

ICT機器を利用したリスク低減の考え方 ～IMSを対象とした支援的保護システムの活用～

主査：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

清水 尚憲

研究の背景

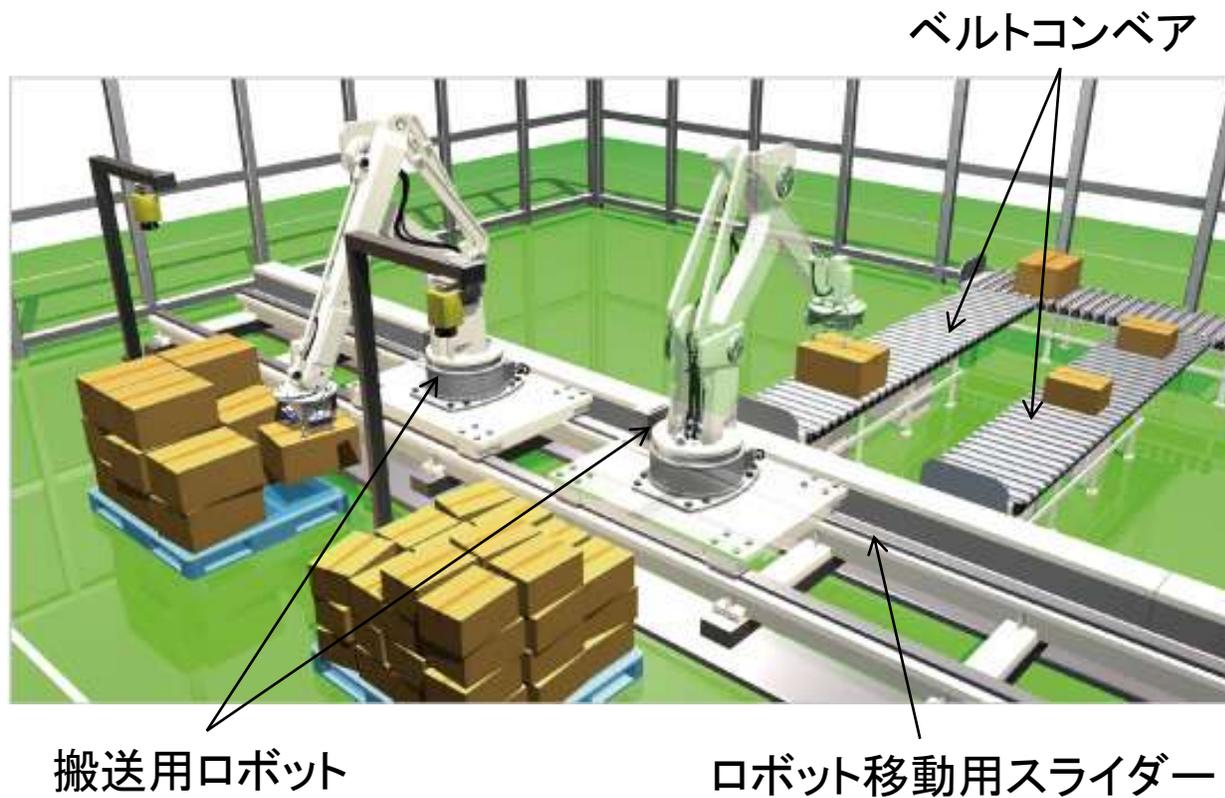
- 非定常作業では、人と機械設備が近接して行う作業（危険点近接作業）が日常的に存在している。
- 生産ライン等、複数の機械を複合したシステム(IMS)において、危険領域内に他の作業者が存在する場合、視認性の悪さや死角等により、確認ができない可能性がある。
- ISO11161「統合生産システム（IMS）における安全性」において、危険点近接作業における有効的な安全確保の手段を提供していない。

※ISO12100/JIS B 9700（機械類の安全性-設計のための一般原則）では、原則的に同一時刻・同日場所での人と機械の協調作業を許可していない（隔離の原則、停止の原則）

IMSとは？

Integrated Manufacturing System

広大な作業領域に複数の機械設備が混在して作業を行うシステム



メンテナンス作業



ティーチング作業

研究の目的

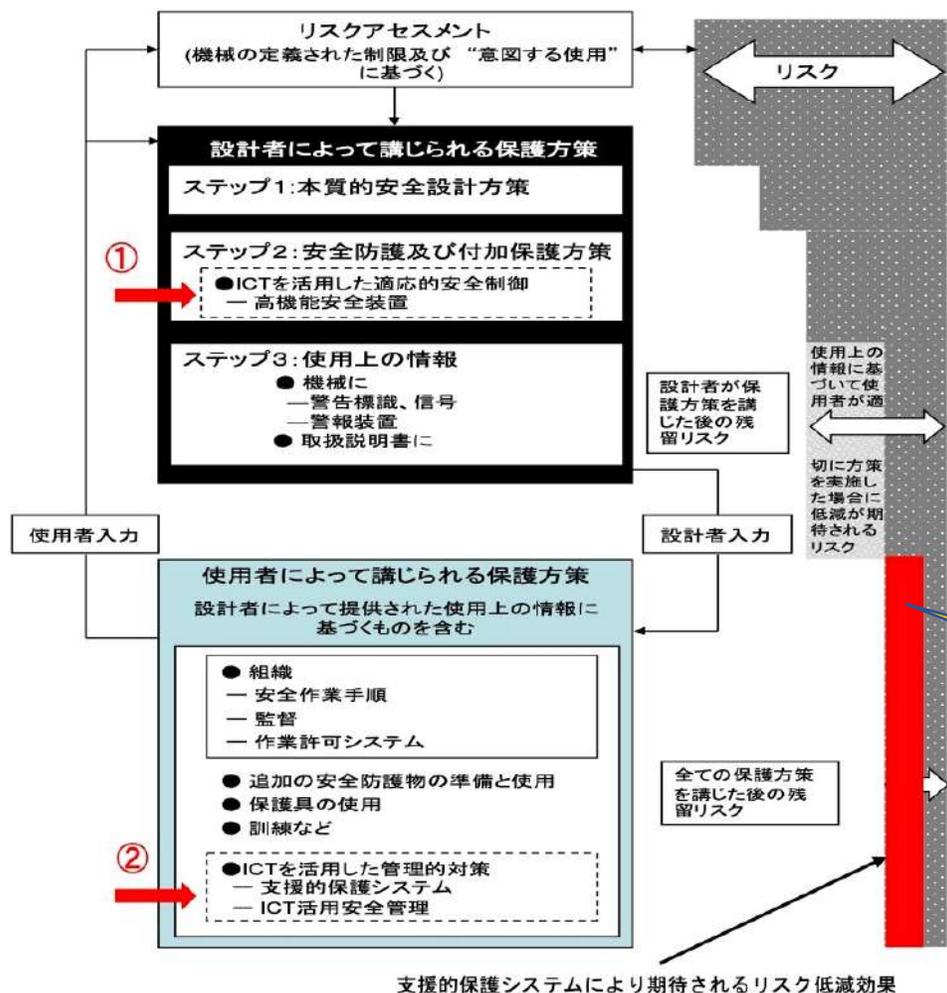
“支援的保護システム (Safeguarding Supportive System; SSS)”

現場に実装可能な支援的保護システムの構築

SSSとは

- **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
- 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) で低減した後のリスクを対象とする
- 従来の人々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機器の組み合わせ**を用いる
- 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**

ICT機器をリスク低減に用いる場合の適用例



①保護装置及び付加保護方策と同等の安全機能を有することで、ステップ2の代替を可能とする
→現在は、単体での安全性評価が求められる

②3ステップメソッドによるリスク低減適用後の残留リスクを対象として適用する。
→組み合わせによる安全性評価が可能

各年度ごとの研究概要

2014-2016年度の実証実験⇒主に**定置式の機械**に対する**非定常作業**を対象とし、ICT機器を利用したSSSを構築し、**入退出管理**についてのリスク低減効果の検証を行った

2017-2019年度の研究概要

- 作業領域で対象となる**移動式の機械の動き**と**作業者の位置情報の測位**を追加検討
- SSS導入の際に生じる作業者の**作業負荷についての検証**
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実験

2017年度⇒山岳トンネル環境にSSSを導入することを想定し、人と機械の接触事故に対するリスク低減のための**予備実験**⇒**ビーコンシステム**を採用

2018年度⇒**山岳トンネル**にて実証実験
3Dレーザーレーダーシステムを採用した位置測位システム
粉じん環境下における位置測位の精度の検証

2019年度⇒**クレーンの荷役作業**環境下における位置測位の実証実験
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
可視光通信システムを採用
作業者のバイタルサイン情報⇒**ビーコンシステム**を採用
SSSの発する危険情報の有効性検証⇒作業者の熟練度の違いが及ぼす感受性の違いを検討

研究スケジュール

	2017年度		2018年度		2019年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
実証実験準備と実施						
(1) 実験場所選定	→		→		→	
(2) 実験内容の確認と機材準備		→		→		→
(3) 実験実施		→		→		→
(4) 実験データ解析作業			→	→		→
(ISO/TR22053作成作業)	→					
(ISO11161改訂作業)	→					
報告書作成作業						→

2017年度の実証実験概要

- ビーコンセンサによる位置測位の精度検証
- 移動ロボットが混在する作業エリアにおける作業者の作業効率



移動機
(ロボット)



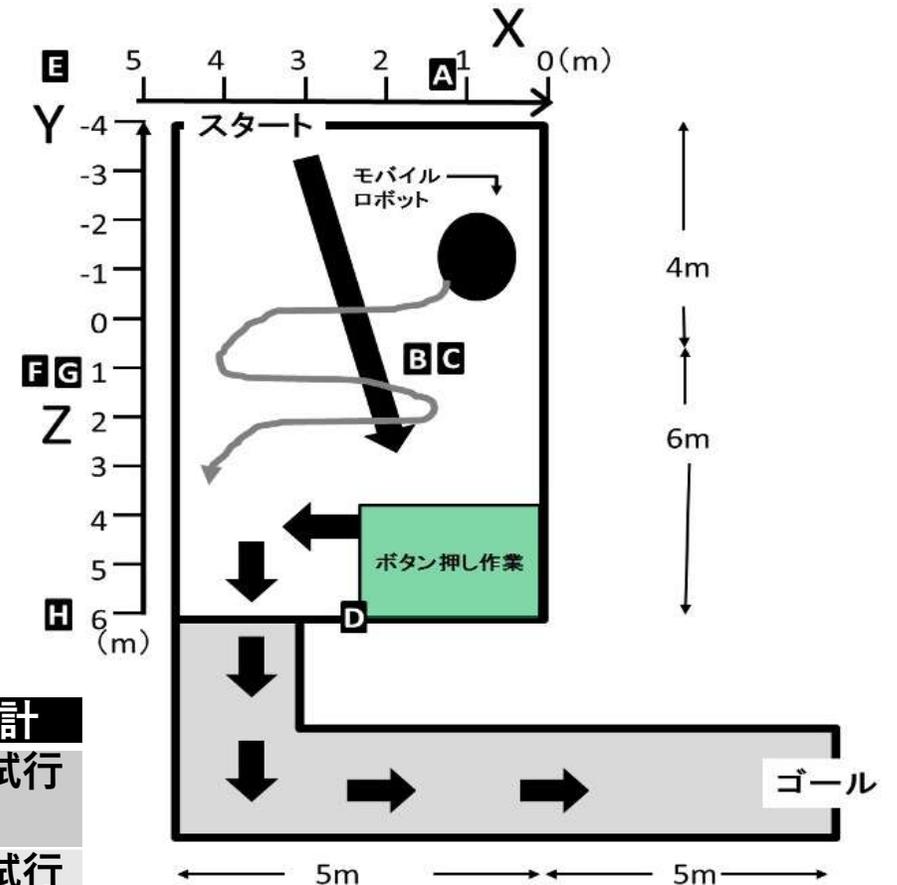
移動機
(作業者)



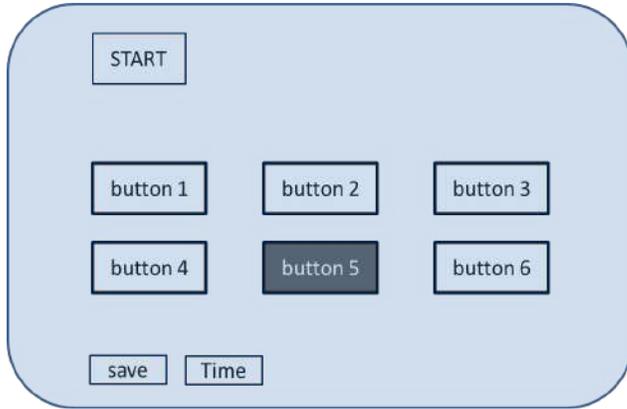
固定機

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



2017年度の実証実験結果

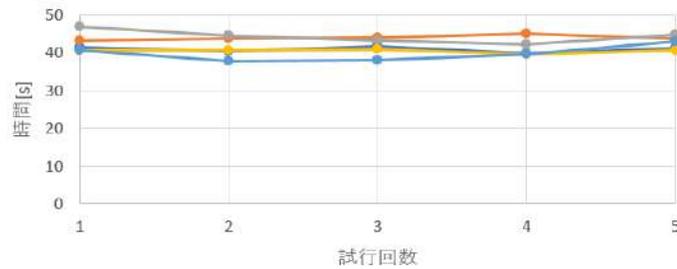


被験者に行ってもらった試行の手順を以下に示す。

- ① スタート位置からスタートする
- ② ボタン押し作業場へ移動
- ③ ボタン押し作業を行う
- ④ 通路を通過してゴール

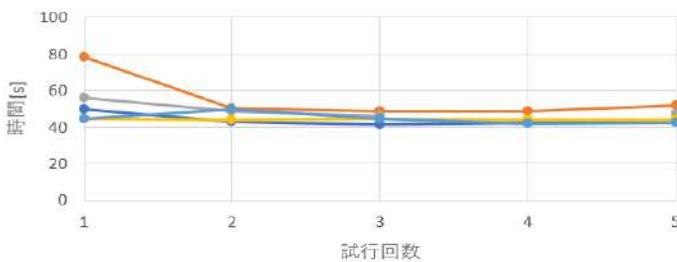
ボタン押し作業の詳細を以下に示す。

- (1) 右図画面のSTARTボタンを押す。
- (2) button1~button6のうち、ランダムな一つの色が変化。
- (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。



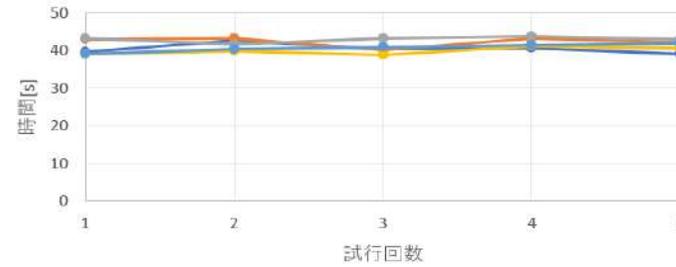
被験者A 被験者B 被験者C 被験者D 被験者E

フィードバックなし、ロボット稼働



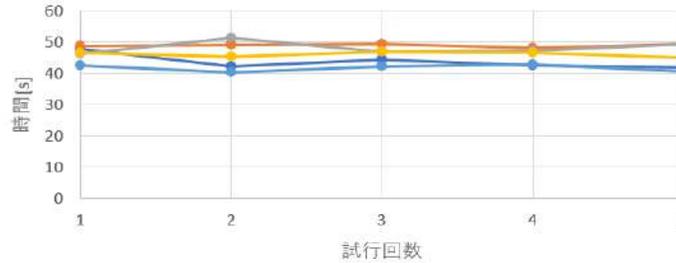
被験者F 被験者G 被験者H 被験者I 被験者J

フィードバックあり、ロボット稼働



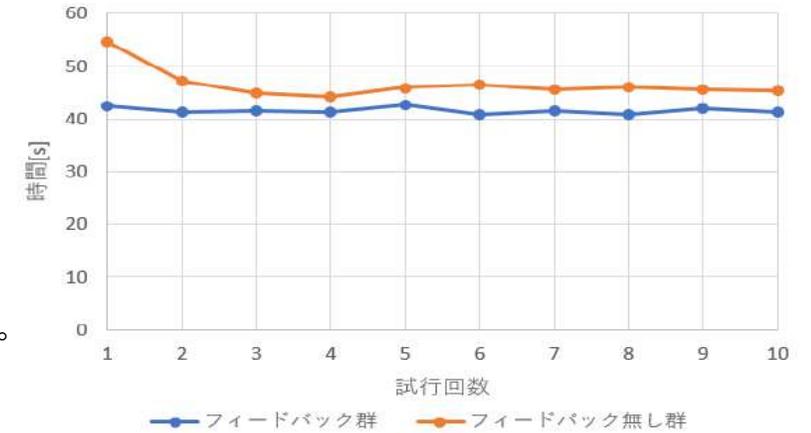
被験者A 被験者B 被験者C 被験者D 被験者E

フィードバックなし、ロボット非稼働

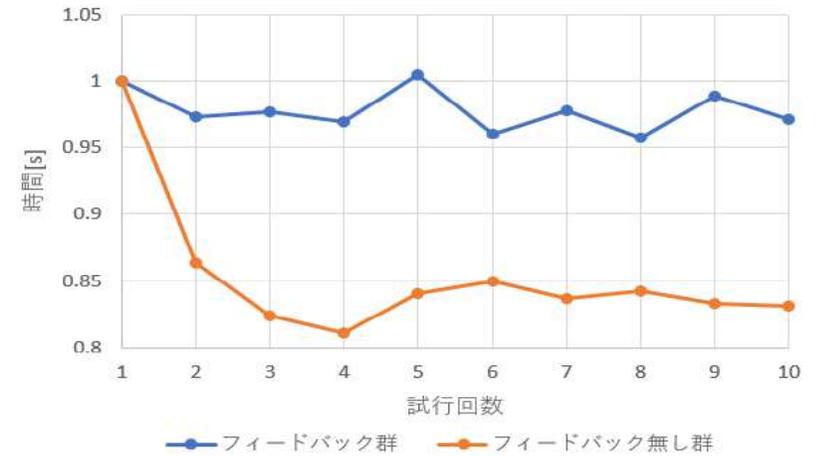


被験者F 被験者G 被験者H 被験者I 被験者J

フィードバックあり、ロボット非稼働



5名の平均時間の推移



5名の平均時間の推移
(1回目を1とした場合)

2017年度の実証実験結果

- ・ **ビーコンセンサの位置測位の精度検証**

移動体（作業者とモバイルロボット）の存在エリア（半径 1 m）を測位できた割合は、64% であり、安全を担保するシステムとして不十分であった
固定機の数を増やすことや、他のセンサとの併用などの検討が必要

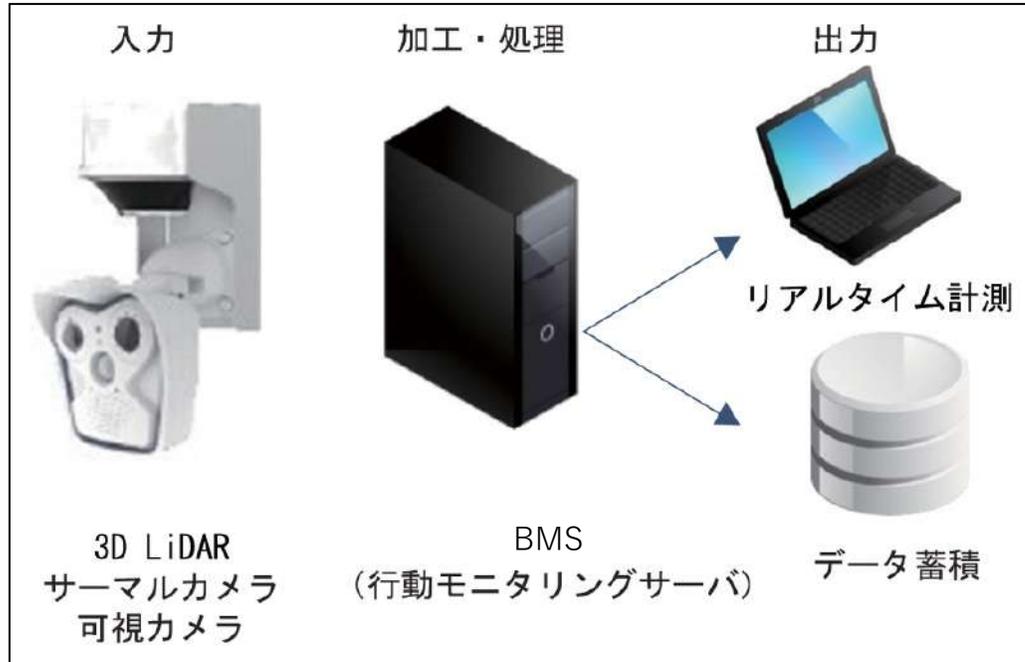
- ・ **移動式ロボットが混在する作業エリアにおける作業者の作業効率**

作業を行う際に、フィードバックを与えることで作業効率が上がることが示唆された
モバイルロボットの稼働の有無による優位な差は認められなかった

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

2018年度の実証実験概要

- 行動モニタリングシステムによる作業者IDと位置情報測位の精度検証
- リスクポイントの提案



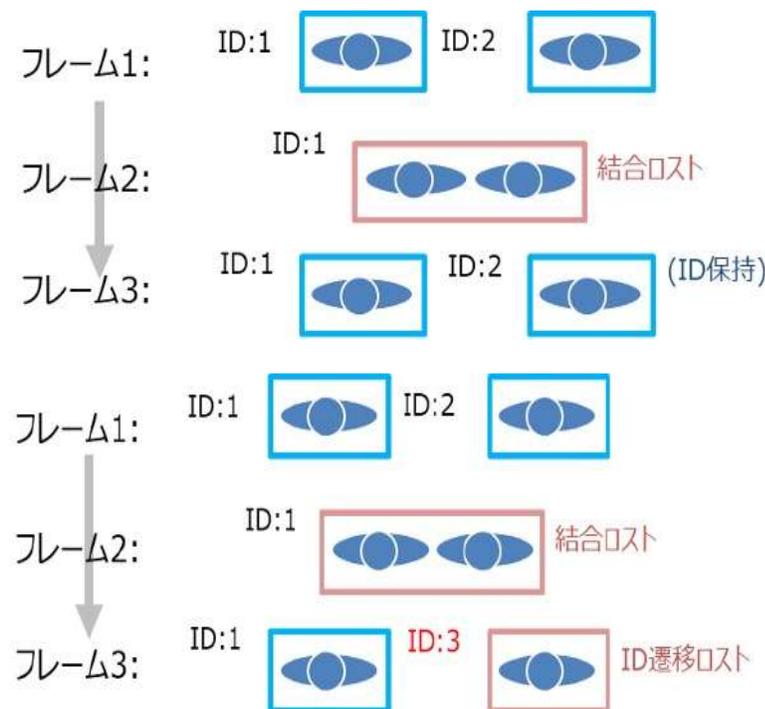
行動モニタリングシステム

2018年度の実証実験結果

	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)

結合ロスト

ID遷移ロスト



(1) 作業者と重機の特定

後解析により必要要件は全て達成できた

重機においては、モデルの分類をサイズのみにとするとミスが発生⇒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
大型車両での分裂現象が発生⇒外観の特定可能な部位に反射板を塗布、反射率の違いによる実測データを蓄積して重機の形態を処理するアルゴリズムの開発が必要

(2) 特定した作業者と重機のトラッキング

画素不足のロストが課題⇒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考慮する
複数台の検知結果を統合システムを開発する必要がある

結合ロスト ⇒ 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の開発が必要

(3) 作業者と重機の距離計測

検知結果と重機パラメータから旋回中心を求めるアルゴリズムの開発が必要
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
リアルタイム計測の開発が急務

※現在、メーカーと共同研究を立ち上げ、システムの高度化を行っている

2019年度の実証実験概要

- **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**

危険源（クレーンの吊り荷）や危険源近くに存在する人の立体的な位置検知の検証
可視光通信システム及びセンサビーコンを使用し、検知性能を検証

- **可視光通信システムにおける人のID認識の确实性検証**

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を採用
人の認知精度の向上と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

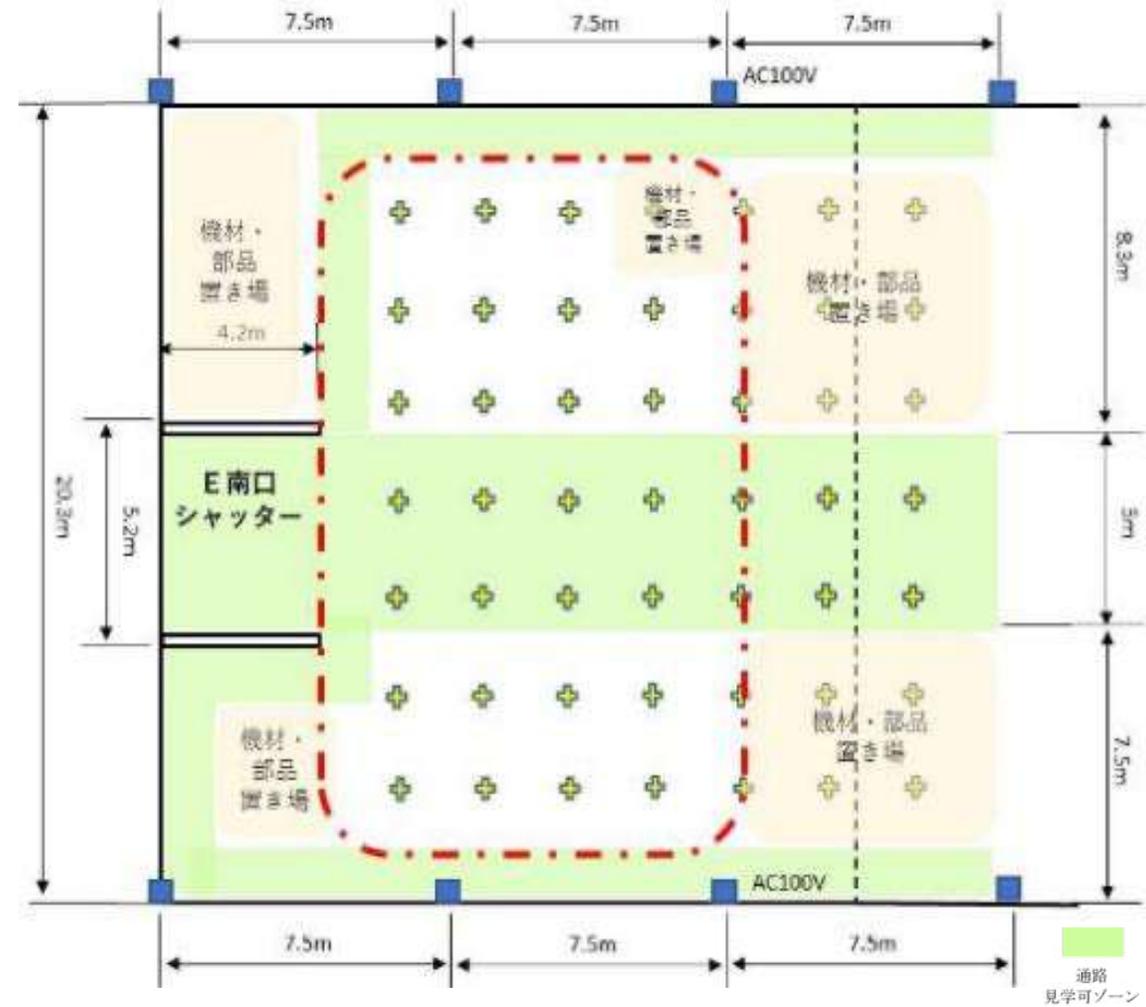
- **人の生体情報（バイタルサイン）取り込み可否と生体情報の精度の検証**

人の健康状態のリアルタイムな把握のために、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センサビーコンを採用し、得られた生体情報の精度を検証

- **作業者の資格の違いによるSSSの危険信号への感受性の違いの影響**

クレーン荷役作業資格あり群・なし群と、移動体静止・可動の条件で、ライトによる
危険信号の感受性の違いを検証

2019年度の実証実験結果

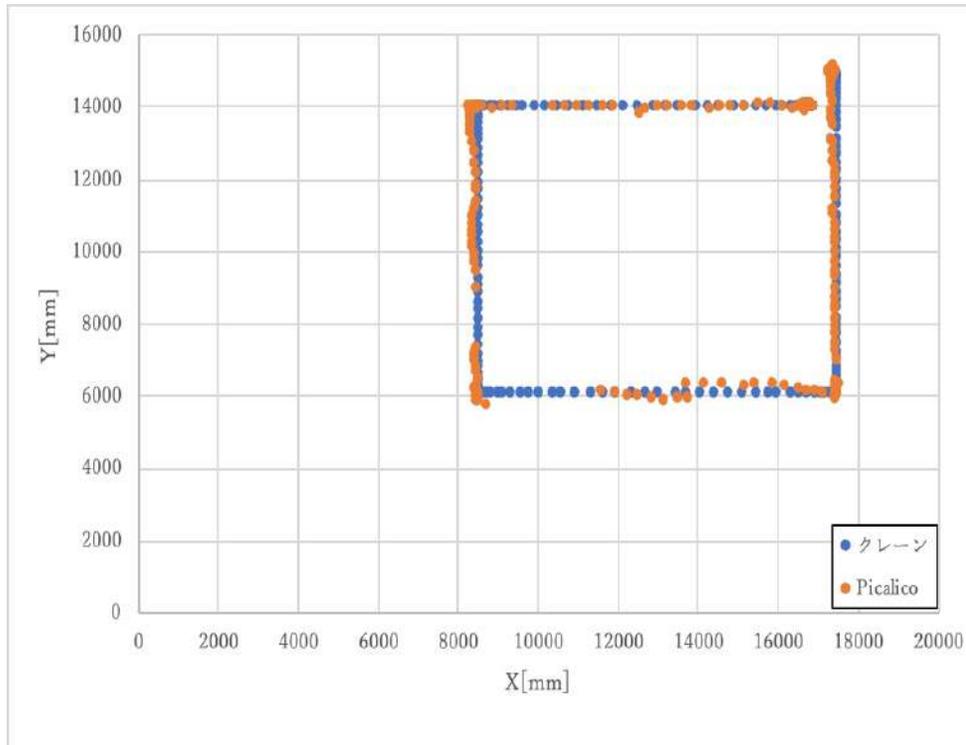


実証実験エリアの平面図

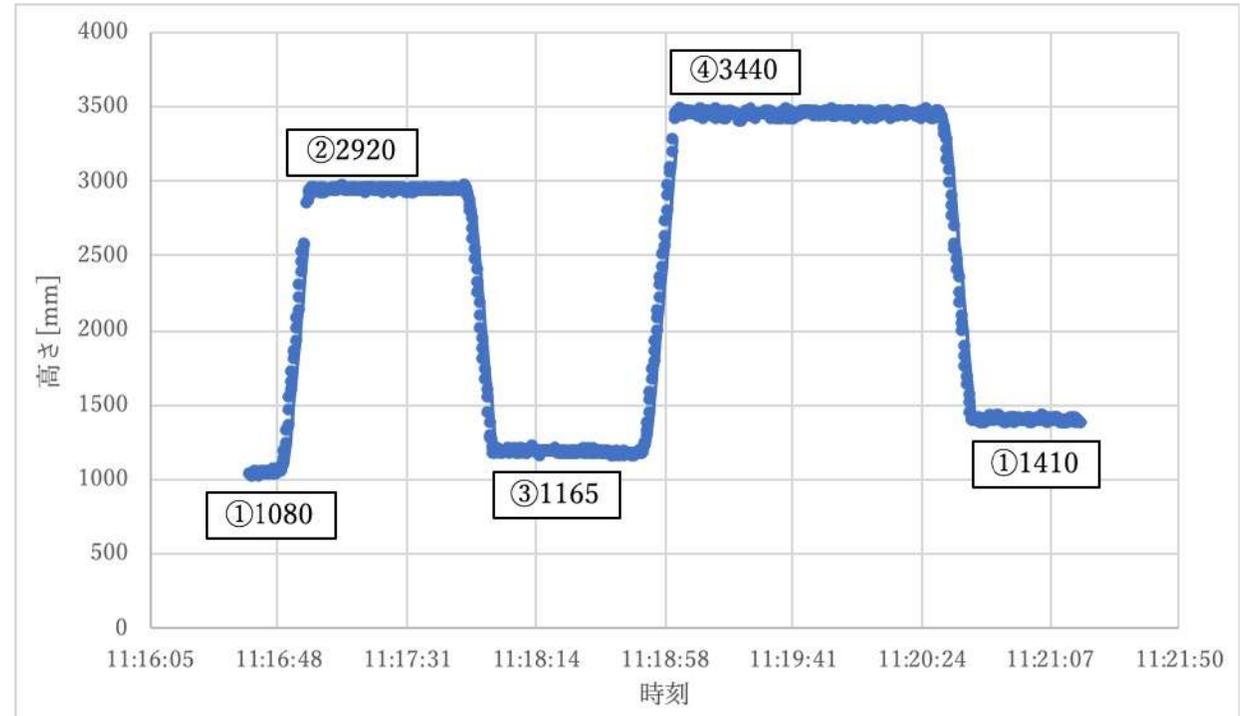
見学可ゾーン
実証実験ゾーン
(クレーン移動エリア)

2019年度の実証実験結果

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



クレーンクラブと可視光通信システム移動機的位置測位結果



可視光通信システム移動機の高さ測位結果

クレーンで吊り荷を吊り上げ、移動機の高さを2.4mに固定してクレーンのクラブを動かした結果、移動機は最大415mm(調整後)、高さ方向は20mm程度の誤差で測位された

2019年度の実証実験結果

可視光通信システムにおける人のID認識の確実性検証

被験者ごとのデータ欠損率 (%)

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	LED 隠す	17.0
7	3.4	36.4	4.4	28.0	25.9	4.4	17.1		
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		

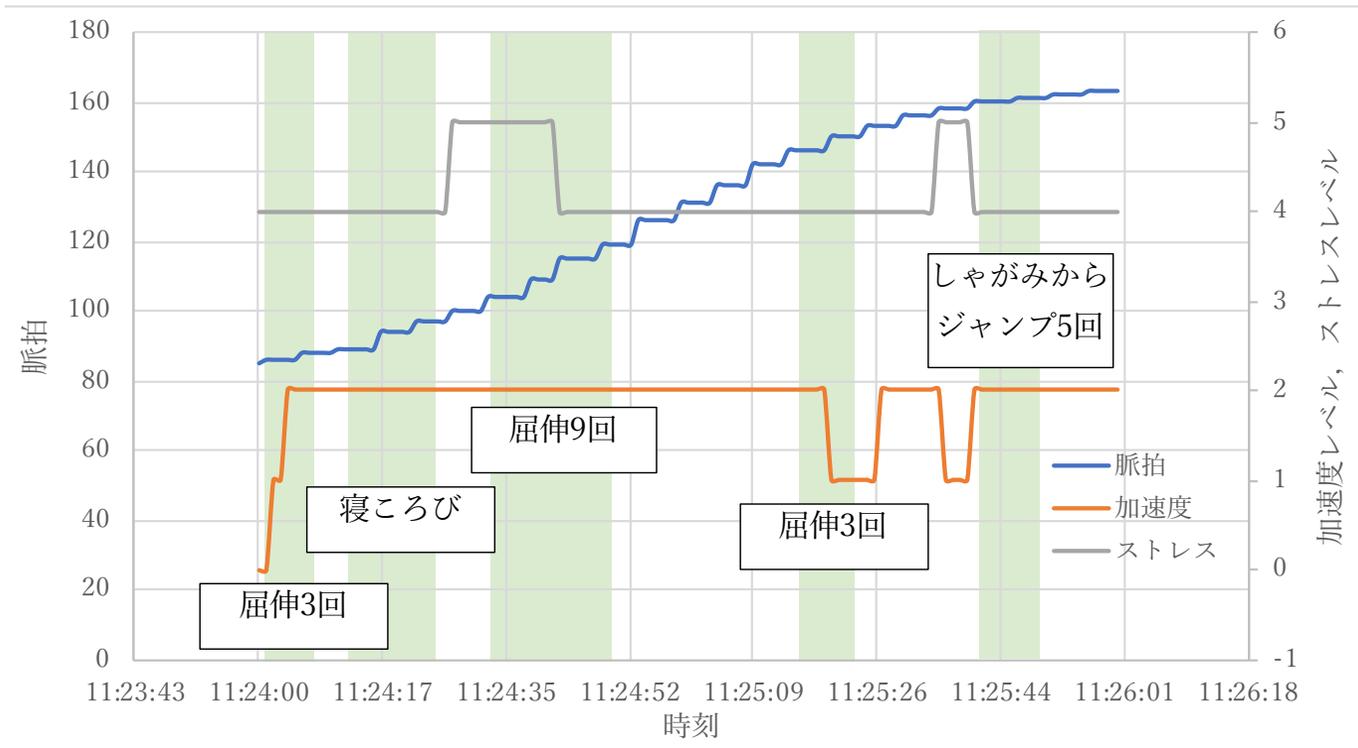
被験者6名 (A-F)、18試行

- 試行7、8では、IDロストを意図的に発生させるため、3名(B、D、E)が可視光通信システムの移動機であるLEDを胸の前で持ち移動した。結果、欠損率は他より大幅に大きくなった。LEDが死角に入ることによって、IDをロストすることが確認できた。
- 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、死角に入りやすいと考えられるが、他に比べ、欠損率が高くなることはなかった。
- 試行6、8では被験者全員が交差や接近を繰り返すように動いた。試行6では他の試行と比べてデータ欠損が多くなることはなかった。試行8では、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かった。

可視光通信システムでは、接近や交差による作業者同士のIDの入れ替わりや変化は発生しなかった。

2019年度の実証実験結果

人の生体情報（バイタルサイン）取り込み可否と生体情報の精度の検証



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

- 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
- 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

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

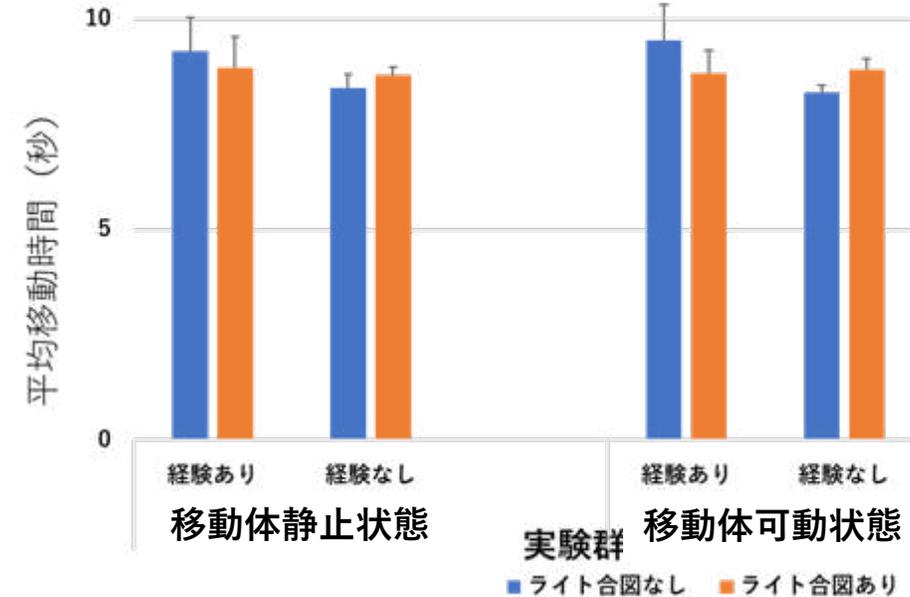
- 実際に体調不良などの異常を発生させることはできず、転倒に関しても人為的な倒れ込みの動作を行ったので、センサビーコンが検知できる真の体調不良や自然な転倒とはデータの特徴が異なっていた可能性がある

2019年度の実証実験結果

作業者の資格の違いによるSSSの危険信号への感受性の違いの影響



A地点からB地点までの平均移動時間



移動体の静止・稼働の有無にかかわらず

クレーン荷役作業経験あり群⇒合図のライトがない場合よりある場合のほうが時間が短縮している（見えないほうが遅い）

ライトが効率の良い横切り行動と危険の回避を支援している

クレーン荷役作業経験なし群⇒合図のライトがない場合よりある場合のほうが時間が延長している

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た

（安全行動を取っているとは言えない）、ライトによって遠回りをしている

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

まとめ

「複合的作業空間における安全確保システム開発部会」の3年間の先行研究において行った支援的保護システムの開発に加えて、本開発部会でさらに3年間、合計6年間行った。研究内容は以下のとおりである。

- 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
- 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
- ③支援的保護システムの国際規格化(ISO/TR22053とISO11161の改正への提案)
- 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
- 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

人の注意力に依存していた残留リスクが、ICT機器を使用した支援的保護システムを導入することにより、確定性の高いリスク低減が期待できる

展望

機械安全

機能安全

協調安全

(安全性と生産性の両立)

「停止と隔離」の原則から、「止めない、隔離しない」システムで安全性と生産性の両立

生体認証、RFID、3DLiDAR、UWB、可視光通信システム、Bluetooth…

3ステップメソッド + 支援的保護システム