2017、2018、2019 年度
広大な作業空間における安全管理システム
開発部会報告書

2020 年 3 月

一般社団法人日本機械工業連合会

はじめに

本報告書は、2014 年度から 2016 年度までの 3 年間実施してきた「複合的作業空間における安全確保システム開発部会」において提案した“支援的保護システム（Safeguarding　Supportive System）”について、さらに現場に実施可能なシステムの構築を目指して、2017 年度から 2019 年度まで実施してきた研究の報告書である。

支援的保護システムとは、設計･製造者が **JIS B 9700**（**ISO 12100**）「機械類の安全性:設計のための一般原則」で述べるリスク低減方策（スリーステップメソッド：本質安全設計方策、安全防護及び付加保護方策、使用上の情報提供）で低減した後の残留リスクに対して、使用者がさらに作業現場でリスクを低減するための方策として位置づけており、従来の人の注意力に大きく依存しているリスク低減方策に対して、適切な ICT（Information and Communication Technology）機器を組み合わせて用いることで、より確定性の高いリスク低減効果を得ることを目的とする支援的な保護方策である。ただし、この支援的保護システムは、すでに現場で採用している保護方策や、教育･訓練･管理に代わるものではない。先行研究である「複合的作業空海における安全確保システム開発部会」での実験では、3 つの統合生産システムを対象に、支援的保護システムの構築を目的とした研究であったが、2017 年度から実施した研究では、対象となる機械を定置式から移動式に変えて、定常作業も対象とした支援的保護システムの開発と、導入時の作業者への精神的・肉体的負荷を検討することを目的とした。

2017 年度は支援的保護システムの有効性検証を目的として、行動分析学的介入法を用いた有効性検証実験を行った。この実験は、山岳トンネル施工現場を対象とした重機と人との共存／協調作業において、リアルタイムにお互いの位置測位を行いながら、安全作業を行うために、バイタルモニタービーコンシステムを用いた支援的保護システムを構築し、機械と人の位置測位に関する実験と移動する機械と共存して作業を行う時の負荷を行動分析学的実験で求めた。

2018 年度は A 社山岳トンネル施工現場において、トンネル施工工事現場における接触災害を防止するための 3D レーザーレーダーシステムを利用した支援的保護システム構築のための予備実験を行った。その結果、複数の作業者や重機の近接状態による ID のロスト現象が発生することがわかった。このロスト現象については、形状だけではなく、反射率の違いなどの情報を追加することにより発生を抑制できる可能性を確認した。

2019 年度は、クレーン作業現場における荷役作業の安全化を目的に、光通信システムと、バイタルモニターが可能なビーコンによる周辺作業者の ID 確認と､位置位置の測位実験を行った。また、同時にクレーン周辺作業者の経験の違いによる危険感受性に関する実験を行った。

近年、産業現場では、機械と人との共存／協調作業が必要な中で、ダイナミックに変化するリスクに対応した協調安全を確立するためには、リアルタイムな位置情報やそれぞれの ID 情報の収集が必要となる。

最後に、本部会が 3 年間の活動を実施する上で多くの関係者の方々にご協力を頂いたことに対して、ここに改めてお礼を申し上げます。

広大な作業空間における安全確保システム開発部会

主査　　清水　尚憲

2017 年度　広大な作業空間における安全管理システム開発部会委員名簿

	氏名	所属
主査	清水　尚憲	独立行政法人労働者健康安全機構　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
委員	福田　隆文	長岡技術科学大学　システム安全専攻
同	角　　保志	国立研究開発法人産業技術総合研究所 ロボットイノベーション研究センター ディペンダブルシステム研究グループ
同	北條理恵子	独立行政法人労働者健康安全機構　労働安全衛生総合研究所
同	清水　隆義	IDEC 株式会社 国際標準化・Safety2.0 推進部　Safety2.0 推進グループ
同	飯田　龍也	オムロン株式会社 営業本部　中部支店　営業技術課
同	井上　正也	オムロン株式会社 ＩＡＢカンパニー　営業本部　オートメーションセンタ
同	大塚　　裕	エクサコンサルティング
同	村田　記一	技研トラステム株式会社　技術部
同	畑　　幸男	機械安全実践技術促進会
同	志賀　　敬	SUBARU 株式会社 群馬製作所　総務部　総務課　大泉総務係
同	有田　　隆	富士通コンポーネント株式会社 マーケティング統括部　第二マーケティング部
同	越　　俊樹	アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー　CP 開発部
同	築山　和成	オムロン株式会社 技術開発本部　第 1 技術部
同	市村　欣也	株式会社三井 E&S マシナリー 運搬機システム事業部　企画管理室　戦略企画グループ
同	辻本　方則	株式会社ダイフク
同	伊藤　大貴	日本大学　理工学部　情報科学専攻
同	松井　克海	日本大学　理工学部　応用情報工学科
オブザーバ	加藤　大介	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	河端　　司	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	廣瀬　和弘	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	吉田　眞二	株式会社日本ジー・アイ・ティー　事業開発本部
同	寺田　　勝	株式会社日本ジー・アイ・ティー　ワイヤレス事業本部
同	荻野　　哲	株式会社新日本電波吸収体
同	堀内　　智	一般社団法人日本産業車両協会　業務部
事務局	佐々木幹夫	一般社団法人日本機械工業連合会
	野村　浩章	一般社団法人日本機械工業連合会

2018 年度　広大な作業空間における安全管理システム開発部会委員名簿

	氏名	所属
主査	清水　尚憲	独立行政法人労働者健康安全機構　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
委員	福田　隆文	長岡技術科学大学　システム安全専攻
同	角　　保志	国立研究開発法人産業技術総合研究所 ロボットイノベーション研究センター ディペンダブルシステム研究グループ
同	北條理恵子	独立行政法人労働者健康安全機構　労働安全衛生総合研究所
同	清水　隆義	IDEC 株式会社 国際標準化・Safety2.0 推進部　Safety2.0 推進グループ
同	飯田　龍也	オムロン株式会社 営業本部　中部支店　営業技術課
同	井上　正也	オムロン株式会社 ＩＡＢカンパニー　営業本部　オートメーションセンタ
同	大塚　　裕	エクサコンサルティング
同	村田　記一	技研トラステム株式会社　技術部
同	畑　　幸男	機械安全実践技術促進会
同	志賀　　敬	SUBARU 株式会社 群馬製作所　総務部　総務課　大泉総務係
同	有田　　隆	富士通コンポーネント株式会社 マーケティング統括部　第二マーケティング部
同	越　　俊樹	アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー　CP 開発部
同	築山　和成	オムロン株式会社 技術開発本部　第 1 技術部
同	市村　欣也	株式会社三井 E&S マシナリー 運搬機システム事業部　企画管理室　戦略企画グループ
同	辻本　方則	株式会社ダイフク
同	松井　克海	日本大学　理工学部　応用情報工学科
同	泉野祥太朗	長岡技術科学大学　工学部　機械創造工学課程
オブザーバ	加藤　大介	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	河端　　司	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	廣瀬　和弘	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	吉田　眞二	株式会社日本ジー・アイ・ティー　事業開発本部
同	寺田　　勝	株式会社日本ジー・アイ・ティー　ワイヤレス事業本部
同	荻野　　哲	株式会社新日本電波吸収体
同	堀内　　智	一般社団法人日本産業車両協会　業務部
同	米竹淳一郎	コニカミノルタ株式会社 産業光学システム事業本部　状態監視ソリューション事業部
同	菖蒲　鷹彦	コニカミノルタ株式会社 産業光学システム事業本部　状態監視ソリューション事業部
事務局	佐々木幹夫	一般社団法人日本機械工業連合会
	野村　浩章	一般社団法人日本機械工業連合会

2019 年度　広大な作業空間における安全管理システム開発部会委員名簿

	氏名	所属
主査	清水　尚憲	独立行政法人労働者健康安全機構　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
委員	福田　隆文	長岡技術科学大学　システム安全専攻
同	角　　保志	国立研究開発法人産業技術総合研究所 ロボットイノベーション研究センター ディペンダブルシステム研究グループ
同	北條理恵子	独立行政法人労働者健康安全機構　労働安全衛生総合研究所
同	清水　隆義	IDEC 株式会社 国際標準化・Safety2.0 推進部　Safety2.0 推進グループ
同	飯田　龍也	オムロン株式会社 商品事業本部　セーフティ事業部　セーフティ PMG
同	大塚　　裕	エクサコンサルティング
同	村田　記一	技研トラステム株式会社　技術部
同	畑　　幸男	機械安全実践技術促進会
同	志賀　　敬	SUBARU 株式会社 群馬製作所　総務部　総務課　大泉総務係
同	有田　　隆	富士通コンポーネント株式会社 マーケティング統括部　第二マーケティング部
同	越　　俊樹	アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー　CP 開発部
同	築山　和成	オムロン株式会社 技術開発本部　第 1 技術部
同	市村　欣也	株式会社三井 E&S マシナリー 運搬機システム事業部　企画管理室　戦略企画グループ
同	乾　　龍馬	株式会社三井 E&S マシナリー 運搬機システム事業部　企画管理室　戦略企画グループ
同	川尻　栄作	株式会社日立プラントメカニクス　開発統括センタ
同	松井　克海	日本大学　理工学部 応用情報工学科
同	久保　洸貴	日本大学　理工学部 応用情報工学科
同	石川　祥啓	専修大学大学院　文学研究科　心理学専攻
同	佐藤　歩輝	長岡技術科学大学　システム安全工学研究室
オブザーバ	加藤　大介	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	河端　　司	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	廣瀬　和弘	オムロンフィールドエンジニアリング株式会社 IB 事業本部 IB 東部エンジニアリング部 IB 東部 SE 課
同	吉田　眞二	株式会社日本ジー・アイ・ティー　事業開発本部
同	荻野　　哲	株式会社新日本電波吸収体
同	堀内　　智	一般社団法人日本産業車両協会　業務部
同	米竹淳一郎	コニカミノルタ株式会社 産業光学システム事業本部　状態監視ソリューション事業部
同	菖蒲　鷹彦	コニカミノルタ株式会社 産業光学システム事業本部　状態監視ソリューション事業部
同	石田　智也	カシオ計算機株式会社　技術開発センター　OIT 企画推進部
同	宮本　直知	カシオ計算機株式会社　技術開発センター　OIT 企画推進部
同	小野澤　宏	HOYA デジタルソリューションズ株式会社 情報システム事業部

	氏名	所属
同	河口　真也	HOYA デジタルソリューションズ株式会社 情報システム事業部
事務局	佐々木幹夫	一般社団法人日本機械工業連合会
	野村　浩章	一般社団法人日本機械工業連合会

目次

1　開発の背景と目的 1
2　開発部会の体制 1
2.1　本委員会 1
2.2　実証実験ワーキンググループ（WG） 1
3　開発スケジュール 1
4　2016 年度～2019 年度の成果 2
4.1　各年度の実証実験の目的 2
4.2　2017 年度の実証実験の概要（バイタルモニタービーコンシステムを利用した移動機械と人との位置情報測位予備実験） 2
4.2.1　実験の概要 2
4.2.2　実験機材 3
4.2.3　実験方法 4
4.2.4　結果と考察 6
4.2.5　結論 12
4.3　2018 年度の実証実験の概要（山岳トンネル施工現場におけるリスクポイント計測に関する予備実験） 12
4.3.1　実験の目的 12
4.3.2　実証実験の概要 14
4.3.3　実証実験結果 16
4.3.4　考察 19
4.3.5　結論 20
4.3.6　展望 20
4.4　2019 年度の実証実験の概要 21
4.4.1　実証実験の目的 21
4.4.2　実証実験における検証項目 21
4.4.3　実証実験日時と内容 22
4.4.4　実証実験場所 24
4.4.5　実証実験参加メンバー及び人数 25
4.4.6　実証実験場所のレイアウト 25
4.4.7　過去の実験からの改善点及び変更点 26
4.4.8　各実証実験用機器設置レイアウト 27
4.4.9　実証実験に使用した各 ICT 機器の詳細 37
4.4.10　実証実験結果と考察 41
4.5　2019 年度の行動分析実証実験の概要 55
4.5.1　行動分析実証実験の目的 55

4.5.2　行動分析実証実験における検証項目 57
5　国際規格化への対応 61
6　3 年間の総括 62
7　終わりに 63

1　開発の背景と目的

国際安全規格で **ISO12100/JIS B 9700**（機械の安全性 – 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）による安全確保の原則は、本質的にリスクを除去または低減する方法、危険源と作業者の作業エリアを分離する方法、危険状態が発生している場合に、作業者を危険領域に近づけないようにするか、作業者が危険領域に侵入する際は、危険状態を解除する方法を採用することで、危害発生のリスクを低減している。

しかし、実際の機械設備では、危険点近接作業（作業者が機械の可動部を停止させずに可動部に近接した状態で行う運転確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃、除去などの作業）があるため、これらの原則のみでリスク低減を実施するには困難な場合がある。さらに、複数の機械を複合的に組み合わせた統合生産システム(Integrated Manufacturing System:IMS)では、機械設備を組み合わせることによる新たなリスクが発生しており、危険点近接作業だけではなく、定常作業時においても、人の注意力に大きく依存した方法でリスクを低減しているものがある。本研究では、2017 年度から 2019 年度まで実施した先行研究において開発した支援的保護システムの高度化と適用時の作業負荷について検討を行うことと併せて、国際規格 **ISO/TR 22053**:Safegurging supportive system（支援的保護システム：SSS）の作成作業で、必要な関連情報を提供することを目的とする。

2　開発部会の体制

開発部会は、本委員会及び実証実験ワーキンググループ（WG）の体制とした。（**図 1**）

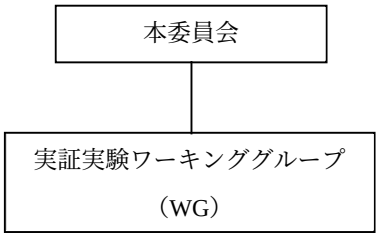


図 1　開発部会の体制

2.1　本委員会

全委員が参加し、WG で検討した事項の報告を受け、必要により意見を述べる。

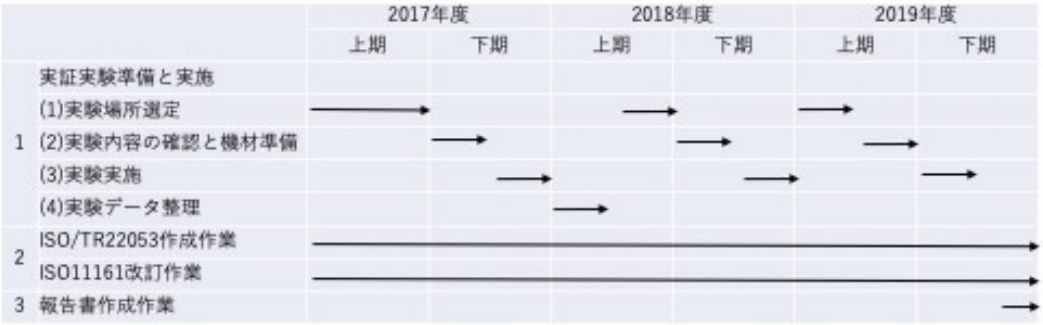
2.2　実証実験ワーキンググループ（WG）

“広大な作業空間における安全管理システム”を実際の作業現場に構築してデータを集め、システムの実現性とその効果を検証する。

3　開発スケジュール

概略の開発スケジュールは**表 1** の通りである。

表 1 開発スケジュール



4　2016 年度～2019 年度の成果

4.1　各年度の実証実験の目的

2014 年度から 2016 年度までの実証実験では、「複合的作業空間における安全確保システム開発部会」が主に定置式の機械に対する非定常作業を対象にした入退出管理について、IoT 機器を利用した支援的保護システムを構築し、リスク低減効果の検証を行った。「広大な作業空間における安全管理システム開発部会」では、これらの成果をもとに、作業領域で対象となる移動式の機械の動きとともに、作業者の位置情報の測位を追加検討した。

さらに、開発した支援的保護システムを適用する際に生じる作業負荷について検証を行い、作業負荷を低減するための要件について行動分析学的手法を用いた考察を行った。

2017 年度は、2018 年度に実施予定の山岳トンネル環境での人と機械の接触事故に対するリスクを低減するための支援的保護システム開発のための予備実験を行い、次年度開発するシステムの関連情報を収集することを目的とする。

2018 年度は、3D レーザーレーダーシステムを利用した位置測位システムを使用した支援的保護システムを構築し、山岳トンネルにて実証実験を実施することで、視界が得にくい粉塵環境下における位置測位のあり方について検証を行う。

2019 年度は、クレーンの荷役作業環境下において、3 次元に移動する危険源（クレーンの吊り荷）と作業者の位置測位実験を行う。ここでは、位置測位のための ICT 機器として光通信システムを採用する。また、作業者のバイタルサインの情報を得るための ICT 機器としてバイタルモニターが可能なビーコンシステムとして、バイタルモニタービーコンシステムを採用する。併せて、熟練作業者と未熟練作業者とにおける危険情報に対する感受性の違いに対する予備実験を行い、支援的保護システムの有効性を検証する。

4.2　2017 年度の実証実験の概要（バイタルモニタービーコンシステムを利用した移動機械と人との位置情報測位予備実験）

4.2.1　実験の概要

山岳トンネルの施工現場では、人と重機が同じ領域で作業を行っているため、毎年、重機との接触事故が発生している。原因としては、重機の可動領域と人の作業領域を分離できないことと、人が重機の可動領域に侵入した際に急停止が困難であること、また、人が移動する際に、現場に設置している安全通路を逸脱することなどが

ある。

また、今後は Industry 4.0（第四次産業革命）などによって、工場などでも人と機械との共存・協調作業が増えていくため、非定常作業時だけではなく、定常作業時においても、人と機械の位置情報を把握することは安全上重要な要件となる。

そこで、人と機械が同じ作業領域に存在する場合、人の作業にどのような影響が出るかについて、予備実験を行った。同時に、トンネル施工現場おいて、機械と人とが存在する位置の測位にバイタルモニタービーコンを使用することを想定し、ビーコンシステムの精度の検証を行った。さらに、行動分析学を用いた作業効率への介入法の検証を行った。なお、先行研究では、対象となる機械は定置式であったが、今年度の実験では、移動する機械を対象としている。

4.2.2　実験機材

①バイタルモニタービーコンシステム EX-Beacon（株式会社 WHERE 製）

写真 1　バイタルモニタービーコンシステム（移動機、固定器）

②モバイルロボット LD - 60（オムロン株式会社製）

写真 2　モバイルロボット

4.2.3　実験方法

労働安全衛生総合研究所機械システム実験棟大実験室内に**図 2** のような 5m×10m の模擬的作業現場を構築した。作業現場には作業者の位置情報を把握するためにバイタルモニタービーコンシステムを導入した。このシステムは、作業現場内の A～H に設置した 8 つの固定器による 3 点測位で、作業者のヘルメットに付けたタグ（移動機）と、モバイルロボットの上に乗せた段ボールに付けたタグ（移動機）の位置を計測する。本予備実験では固定器をトンネルの壁面と天井に設置することを想定し、F、G、B、C の 4 つの固定器は高所（床面から 1m）に設置した。また、バイタルモニタービーコンの精度を検証するために、模擬的作業現場全体を 2 台の定点カメラで撮影（**写真 3**）し、バイタルモニタービーコンのログと撮影した映像を比較して、位置情報の誤差を確認した。

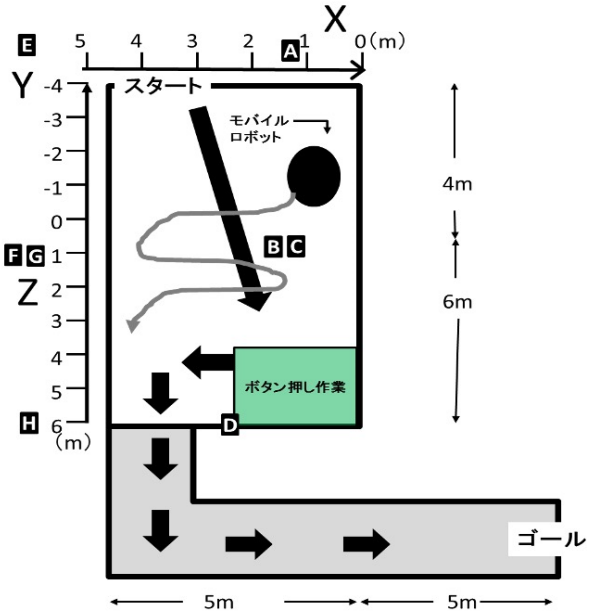


図 2　実験導線とレイアウト

写真 3　実験状況とモバイルロボット

被験者が行った試行の手順を以下に示す。

① スタート位置からスタート

② ボタン押し作業場へ移動

③ ボタン押し作業を行う

④ 通路を通ってゴール

手順③で行うボタン押し作業の詳細を以下に示す。

(1) **図 3** の画面で、START ボタンを押す。

(2) button1～button6 のうち、ランダムな一つの色が変わる。

(3) 色が変わったボタンを可能な限り早く押す。

(4) (2)、(3)を 10 回繰り返す。

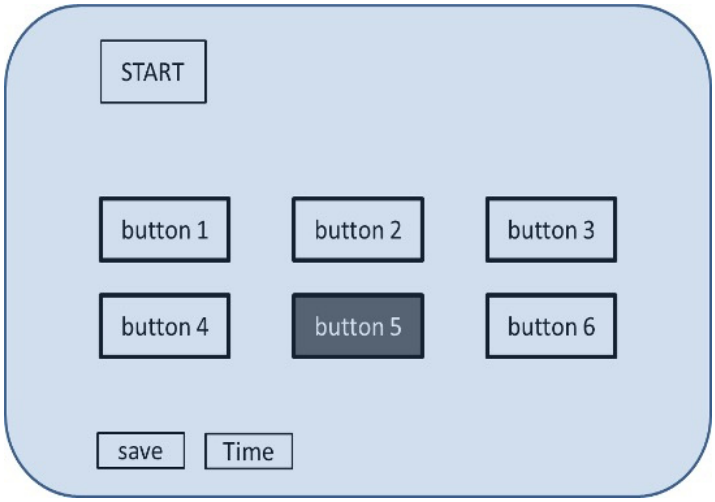


図 3　ボタン押し作業の画面

被験者は社会人の男性 5 名、女性 5 名の合計 10 名で行った。報酬の有無による学習効率の差を調べるために、被験者 10 名のうち 5 名はフィードバック条件群、残りの 5 名はフィードバック無し条件群とした。フィードバック条件群にはボタン押し作業にかかった時間を表示する。また、1 試行が終わる毎に報酬を一つ与え、10 試行が終了した段階では合計 10 個の報酬を与える。一方、フィードバック無し条件群は、ボタン押し作業の時間を表示しない。また、1 試行毎の報酬は与えず、10 試行がすべて終了してから 10 個の報酬をまとめて与えた。ここでの報酬は、複数の種類のティーバッグから好みのものを選択するというものである。また、実験開始前と終了後、及び各試行後に自記式調査票による作業中のストレスと負担感について測定を行った。

また、ロボット稼働の有無による作業への影響を調べるために、10 試行のうち 5 試行はロボットを稼働させ、残りの 5 試行ではロボットを稼働させなかった。ロボット稼働時は、作業現場内を 1 台のモバイルロボットが 0.9m/s でランダムに走行している。本来のモバイルロボットの走行速度は 1.8m/s であるが、バイタルモニタービーコンシステムが 2 秒ごとの移動平均で位置を割り出すため、本来の速度では正確な位置情報が計測できず、速度を下げて使用した。ロボットのサイズは 699 L×500 W×383 H mm である。**表 2** に実験の条件をまとめる。

表 2　実験条件

	ロボット稼働あり	ロボット稼働無し	合計
フィードバック条件群（5 名）	5 試行	5 試行	10 試行
フィードバック無し条件群（5 名）	5 試行	5 試行	10 試行

4.2.4　結果と考察

4.2.4.1　ロボット稼働の影響

フィードバック無し条件群のロボット稼働時の時間を**図 4**、ロボット非稼働時の時間を**図 5** に示す。また、フ

ィードバック条件群のロボット稼働時の時間を**図 6**、ロボット非稼働時の時間を**図 7** に示す。

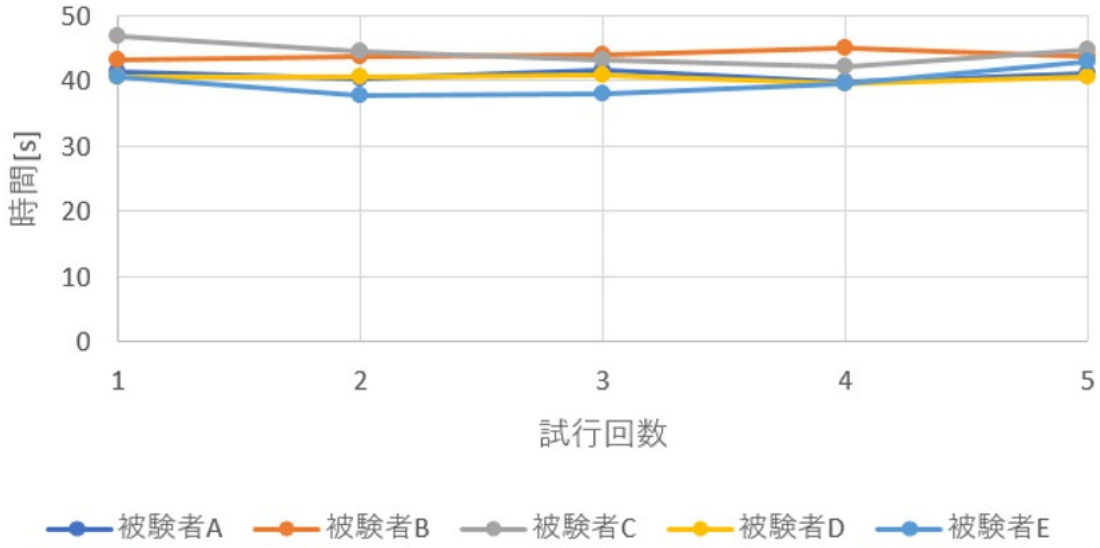


図 4　フィードバック無し条件群、ロボット稼働時の時間

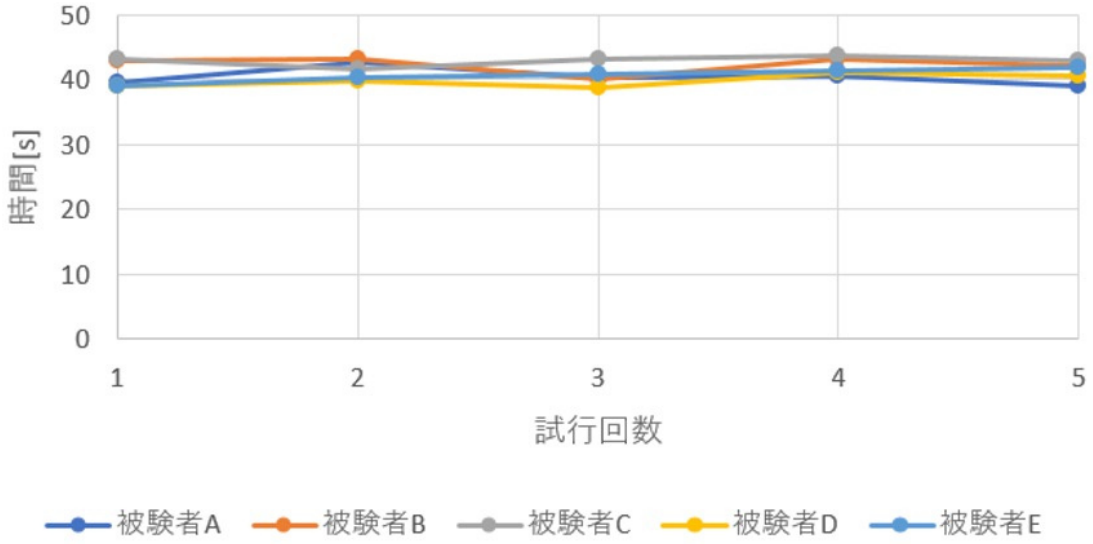


図 5　フィードバック無し条件群、ロボット非稼働時の時間

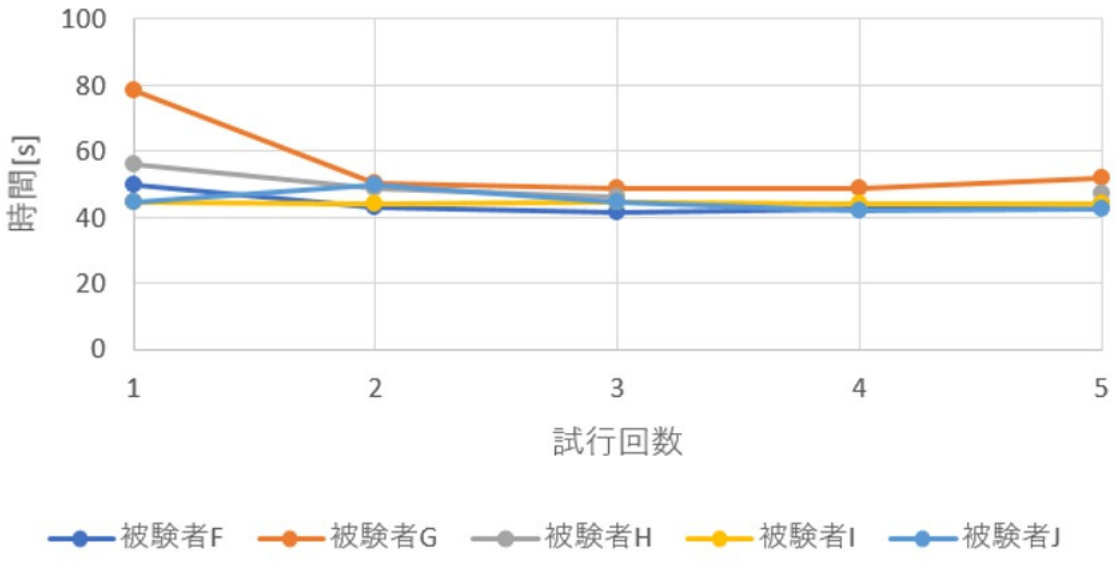


図 6　フィードバック条件群、ロボット稼働時の時間

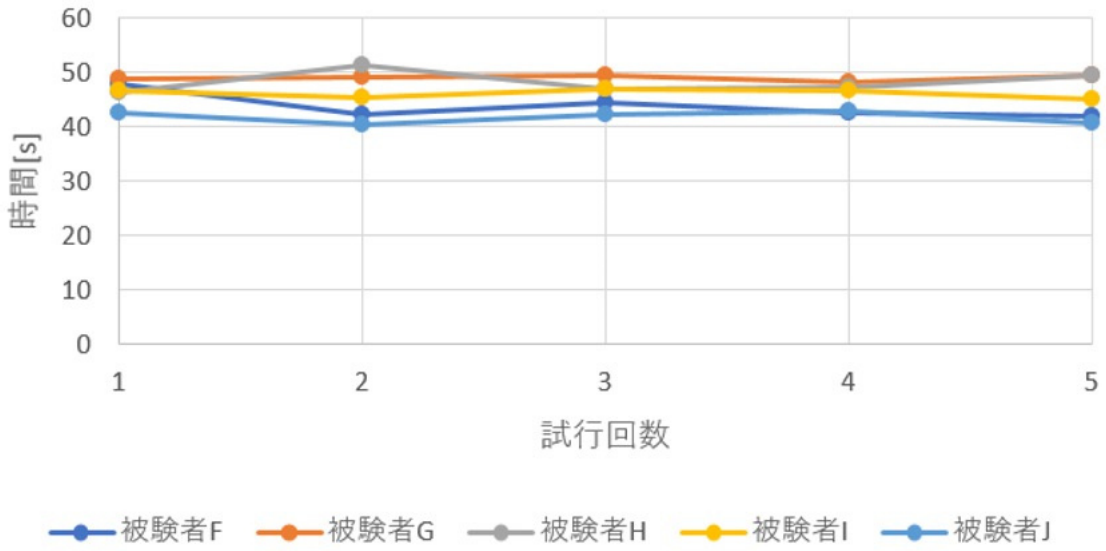


図 7　フィードバック条件群、ロボット非稼働時の時間

各条件での平均時間を**表 3** に示す。

表 3　各条件の平均時間

フィードバック	ロボット稼働	平均時間[s]
なし	あり	41.2
	なし	41.9
あり	あり	47.5
	なし	45.8

ここで、手順③のボタン押し作業時に操作が分からないなどの理由により、時間が長くかかってしまった試行があったため、EZR を用いて外れ値検定を行った。外れ値検定後の各条件の平均時間を**表 4** に示す。

表 4　外れ値検定後の平均時間

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

表 5 より、フィードバック条件、フィードバック無し条件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なかった。これは、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ということを示唆している。しかし、今回の実験ではロボットの速度が遅かったため、今後は実際の作業現場に近い条件で検証を行っていく必要がある。

4.2.4.2　フィードバックの有無と作業効率

それぞれの条件群試行ごとに、被験者 5 人の平均値の推移を**図 8** に示す。また、平均時間の推移を、1 回目を 1 として割合で表したものを**図 9** に示す。

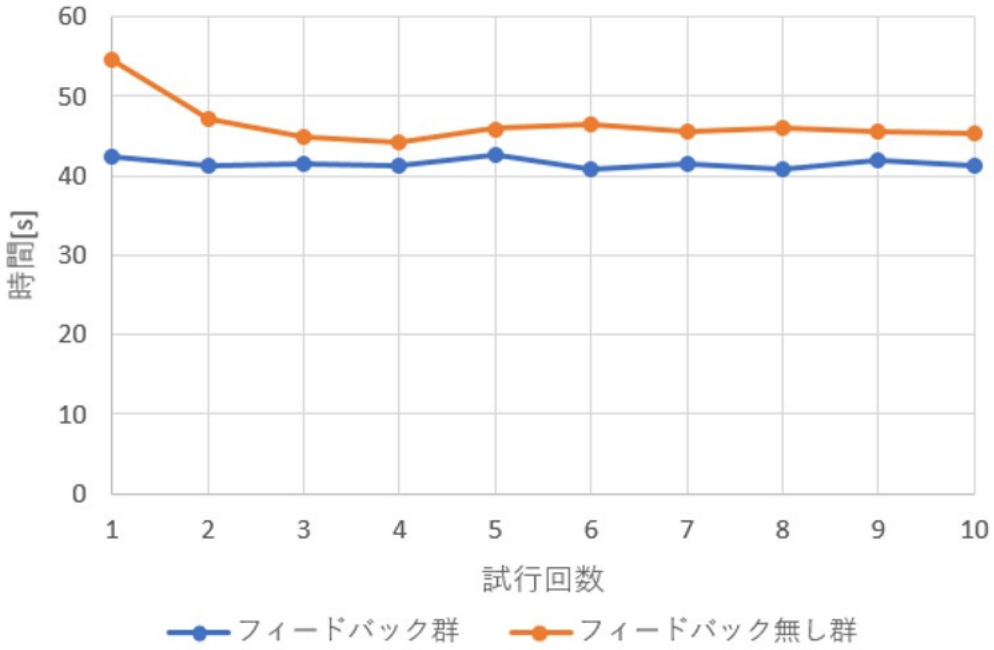


図 8　平均時間の推移

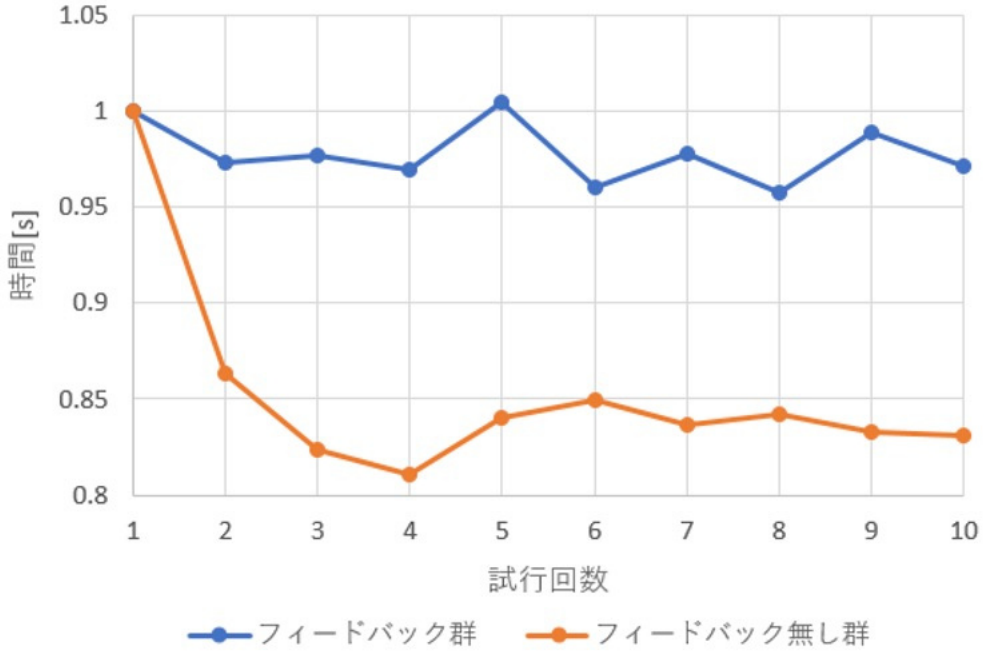


図 9　平均時間の割合の推移

スタートからゴールまでの平均時間は、フィードバック条件群では 46.6 秒、フィードバック無し条件群では 41.6 秒で、フィードバック無し条件群の方が短かった。しかし、**図 9** に示すように、フィードバック条件群の減少率はフィードバック無し条件群に比べて有意に大きいという結果を得た。ただし、①ロボットの稼働の影響で述べたように、手順が分からずに時間がかかってしまった試行があったため、EZR による外れ値検定を行った結果を**図 10**、**図 11** に示す。

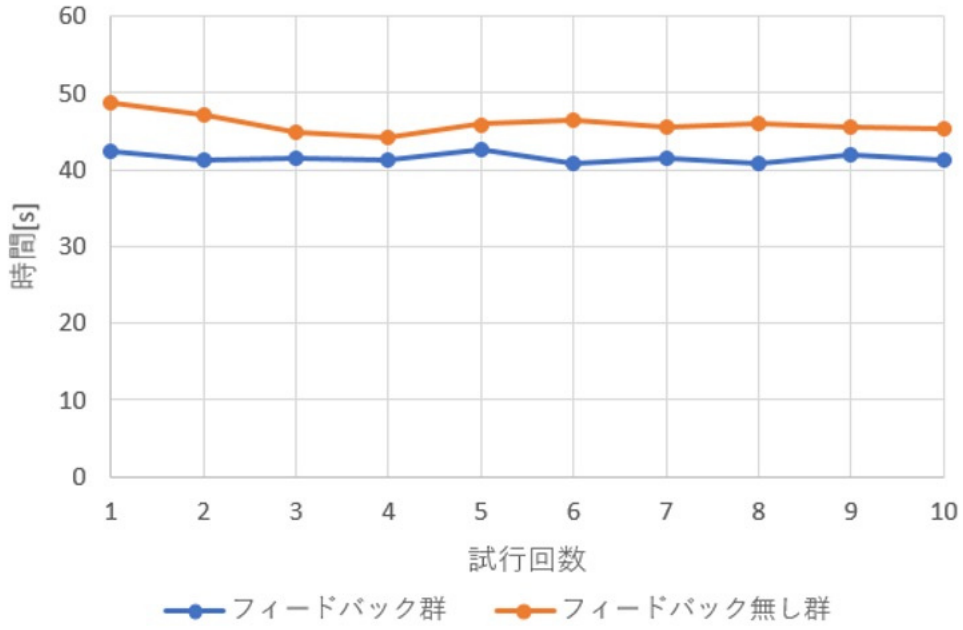


図 10　外れ値検定後の平均時間の推移

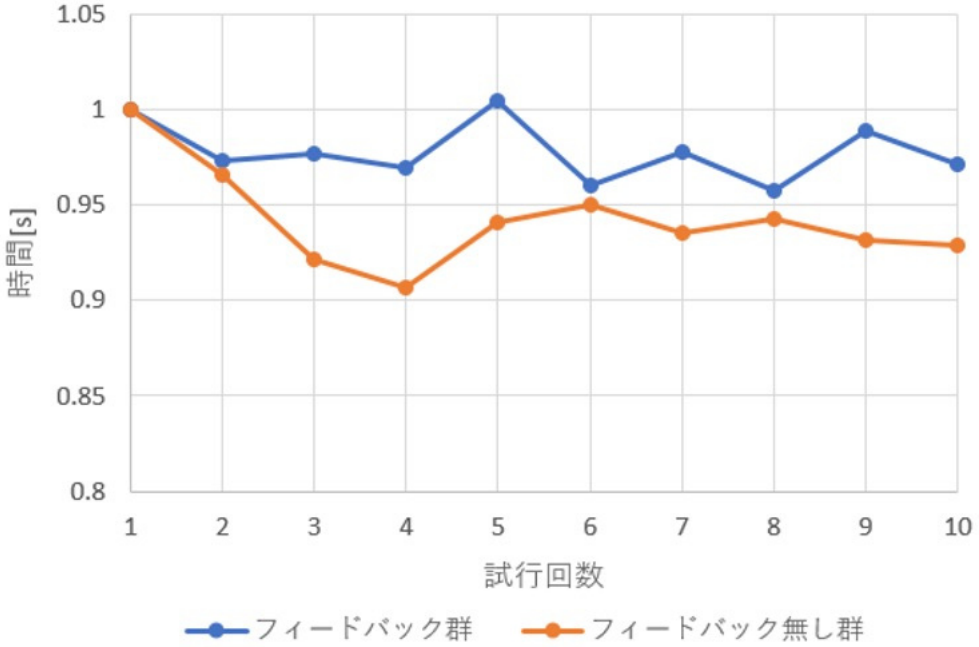


図 11　外れ値検定後の平均時間の割合の推移

図 10、**図 11** より、外れ値検定後も同様の傾向があった。この結果より、作業を行った際にフィードバックを与えることで学習効率が上がるということを示唆している。

フィードバック条件群とフィードバック無し条件群で総時間の平均に差があるが、これはフィードバック無し条件群の 5 名が男性、フィードバック条件群の 5 名が女性だったため、性別による差が出たと考える。今後の実証実験では性別の影響が出ないように被験者を各条件群に分けて検証を行っていく必要がある。

4.2.4.3　バイタルモニタービーコンシステムの精度

本実験で用いたバイタルモニタービーコンシステムは、ログをファイルに出力せず、画面に表示するものであった。その為、ログ画面をカメラで撮影（**図 12**）した。この画面には、移動機 3 つ分のデータを表示する。各移動機における、固定器 8 とのそれぞれの電波強度をリアルタイムなデータ［rssi（actual）］、2 秒ごとの移動平均のデータ［rssi（filterd）］、［rssi（filterd）］のデータを基にした距離（dist）、ロボットが存在すると推定したエリアのデータを表示する。今回は、推定エリアが正しいかどうかの検証を行った。定点カメラの映像とログ画面を比較した結果、推定エリアが正しかったのは約 64%であった。これは、安全を担保するシステムとしては不十分である。ただし、固定器の数を増やせば精度は上がると見込まれる。今後は、他のセンサの利用も併せて検討していく必要がある。

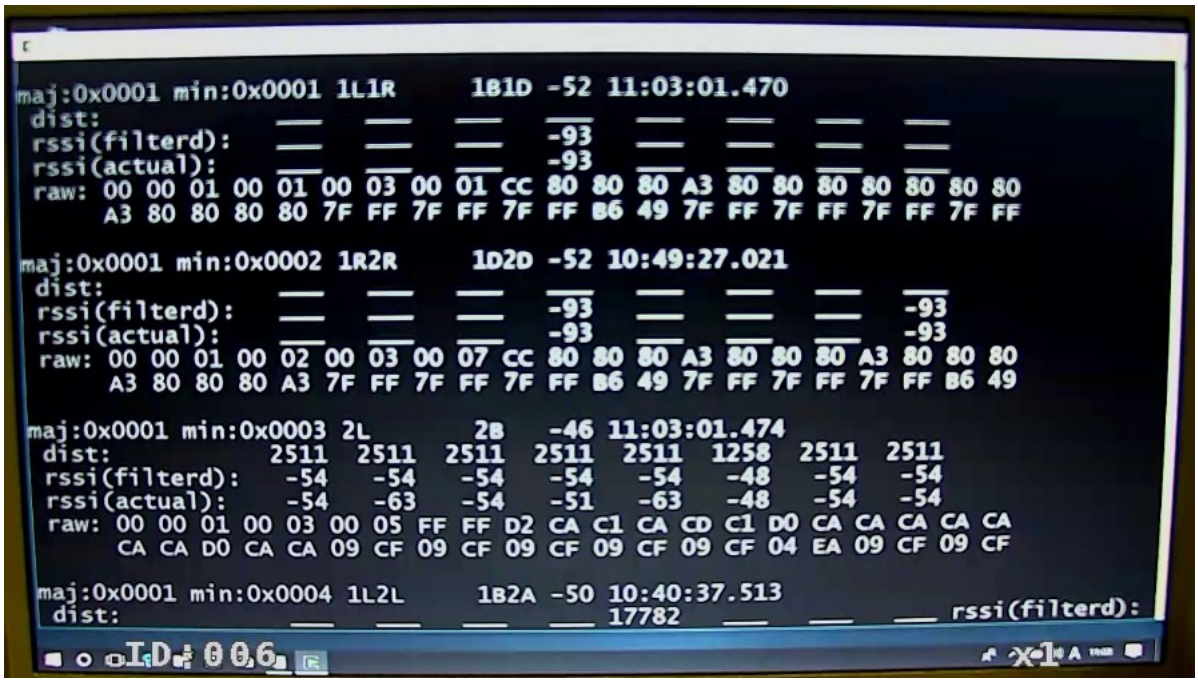


図 12　バイタルモニタービーコンシステムのログ画面

4.2.5　結論

工場などの製造現場において、作業ごとに停止するタスクゾーンを適切に設定することで生産性を下げずに **ISO/TR 22053**:Safegurging supportive system（支援的保護システム：SSS）を導入できることが確認できた。作業効率及び安全面から、SSS の導入が有効である。

作業に対して何らかのフィードバックを与えることで、作業がより効率的に行えることを示唆している。今後は、実際の現場で利用できるフィードバックを検討していく必要がある。また、作業効率は良くなっているが、主観性評価におけるストレス及び疲労の度合いはフィードバックの有無にかかわらず、個人によるところが大きい。そのため、作業や SSS 導入によるストレス・疲労感と作業効率等の行動の変化は異なる指標で別々に評価することが望ましい。また、作業現場における SSS 導入に際し、行動分析学的評価の果たす役割が大きい可能性が明らかになった。

本実験ではモバイルロボットを通常稼働よりも遅い速度で用いたが、作業現場に移動する機械（モバイルロボット）が存在するか否かでは、特に作業に影響することはなかった。今後は様々な条件でさらなる実験が必要である。

4.3　2018 年度の実証実験の概要（山岳トンネル施工現場におけるリスクポイント計測に関する予備実験）

4.3.1　実験の目的

日本の建設業における10万人当たりの死亡数は、2003年及び2004年には9人及び10人であったが、2016年には就業者（495万人）10万人当たりの死亡者数（294人）は5.9と減少傾向にある。一方、製造業における就業者（1041万人）10万人当たりの死亡者数（177人）は、1.7であり、日本の製造業に比べると建設業の死亡率は約3.5倍に上る。

状況や条件が異なるため単純な比較は困難ではあるが、両者の死亡率が大きく異なる理由として次がある。

(1) 製造業では、機械等の制御及び機械等と使用者間の隔離が比較的容易な状況にある。

(2) 建設業においては、作業者が建設機械等と同時に同じ現場で作業することが多いため、建設機械の制御も建設機械等と作業者との空間的分離が困難であることや、斜面、地盤、地山等を対象とする工事が多く、地質等の不確定性が大きい。

このように様々な条件の相違はあるものの、最近の製造現場のコンピューター制御による統合生産システム（Integrated Manufacturing System、IMS）による事故では、主に機械による“ 挟まれ及び巻き込まれ ”が最も多い。

これに対し、建設業の自動施工システムでは、機械による “ 挟まれ及び巻き込まれ ” だけでなく、移動中の機械と人との接触、傾斜面などでの機械の転倒、荷振れによる人と荷との接触なども考慮する必要がある。

我が国における安全衛生の成績が、建設業よりも製造業が良好であることを考慮すると、機械安全分野の考え方を建設分野にも適用することが有効な手段であると推察した。

そこで、我々は製造業における安全の考え方、方策及び対策を建設業、特にトンネル施工現場に導入し、有効性を検証する必要があるという考えに至った。

一方、製造現場における機械安全は、International Organization for Standardization（**ISO 12100**:2010）／Japanese Industrial Standards（**JIS B 9700**:2013）「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を図っている。その原則は、本質安全設計、安全防護及び付加保護方策及び使用上の情報提供のスリー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を管理してはいるが、今日の製造現場における生産形態が IMS に移行しつつあるため、新たな問題も生じている。

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、稼働領域内での行う作業も生じるため、従来の機械安全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 IMS では、機械設備を組み合わせることによる新たなリスクも発生している。

機械単体の保護装置の付与によりリスク低減は、IMS 導入以前の安全対策としては有効であったが、機械の組み合わせでは、単体の機械それぞれのリスク低減対策を行っても、低減できないリスクが新たに発生する場合がある。

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、ユーザー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ある。

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を得ることが出来ずに重篤な災害が発生する結果となっている。

これらのことから、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（Safegurarding Supportive System：SSS）”を構築した。SSS は製造者が **ISO 12100**／**JIS B 9700** のスリー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定性の高いリスク低減効果を得ることを目的とする。

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た作業を行う。すなわち、作業者 ID と作業内容（対象機械）が合致した時のみ作業の実行を許可するので、ヒューマンエラー発生に起因する危険側エラーを防止することができる。ただし、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が、今年度はSSSを構成する機器選択を目的とした予備的実験行った。

産業基盤としてのインフラ設備、基幹産業である建設、土木業等における事故は一旦発生すると重篤なものになっているが、本実験では、この課題を解決するために開発した行動モニタリングシステムがInternet of Things（IoT）及びICT機器の活用でSSSの構成要素として使用可能かどうかの検討を次のとおり行った。

(1) 人と機械の位置を把握することができるかどうかを含めた行動分析装置の性能確認

(2) 一部作業者と重機の接触災害を防止するための接近距離計測、すなわちそれぞれの移動経路のクロスするポイント（リスクポイント）の計測の可能性確認

検討の結果、作業者と重機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。

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

行動モニタリングシステムは、Time of Fright（TOF）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。

今年度は、SSSをトンネル施工現場に導入し、作業者と重機との位置情報を計測した実証実験を行い、その分析結果から、今後の課題と展望を述べる。

4.3.2 実証実験の概要

本実験はA社山岳トンネル施工現場にて2018年7月30日から8月1日まで実施した。

本実証実験現場では、掘削作業者は通常5～6人がチームとなり作業にあたっている。また、切羽先端では掘削重機やコンクリート吹き付け車が作業者と同時に現場に存在し、そのほかにもダンプやミキサー車などが作業現場に入退出している。本実証実験では、SSS導入による重機と作業者との接触災害に関するリスク低減を行うことを目的としている。そこで、リスク低減効果の検証に必要となるリスクポイントを評価するための行動モニタリングシステムを導入し、機能検証ステップとして、1）作業者1人または重機1台、2）作業者1人及び重機1台、3）作業者複数人及び重機複数台の環境が想定できるが、本実験では、糸口として1）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、①人と重機（機械）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②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た。

(1) 行動モニタリングシステム

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重機の位置・大きさ・温度データ等の取得が可能となった。主な仕様及び機能は次のとおり（**図 13**）。

(a) 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、Mobotix社製サーマルカメラ（ドイツ）及び3D-LiDARを組み合わせて使用した。

(b) 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した行動分析データとなる。

(c)　作業者及び重機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。

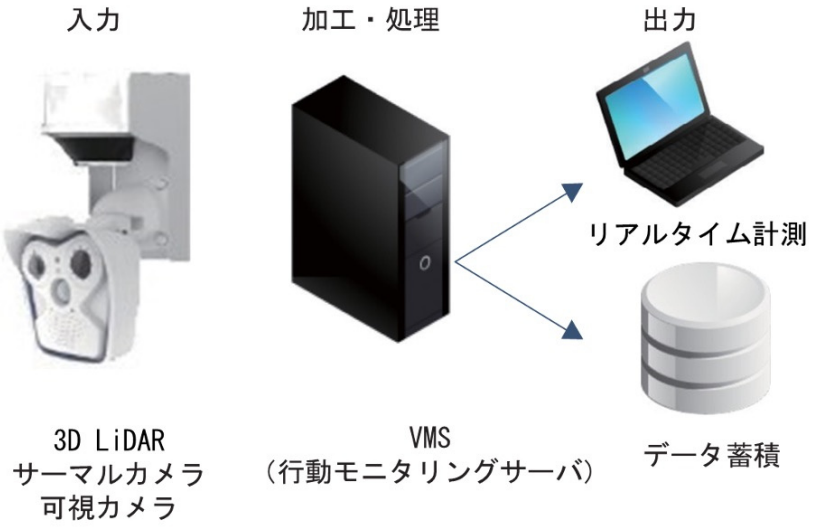


図 13　行動モニタリングシステム

(d)　本稿で述べている語句の定義

1) 検知：動体検知アルゴリズムを用いて、3D レーザーレーダーから得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 を付与した動体情報を得ることであり、動体情報としては大きさ、位置等を取得する。

2) ロスト：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。

3) トラッキング：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、前のフレームで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 を割り当て、それが継続している状態をいう。

4) リスクポイント：作業者と重機の位置情報（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）。

(2)　データ分析：位置把握性能及びリスクポイントの評価

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。おもに、検知エリア内の重機と作業者検出数の増減の有無及び重機と作業者検知後のロストの有無を観点として評価した。次に、作業者と重機の接近距離計測、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。

4.3.3　実証実験結果

(1)　作業者と重機の特定

作業者と重機の特定、特に人と重機を分類して検知できるかどうかを検証した。その結果、人の検知及び重機の検知を分析の結果、良好な検知が達成できた（**表 5**）。

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で、ID が付与した動体が大量に発生す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、結合ロスト及び ID 遷移ロスト［**4.3.3(4)**参照］が頻発するために新規 ID を付与し続け、一つの物体として検知できなくなる。

表 5　作業者と重機とを特定する機能

機能	解析	課題
人の検知	○	分裂体を人と認識
作業車の検知	○	サイズのみの分類ではミスが発生

(2)　特定した作業者と重機のトラッキング

特定した作業者と重機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 6**）。 その結果、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 レーザーレーダーが得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 を付与し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、正しく検出できなかった。

したがって、以前に付与した検知 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体がその後分離しても、分離した標的物体には新たな ID を付与する現象（ID の遷移）が発生したためにトラッキングが不能になったと推察する。

表 6　特定した作業者と重機を検知し続ける機能

機能	解析	課題
物体をロストなく検知	×	画素不足（遮蔽）によるロスト発生 結合によるロスト発生
検知物体のトラッキング	×	結合による ID 遷移の発生 物体数が多くなると精度が落ちる

(3)　作業者と重機の距離計測

重機であるか否かは、分析者が判断することで対応できた（**表 7**）。

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、重機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重機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。

表 7　作業者と重機の距離計測機能

機能	解析	課題
作業車の判別	○	人の判断で後解析では達成
旋回中心を求める	△	検知結果による誤差が発生 検知結果から旋回中心を求める
旋回半径を求める	○	作業車種別の認識が必要

(4)　ロスト分類による ID 変化

本稿では、今後のシステム改良に必要な項目では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 8**）。

表 8　ロスト分類における ID の変化

	説明	物体数の変化	ID の変化
①結合ロスト	2 つ以上の動体が近接することにより，結合された 1 つの動体として検知され，結果，動体数が減少するロスト.	複数→1	結合前のいずれかの物体 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.	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画素が移動に伴い不足することで発生するロスト. ※動体が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.	1→0	なし （物体そのものがロスト）
④死角ロスト	検知状態にある動体が作業車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. ※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りえない）	1→0	なし （物体そのものがロスト）

次に、ロスト及び課題となるもう一つの現象を解説する。

(a)　結合ロスト: 2 つ以上の物体が近接することにより、結合した 1 つの物体として検知したロスト。その結果、動体数が減少する。システム上のカウンタは、物体数 2 以上であったものが、結合した時点で物体数が 1 となる。結合が解除すると、結合前のいずれかの物体 ID が結合解除後のいずれかの物体の ID となる（**図 13**）。

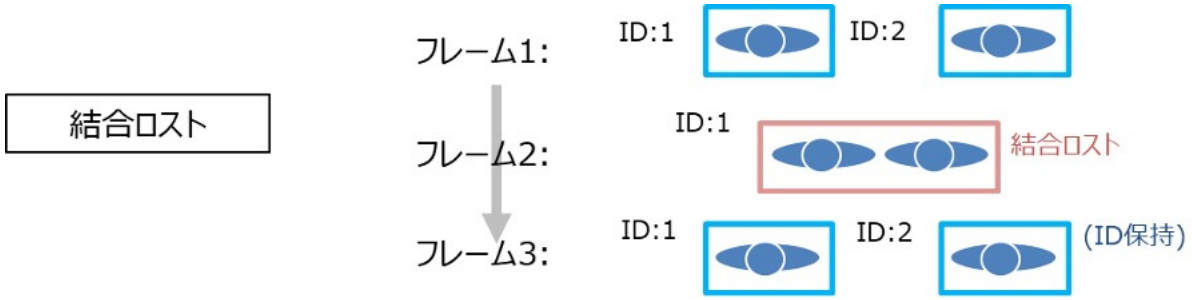


図 13　結合ロスト

(b)　ID 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を、動体の移動等により再び個別の動体として検知した場合に新たな ID を付与し、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 を保持する仕組みがあるが、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 14**）。

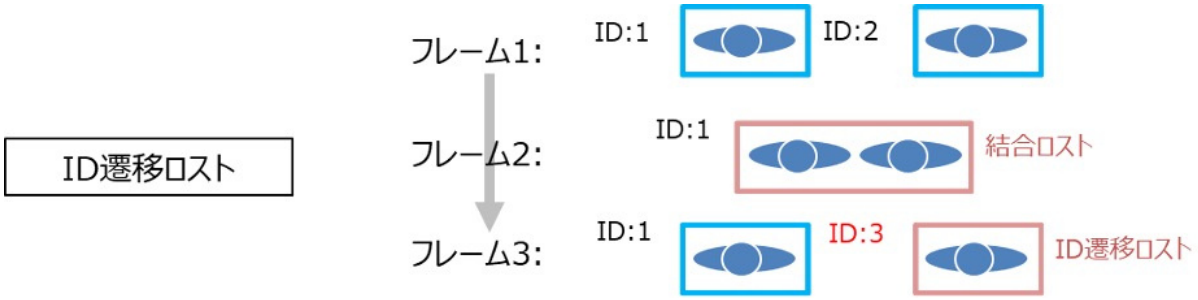


図 14　ID 遷移ロスト

(c)　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、又は遮蔽物が動体の一部を遮って移動するシーンで発生する現象である。

(d)　死角ロスト：検知状態にある動体が重機の裏側などの死角に移動し、動体全体が見えなくな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、完全に見えなくなっ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 レーザーレーダー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な対策で解消出来ると考察する。

ロストの他、付与した検知 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次に記載する。

(e)　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 を付与し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 を付与し続け、１つの物体として検知できなくなる。特に大型車両で発生しやすいという特徴

がある。

4.3.4　考察

本実験は、トンネル建設現場に SSS を導入して安全確保の有効性検証を行うことを目的とし、本解析では、主に安全性の確保及び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と、リスクポイント（作業者と重機の距離を把握する）の確認を行った。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に焦点を当てた。すなわち、

1)　作業者と重機とを分離して検知し特定する。

2)　特定した作業者と重機とを検知し続ける（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の実現の可能性を中心に検討した。

解析の結果、必要要件のいくつかは録画後の解析によって確認出来たが、いくつかの測定においては、課題が残る結果となった。

(1)　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重機との位置確認及びリスクポイントの確認を行った。録画資料での解析では、必要要件をほぼ達成する結果を得たが、作業現場における作業者の安全確保のためには、**図 15** のようなリアルタイムでの計測の必要性があると考察する。

すなわち、現場での実装を実現するためには、作業者と重機との位置把握がリアルタイムで計測可能なようにシステムの高度化を図ることが必要である。

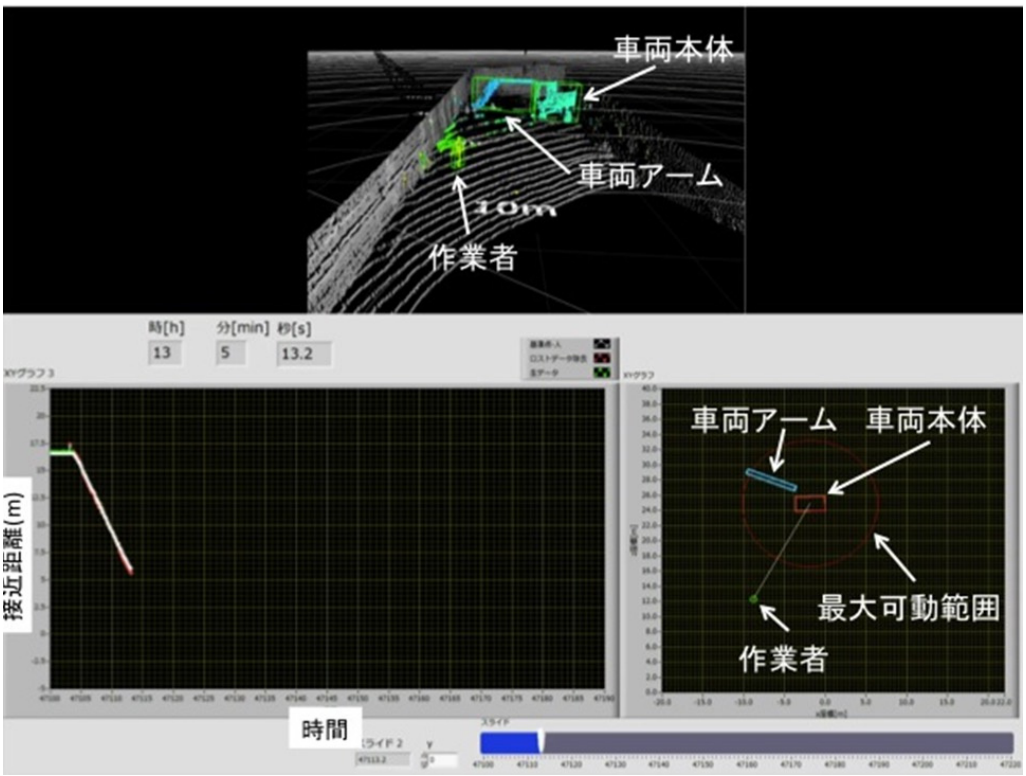


図 15　リアルタイム計測における出力画像イメージ図

(2) 必要要件に関する考察

(a) 作業者と重機の特定

作業者と重機の特定に関しては、後解析により必要要件は全て確認できた。しかし、重機においては、分類をサイズのみに依ると分類ミスが発生することが明らかとなった。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である。また、特に大型車において分裂現象が発生したので、大型車の外観の特定可能な各部位に反射板を取り付けて、反射率の違いによって得るデータを蓄積して重機の形態を処理するアルゴリズムを開発する予定である。

(b) 特定した作業者及び重機のトラッキング

作業者及び重機のトラッキングは、画素不足のロストが課題となった。対策として、位置確認システム機器の複数使用も視野に入れ、機器配置の最適化を行うことが有効と考察したが、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。また、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して解決可能と考察した。

(3) 作業者と重機の距離計測

本解析項目に関しては、リアルタイムで検知結果と重機パラメータから旋回中心を求める必要があり、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重機パラメータの取り込み方法の検討が必要である。

4.3.5 結論

本実験により、次の 3 つの課題が明らかになった。

1) **4.3.4(1)～(3)**を計測するための共通課題として、「リアルタイム位置把握」がある。
2) 位置把握性能の課題として、「重機の分裂現象」と「作業者及び重機のロスト現象」の解決がある。
3) リスクポイントの確認課題として、「重機の車種特定」と「重機動作中心の算出方法」の検討がさらに必要である。本実験では、主に現場で作業する動体として油圧ショベルを選択したが、今後はより多くの重機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困難である、トンネル、建築現場、農業用地等の作業現場に対しては、データのリアルタイム処理が求められる。本実験で使用した位置確認システムでは、録画を使用した視認での解析／判断は可能であったが、災害の未然防止の観点から、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。

4.3.6 展望

今後、作業者と重機の位置計測をより精密に行うためには、複数のカメラを用いた統合検知システム等の構築が必要である。この方策は、技術的にはすぐに実現可能であるが、費用対効果としての困難さを予想する。それに代わる方法として、カメラの画角の広角度化や高解像度化を急ぐ必要がある。本システムにおいても検討を始めている状況である。作業パラメータ取り込み方法の改善についても実用化に向けた検討を進めている状況である。

4.4　2019 年度の実証実験の概要

4.4.1　実証実験の目的

今年度の実証実験は、次の(1)～(4)を目的として実施した。

(1) 危険源のクレーンの吊り荷及び人の、X、Y、Z 方向の位置検知可否の検証

過去の実証実験では人の平面的な位置情報の把握ができるかの検証を行ったが、今回の実証実験では危険源（クレーンの吊り荷）及び危険源近くに存在する人の立体的な位置検知の可否を検証するために、可視光通信システム（Picalico）及びセンサービーコン（MEDiTAG）を使用し、それらの検知性能を検証する。

(2) 人の ID 認識の確実性検証

これまで実施してきたカメラを使った人検知システムにおける画像解析では、一度死角に入った人の ID 情報をリセットしたり、複数存在する人の ID 情報が入れ替わったりするという問題があった。

今回の実証実験においては、ID 情報として独自の色のパターン認識機能を備えた可視光通信システム（Picalico）を新たに採用し、人の認知精度の向上、及びカメラの死角から出た際に人の ID 情報が変化しないことを検証する。

RFID アクティブタグの一種であるセンサービーコン（MEDiTAG）による、人の ID 認識についても検証を行う。

(3) RFID アクティブタグによる人の位置検知精度向上の検証

電波を使って位置検知ができる RFID アクティブタグの一種であるセンサービーコン（MEDITAG）は、RF タグとアンテナ間に存在する障害物によって電波の遮蔽や反射等が発生することで電界強度が変化し、正しい位置検知ができなくなる場合がある。そのため、今回の実証実験においては、障害物の影響を受けにくいアンテナの設置場所と設置方法をあらかじめ想定することで、位置検知精度の向上を図ることが可能であるか検証する。

(4) 人の生体情報取り込み可否と生体情報の精度の検証

安全と密接に関係する人の健康状態をリアルタイムに把握するために、今回の実験で初めて脈拍、転倒（気圧）等の情報をモニタリングできる機能を搭載した RFID アクティブタグの一種であるセンサービーコン（MEDiTAG）を採用し、得た生体情報の精度を検証する。

4.4.2　実証実験における検証項目

今年度の実証実験における検証及び確認項目は次の通りである。

(1) 実験現場における各機器での人の検知性能・検知精度の検証

① 可視光通信システム（Picalico）

・実験エリア内に存在する人を検知できることを検証する。

・実験エリア内に存在する人の X、Y、Z 方向の位置が特定できることを検証する。

・実験エリア内に存在する人の ID 情報を認識できることを検証する。

・検知できないことの有無確認とその場合の条件（場所、周囲環境、向き、姿勢他）とを明確にする。

② センサービーコン（MEDiTAG）

・実験エリア内に存在する人を検知できることを検証する。

・実験エリア内に存在する人の X、Y、Z 方向の位置が特定できることを検証する。

・実験エリア内に存在する人の ID 情報を認識できることを検証する。

・人の生体情報（脈拍、転倒（気圧）等）が取得できることを検証する。

(2) 実験現場における機器での複数人の検知性能・検知精度の確認

① 可視光通信システム（Picalico）

(1)に加えて、カメラの死角に入った際の ID 情報変化の有無を確認する。

② センサービーコン（MEDiTAG）

(1)に加えて、死角に入った際の ID 情報変化の有無を確認する。

(3) 実験現場における機器での危険源の検知性能・検知精度の確認

① 可視光通信システム（Picalico）

・実験エリア内に存在する危険源とその位置（X、Y、Z 方向）を検知できることを検証する。

・実験エリア内に存在する危険源の ID 情報を認識できることを検証する。

・検知できないことの有無とその場合の条件（場所、周囲環境、向き、姿勢他）を明確にする。

② センサービーコン（MEDiTAG）

・実験エリア内に存在する危険源とその位置（X、Y、Z 方向）を検知できることを検証する。

・実験エリア内に存在する危険源の ID 情報を認識できることを検証する。

(4) **総合実証実験**：(1)～(3)項の各機器の検証及び確認完了後に総合的な実証実験を行う。

4.4.3 実証実験日時と内容

実証実験は 2019 年 10 月 25 日から 10 月 28 日で実施した。

・2019 年 10 月 24 日（木） 安全教育受講

・2019 年 10 月 25 日（金） 備品等搬入・設置、調整、全体システムチェック、センサービーコン及び Picalico の最終動作確認

・2019 年 10 月 26 日（土） センサービーコン及び Picalico を用いた実験とデータの確認

・2019 年 10 月 27 日（日） センサービーコン及び Picalico を用いた実験とデータの確認
行動心理学実験機器設置、動作チェックと行動心理学実験

・2019 年 10 月 28 日（月） 10 月 28 日は予備実験日として設定していたが、前日までに必要なデータが取得出来たため、追加実験は行わず、すべての実験機器の撤収と梱包、配送を完了した。

実証実験の概略とスケジュールは次の表の通りである。

時刻 日付	内容	09:00～09:10	09:10～12:00	13:00～15:00	15:00～17:00
10 月 24 日	安全教育（該当者 4 名）	―	―	―	←→ 16:30 17:00

（木）					
10 月 25 日 （金）	･備品等搬入・本部設置 ･全体システムチェック ･HOYA センサービーコン実験 ･CASIO　Picalico 実験	朝礼	機器搬入・設置・調整 機器搬入・設置・調整	最終動作確認 最終動作確認	データ・課題確認 データ確認 データ確認
10 月 26 日 （土）	･HOYA センサービーコン実験 ･CASIO　Picalico 実験	朝礼	実験 実験	データ確認　実験 データ確認　実験	データ確認 データ確認
10 月 27 日 （日）	･HOYA センサービーコン実験 ･CASIO　Picalico 実験 ･行動心理学実験機器設置・動作チェック ・行動心理学実験	朝礼	実験 実験 機器搬入・設置・調整	データ確認　実験 データ確認　実験 実験	データ確認　実験 データ確認　実験 データ確認　実験
10 月 28 日 （月）	・機器撤収・梱包・配送 ・着替え・撤収	朝礼		予備	―

4.4.4　実証実験場所

今年度の実証実験は、株式会社日立プラントメカニクス　佐野工場様の協力を得て実施した。

（栃木県佐野市栄町 11 番地）

写真 4 株式会社日立プラントメカニクス　佐野工場様の外観

写真 5　株式会社日立プラントメカニクス様の会社概要

（出所：株式会社日立プラントメカニクス様 HP）

4.4.5　実証実験参加メンバー及び人数

今回の実証実験への参加者数を次に示す。

(1)　9 月 26 日（木）

安全教育受講者　9 名

(2)　10 月 24 日（木）

安全教育受講者　4 名

(3)　10 月 25 日（金）

・午前　13 名

・午後　13 名

(4)　10 月 26 日（土）

・午前　14 名

・午後　14 名

(5)　10 月 27 日（日）

・午前　14 名

・午後　13 名

(6)　10 月 28 日（月）

・午前　7 名

（注）このほか、株式会社日立プラントメカニクス様にも協力していただいた。

4.4.6　実証実験場所のレイアウト

今回の実証実験場所の概要図を、**図 16** に示す。

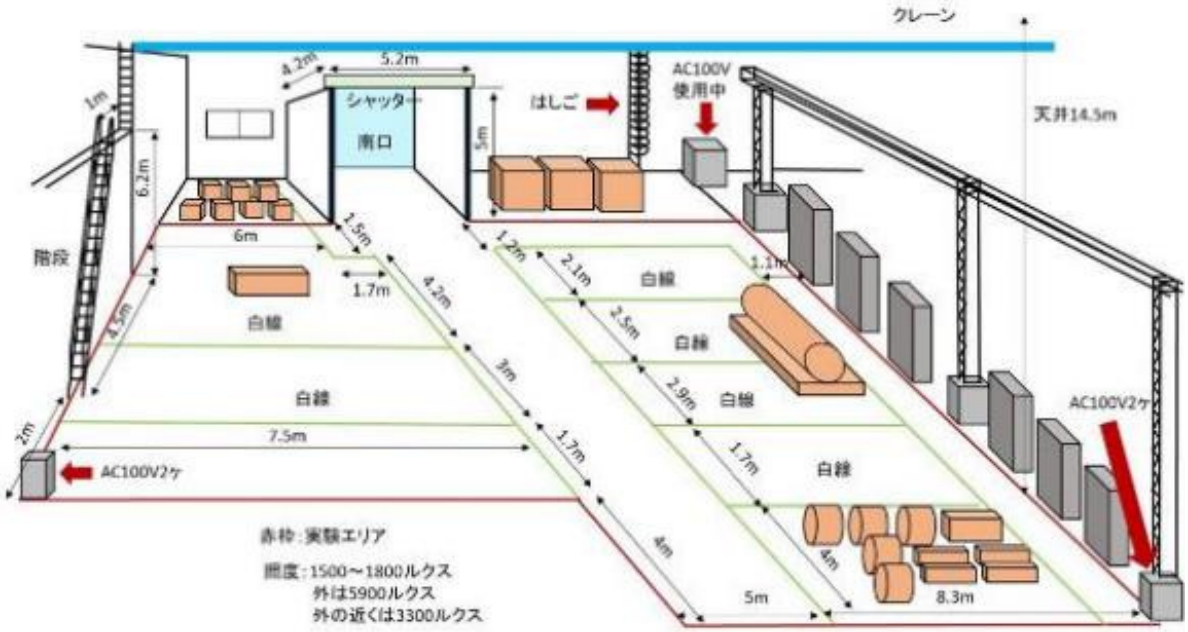


図 16　実証実験場所の概要図

実証実験エリアの平面図を**図 17** に示す。

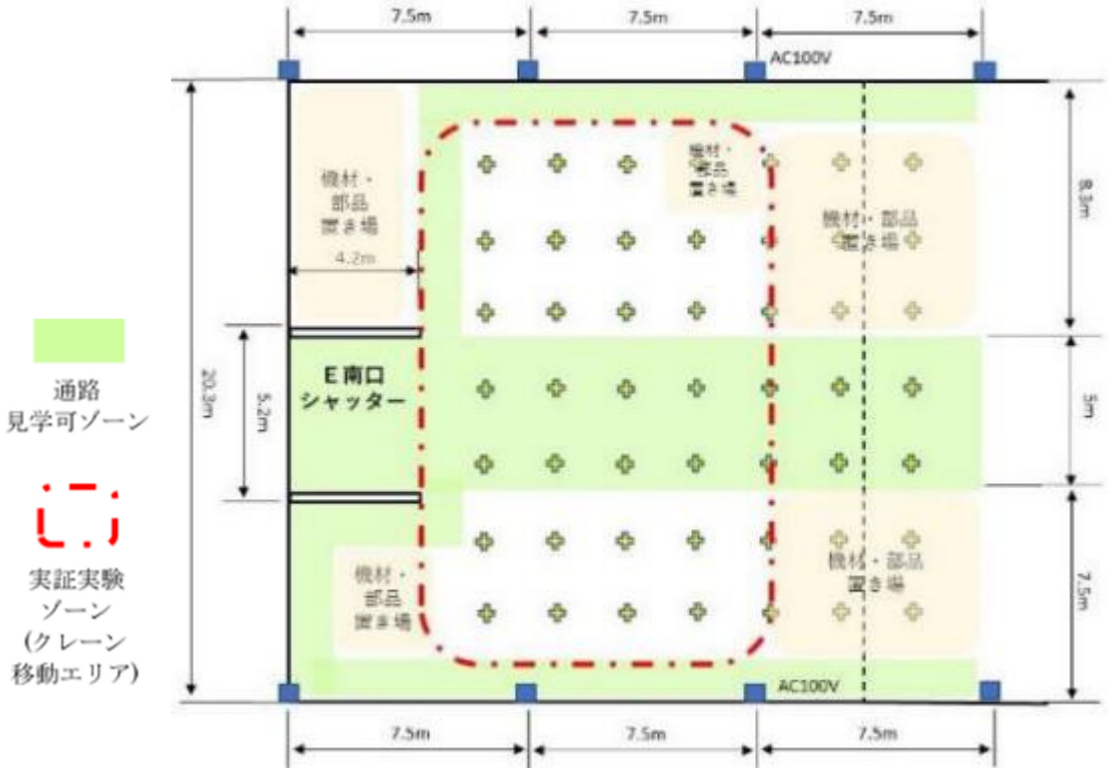


図 17　実証実験エリアの平面図

4.4.7　過去の実験からの改善点及び変更点

2015 年度から 2019 年度に実施した先行実験では、作業領域内にある定置式の機械を対象として、1 人の作業者が 1 つのタスク、1 人の作業者が複数のタスク、複数の作業者が複数のタスクをそれぞれ想定して実証実験を行った。

この実験では、RFID タグシステムとカメラシステムを利用した入退出管理システムを構築することで、作業領域に取り残されるリスク及び資格と権限のない作業を行うことに対するリスクを低減するための支援的保護システムの構築と使用時の問題点の確認を行った。その結果、カメラシステムによる入退出管理システムでは、環境照度、設置位置、複数の作業者が同時に入退出する際の高精度な人数カウント等が問題となることがわかった。

また、試行的に UWB タグシステムによる作業者の 2 次元位置測位実験を行ったが、実験環境（電波の反射など）や固定器の設置環境（固定器の数と移動機との間の障害物の影響など）の影響もあり、電波強度を利用した 3 点観測で移動する作業者の位置を高い精度で測位することが困難であった。

本実験では、対象となる機械を移動式として、複数の作業者が同時に作業領域に侵入することを想定した。そこで、移動する機械や作業者の位置を測位するための ICT 機器としては、3D レーザーレーダーシステムと可視光通信システムを導入することとした。

3D レーザーレーダーシステムは、本体から照射するレーザー光により対象範囲に存在する物体の有無や、対象までの距離を計測する機能を持つ。レーダーからの投光が測定対象物で反射し、センサで受光するまでの光の飛行時間から距離を計測する TOF（Time of flight）方式を採用している。光が戻ってくるまでの時間差により物体の 3 次元画像を取得し、毎秒 10 フレームのリアルタムな計測が可能であり、反射光の強度情報も取得できる特長がある。さらに、独自のレーザー投受光技術と走査技術により、検出可能範囲は水平角度最大 120 度の高画角を実現しており、垂直方向にも高い分解能を持ち、垂直方向 24 ライン分を取得できる。さらに、遠方のスキャンでもライン管の隙間が生じない広域捜査技術で、データの抜けがない高精度の測定が可能である。50m 先の人物、100m 先の車両のリフレクターを検知可能で、最大検知距離は 200m の広範囲をカバーすることができる。

3D レーザーレーダーシステムは、停止している形状や物体の識別だけではなく、移動体情報を毎秒 10 フレームのリアルタイム検出で複数の人間や、機械と人との距離を計測し、動く速度等を計測することもできる。

可視光通信システムは、カメラ可視光通信を使った屋内位置測位システムで、色変化パターン情報を表す LED を送信機とし、カメラを受信機として、ID 情報と位置情報とを収集するシステムである。今回使用したカメラ可視光通信は、赤、緑、青の 3 色を一定間隔で変化させることで情報を伝達している。送信機は約 106 万通りの色の変化で情報を伝達することができるため、カメラで撮った画像から信号を取り出すことにより、割り振った ID をリアルタイムで追跡することが可能である。

位置情報の精度には「座標精度」と「検知精度」の 2 種類がある。座標精度とは、エリア内における検知対象物の実際の所在座標とデータ上の所在座標との誤差のことである。これに対して、「検知精度」とは、エリア内における検知対象物の検知率や、対象物が複数ある場合に漏れの少ない検知率のことを言う。

3D レーザーレーダーシステムと可視光通信システムはエリア検知の技術であるため、座標精度という概念はなく、エリア内の座標を取得することができない。そのため、本実験では、検知精度という概念で検討を進めた。

バイタルモニタービーコンシステムは、Bluetooth 信号を発信するビーコン及び信号を受信する端末を使用して、信号の強度判別で位置範囲の計測する、或いは、三点観測を行って位置を測位するが、精度にはかなりばらつきがある。そこで、本実験では、バイタルモニタービーコンシステムの端末に内蔵した機能である気圧、バイタルデータなどを取得するための ICT 機器として位置づけて、位置測位のための ICT 機器との組合せで、作業エリア内に存在する機械と作業者との接触災害のリスク及び作業者の健康リスク低減効果の確認を行うことを目的とした。

4.4.8 各実証実験用機器設置レイアウト

(1) Picalico 関連機器設置レイアウト

Picalico は、予め設置位置座標を特定したカメラで、人や物体に装着した送信機（LED マーカ）を検知することで送信機の位置を特定する機器である。そのため、カメラは送信機が確実に見える場所に設置する必要があるし、一つのカメラで検知する送信機が人や物体の死角に入った場合には確認することができなくなるため、複数台のカメラを設置してカメラの死角を無くす必要がある。

そこで、今回の実証実験では、**図 18** に示す位置 4 カ所にカメラを設置した。なお、カメラで見る死角を極力少なくするためにカメラの設置はできるだけ高い位置が望ましいので、作業台 4 台の上部にカメラを設置した。

カメラの設置位置（X、Y、Z の座標）は、トータルステーション（**写真 11**）で測定して設置位置の誤差

を無くした。また、各カメラからの送信データは有線 LAN ケーブルによって本部の PC に取り込むようにした。

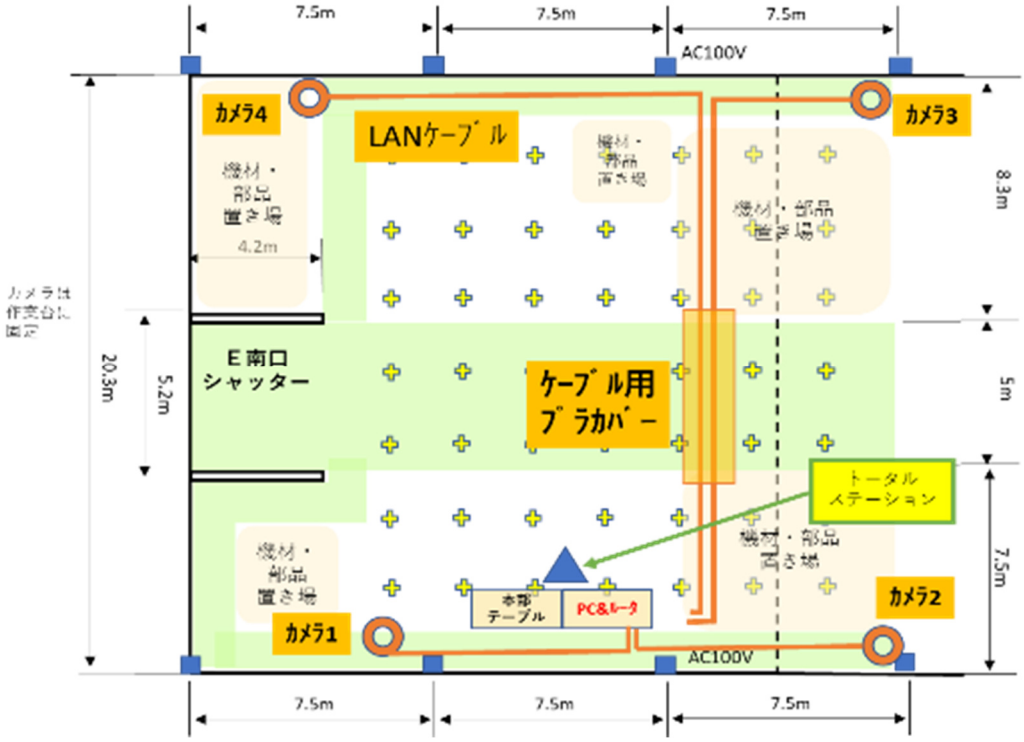


図 18　Picalico 関連機器の現場設置レイアウト図

(2)　Picalico 関連機器の個別設置状況

①　送信機（LED マーカ）

写真 6 に送信機とそれをものに取り付けた状態、及び人が装着した様子を示す。人が装着する場合は、送信機の大きさと形状から両手で送信機を持つ形となった。

写真 6　送信機、及びモノや人への装着の様子

今回の実験で使用した送信機は、No.1～6、および No.11 の 7 台である。

② カメラ 1

現場設置レイアウト**図 18** に示したカメラ 1 の設置の様子を、**写真 7** に示す。

写真 7　カメラ 1 の設置状況

カメラは、地上約 2m の高さに作業台の上に固定した。

③ カメラ 2

写真 8 に示すように、カメラ 2 を作業台に固定した。

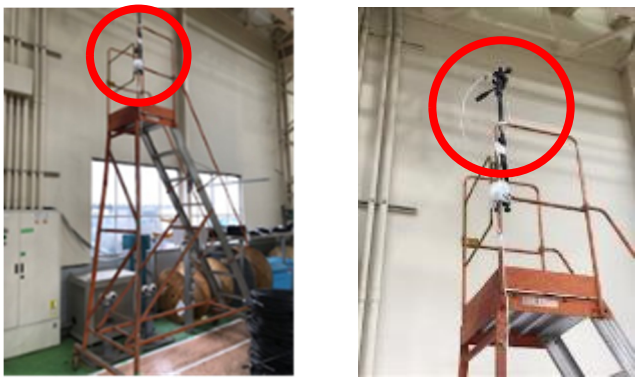


写真 8　カメラ 2 の設置状況

④　カメラ 3

写真 9 に示すように、カメラを作業台に固定した。

写真 9　カメラ 3 の設置状況

⑤　カメラ 4

写真 10 に示すように、カメラを作業台に固定した。

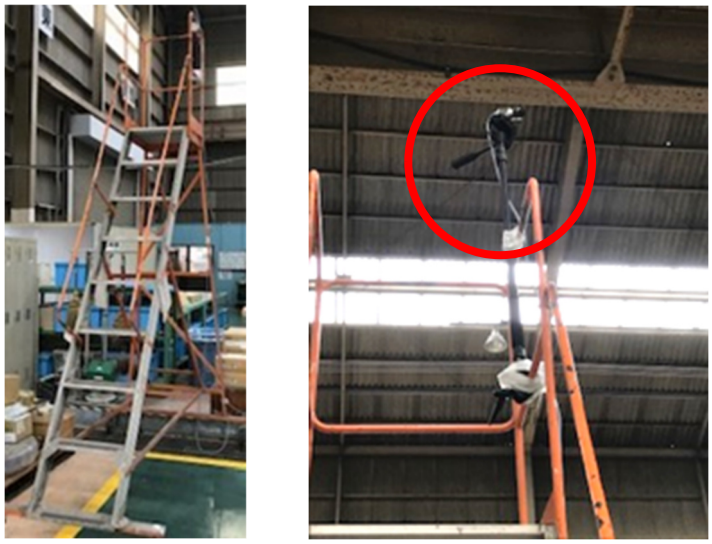


写真 10　カメラ 4 の設置状況

⑥　トータルステーション

写真 11 に示すように、トータルステーションを設置した。

写真 11　トータルステーションの設置状況

4 カ所に設置したカメラの場所をトータルステーションで測定し、位置座標を特定した。

(3) センサービーコン関連機器設置レイアウト

センサービーコン（MEDiTAG）は、アクティブタグの一種で送信機能を持つ MEDiTAG と受信機のアンテナであるゲートウェイ（GW）との間を Bluetooth で通信し、MEDiTAG の X、Y、Z 方向の位置情報の特定や MEDiTAG 装着者の生体情報（バイタルデータ）の取り込みができる機器である。

位置情報の精度を向上させるには、アンテナである GW の数を増やす必要があり、今回の実証実験においては 8 台の GW を**図 19** に示す位置に設置した。

なお、GW を適度な高さに設置するために三脚等を活用すると共に、電波の障害となる金属体をできるだけ避ける位置を選定したが、位置データの精度に課題があったため、実験の途中（10 月 26 日 15 時）で GW の設置位置を**図 20** に示す箇所に変更した。

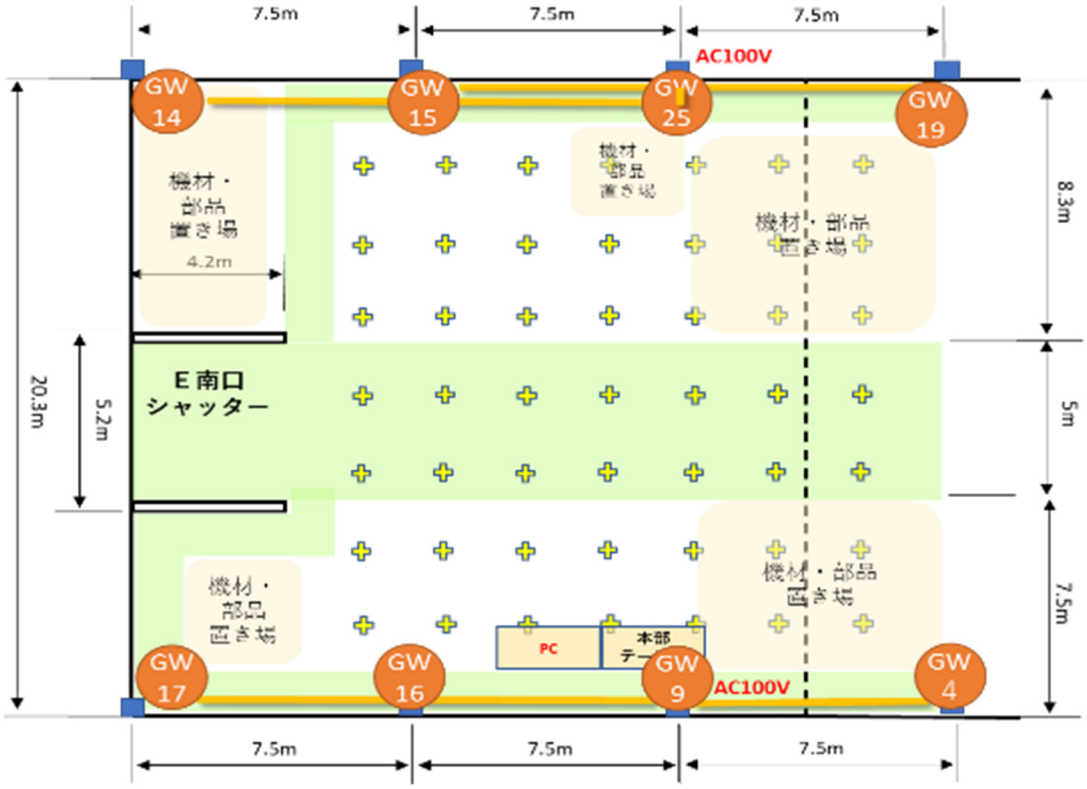


図 19　センサービーコンシステム関連機器の実験初期の現場設置レイアウト図

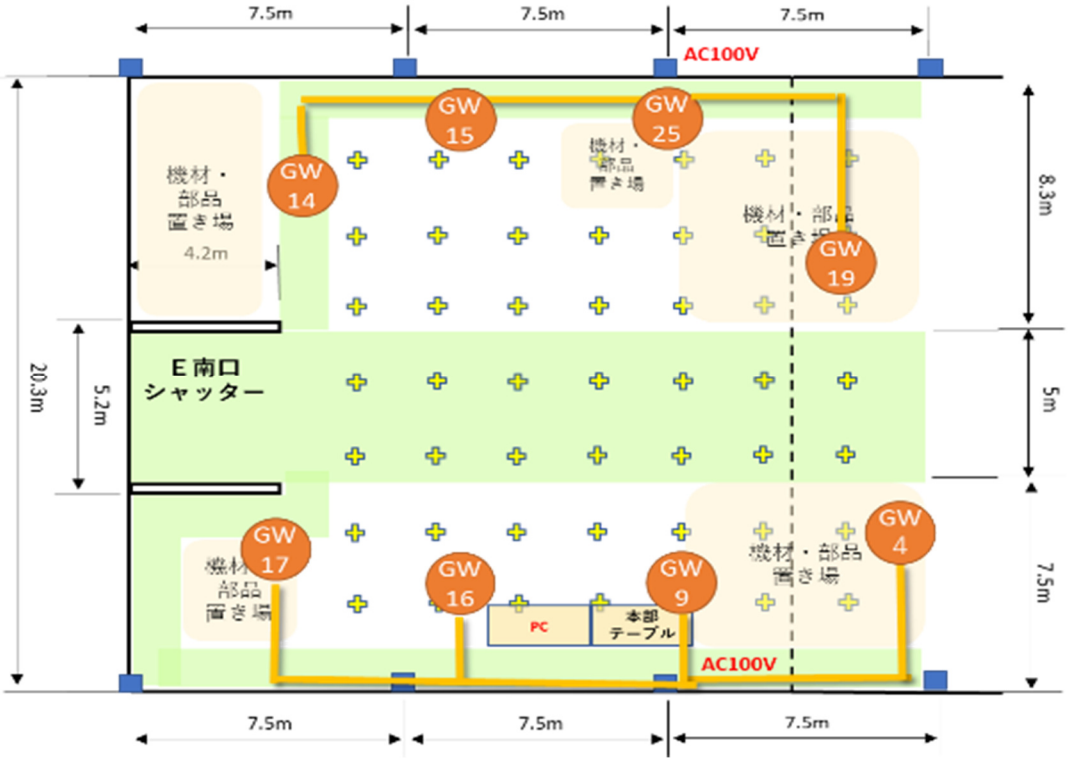


図 20　センサービーコンシステム関連機器の見直し後の現場設置レイアウト図

(4) センサービーコン関連機器の個別設置状況

① MEDiTAG（アクティブタグ）

写真 12 に MEDiTAG を示す。この機器はリストバンド形状になっており、人が簡単に腕に装着することができた。なお、位置情報や高さ情報（気圧データ）の他に取り込むことができる生体情報（バイタルデータ）は、脈拍数、血圧、ストレス度、加速度（転倒等を判断）等である。

写真 12　MEDiTAG（アクティブタグ）端末

今回の実験で使用した MEDiTAG は、No.1251、No.1322、No.1354、No.1358、No.1663、No.1719、No.1753、No.2067 の 8 台である。

② ゲートウェイ（GW）17

GW17 は実験初期段階では周辺の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして三脚取り付けに変更した（**写真 13**）。

【実験初期の設置】

【見直し後の設置】

写真 13　GW17 の設置状況

③ ゲートウェイ（GW）16

GW16 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして三脚取り付けに変更した（**写真 14**）。

【実験初期の設置】　　【見直し後の設置】

写真 14　GW16 の設置状況

④ ゲートウェイ（GW）9

GW9 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で電波環境が良い前方に移動し、三脚での取り付けに変更した（**写真 15**）。

写真 15　GW9 の設置状況

⑤ ゲートウェイ（GW）4

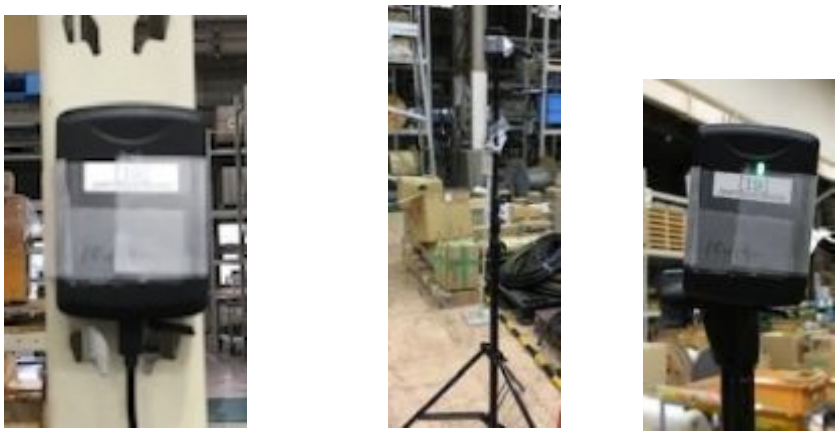
GW4 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして三脚取り付けに変更した（**写真 16**）。

【実験初期の設置】　　【見直し後の設置】

写真 16　GW4 の設置状況

⑥ ゲートウェイ（GW）19

GW19 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして前方に移動させ、取り付け方法は三脚固定に変更した（**写真 17**）。



【実験初期の設置】　　**【見直し後の設置】**

写真 17　GW19 の設置状況

⑦ ゲートウェイ（GW）25

GW25 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして前方に移動させ、取り付け方法は三脚固定に変更した（**写真** 18）。

写真 18　GW25 の設置状況

⑧ GW（ゲートウェイ）15

GW15 は実験初期段階では壁の柱に取り付けていたが、実験途中で設置場所の見直しをして前方に移動させ、取り付け方法は三脚固定に変更した（**写真 19**）。

写真 19　GW15 の設置状況

⑨　GW（ゲートウェイ）14

GW14 は実験初期段階では実験現場の奥まった箇所に取り付けていたが、実験途中で電波環境を向上させるために設置場所の見直しをして前方に移動させ、取り付け方法は三脚固定に変更した（**写真 20**）。

【実験初期の設置】

【見直し後の設置】

写真 20　GW14 の設置状況

4.4.9　実証実験に使用した各 ICT 機器の詳細

(1)　可視光通信システム（Picalico）

①　カシオ計算機株式会社製（出典：カシオ計算機株式会社提供資料）

②　システム構成

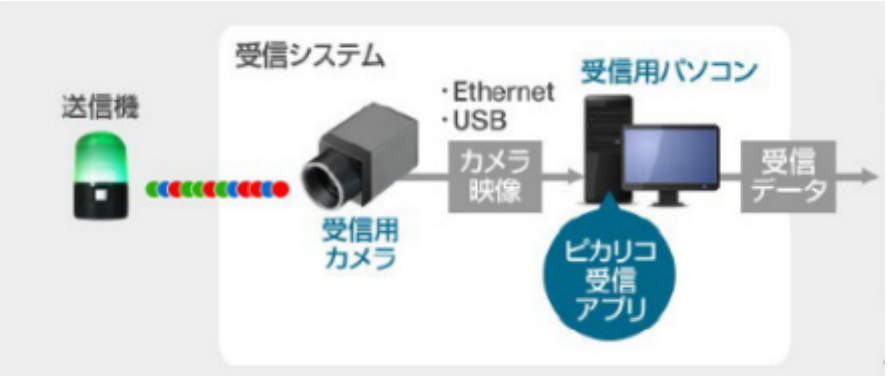


図 21　可視光通信システムのシステム構成

③　原理

図 22　可視光通信システムの原理

今回の実証実験では、LED 表示灯を使用した。

④　位置測位

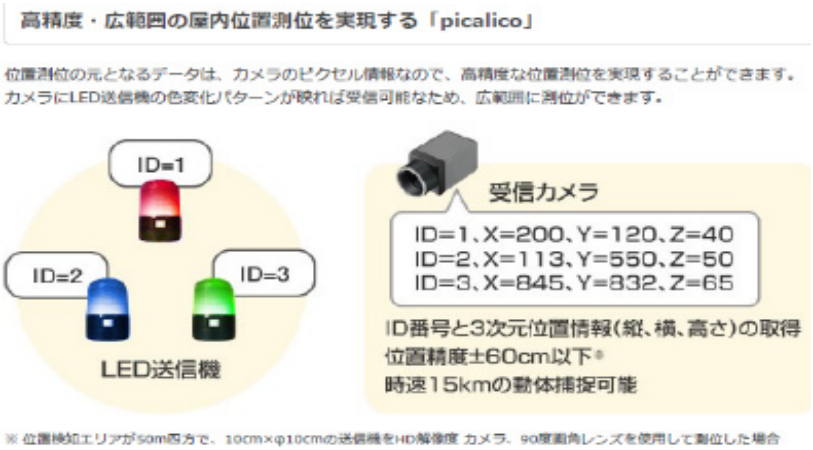


図 23　可視光通信システムの位置測位機能

⑤　主な仕様

表 9　可視光通信システムの主な仕様

送信可能ID数	1,062,882種
同時受信可能数	100
最少応答時間	2.6sec
受信距離条件	カメラ映像内に信号が映ること
受信エラー率	7.5×10^{-7} ※弊社規定環境条件下
変色周期	10Hz
発光色波長範囲	赤：610～640nm 緑：515～575nm 青：460～480nm
使用環境照度	1500lx以下

⑤　3D 動線表示・分析ツール（株式会社シー・イー・シー製）

３Ｄ動線表示・分析ソフト　「RaFLOW（ラフロー）」

倉庫・物流センターの人、モノ、機器の位置、作業動線が、パソコンで簡単管理！ログデータの簡単集計で作業やレイアウトのムダを省きます

株式会社シーイーシー

動線表示・分析ソフト「RaFLOW（ラフロー）」は3次元ビュアーによる描画技術と位置情報システムを組み合わせ、リアルな3Dモデルで物流現場をモニタリングできる位置情報管理・動線分析ソフトウエアです。
RFID、WiFi、超音波など様々な位置情報に対応し、動線分析、滞留ポイント、エリア別滞在分布など幅広い分析が可能です。
詳しくはカタログをダウンロードしてください。

３Ｄ動線表示・分析ソフト　「RaFLOW（ラフロー）」 製品画像

基本情報

【特長】
○遠隔地からリアルタイムに現場状況の把握が可能
○3D表示、表現力における臨場とリアリティーを追及
○3Dアニメーションの動きから作業員別・時間帯別などの様々な角度から動線表示が可能
○GPSの位置情報の誤差から生じる、壁などの障害物を通り抜けてしまう現象を自動的に補正し、より正確な移動距離、動線、移動時間が測定が可能
○ログを分析したアウトプット機能により、現状の問題点や課題分析、計画と実績に対比分析により継続的な改善につなげることが可能

図 24　3D 導線表示・分析ツールの説明

(2)　センサービーコン（MEDiTAG）

①　HOYA デジタルソリューションズ株式会社製

②　MEDiTAG 本体の主な仕様（出典：HOYA デジタルソリューション株式会社提供資料）

・光学脈波・加速度・気圧センサ内蔵
・動作時間 16 時間
・バイブ機能（クラウド制御機能）
・サイズ　38mm × 25mm × 9mm
・重量　10g
・防水　生活防水レベル
・動作温度　-10～+60℃

写真 18　センサービーコン端末

③　測定項目

表 10　センサービーコンの測定項目

測定項目	アルゴリズム内容
脈拍測定	光学脈波センサーによる脈拍測定
血圧測定	光学脈波センサーによる相対的血圧測定 ※静止時のみ取得
ストレス度測定	光学脈波センサーによるストレスレベル測定 ストレス度の目安として一般的に知られているHRV（heart rate variability）の LF/HF（揺らぎの低周波成分と高周波成分の比率）を計算
歩数	加速度センサーによる歩数検知
消費カロリー	加速度センサーによる歩行・運動強度を考慮したカロリー計算
行動認識	加速度センサーによる止まっている・歩いている・走っている状態の検知
転倒検知	気圧センサーによる落下と転倒時の衝撃の検知

④　ゲートウェイ(GW)の仕様

・外形寸法　L95mm×W65mm×H30mm

・質量　本体 117g

・OS Android6.0

・対応バンド　W-CDMA(2100/800MHz)Band 1、6

FDD-LTE(2100/1800/800MHz)Band 1、3、19

・インターフェース　micro USB-B OTG (USB 2.0)、温度センサ端子

・SIM スロット　microSIM slot ×1

・無線 LAN　IEEE802.11 a / b / g / n 準拠(2.4GHz / 5Ghz)

・Bluetooth　Bluetooth4.0 Smart Ready

・状態表示 LED ×2・使用温度範囲　－20～70℃

・湿度範囲　20%～80%RH

・防水性　IPX3(生活防水)

写真 19　ゲートウェイ(GW)

4.4.10　実証実験結果と考察

表 11 は 10 月 26 日に実施した支援的保護システムに関する実験のタイムテーブルである。実験はそれぞれの内容に対して 18 試行を行った。

表 11　支援的保護システムに関する実験のタイムテーブル

試行	開始時刻	終了時刻	内容	Picalico	MEDiTAG
1	9:47:00	9:49:00	クレーンログ無し	露光調整前	受信機移動前
2	9:52:10	9:54:14			
3	9:54:40	9:56:25			
4	9:57:00	9:58:55			
5	10:10:30	10:13:30	クレーン追従		
6	10:13:55	10:15:25	人が激しく交差		
7	10:15:50	10:17:30	LED を胸の前に		
8	10:17:50	10:19:50	LED を胸の前 交差激しく		
Picalico のカメラ露光を調整					
9	10:51:00	10:54:02	-	露光調整後	
シャッターを閉める					
10	10:58:36	11:00:24	-	シャッター閉	
11	11:10:45	11:12:21	高さ固定		
12	11:12:55	11:14:45	高さ固定		
13	11:16:30	11:21:36	クレーン斜め移動		
14	11:24:00	11:26:00	クレーン移動無し		
MEDiTAG 受信機移動 Picalico を RGB モードからベイヤーモードへ					
15	14:56:30	14:58:00	クレーン移動無し	ベイヤーモード	受信機移動後
16	15:02:00	15:03:50	-		
17	15:06:20	15:08:10	-		
18	15:10:30	15:14:50	クレーン斜め移動		

4.4.10.1　可視光通信システム（Picalico）の ID 確認

まず、各試行においてクレーンの吊り荷を Picalico で測位した際のデータ欠損率を**表 12** に示す。試行 8 までで 35.7%と、多くのデータ欠損が生じていた。これは、実験エリアの南側にシャッターがあり、工場全体に天窓があったため、日光などの外乱の影響を強く受けたためであると考察した。

そこで、これを改善する為に、カメラの露光を調整した。その結果、欠損率は 6.5%まで低下した。しかし、依然としてデータ欠損があったため、実験エリア南側のシャッターを閉めて再度測位を行った。その結果、欠損率は 5.1%まで低下した。更なる欠損率低下のために、カメラを RGB モードからベイヤーモードへ変更した。その結果、欠損率は 0.07%まで低下した。

次に、各試行において被験者 6 名を Picalico で測位した際のデータ欠損率を**表 13** に示す。試行 7、8 では、ID ロストを意図的に発生させるために、6 名の被験者のうち 3 名（被験者 B、D、E）が LED を胸の前で持ち、実験を行った。その結果、LED を胸の前で持った 3 名の ID 欠損率は他の 3 名より大幅に大きくなった。この結果

より、Picalico の LED が死角に入ることで、ID をロストすることが確認できた。ここで、被験者 C はクレーン誘導のため、常に吊り荷の近くにおり、死角に入りやすい可能性があるが、他の作業者に比べ、欠損率が高くなることはなかった。また、試行 6、 8 では被験者が意図的に交差や接近を繰り返すように動いたが、試行 6 は他の試行と比べて、試行 8 は同じく LED を胸の前に持った試行 7 と比べて、データ欠損が多くなることはなく、接近や交差による作業者同士の ID の入れ替わりや ID の変化は発生しなかった。

これらの結果より、Picalico では、外乱と死角によって ID のロストが発生することが確認できた。

Picalico は可視光通信によって ID 認識と測位を行っているため、LED が十分な輝度と大きさでカメラに写っていなければ LED を認識できず、データの欠損が生じてしまう。実際に、カメラの露出を調整することで、データ欠損率の大幅な低下が確認できた。

Picalico の設定は、実験前日の 10 月 25 日に調整し、動作確認も行ったが、実験当日には大きな誤差が生じた。これは、日光による外乱が大きく影響していると考察した。気象庁のデータによると、10 月 25 日の現場周辺（佐野市）の日照時間（直達日射量が 0.12kW/m^2 以上）は 0 であったのに対し、10 月 26 日の実験を行った時間帯では、ほぼ全ての時間において日照があった。このように、日照条件は日にちや時刻によって変化するため、窓などから日光が差し込む環境において十分な精度で可視光通信を使用する場合は、外乱の影響を考慮し、外乱を完全に遮るか影響を低減させるか、カメラの設定を動的に変化させなければならない。

一方、死角による ID のロストは、意図的に LED を隠さない限り発生しにくいことが確認できた。ただし、本研究ではカメラを 4 台使用したため、4 台すべての死角に入る可能性は低く、データの欠損率が低かったと考察した。周囲に、死角となる障害物が存在する場合、欠損率も上昇するため、測位したいエリアに応じて、死角がなくなるように障害物をなくすか、カメラの設置台数、設置位置を検討する必要がある。

表 12　吊り荷の Picalico のデータ欠損率

試行	データ数	欠損数	欠損率[%]	状況毎の欠損率			
				状況	データ数	欠損数	欠損率[%]
2	399	243	60.9	露光調整前	2634	940	35.7
3	337	227	67.4				
4	369	150	40.7				
5	563	97	17.2				
6	286	96	33.7				
7	321	58	18.1				
8	359	69	19.2				
9	567	37	6.5	露光調整後	567	37	6.5
10	331	22	6.6	シャッター閉	1806	93	5.1
11	272	28	10.3				
12	307	24	7.8				
13	896	19	2.1				
16	353	0	0	ベイヤーモード	1530	1	0.07
17	353	0	0				
18	824	1	0.1				

表 13　被験者毎の Picalico のデータ欠損率（%）

試行	A	B	C	D	E	F	合計	状況	合計
1	2.0	6.6	5.9	10.2	44.6	-	11.7	露光調整前	7.3
2	0.5	3.5	1.0	0.3	24.9	-	5.0		
3	1.5	8.6	12.2	3.9	39.8	-	11.6		
4	0	0.8	4.6	1.1	13.8	1.1	3.6		
5	1.1	6.2	6.7	5.7	37.8	8.2	11.0		
6	2.1	22.8	3.8	3.5	18.0	2.8	8.8		
9	1.1	0.2	1.6	0.8	10.8	1.9	2.7		
7	3.4	36.4	4.4	28.0	25.9	4.4	17.1	LED 隠す	17.0
8	0	54.3	2.3	19.5	21.6	3.4	16.8		
10	0	3.3	3.6	0.9	0	0	1.3	調整後	1.3
11	0	0	2.6	4.8	2.2	0.4	1.7	シャッター閉	5.6
12	0	0.9	2.1	5.7	3.3	1.2	2.2		
13	0	0.2	5.4	32.5	5.2	4.9	8.0		
14	0	9.4	11.2	1.8	6.5	2.9	5.3		
16	0.8	-	0	2.0	0.3	0	8.5	ベイヤーモード	5.9
17	0.0	-	0	0	0	8.0	1.6		
18	0	-	1.3	0	0.1	20.6	6.9		

※試行 15 は Picalico のデータなし

4.4.10.2　可視光通信システム(Picalico)の位置測位精度

最初に、Picalico の二次元位置測位の精度を検証する為に、クレーンの吊り荷を移動させた際に、クレーンのクラブが保持している座標ログと Picalico の測位結果を比較し、Picalico の位置測位精度を検証した。**表 14** に、各試行における、Picalico の測位誤差を示す。

Picalico のデータ欠損率を低下させるために、カメラの調整等を行ったが、欠損率の低下に伴い測位誤差は大きくなっており、欠損率と測位誤差がトレードオフの関係にあることが確認できる。

また、Picalico の各条件での測位結果（**図 25**～**28**）から、調整前に欠損が生じていた実験エリア東側（グラフ下側）では、調整後に測位可能になっても大きな誤差が生じていることが確認できる。欠損が生じていた箇所には日光など外乱の影響があり、設定の調整により測位可能になっても、外乱の影響を完全には取り切れず、大きな誤差が生じていると考察できる。Picalico の使用想定環境は照度 1500lx 以下だが、工場内は 1500lx～1800lx 程度あり、シャッターの近くでは 3000lx あり、工場内が使用想定環境範囲を超えていた。そのため、測位精度が低下したと考察する。

表 14　Picalico の測位誤差

試行	測位誤差の平均[mm]			状況毎の誤差平均	
	Max	Min	Average	状況	誤差[mm]
5	2508	10	304	露光調整前	**357**
6	3865	18	531		
7	2351	22	398		
8	2288	48	271		
9	2846	10	415	調整後	**415**
10	2776	26	598	シャッター閉	**700**
11	2921	23	817		
12	2940	11	849		
13	7472	7	655		
16	2920	26	668	ベイヤーモード	**964**
17	2565	38	580		
18	9958	19	1256		

※試行 1、14、15 はクレーンの移動なし、2～4 はクレーンのログなし

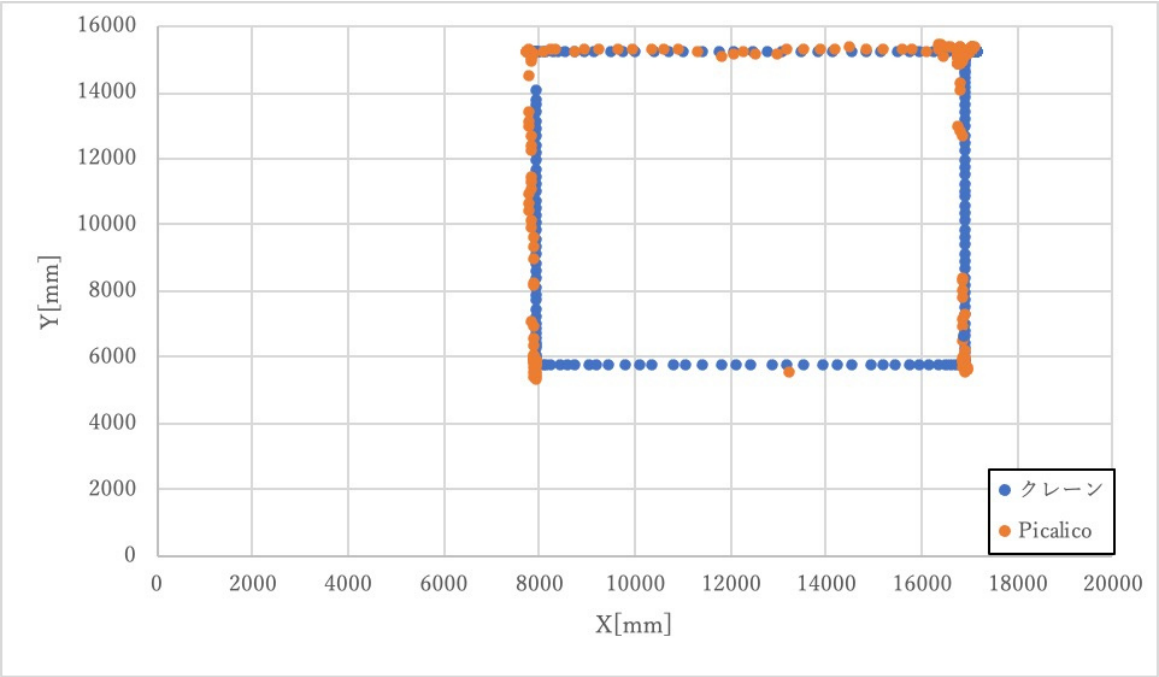


図 25　試行 5（露光調整前）の Picalico 位置測位結果

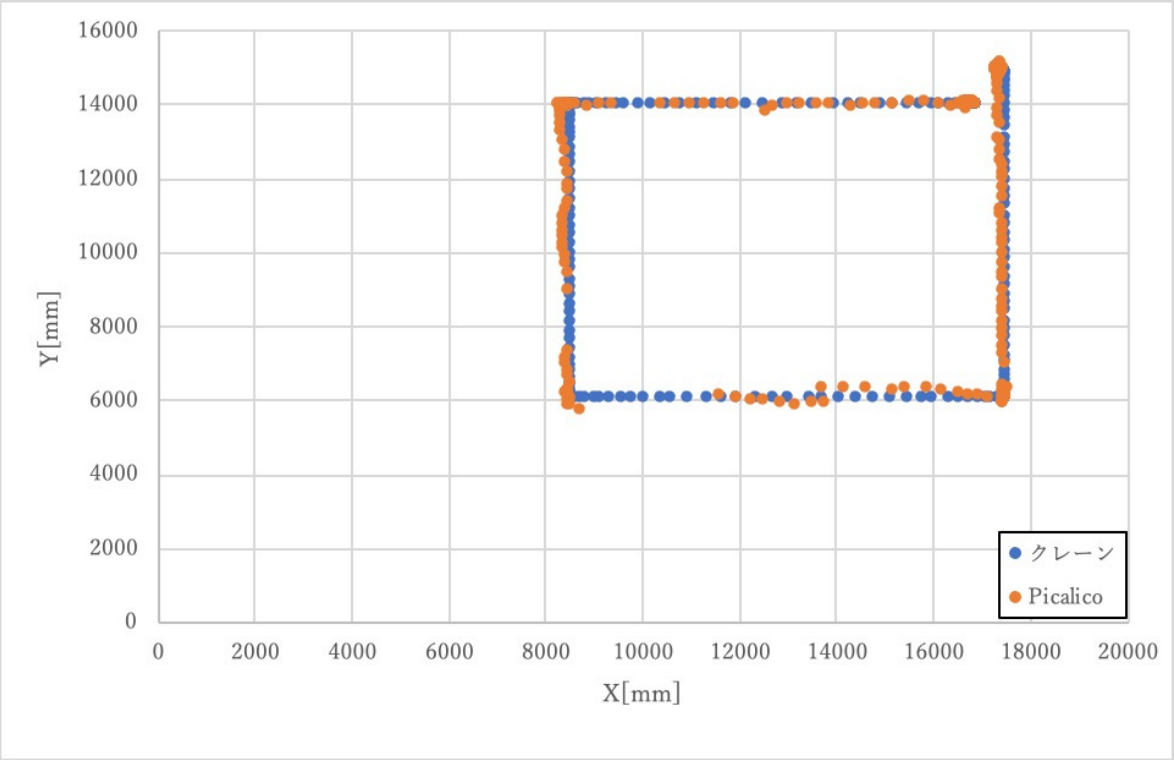


図 26　試行 9（露光調整後）の Picalico 位置測位結果

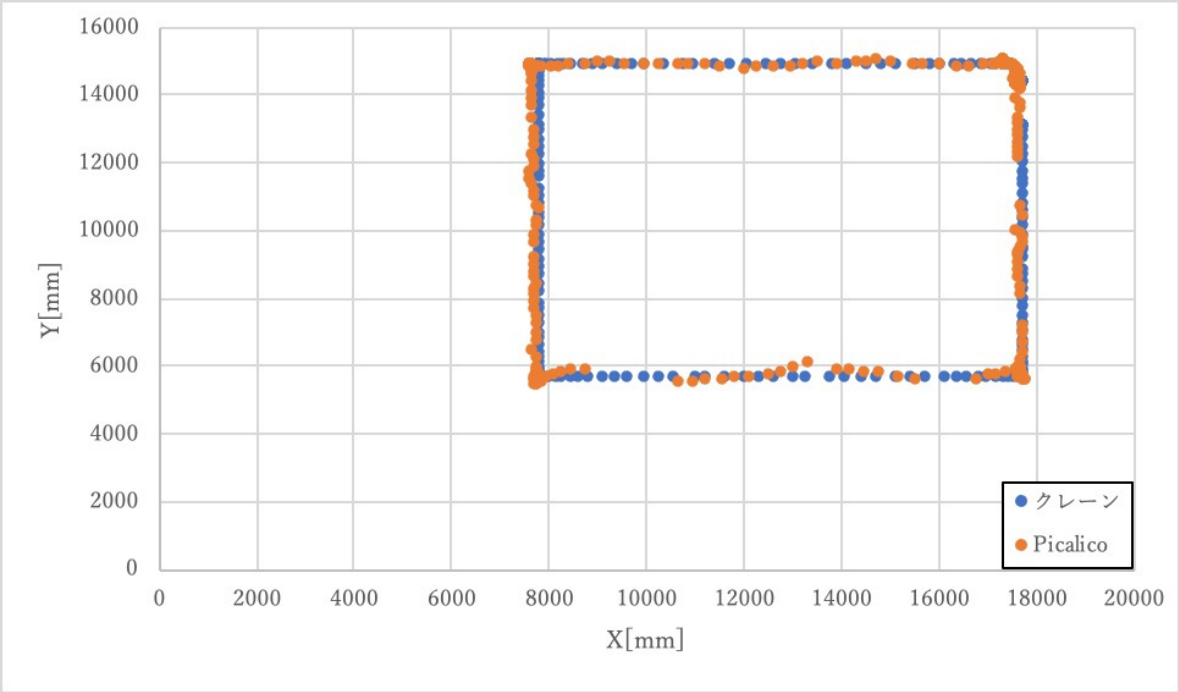


図 27　試行 10 の Picalico 測位結果（シャッターを閉めた後）

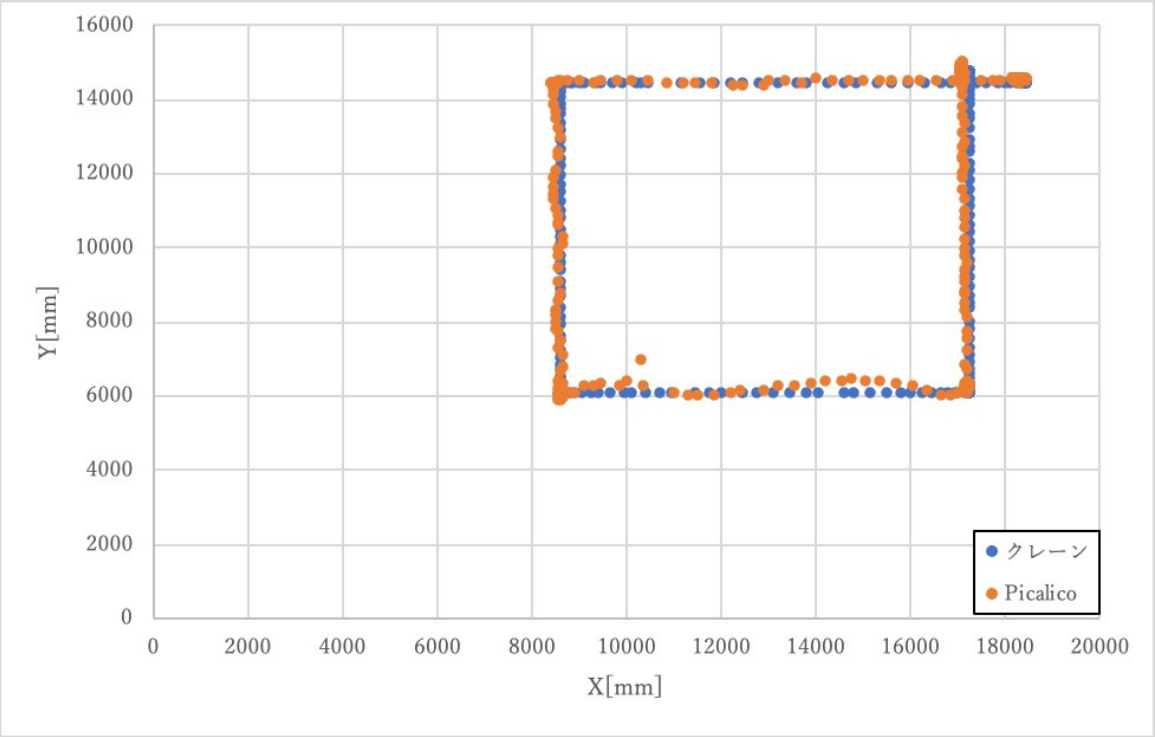


図 28　試行 16 の Picalico 測位結果（ベイヤーモード）

次に、Picalico の高さ方向の測位精度を検証する。

1) クレーンで吊り荷を吊り上げ、LED の高さを 2.4m に固定してクレーンのクラブを動かした。これを 2 試行（試行 11、12）行った Picalico の高さの測位誤差を**表 14** に示す。Picalico は 20mm 程度の誤差で高さの測位が行えた。

表 14　Picalico の Z 軸測位結果 [mm]

試行	Max	Min	Average
12	63	0	20.6
13	61	0	18.4

2) 吊り荷の高さを変化させながらクレーンのクラブを移動し（試行 14、18）、吊り荷の高さをレーザー距離計で計測して、Picalico の測位結果と比較する。
試行 14 での地面から吊り荷の底面までの高さは、開始時は 100mm、②では 1940mm、③では 185mm、④では 2460mm、終了時は 430mm であった。吊り荷の高さは 980mm なので、LED の高さの遷移は①1080mm→②2920mm→③1165mm→④3440mm→①1410mm である。この場合の Picalico の高さ測位結果を**図 29** に示す。
同様に、クレーンのクラブを斜めに移動させた試行 18 の測位結果を**図 30** に示す。試行 18 での LED の高さの遷移は、①980mm→②3154mm→③1130mm→④3216mm→①1080mm、最後にクレーンのクラブを完全に下降させ、980mm であった。この時の高さの測位誤差を**表 15** に示す。
高さを変動させても誤差の平均は 20mm 未満であり、高い精度で測位ができることが確認できた。

したがって、二次元測位の結果と合わせて、Picalico は作業者と危険源の接近検知に十分な精度で三次元測位を行えることが確認できた。

表 15　高さ変動時の Picalico の Z 軸測位結果[mm]

試行	レーザ距離計	Max	Min	Average
12	①1080	62	3	39.9
	②2920	60	0	21.0
	③1165	51	0	16.5
	④3440	47	0	16.0
	①1410	42	0	16.4
	全体	62	0	18.5
13	① 980	26	0	10.1
	②3154	58	11	27.8
	③1130	118	0	10.1
	④3216	67	0	19.3
	①1080	133	0	19.3
	① 980	32	0	7.1
	全体	133	0	18.0

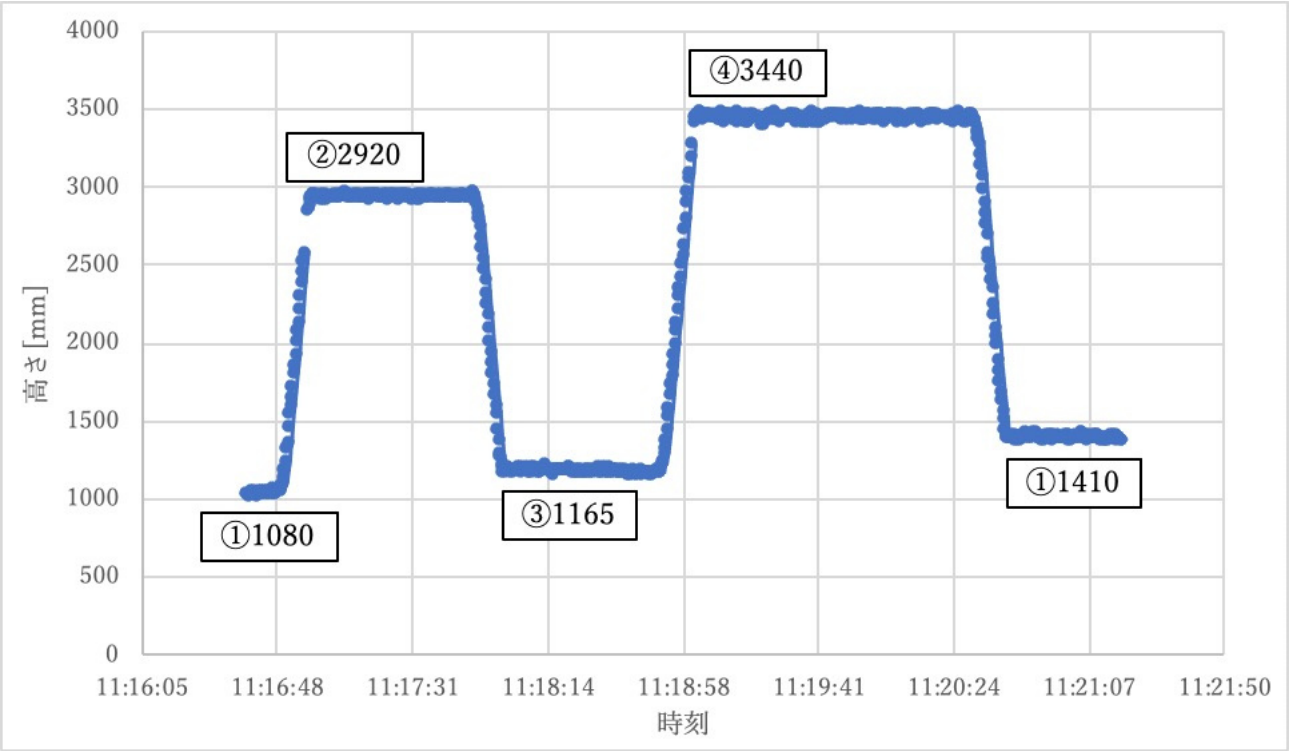


図 29　試行 14 の Picalico の高さ測位結果

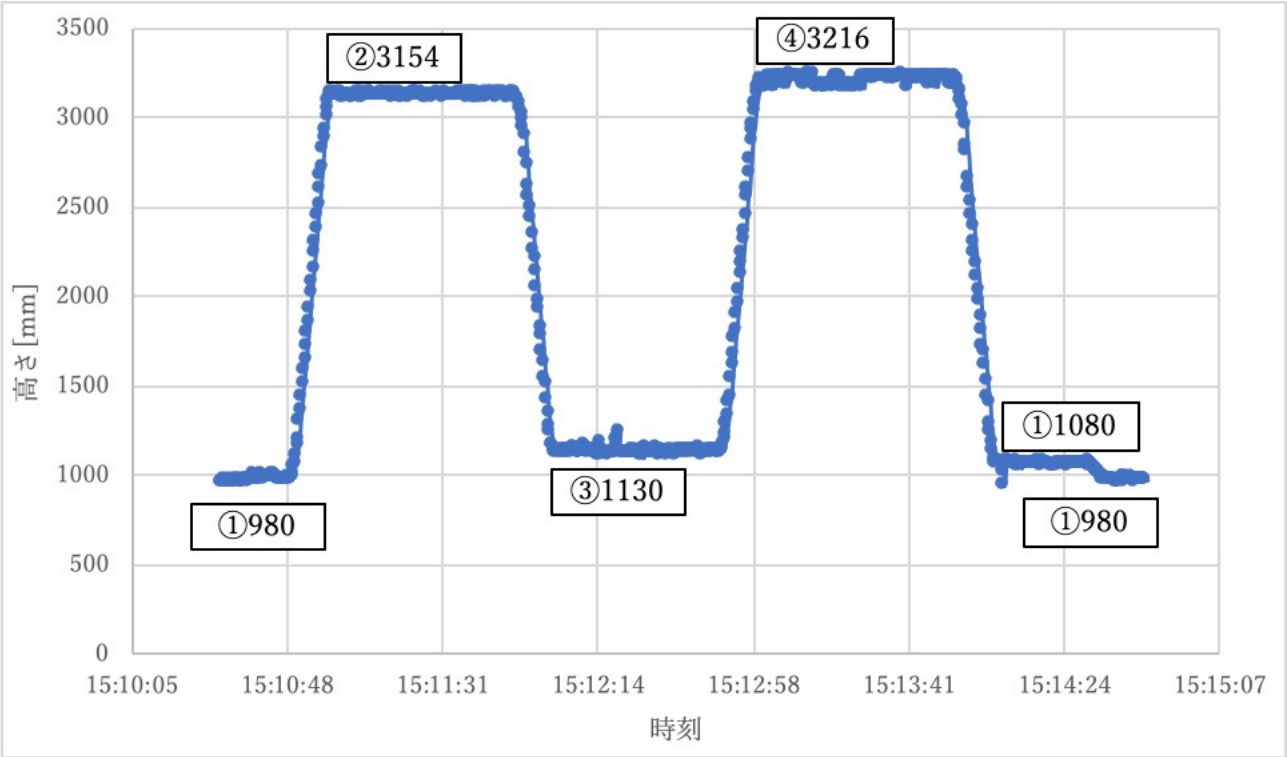


図 30　MEDiTAG 測位結果（気圧）

カメラを複数台使用する場合には、意図的に隠そうとしない限り ID のロストは発生せず、測位誤差が小さいことから、Picalico は人と危険源との接近検知を行えることが確認できた。

ただし､現在の Picalico の LED は大きく､作業者のヘルメットに固定して作業を行うのは現実的ではないし､､試作段階の小型の LED を使用した測位では、実用レベルの欠損率と誤差を実現できなかった。そのため、現状のシステムでフォークリフトなど機械の測位は行えるが、作業者の測位を行うためには、LED の小型化かつ高輝度化を実現することが今後の課題となる。

4.4.10.3　Bluetooth を用いた三次元測位の精度について

Picalico と同様に、クレーンのクラブの座標ログと MEDiTAG の測位結果を比較し、二次元測位の精度を検証した。MEDiTAG の測位誤差を**表 16** に示す。

MEDiTAG の測位結果を**図 31** に示す。MEDiTAG の二次元測位では平均で約 4.4m、最大で 15m 以上の誤差が生じた。MEDiTAG は BLE（Bluetooth Low Energy）の電波強度で測位をしていることから、周囲の金属での電波反射が影響して正しい電波強度が測定できず、大きな誤差が生じたと考察した。そこで、MEDiTAG の受信機の取り付け場所を金属製の柱から三脚に変更し、三脚を金属から離れた場所へ移して再度実験を行った。この時の MEDiTAG の測位結果を**図 32** に示す。結果として、測位誤差は約 3.8m まで低下したが、依然として最大で 10m 以上の誤差が生じており、作業者の移動の様子を確認できる精度ではなかった。

これらの結果より、Bluetooth を用いた二次元測位の精度は、人と危険源の接近検知を行うには不十分であるが、作業者のおおよその位置の計測を行えることが確認できた。さらに、受信機の設置方法の変更により、測位精度が向上することが確認できた。受信機の設置方法の調整や、受信機の追加、測位のアルゴリズムの改善などにより精度向上が可能であるかもしれない。

表 16　MEDiTAG の測位誤差[mm]

試行	測位誤差の平均			状況毎の平均	
	Max	Min	Average	状況	Average
5	10457	939	4457	受信機移動前	4390
6	9362	388	4022		
7	14373	1195	4738		
8	12127	1314	4628		
9	10675	466	3864		
10	14637	109	4729		
11	9778	412	4527		
12	13305	910	4231		
13	15029	737	4457		
16	12779	93	5113	受信機移動後	3817
17	12460	85	3664		
18	10761	152	3331		

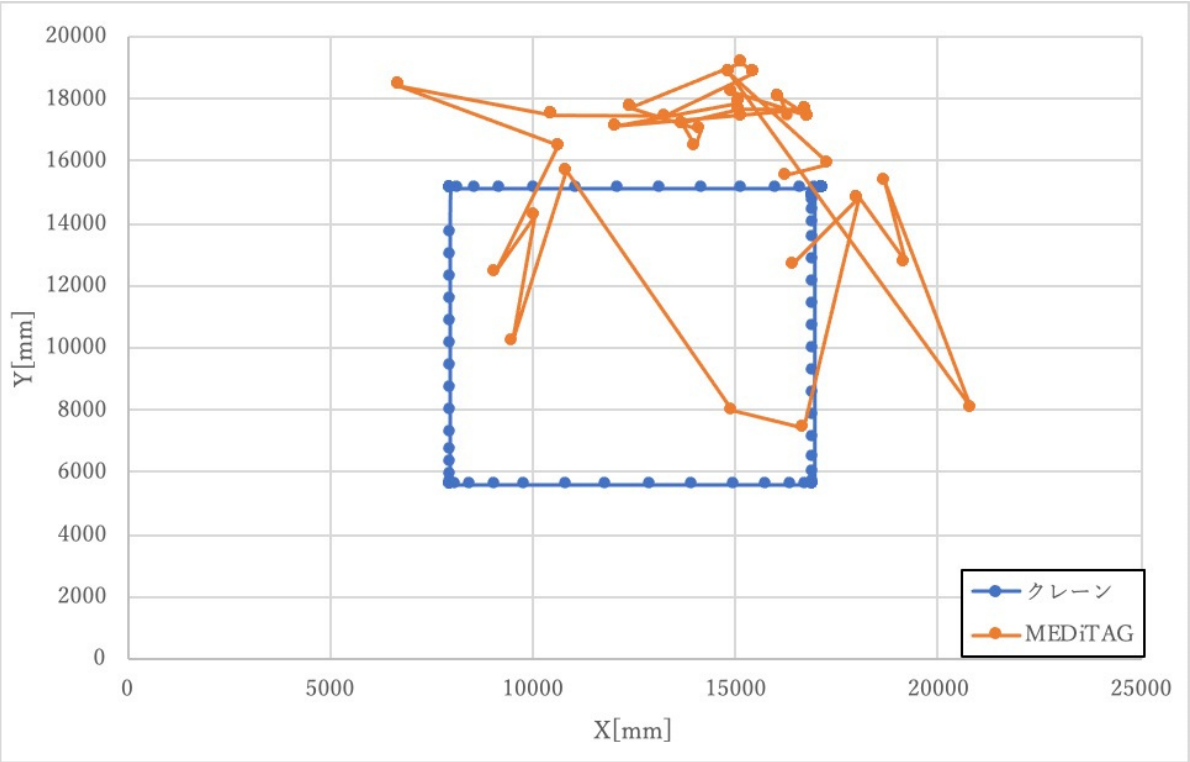


図 31　試行 5　MEDiTAG の測位結果（受信機移動前）

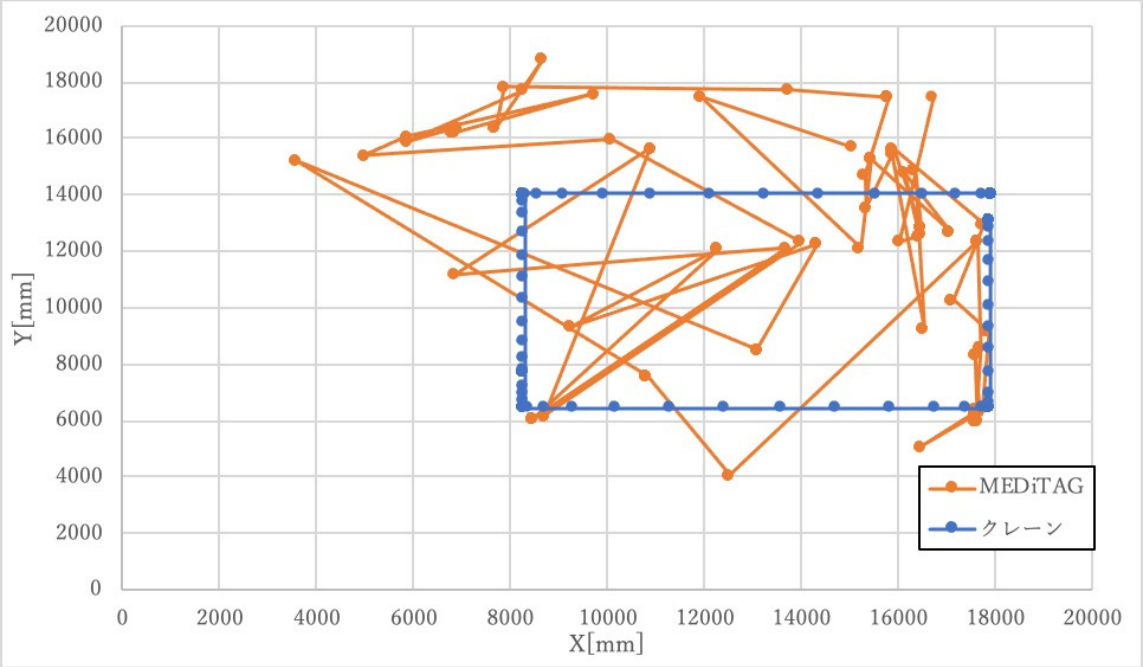


図 32　試行 18 の MEDiTAG 測位結果（受信機移動後）

次に、MEDiTAG の高さの測位精度を検証する。ただし、MEDiTAG は二次元での座標しか測位していないため、気圧のデータを高さの指標とした。吊り荷の高さを変更しながらクレーンのクラブを動かした試行 14、18 における、MEDiTAG の気圧計測結果を Picalico の高さ測位結果と合わせて、**図 33**、**図 34** に示す。吊り荷の高さの変化に応じて気圧も変化しており、気圧が高さの指標として使えることが確認できた。ただし、気圧は大気の状態、高度又は時間経過によって変化し、気圧の値から作業者の高さを正確に求めることは困難である。そのため、気圧を高さの指標として用いる際は、気圧の変動を見ることで作業者の高さの変動を見る必要がある。

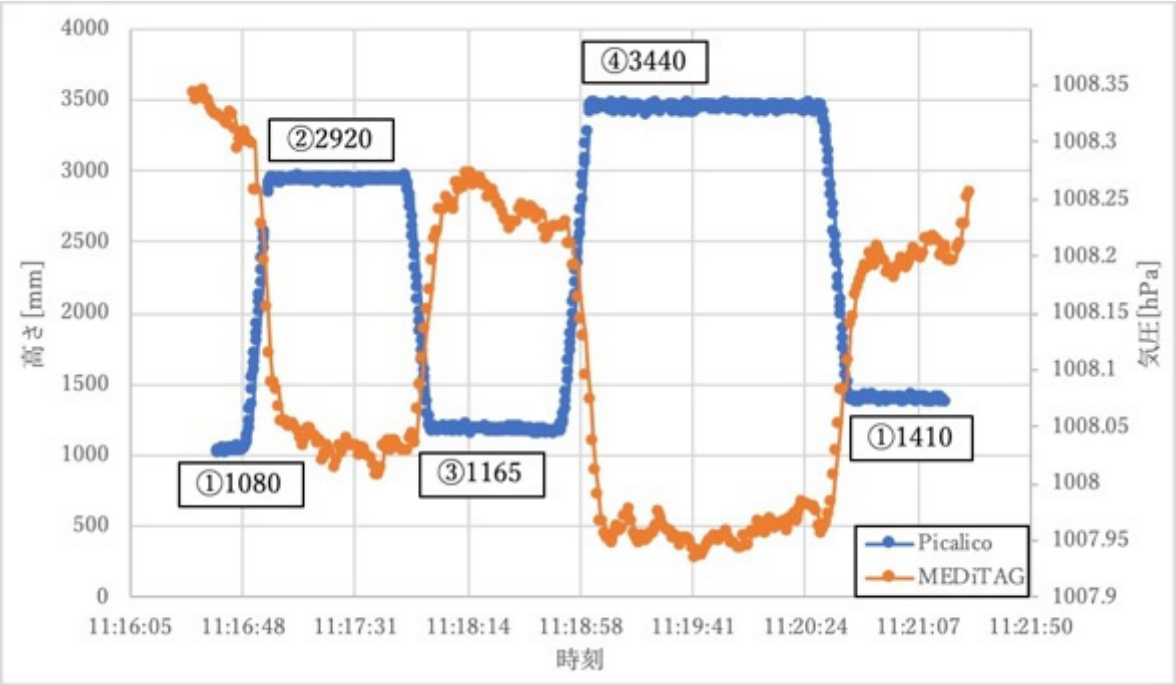


図 33　試行 14 の Picalico(高さ)と MEDiTAG（気圧）の位置測位結果

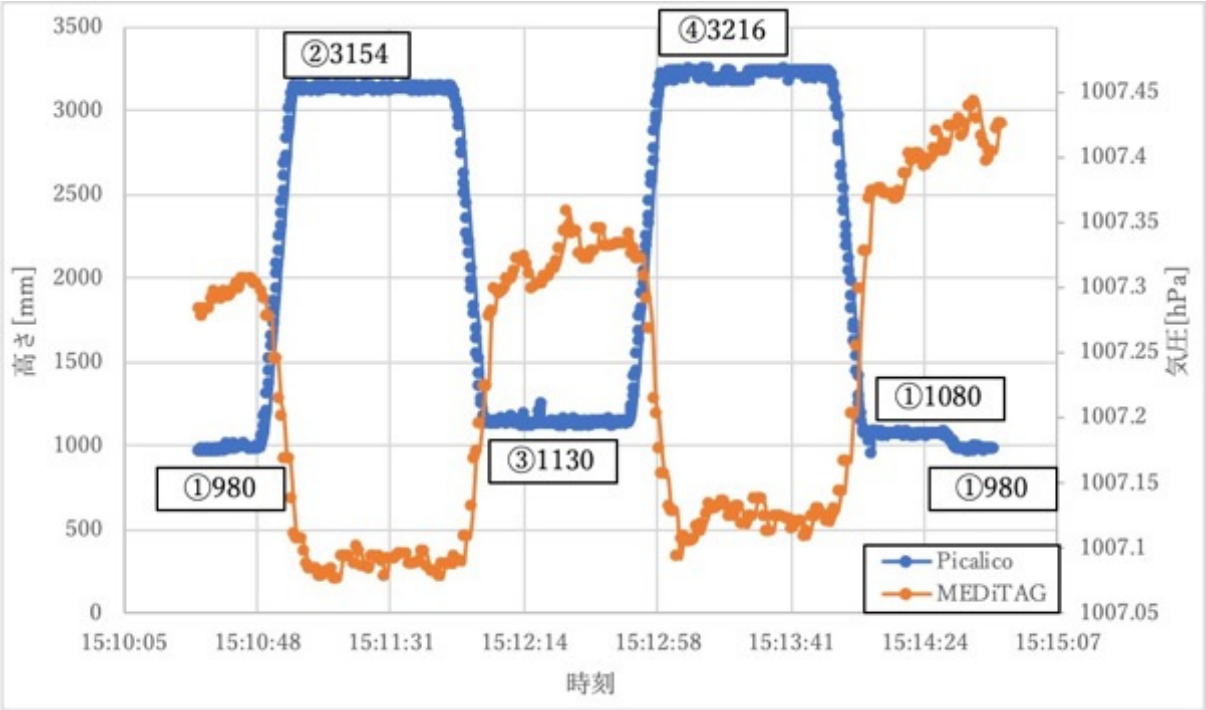


図 34　試行 18 の Picalico(高さ)と MEDiTAG（気圧）の位置測位結果

4.4.10.4　姿勢情報による危険検知特性について

MEDiTAG で取得した生体情報と、実験時の様子を撮影した映像を比較し、作業者に発生した異常を MEDiTAG のデータから検出できるか検証した。ただし、被験者が実際に転倒することや、体調不良になることは困難であるため、本研究では転倒を想定した倒れ込みの動作を行い、これを検知できるか検証した。

4.4.10.3 の結果から、気圧が作業者の高さの指標となることが確認できたため、気圧データから作業者の行動を検出できるかを検証した。試行 14 で、被験者 6 名が寝ころびや屈伸、ジャンプなど、上下の移動を伴う動作を行った際の MEDiTAG の気圧計測結果を**図 35** に示す。

図 35 から、時間経過に伴い全体的に気圧が低下傾向にあることが確認できる。特に、試行 14 ではクレーンの吊り荷を動かしていないにもかかわらず、気圧が緩やかに低下している。そこで、時間経過による気圧の変動の影響をなくすため、クレーンの吊り荷位置の気圧データと各被験者の気圧データとの差分を取った（**図 36**）。

本来、高所に行くほど気圧は下降し、低所に行くほど気圧は上昇するが、**図 36** においてはクレーンの吊り荷と被験者の気圧の差分を取っているため、被験者が低所に行くほど気圧の差分の値も低下している。

次に、被験者 B について、Picalico の高さ測位結果と MEDiTAG の気圧計測結果（クレーンの吊り荷位置との差分値）を比較し、実験時の映像で確認した被験者 B の行動を記載したものを**図 37** に示す。

Picalico のサンプリングタイムは 0.3 秒であるため、被験者の動作を詳細に確認することができ、高さの違いからしゃがみと寝ころびを区別することができる。一方、MEDiTAG のサンプリングタイムは 1 秒間隔であるため、屈伸やジャンプのように素早い動作を詳細に把握することができなかった。

MEDiTAG は、寝ころびはゆっくりかつ変動の大きな動作であるため、気圧の変動が確認できた。屈伸やジャンプを行った際にも気圧の変動は確認できるが、上下運動を繰り返していることまでは確認できない。

Picalico の LED は頭上にあり、被験者の上下運動をそのまま反映するのに対し、MEDiTAG のタグは手首に付

けていたため、全身の動きとは異なる、腕のみの動きの影響を受ける可能性がある。

図 36 より、被験者 D は最大で 0.8hPa 程度の気圧変動があり、被験者 C 及び被験者 F は 1hPa 程度の気圧変動がある。0.8hPa の気圧差は約 6.78m、1hPa の気圧差は約 8.47m の高度差にあたるが、実験中の高度の変化は最大でも 2m 程度（被験者が手を挙げている状態と寝ころんでいる状態の差）である。そのため、被験者 D のデータは正確に計測できていない。また、センサごとに測定値に差があったため、気圧の値からそのまま高度を求めることはできない。

一方、**図 37** より被験者 B の気圧変動は最大で 0.2hPa 程度で、約 1.69m の高度差にあたる。実際に、被験者 B が頭上の LED を抑えている際の手首位置と寝ころんだ際の手首位置の高度差は 1.7m 程度であり、気圧の変動から高さの変動を正確に測れることが確認できた。

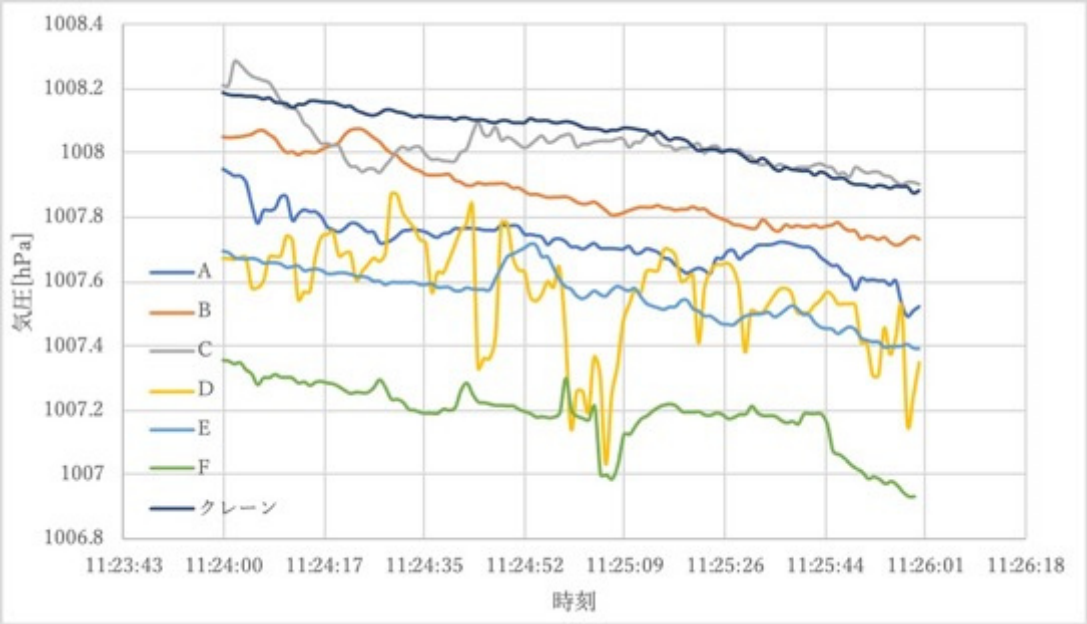


図 35　試行 14 の MEDiTAG 気圧計測結果

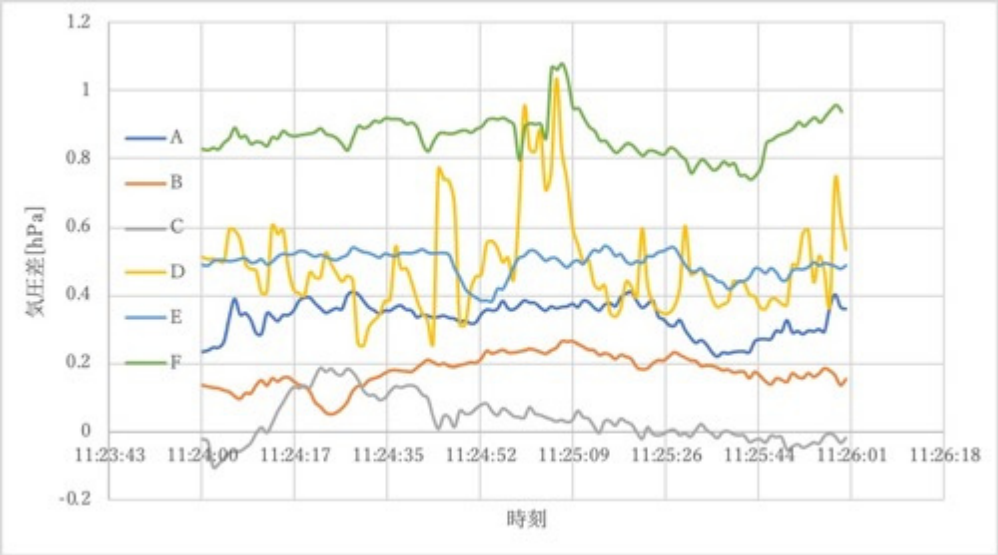


図 36　各被験者とクレーンの吊り荷位置の気圧差

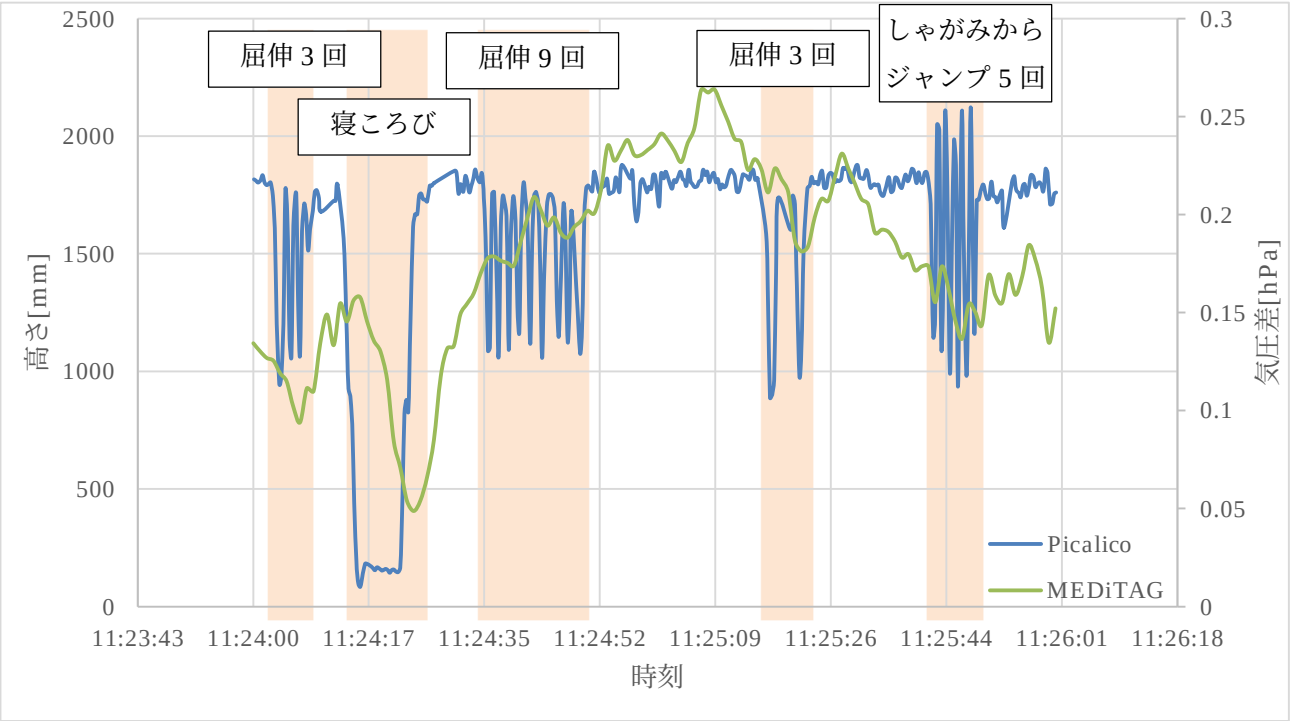


図 37　被験者 B の Picalico、MEDiTAG の位置測位結果と行動

図 38 にその他のバイタルサイン及びその時の作業者の動作を示す。MEDiTAG には加速度や気圧から転倒を検知する機能が備わっているが、実験中に転倒を検知した回数は 5 回で、その内 4 回は実際には転倒していなかった。1 回のみ、被験者が転倒を想定して、しゃがみながら腕を振り下ろす動作を転倒として検知していた。

加速度は、実際に記録する値は「0：止まっている、1：ゆっくり動いている、2：速く動いている」の 3 値であり、**図 38** において被験者が寝ころんでいるときに加速度レベルが 2 になっているように、被験者の動きとの関連がない箇所があった。脈拍のデータは被験者の動きに伴って上昇していることが確認できたが、その他のバイタルデータに関しては、被験者の動きと明確な関連がなかった。

実験時には実際に被験者に体調不良などの異常を発生させることはできず、転倒に関しても転倒を想定した倒れ込みの動作を行ったので、MEDiTAG が検知できる転倒とはデータの特徴が異なっていた可能性がある。

本研究では、気圧による転倒検知以外に、危険検知に有効な指標は確認できなかったが、様々なバイタルサインを、位置情報と共にリアルタイムで取得できたため、バイタルサインの通信方式として、Bluetooth が有益であることが確認できた。

今後は、複数のバイタルサインを組み合わせる、別のバイタルサインを取得する、様々な条件及び被験者で検証を行う、労働中の作業者のバイタルサインを取得する、などにより有効な指標を検討することで、作業者の異常状態の発生を検出できると考える。

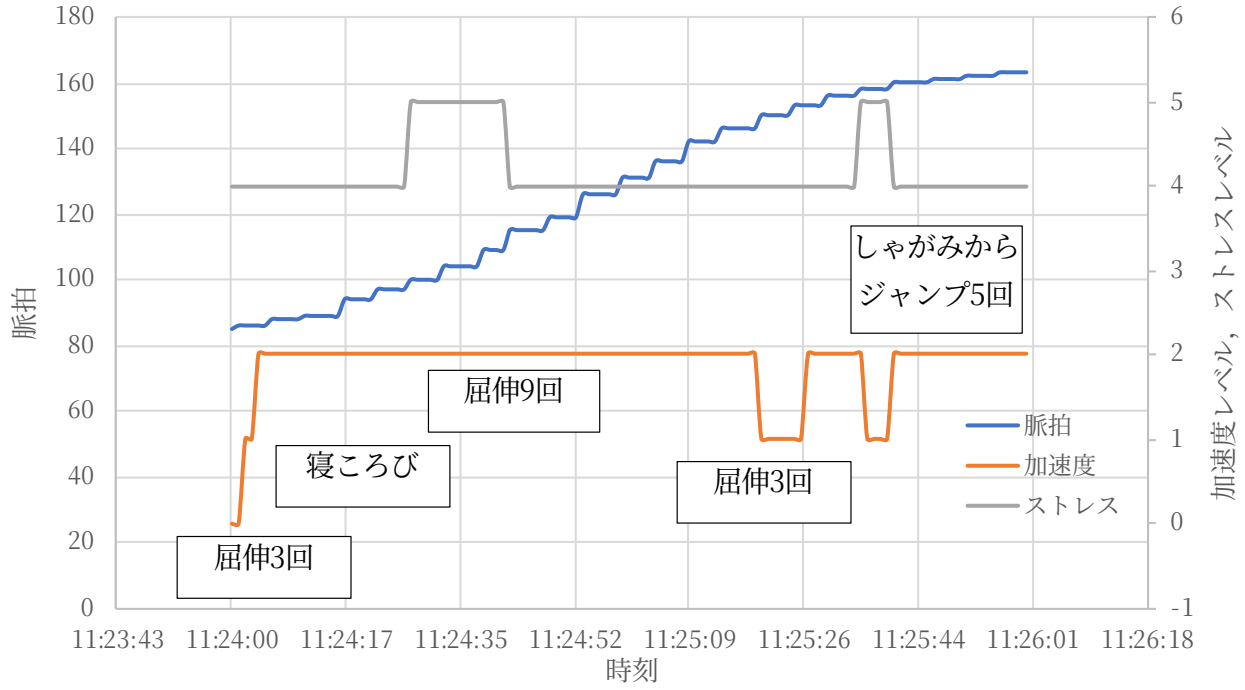


図 38　被験者 B の姿勢変化に対するバイタルサイン（脈拍）の変化

4.4.10.5　結論

本研究では、作業者と機械の共存・協調作業に関する安全を実現する為に、作業者や危険源の ID と三次元位置情報、作業者のバイタルサインをリアルタイムにモニタする支援的保護システムの有効性を検証する実験を行った。

その結果、可視光通信システム Picalico では、作業者と危険源の接近検知を行うのに十分な精度で ID 認識と三次元位置測位が行えた。位置測位データの欠損率と測位誤差はトレードオフの関係にあったが、欠損率が低下した場合の測位誤差も実用に耐えるものであった。

実際に使用する場合は、支援的保護システムを導入する環境に応じて必要な精度を検討し、外乱や死角が少なくなるように留意することで欠損率及び誤差を共に抑えることができると考察した。

Picalico は、今回使用した発信機（移動機）は形状が大きいので、作業者の測位を行うには形状の小型化とともに、計測に必要な発光量の維持が課題となる。

バイタルモニタービーコンの MEDiTAG を用いた位置測位の精度は、作業者と危険源との接近検知を行うには不十分であった。しかし、おおよその位置情報は取得できるため、バイタルサインなど他の情報と組み合わせることで、作業者の異常発生検知（体調不良に伴う転倒等）とそのおおよその位置検出とを行うことが可能であることが推測できる。なお、気圧データからは作業者や危険源の高さの変動を見ることができ、高さの指標となることが確認できた。

しかし、気圧は作業者の動作だけでなく、時間経過や大気の状態によっても変動する。また、MEDiTAG の気圧は同じ環境での計測でも最大で 1hPa 程度の差があったため、気圧から作業者の動作を検出するには、基準となる気圧との差分を取り、時間経過による気圧変動の影響をなくし、作業者の行動による気圧変化のみを取り出

したうえで、その変化量を見るなど、動的な閾値設定が必要となる。

なお、本研究における支援的保護システムは、作業者や危険源の ID 認識と三次元測位とを行い、作業者と危険源の接近を検知し、警報等により注意を促すシステムであり、危険を検出した場合に機械を非常停止させるものではない。そのため、必要な精度の具体的な値は決まっておらず、実際に導入する現場の作業範囲や作業者の人数、危険源の大きさなどを考慮して、必要な精度を検討しなければならない。また、危険側故障を防ぐためには、測位誤差よりも欠損率の低下が重要となる。

最後に、バイタルサインを用いた作業者の異常発生検知は、今回の実験では有効な指標が確認できなかった。

しかし、様々なバイタルサインをリアルタイムで取得することができたため、同時に測位できることも含め、Bluetooth が生体情報の通信手段として有益であることが確認できた。また、複数の情報を組み合わせることや、別の生体情報を取得することで、作業者の異常発生検知が行える見込である。実験時には被験者の異常を実際に発生することはできないため、より多くの条件、被験者での検証が必要となる。また、検出したい異常や動作に応じて、取得するデータ及びデータの取得間隔などを検討する必要がある。

支援的保護システムは、スリーステップメソッドによるリスク低減を行った後の残留リスクに対して、使用者が現場で行う確実性の高いリスク低減方策であり、現在、**ISO/TR 22053**:Safeguarding supportinve system:SSS として検討を進めている。今後は、動的に変化するリスクに対応するダイナミックリスクアセスメントの評価方法の提案とともに、支援的保護システムを活用した協調安全の構築方法についても併せて研究を進めることが必要である。

4.5　2019 年度の行動分析実証実験の概要

4.5.1　行動分析実証実験の目的

日本クレーン協会が報告している 2018 年のクレーン等によって発生した労働災害による死傷者数は、死傷者数は 1,757 人であり、前年と比較して 135 人の大幅な増加である。死亡者数は 56 人で前年に比べ 2 人の減少である。これらのうち、天井クレーンによるものは死傷者数 828 人（全死傷者数に占める比率 47.1%）、死亡者数 20 人（全死亡者数に占める比率 35.7%）、移動式クレーンによるものは死傷者数 603 人（34.3%）、死亡者数 34 人（60.7%）であり、平成 13 年（2001 年）以降の推移は**図 39** のとおりである。また、クレーン等労働災害を業種別にみると、死傷者数では製造業が 751 人（42.7%）で最も多く、次いで、建設業 474 人（27.0%）、運輸交通業 201 人（11.4%）の順であり、死亡者数は建設業が最も多く 22 人（39.3%）、次いで、製造業 21 人（37.5%）、その他の事業 7 人（12.5%）、陸上貨物運送事業 5 人（8.9%）の順である（**図 40**）。

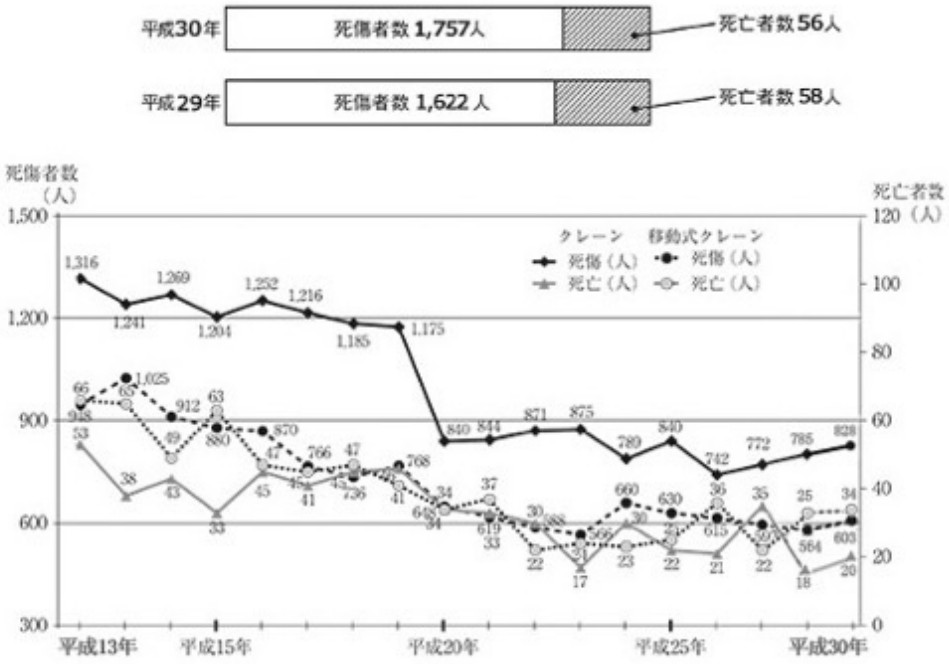


図 39　クレーンに起因する死亡・死傷災害の推移

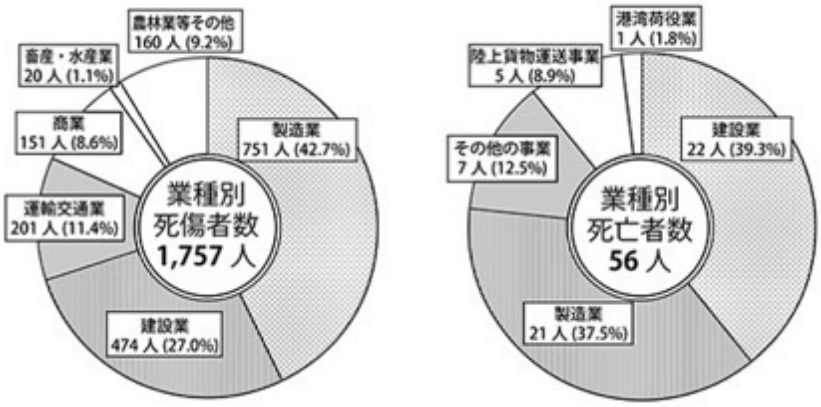


図 40　業種別のクレーンに起因する死亡・死傷災害の割合（平成 30 年）

このように、製造業でのクレーン作業中に、荷崩れやフックとの衝突による人身事故は現在でも依然として発生している。中でもクレーン作業中に起きる事故の多くは「玉掛け作業」によるものであり、大きな問題である。

玉掛け作業とは、クレーンのフックに荷物をかけて荷物を移動させた後に荷物をフックから外すまでの工程である。

玉掛けは、少しのミスによって大けがや死亡といった大事故につながりかねない危険を伴う作業である。従って、補助的な作業を除き、厚生労働省の主催する講習を受けて国家資格を持った者しか玉掛け作業を行うことはできないが、知識を持っているだけではなく、実際の現場で作業経験を積んでいる必要がある。

現在の日本におけるクレーン荷役作業の環境では、ベテラン技術者の減少、労働力不足、働き方改革の一環としての高齢者や女性の就労、生産性向上のための長時間労働等の問題がある。特に、派遣労働者の死傷災害の分析結果をみると陸運業、倉庫業の、荷役作業に関連した作業中での災害が大半を占めている。クレーン荷役作業においては、現場の安全を確保しつつ、安全な作業を担保する対策が重要となる。

安全に玉掛け作業を行うための対策の糸口として、熟練者と経験の浅い未熟練作業者との安全確認行動にどのような違いがあるかを把握することが重要とである。本研究の最終目的は、玉掛け作業が最適に行われるために支援的保護システムを適用した場合の、作業者スキルの必要要件を明確にすることである。今回は、現在構築している支援的保護システムの有効性検証のための予備実験として、あらかじめ実験的に設けた危険領域に対する行動様式にスキルによる違いがあるか否かを検証した。

4.5.2　行動分析実証実験における検証項目

4.5.2.1　実験方法

2019 年 10 月 27 日に株式会社日立プラントメカニクス佐野工場内に設置した 15m×20m の実験エリアにおいて実験を行った。実験エリア中央には、2D の移動体として業務用ロボットクリーナー（RC200DZSP、株式会社マキタ製、**写真 20**）を設置した。移動体中央より半径 2.0m 以内を「危険（立ち入り禁止）区域（**図 4** の破線部分）」とし、実験条件により危険区域の境界を移動体の上部に取り付けた緑色同心円のレーザーライトを合図刺激として照射した（**写真 21**）。さらに、移動体を 2.0m四方のアルミテープの正方形で囲み、実験条件によりアルミテープ内の移動エリアをランダムに移動した。20～50 才代の成人男性 12 名を実験協力者とした。クレーン荷役作業のスキルの違いにより、クレーン荷役作業経験者を 3 名および未経験者を 9 名とした。

写真 20　予備実験で使用した業務用ロボットクリーナー

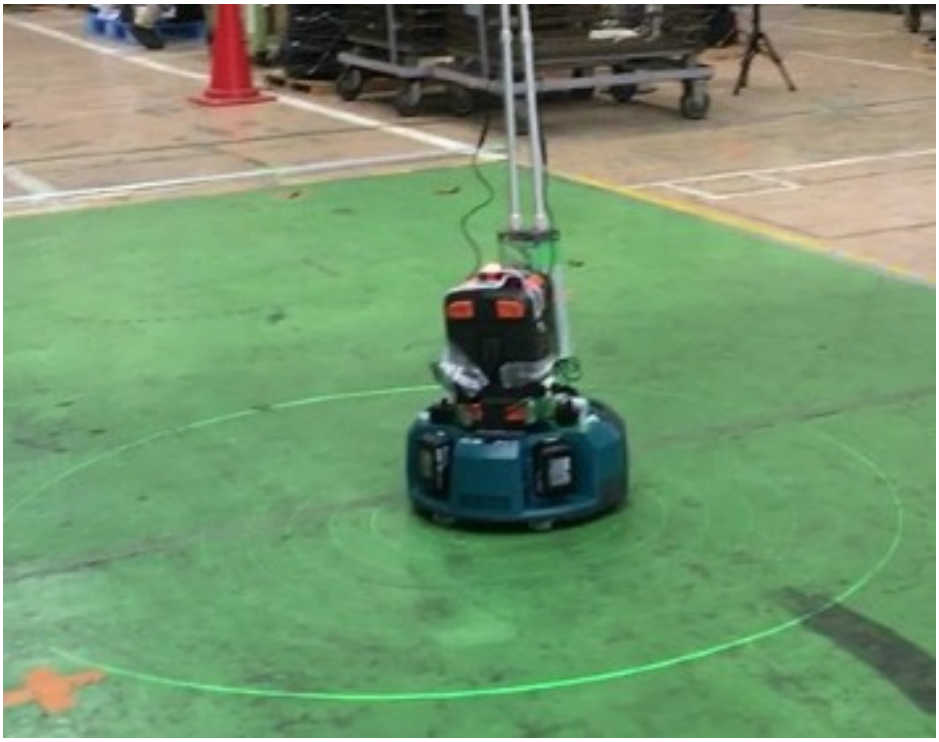


写真 21　危険区域のレーザーライト照射状態

4.5.2.2　実験手順

実験協力者に段ボール（荷）を持たせ、危険区域への立ち入りを回避しつつ実験エリアの外側 A 地点から対角にある B 地点になるべく迅速に荷を運ぶこととした。A 地点と B 地点の床上にテープでラインを引き、目印とした。実験開始前に、実験協力者を A 地点に誘導し、荷を見せながら、次のような教示を行った。

1) この荷物を A 地点から、対角上の B 地点までなるべく早く運んでください。その際、中央地点にある移動体の中心から半径 2.0m は危険エリアなので立ち入らないようにして B 地点まで行ってください。
2) “用意、スタート”と声を掛けます。B 地点まで到達した際には、“はい、ありがとうございます”と声を掛けます。
3) この動作を 5 回続けて行います。
4) 休憩をはさんで条件の異なる移動実験を 4 種類行いますので、合計で 20 回横切り行動を行っていただきます。
5) これから B 地点を確認しましょう。

実験者は研究協力者を誘導し、B 地点の位置を確認した後に再び A 地点に戻った。

実験内容に関する質問があった場合は、相当する教示個所を繰り返した。

実験は、次の 4 条件とした。

1) 移動体は実験エリア中央に静止しており、危険区域のレーザーライトの照射はない。
2) 移動体は実験エリア中央に静止しており、危険区域のレーザーライトの照射がある。
3) 移動体は実験エリアをランダムに動いており、危険区域のレーザーライトの照射はない。

4)　移動体は実験エリアをランダムに動いており、危険区域のレーザーライトの照射がある。

実験協力者全員が 4 実験条件をそれぞれ 5 回繰り返した。

実験条件は順序効果を避けるため、実験協力者ごとに順番をランダムに変更した。

実験条件の概要を**表 17** に示した。

実験開始とともに A 地点から B 地点まで移動する時間を計測した（**図 41**）。

表 17　実験条件の概要

実験条件				
	移動体	ライト	実験協力者（人）	
			経験あり	経験なし
1	静止	無し	3	6
2	静止	あり	3	6
3	動	無し	3	6
4	動	あり	3	6

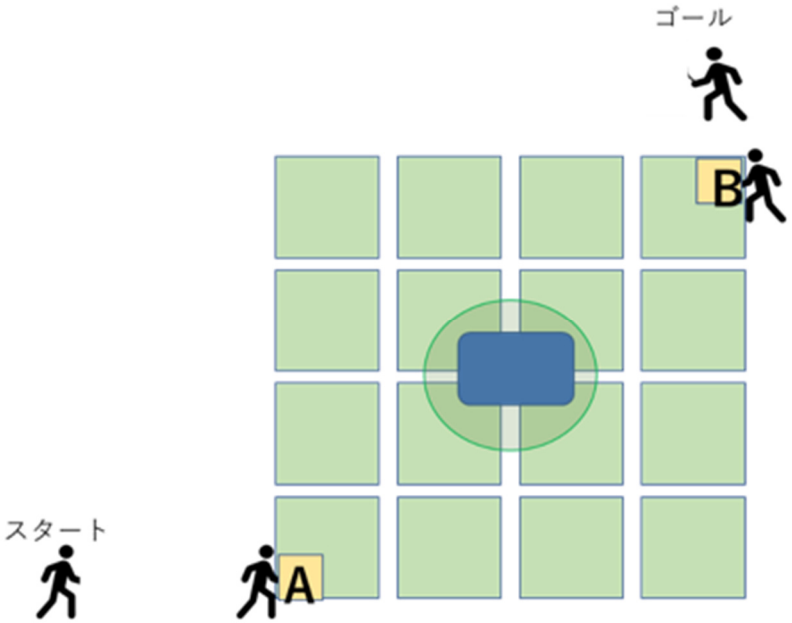


図 41　実験場のレイアウト図

4.5.2.3　実験結果

クレーン荷役作業経験の有無による 1 回目から 5 回目の平均移動時間を、実験条件別に**図 42** に示す。移動体の静止条件及び動く条件ともに、経験者はライトの合図がない状態よりもライトがある条件で平均移動時間が短縮した。一方、経験のない群では、ライトがある場合に移動時間が延長していた。

また、ライトの合図がない条件では、移動体の動きの有無にかかわらず、経験者よりも経験のない群の移動時間が短かった。ライトの合図がある場合は、経験ありの群と経験なしの群に差はなかった。

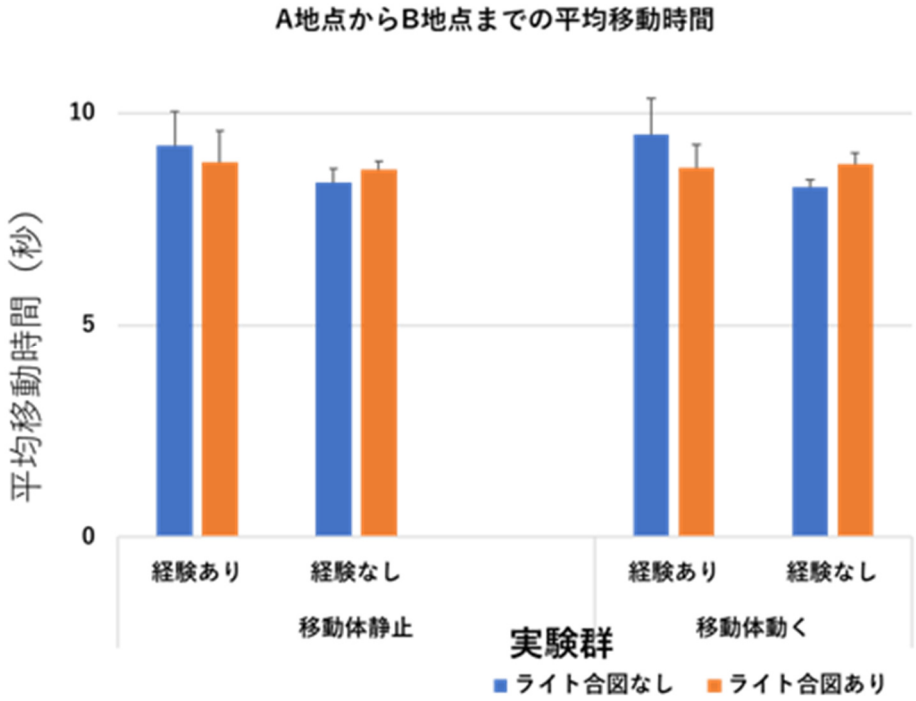


図 42　実験条件の違いによる平均移動時間（秒）

移動時間を 1 回目から 5 回目に分けて変化をみると（**図 43**）、移動体が動いているか否かにかかわらず、ライトの合図がない条件では、経験のない群が経験者に比べて、移動時間が短かった。ライトありの条件では、クレーン荷役作業経験の有無にかかわらず、移動時間はほぼ同じであった。移動体が静止している条件では、回を重ねるごとに、経験者及び未経験者の移動時間が短縮する傾向があった。しかしながら、移動体が動く条件下では、経験者は時間が延長する傾向があった。経験のない群では、回を重ねてもほとんど移動時間に変化はなかった。ライトの合図がある条件では、移動体が静止していても動いていても、繰り返しによる移動時間の変化はほとんどなかった。

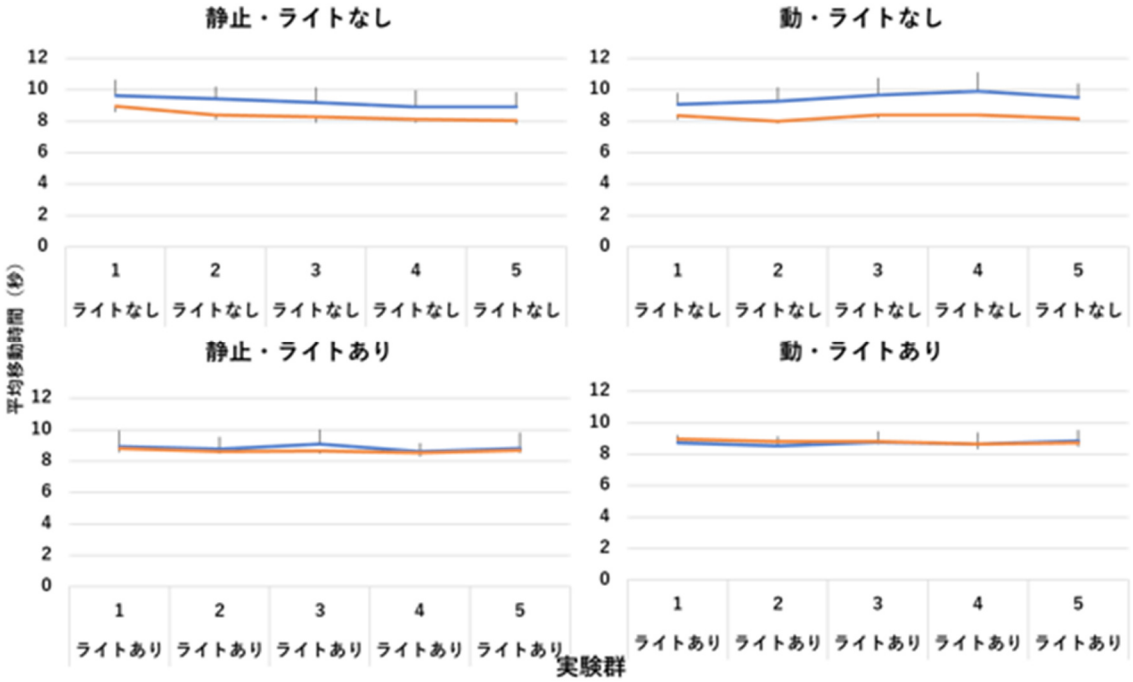


図 43　実験回数による平均移動時間の推移（秒）

4.5.2.4　実験の考察

移動時間は、ライトの合図がない条件下では、クレーン荷役作業経験者のほうが未経験者よりも短いと予測していたが、未経験者の移動時間が短いことが判明した。この結果は、1 回目から 5 回目を分けて分析してみるとより明確となった。

実験協力者には、あらかじめ半径 2m内は危険区域だと告げているため、クレーン荷役作業に従事した経験のある者は、ライトの合図がない場合は、注意深く危険区域を回避していたために移動時間が長くなった可能性がある。移動体が動いている時に、回を重ねるごとに移動時間が延長したことからもその傾向がうかがえる。

一方、クレーン荷役作業経験がない群では、ライトの合図がない場合には、移動体が静止している場合は移動時間の短縮があり、動いている場合は移動時間の変化がなかった。半径 2m の危険区域すれすれか中に入って移動している可能性が高く、安全行動を取っているとは言えない。ライトの合図がある場合には、移動体が静止していても動いていても、1 回目から 5 回目まで時間の増減がほとんどなかった。この現象は、経験者でも未経験者でも同様にあり、両者間には時間の差もほとんどなかった。

これらのことから、未経験者でも安全な作業を行うためには、ライトによる危険区域の明示が重要であることが明確になった。実験の結果は、支援的保護システムでは、作業者の位置情報と共に作業現場における危険領域の視覚情報の提示の重要性を示唆している。

5　国際規格化への対応

現在、ISO/TC199 WG3 に **ISO/TR 22053**：支援的保護システム（SSS）を提案し、審議を進めている。この審議では、SSS の具体的な適用例について検討をしており、審議メンバーは、日本でこの 3 年間で実施してきた事

例を参考にすることで、SSS の具体的なイメージを持つことができた。今後は **TR 22053** の完成を目指すと共に、同時に行われている「**ISO 11161**：統合生産システムの安全性」の改正作業についても、引き続き **TR 22053** の内容を反映させつつ作業を進めて行きたい。

6　3 年間の総括

1) 支援的保護システム（Safeguarding Supportive System:SSS）とは、従来の機械安全分野におけるリスク低減方策だけでは低減できないリスクに対して、リスク情報を受け取ったユーザーが現場でさらに安全対策を検討する際に採用する支援方策である。この残留リスクの許容可能なリスクレベルは、メーカーとユーザーの考えに違いがあり、この差が労働災害の原因となる場合がある。例えば、メーカーが許容可能なレベルと判断したものでも、ユーザーにとっては許容不可能なために対応できずに災害に至る場合である。日本では、欧米とは異なりこれら残留リスクを適切に分散するためのシステムインテグレーションシステムが確立されていないために、メーカーとユーザーがそれぞれの立場でリスク評価を行うことになる。その際にも、スリーステップメソッドや、管理及び教育によるリスク低減方策だけではなく、SSS によるリスク低減方策を採用することで、メーカーとユーザーとが評価する残留リスクレベルの差を同レベルに近づけることが可能となる。また、リスクアセスメントで人の注意力に大きく依存して低減するリスクに対しても、SSS の使用により、人的過誤の際には作業や起動ができなくなるので、確実なリスク低減が期待できる。

2) 国際標準化については、先行研究により開発した SSS を活用した現場の実証実験結果をもとに、ISO/TR22053 として審議を進めているが、さらにこの 3 年間に得た実験結果についても活用しながら、作業を進めている。

   今後 ICT デバイスは革新的に進化していくが、単なる利便性や経済性だけだはなく、安全性の観点からこれらのデバイスの選定を行わなければならない。また、システム構築に関しては、保護装置との位置づけや、安全関連部への関与の仕方など、具体的に現場で適用可能な規格としての完成を目指している。

3) 人と機械の位置情報測位を行うための ICT 機器及びセンサ類として、1 年目の予備実験では、バイタルモニタービーコンシステムを用いた。ビーコンシステムによる位置情報測位では、周囲からの電波の影響を受けない場所であれば高い精度を得るが、周辺環境によっては精度が低くなるため、固定器の増設や、設置方法を考慮する必要がある。また、移動体の速度が速い場合などアプリケーションのビーコン検出間隔と発信間隔の違いによる検知漏れは、アプリケーションを常時起動してビーコンを検出するなどの対策が必要となる。

   1 年目の実験は、SSS 導入に対して行動分析学的手法を用いた評価を行ったが、結果は作業に対して何らかのフィードバックを与えることで、作業がより効率的に行えることを示唆している。

   2 年目の予備実験では、山岳トンネル施工現場において、作業者と重機の位置情報を測位するために、レーザーレーダーを利用した行動モニタリングシステムを用いた。ここでは、新たにリスクポイントという新しい概念を用いて、当該重機の最大可動範囲と人の作業範囲とが交差する時間及び位置を計測することで、作業エリア内に潜在する接触リスクの場所と大きさの定量的評価を行った。その結果、重機と複数の人にそれぞれ割り振った ID がロストする現象とそれに対する対策を検討することができた。今後は、山岳トンネル特有の作業環境において、ID のロスト現象を防止するための対策を併用することでシステムの高度化を目

指すとこととした。

3 年目は、クレーン荷役作業現場における荷物と周辺作業者の位置情報を測位するシステムとして、バイタルモニタービーコンシステムと、光通信システムを用いた。ビーコンシステムは 1 年目と同様のシステムを用いたが、今回は主に作業者のバイタルサインのデータ計測用に使用した。位置情報の計測については、光通信システムを用いたが、光の伝達時間を計測するシステムであることから、2 台以上の固定器から単体の移動機の光パターンが確認できることが条件となるが、位置精度はかなり高い精度を得ることがわかった。

また、熟練作業者と非熟練作業者とでの視覚的な危険感受性の違いについては、クレーン荷役作業に従事した経験のある者は、ライトの視覚的合図がない場合には、注意深く危険区域を回避していたために移動時間が長くなった可能性がある。移動体が動いている時に、回を重ねるごとに移動時間が延長したことからもその傾向がうかがえる。

一方、クレーン荷役作業経験がない群においては、ライトの視覚的合図がない場合で、移動体が静止している場合は移動時間の短縮があり、動いている場合は移動時間の変化はなかった。これは半径 2m の危険区域すれすれあるいは中に入って移動している可能性が高く、安全行動を取っているとは言えない。それとは反対に、ライトの合図がある場合には、移動体が静止していても動いていても、1 回目から 5 回目までほぼ同じ時間で移動しており、時間の増減がほとんどなかった。この現象は、経験者でも未経験者でも同様にあり、両者間には時間の差もほとんどなかった。以上の結果から、未経験者でも安全な作業を行うためには、ライトによる危険区域の視覚的合図が重要であることが明確になった。実験の結果は、支援的保護システムにおいて、作業者の位置情報とともに作業現場における危険領域の視覚情報の提示の重要性を示唆するものである。

7　終わりに

本開発部会では、「複合的作業空間における安全確保システム開発部会」の先行研究により開発を行った支援的保護システムに加えて、合計 6 年間の研究として、次の結果を得た。

1)　入退出ゲートの間接監視方式による支援的保護システムの構築

RFID タグシステム、ステレオカメラシステムを適用して、入退出ゲートでの作業者の ID 確認と人数確認を行った。RFID タグシステムについては、現場の作業環境や作業者の負担などを考慮して、適切なデバイスを選択することで、資格と権限を有する作業者のみが対象となる作業を行うことができる支援的保護システムを構築した。ステレオカメラシステムについては、設置場所、アルゴリズムの開発など、現状では問題点があることがわかった。

2)　実現場における支援的保護システムのリスク低減効果に関する検討

本実験で開発した支援的保護システムを実際の現場に導入し、実規模実験を行った。その結果、作業環境と作業内容（照度、温度などの変化の有無、粉塵や障害物の有無、作業範囲の大きさ、作業者の人数、機械の台数、タスクゾーンの区分け、作業内容とその作業が可能な作業者の確認等）を事前に検討し、支援の対象となるタスクに対する適切な ICT 機器の選定と使用環境を構築することで、人の注意力に大きく依存しているリスク低減の確実性を大きく高めることができることが推測できた。。

3)　支援的保護システムの国際規格化

開発した支援的保護システムを **ISO/TR 2205** として国際提案を行い、ISO/TC199 WG3 で審議している。その結果、対象となる統合生産システムの国際規格である **ISO11161**（統合生産システムの安全性）の改正作業を同時に審議することになった。

4)　支援的保護システム適用に関する作業者の負荷に関する検討

本研究で開発、検証した支援的保護システムは、実際に稼働しているシステムに後付するシステムとして開発したが、これを使用する際の作業者の身体的及び肉体的負荷を実験により確認した。その結果、最初は慣れないため、使用時に負荷を感じるが、使用回数を増やしていくと使いこなすことが可能となることがわかった。さらに、使用に当たっては何らかのフィードバックを与える方がより慣れやすくなるため、作業者の行動を良い行動に変容させるためのしかけを作っておくことが必要である。

支援的保護システムは、未熟練作業者だけではなく、熟練作業者にも有効な場合もあるため、ヒューマンエラーの発生確率の高い実行上のリスクに対して適用することが望ましい。

5)　リアルタイムな位置測位による直接監視方式による支援的保護システムの構築

機械と人とが共存／協調して作業を行う作業形態を対象にして、機械と人の ID 確認と位置測位に関する支援的保護システムの予備実験を実施した。使用した ICT 機器は、バイタルモニタービーコンシステム、3Dレーザーレーダーシステム、光通信システムであるが、バイタルモニタービーコンシステムは、作業者のバイタルサイン取得のために使用し、3D レーザーレーダーシステムはトンネル掘削作業現場、光通信システムはクレーン荷役作業現場に適用し、使用する際の要件を明確にした。

今後、生産現場では、機械と人との共存／協調作業が主流を占めてくると考えられるが、その際には、機械安全の考え方である隔離と停止による安全確保を基本的考え方とした上で、ダイナミックに変化するリスクに対応した協調安全の考え方を検討する必要がある。その際には、人の注意力に大きく依存したリスク低減方策だけではなく、適切な ICT 機器を組み合わせた支援的保護システムの導入により、確実性の高いリスク低減方策の導入を検討するべきと考える。

以上