時に存在し、ほかにもダンプやミキサー車等が頻繁に入退出している状況である。切羽先端では 5~6 人がチームとなり掘削作業にあたっている。

人と建設機械の SSS の構成要素として、行動モニタリングシステム (写真 8)、コニカミノルタ株式会社、東京) を用い、建設機械の作業範囲の把握、人と建設機械の判別、及び位置関係の把握、すなわち実際に動いている人と建設機械の計測を行った。当該行動モニタリング



写真 8 行動モニタリングシステム

システムは、3DのTime of Flight (TOF3D)方式の3D-Light Detection and Ranging (LiDAR)カメラ、サーマルカメラ及び可視カメラの組み合わせからなり、このシステム導入により対象物の形を把握し、同時に対象物までの距離計測が可能となる。

本実験で使用の行動モニタリングシステムは、複数のカメラやセンサ同士を連携させることで屋外使用を可能にするシステムである。このシステムにより、異常検知及び通知、予知予測に繋がる解析のための作業者と建設機械の位置・大きさ・温度データ等の取得が可能となった。

入力機器：行動モニタリングシステムは入力機器として、可視カメラ、ドイツ Mobotix 社製サーマルカメラ及び3D-LiDARを組み合わせて使用した。データの統合・解析・出力：各機器のデータは、Video Management Software (VMS)を介して統合・解析を行い、結果を出力する。提供する情報は、動画とそれにタグ付けされた行動分析データとなる。作業者及び建設機械の位置を正確に捉えるための技術：行動モニタリングシステムは、センサ動画データを保存・蓄積・管理するVMSを活用したセンサーフュージョンを用いた。この技術により、屋外環境であっても正確な行動分析データ取得を実現する。以上が行動モニタリングシステムの仕様となる。

本稿で述べられている語句の定義は以下のとおりである。検知とは、動体検知アルゴリズムを用いて、3Dレーザーレーダーより得られる点群データから一定画

素数以上の近接する点群の塊を動体として捉え、検知IDが付与された動体情報を得ることであり、動体情報としては大きさ、位置等を取得した。ロストとは、3Dレーザーレーダーの画角内にあり、検知状態であるはずの物体が非検知状態となることを指す。また、トラッキングとは、検知した物体を同一人物として検知し続けることであり、動体検知アルゴリズムにより、前のフレームの検知物体の中から同一物体である可能判定を行った結果、同一のIDが割り当てられ、それが継続している状態をいう。リスクポイントとは、作業者と建設機械の位置情報（インプット）が同じ場所を移動しているが、たまたま同じ時間でないことで接触災害は発生していないが、同時刻に同じ場所を移動することで接触災害の発生するリスクがあるポイント（アウトプット）と定義する。

データ分析：位置把握システムの性能とリスクポイントの評価のため、始めに位置把握性能の確認を行った。主として、検知エリア内の建設機械と作業者検出数の増減の有無及び建設機械と作業者検出後のロストの有無を観点として評価した。次に、作業者と建設機械の接近距離計測、すなわちリスクポイントの確認として、接近距離算出時の課題の有無、接近距離算出に必要な機能の抽出について評価した。それぞれの指標について、録画を見て分析を行った（表5）。

3)・3 結果

作業者と建設機械の特定：特に、人と建設機械を分類して検知できるかどうかを検証した。結果、人の検知及び建設機械の検知とも分析の結果、良好な検知が達成で

表5 ロスト分類におけるID変化

	説明	物体数の変化	ID変化
①結合ロスト	2つ以上の物体が接近することにより、結合された1つの動体として検知され、結果、動体数が現象する	複数→1	結合前の物体IDが結合後のIDとなる
②ID遷移ロスト	結合ロストに付随し発生する 結合ロスト状態の動体を構成する一部の動体が移動等により再び個別の動体として検知される際に、新たなIDが付与され結合ロスト前の動体IDが消失 * 現行の動体検出アルゴリズムには短時間の結合ロスト前後ではIDが保持される仕組みがあるが、機能しない現象	変化しない（結合ロスト前後で）	異なるIDに変化
③画素不足ロスト	検知状態にある動体の検知が素が移動に伴い不足することで発生する * 動体が3Dレーザーの画角境界に移動する、あるいは遮蔽物に動体の一部が遮られて移動するシーンで発生する	1→0	なし（物体そのものがロスト）
④死角ロスト	検知状態にある状態が重機の裏側などの死角に移動し、動体全体が遮られることに伴い発生する * 死角ロストは厳密には課題に分類されない（原理上、完全に遮蔽された物体は検知状態にはならない）	1→0	なし（物体そのものがロスト）

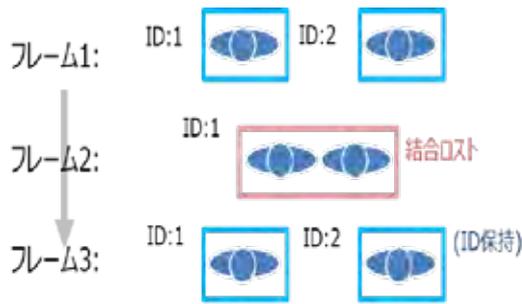


図 12 結合ロスト

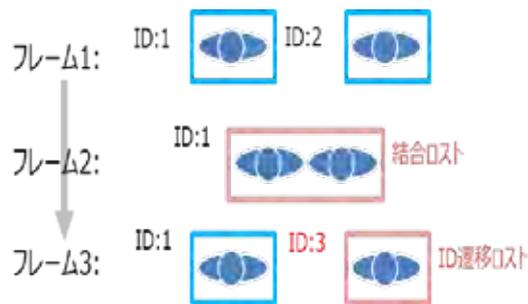


図 13 遷移ロスト

きた (表 2)。しかしながら、車両等の大型物体の各部を多数の動体の集合として検知することにより、ID が付与された動体が大量に発生する現象である分裂現象が生じた。分裂現象では、動体ごとの境界が安定しないため、結合ロストや ID 遷移ロストが併発することで、新規 ID が付与され続け、一物体として検知できなくなる。

特定した作業者と建設機械のトラッキング：特定した作業者と建設機械を検知し続けることが可能であるかどうかについて、すなわちトラッキング性能についての検証を行った (表 3)。結果、標的物体については、画素不足 (遮蔽) によるロストが発生した。すなわち、標的物体が、何かの物体の陰に隠れてしまった場合は、3D レーザーレーダーより得られる点群データから一定画素数以上の近接する点群の塊を動体として捉える事が出来なくなり、検知 ID が付与された動体情報を得ることができなくなった。また、標的物体と何かの物体が接触した場合には、本来は 2 つの物体の結合として検出すべきところ、一つの点群の塊と判断して検出してしまい、正しい検出ができなかった。したがって以前に付与された検知 ID は結合により消失し、その後のトラッキングについても、いったん結合した標的物質がその後分離しても、分離した標的物体には新たな ID が付与される現象 (ID の遷移) が発生したため、不能となったと考えられる。作業者と建設機械の距離計測：建設機械の判別に関しては、分析者の判断により達成された (表 4)。旋回中心を求める分析では、検知結果による誤差が発生したものの、少なくとも録画後の解析においては検知結果から旋回中心を求めることが可能であった。旋回半径については、建設機械種別の認識が可能であれば、半径も

正しく求めることが可能であることが明らかとなった。すなわち対象となる建設機械モデル仕様の実測を繰り返し行い、データベースを作成し、それを利用することで特定が可能であることがわかった。

ロスト分類による ID 変化：今後のシステムの改良に必要な項目の一つにロストの解消が最も重要と考え、ロスト現象を原因別に 4 つに分類した (表 5)。加えて、課題となるもう一つの現象を以下に解説する。

結合ロスト：2 つ以上の物体が近接することにより、結合された 1 つの物体として検知されるロスト。その結果、動体数が減少する。システム上のカウンタは、2 物体数以上から、結合した時点で物体数が 1 となり、カウンタも複数から 1 となる。結合が解除されると、結合前のいずれかの物体 ID が結合後の ID となる (図 12)。

遷移ロスト：結合ロストに付随し発生する場合のあるロスト。結合ロスト状態の動体を構成する一部の動体が、移動等により再び個別の動体として検知される際に、新たな ID が付与され、結合ロスト前の動体 ID がロストする。現行の動体検知アルゴリズムには、短時間の結合ロスト前後では ID が保持される仕組みがあるが、これが機能しない現象を指す。物体数は結合ロスト前後では変化しないが、結合後は異なる ID に変化する (図 13)。

画素不足ロスト：検知状態にある動体の検知画素が移動に伴い不足することで発生するロスト。物体数は 1 から 0 に変化する。検知 ID は動体そのものがロストするため、消失する。本ロストは、動体が 3D レーザーレーダーの画角境界に移動する、あるいは遮蔽物に動体の一部が遮られるように移動するシーンで発生する現象である。死角ロスト：検知状態にある動体が建設機械の裏側などの死角に移動し、動体全体が遮られることに伴い発生するロスト。物体数は、1 から 0 に変化する。検知 ID は動体そのものがロストするため、消失する。このロストは、本システムの原理上、完全に遮蔽された物体は検知状態になりえないため、システムを改良する際の対象とはならない。ただし、3D レーザーレーダカメラ及び可視カメラの設置台数を増加し、死角の無いように物理的に対策することで解消すると思われる。

ロスト以外に、付与された検知 ID が正常に機能しないというシステム上のエラーが生じた。そのため、本エラー現象を 5 つ目の不具合として以下に挙げる。

分裂現象：車両等の大型物体の各部を多数の動体の集合として検知することにより、ID が付与された動体が大量に発生する現象を指す。動体ごとの境界が安定しないため、結合ロストや ID 遷移ロストが併発することで、新規 ID が付与され続け、一物体として検知できなくなる。とくに大型車両で発生しやすいという特徴がある。

3)-4 考察

本実験では、トンネル建設現場に SSS を導入し、安全確保の有効性検証を行うことを最終目的とし、本解析では安全性の確保/向上に大きく影響する、位置確認システムである行動モニタリングシステムの性能の確認を

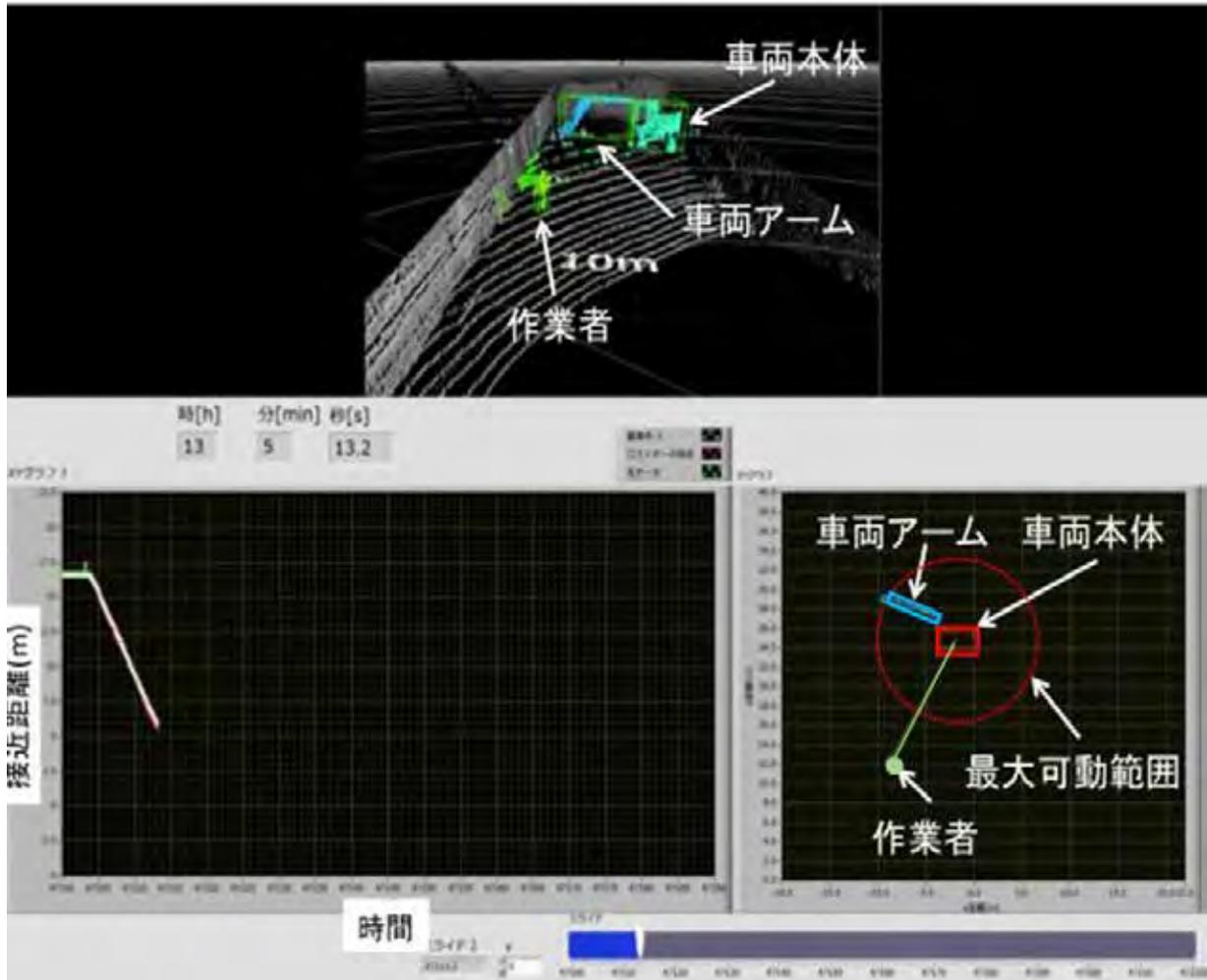


図 14 リアルタイム計測における出力画面イメージ図

メインとして、一部リスクポイントの確認（作業者と建設機械の距離を把握する）を行った。具体的には、人と機械の位置を把握する事が可能であるかどうか焦点を当てた。すなわち、作業者と建設機械を分離して検知し、特定する、特定した作業者と建設機械を検知し続ける（トラッキング）、を今回 SSS の構成要素として導入した位置確認システムで実現の可能性を中心に検討した。

リアルタイム計測の必要性：本研究では、最終目的達成のための糸口として、行動モニタリングシステムを用いた作業者と建設機械の位置確認とリスクポイントの確認を行った（図 14）。録画資料を対象とした解析においては、必要要件をほぼ達成する結果が得られたが、作業現場における作業者の安全確保のためには、引き続き図 20 にみられるようなリアルタイムでの計測の必要性があると思われる。すなわち、現場での実装を実現するためには、作業者と建設機械の位置把握がリアルタイムで計測可能なシステムの高度化を図ることが必要となる。以下は、必要要件に関する考察である。

作業者と建設機械の特定：作業者と建設機械の特定に関しては、後解析により必要要件は全て達成できた。し

かしながら、建設機械においては、分類をサイズのみによると分類ミスが発生することが明らかとなった。今後の対策は、サイズ以外で物体を分類し、同一個体として処理するアルゴリズムの開発が必要と思われる。また、特に大型車において分裂現象が発生した。対策として、大型車の外観の特定可能な各部位に反射板を塗布し反射率の違いによって、その実測データを蓄積して建設機械の形態を処理するアルゴリズムを開発する予定である。

特定した作業者と建設機械のトラッキング：作業者と建設機械のトラッキングに関しては、画素不足のロストが課題として挙げられた。今後の対策として、位置確認システム機器の数を増加も視野に入れ、機器配置の最適化を行うことが有効と思われるが、その際には、複数台の検知結果統合システムを新規に開発する必要があると思われる。次に、発生した結合ロストは、クラスタリングアルゴリズムの改修または動体のみを検知するアルゴリズムを開発することによって解決することが出来ると思われる。

作業者と建設機械の距離計測：検知結果と建設機械パラメータから旋回中心を求める必要性が挙げられた。そ

のため、今後は検知結果と機体情報から旋回中心を求めるアルゴリズムの開発及び作業フローを考慮した建設

機械パラメータの取り込み方法の検討が必要と思われる。また、リアルタイム計測の開発が急務といえる。解析の結果、必要要件のいくつかは録画後の解析にて達成出来たといえる。

しかしながら、いくつかの測定においては、課題が残る結果となった。結果、作業者と建設機械の位置情報はある程度とらえることができたものの、必要要件のいくつかは録画後の解析での達成にとどまり、特にリアルタイム計測においては、課題が残る結果となった。

3)-5 結論

本実験により、3つの課題が明らかとなった。

実験1～3を行う上で、共通の課題として、「リアルタイム位置把握」の必要性が示唆された。また、位置把握性能の課題として、「建設機械の分裂現象」と「作業者と建設機械のロスト現象」の解決が必要である。リスクポイントの確認課題としては、「建設機械の車種特定」と「建設機械動作中心の算出方法」の検討がさらに必要と思われる。本実験では、主に現場で作業する動体としてショベルカーを選択したが、今後はより多くの建設機械を対象に検討を重ねていく必要がある。

人と機械が同時に存在し、隔離や停止の安全原則が基本的に適用が困難なトンネル、建設現場や農業用地等の作業現場に対しては、最終的にはリアルタイム性が求められる。本実験で使用した位置確認システムでは、人による判断を利用した場合には、録画を使用した視認での解析は可能であったが、今後は災害の未然防止の観点からは、現場の状況把握を自動で行うアルゴリズム開発が必要である。

作業者と建設機械の位置情報は捉えることができたが、必要要件のいくつかは録画後の解析での達成にとどまり、リアルタイム計測においては、課題が残る結果となった。

3. まとめ

本実験の結果から、次のような事項が明らかとなった。

- ①UWBは精度よく位置情報が獲得できるが、金属物等の周囲環境により対策が必要である。
- ②ビーコンセンサは、手軽で実用的ではあるが、精度が

UWBより低いため位置情報を獲得するのに用いるには課題が多く残る結果となった。しかしながら、バイタルサインの獲得用への使用が期待される。

③3Dレーザーレーダーに関しては、作業者と建設機械の位置情報は捉えることができたが、必要要件のいくつかは録画後の解析での達成にとどまり、リアルタイム計測においては、課題が残る。

ICT機器をSSSに導入する際には、計測環境、計測対象の形状や数、検出対象などを考慮して適切な機器を選択しなければならない。今回の実験では、表6に示すように、それぞれの計測環境における測位対象と検出対象の異なる実証実験現場において、適切と思われるICT機器を選定して実験を行った。その結果、それぞれのICT機器の性能や特徴に合わせた選定を行うことにより、期待されるリスク低減効果をえられることが分かった。反面、性能や特徴に合わない選択を行った場合は、期待されるリスク低減効果を得られない場合も確認された。将来的には、それぞれのICT機器を組み合わせる事により、それぞれの特徴を生かしたSSSを構築し、人の注意力に大きく依存している残留リスクに対する確定性の高いリスク低減効果が得られる方策を構築することができる。

参 考 文 献

- 1) 梅崎重夫, 清水尚憲, 濱島京子, 木下博文, 平沼栄浩, 宮崎浩一, 石坂清: 統合生産システム (IMS) におけるリスク低減プロセスの基礎的考察, 労働安全衛生研究, 1巻, 3号, pp. 219-229, 2008.
- 2) 厚生労働省都道府県労働基準監督署 (一社) 日本労働安全衛生コンサルタント会, WEBマニュアル, 製造業向け未熟練労働者に対する安全衛生教育マニュアル, 2015.
- 3) ISO12100:2010: 機械類の安全性-設計のための一般原則-リスクアセスメント及びリスク低減, 2010.
- 4) ISO11161:2007: Safety of machinery-Safety of integrated manufacturing system-Basic requirements, 2007.
- 5) 牧野良次, 熊崎美枝子, 松倉邦夫, 和田裕次: 事故のデータに基づくヒューマンエラー発生状況の調査, 安全工学, 51巻, 2号, pp. 106-112, 2012.
- 6) 厚生労働省: 都道府県労働局, 労働基準監督署, WEB手引き, ITを活用した新しい安全衛生管理手法のすすめ方 IT活用の概要, 2009.
http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/gyousei/anken/index.html
- 7) 濱島京子, 梅崎重夫, 木吉英典, 中北輝雄: ITを活用した安全管理手法の概要と労働災害防止対策における位置付け, 電気評論, Vol.94, No.5, pp.29-35, 2009.
- 8) 濱島京子, 梅崎重夫, 木吉英典, 中北輝雄: ITを活用した安全管理手法の開発-安全要求事項抽出の容易化に配慮したシステム設計ガイドの提案, 労働安全衛生研究, 1巻, 2号, pp.119-130, 2008.

表6 計測環境別測位対象と検出対象

計測環境	測位対象	検出対象	ICT機器
高温多湿、定置式の機械、複数作業員	作業員	作業員の固体識別、作業員の位置と移動	UEBアクティブタグ
広大領域、移動機械、複数作業員	作業員、機械	作業員の固体識別とバイタルサイン	ビーコンセンサ
広大領域、高温多湿、粉塵環境、移動機械、複数作業員	作業員、機械	作業員と移動機械の固体識別、作業員の位置と移動軌跡、移動機械の位置と最大可動範囲	3Dレーザーレーダー

- 9) 厚生労働省平成 18 年度事業 実証試験報告書, IT を活用した新しい安全衛生管理手法の構築, 社団法人日本鉄鋼連盟, 2007.
- 10) 厚生労働省平成 19 年度事業 実証試験報告書, IT を活用した新しい安全衛生管理手法の構築, 社団法人日本鉄鋼連盟, 2008.
- 11) 厚生労働省平成 20 年度事業 実証試験報告書, IT を活用した新しい安全衛生管理手法の構築, 社団法人日本鉄鋼連盟, 2009.
- 12) C.E.Shannon, W.Weaver: The Mathematical Theory of Communication, 7/34, Univ.of Illinois Press, 1963.
- 13) 小野浩一: 行動の基礎, 豊かな人間理解のために, 改訂版培風館, 2006.
- 14) 北條理恵子, 清水尚憲, 濱島京子, 土屋政雄, 梅崎重夫: 作業現場における支援的保護システムの有効性検証-作業者への講堂分析的介入との併用における作業効率の向上を目指して-, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.117, No.365, pp.17-20, 2017.
- 15) 清水尚憲, 大塚裕, 濱島京子, 土屋政雄, 梅崎重夫, 福田隆文, 北條理恵子: 機械安全-支援的保護システム (Supportive Protective System: SPS) (統合生産システム (IMS) における SPS の RISC 低減効果, 日本機械学会論文集, 84 巻, 860 号, 17-00425, 2018.
- 16) 清水尚憲, 北條理恵子, 濱島京子, 梅崎重夫: 支援的保護システム-Safety by Design による包括的安全管理の必要性, 計測と制御, 58 巻, 6 号, pp.441-444, 2019.
- 17) 北條理恵子, 伊藤大貴, 松井克海, 濱島京子, 梅崎重夫, 土屋政雄, 福田隆文, 高橋聖, 清水尚憲: 支援的保護システム (Supporting Protective System : SPS) におけるリスク低減と作業効率に関する有効性の検証, 電子情報通信学会通信行動工学研究会(CBE), 2019.
<http://www.ieice.org/ken/paper/20180118511L/>