

モバイルロボット走行環境における 支援的保護システムの有効性検証 及び行動分析学的介入の影響の検討

松井 克海^{*1}, 北條 理恵子^{*2}, 高橋 聖^{*1}, 清水 尚憲^{*2}

^{*1} 日本大学理工学部 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

^{*2} 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 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

要約

作業現場におけるリスク低減方策には人の注意力に依存しているものがあり、ヒューマンエラーによる労働災害が発生している。そこで我々は人の注意力に依存しないリスク低減方策として支援的保護システム(SSS)を構築した。1台のモバイルロボットが0.9m/sで走行する作業現場を構築し、SSSの機能の一つとして作業者の測位のためのビーコンセンサシステムを導入し、その精度の検証及びUWBシステムとの比較を行った。また、作業者に対し行動分析学的介入を行い作業効率の向上を図った。結果、ビーコンセンサシステムはUWBシステムに比べ精度が低いですが、タグが小さいため生体情報等を付加するのに適しているという結論に至った。また、今回の条件ではロボットが作業者に影響を与えることはなかった。今後は条件を変えて検証を行う必要がある。作業に対して即時にフィードバックを与えることで、作業者の作業効率が向上することが示唆された。

1. 研究背景

近年、技術の進歩により労働災害の発生件数は減少している。しかし、平成 28 年度の労働災害による死傷者数は 117,910 人、死亡者数は 928 人であり、決して少ない数とは言えない。工場などの製造現場では、ISO 12100 や JIS B 9700 で定められた 3 ステップメソッドに基づき^[1]、本質的にリスクを除去・低減する方法と危険な稼働部と作業者の作業エリアを分離する方法、危険な稼働部が動いているときは作業者を危険領域に近づけないようにする「隔離の原則」や、作業者が危険領域に進入するときは危険な稼働部を停止させる「停止の原則」を採用することで災害発生リスクを低減している。しかし、実際の機械設備では作業者が機械を停止させずに、機械に接近して行う運転確認、調整、保守・点検、修理、清掃等の危険点接近作業^[2]があるため、これらの原則のみでは適切にリスク低減できない場合がある。さらに、図 1 に示すような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たことにより、新たに視認性の悪さや死角などにより、危険領域内の他の作業者の存在が確認できなかったために第三者が誤って再稼働してしまう等の事故が起きている。これらの事故は、ユーザが現場で実施しているリスク低減方策が、人の注意力に大きく依存しているものがいくつかあることから生じている。これらのリスク低減効果は不確実性が大きく、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、重篤な災害が発生する。人の注意力に依存しない何らかの安全対策が必要ではあるものの、ISO11161“統合生産システムにおける安全性”において、危険点接近作業における有効な安全確保の手段は提供されていない^[3]。そこで、われわれは今日の作業現場の実情に合わせた具体的なリスク低減戦略として、支援的保護システム（Safeguarding Supportive System : SSS）というリスク低減方式を構築した^[4-6]。



図 1 統合生産システム（Integrated Manufacturing System : IMS）の例

2. 支援的保護システム（Safeguarding Supportive System : SSS）

われわれが構築した SSS は、設計・製造者が ISO 12100/JIS B 9700 に定められた 3 ステップメソッド（図 2）で低減してまだなお残る残留リスクを対象としている。SSS は適切な ICT 機器を組み合わせることで人の注意力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したシステムである。

- 3 ステップメソッドはシステムの設計者により講じられる安全方策である。設計者には、
 - ステップ 1：危険源を取り除くか、危険の程度を低減する「本質的安全設計方策」
 - ステップ 2：隔離・停止の原則に基づく「安全防護」や非常停止装置等の「付加保護方策」
 - ステップ 3：信号や標識、取扱説明書などによる「使用上の情報」

の3つの手順でリスクを低減することが求められている。

SSSでは、作業者が、どのような資格（ライセンス）と権限（能力、スキル）を持っているのか、どの機械を対象にいつ、どのような作業を行うのかをハード側で制御し、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が許可される仕組みになっている。そのため、資格や権限を持たない作業者はそもそも作業現場への入場操作さえできないため、許可されていない場所での作業が不可能となる。また、SSSは作業現場内での作業者の位置情報を取得しているので、作業者が危険領域に接近した時には機械を停止する。これらの機能により、ヒューマンエラー発生に対する危険側故障を防止することが可能となる。

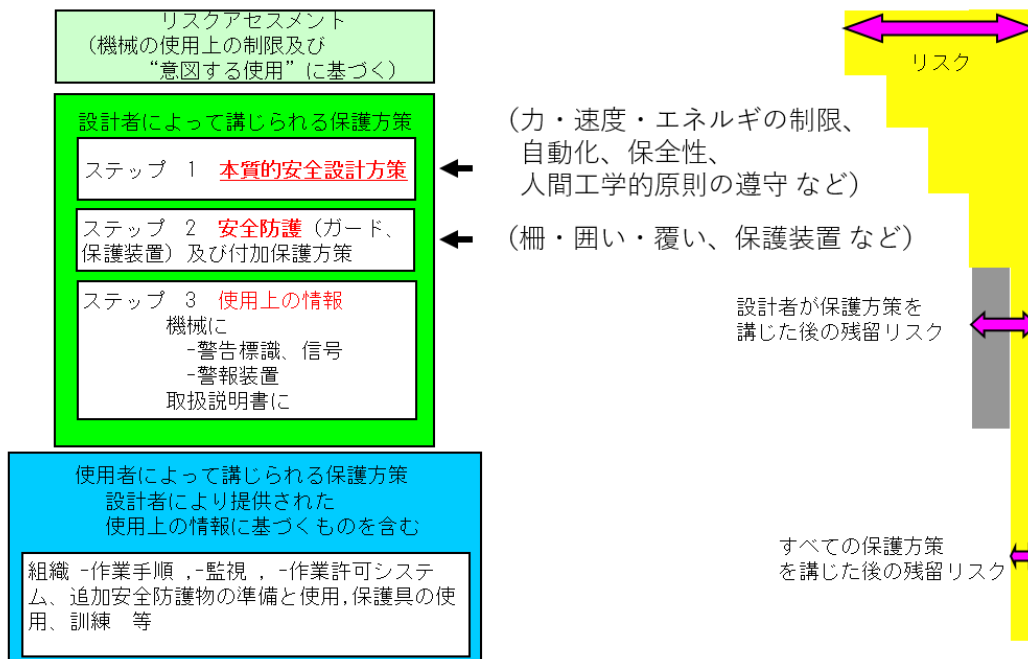


図2 3ステップメソッドによるリスク低減

3. 行動分析学

行動分析学とは、人・動物の行動と周囲の環境の相関を研究する心理学の一形態である。例えば、「人が良い行動をとったら、報酬を与えることで、次も良い行動をとるようになる」、「人が悪い行動をとったら、罰を与えることで、次は悪い行動をとらないようになる」といったように、環境を変化させると人の行動にどのような影響が出るかなどの研究を行う学問である。報酬や罰といっても金銭や物品、罰金といったものばかりではない。例えば自分の行った行動を可視化されることが報酬的に作用する場合も多い。また、行動分析学の最大の特徴は、行動を数えて定量的に評価することである。これにより、様々な事象が客観的に評価される。例えば、保護方策の作業側からの有効性評価には、ほとんどが質問やインタビューによる主観的評価法が使用されてきた。しかし、この方法は作業者の行動の変化を直接的にとらえる方法とは言えない。機械の保護方策の有効性は、作業者の安全・不安全行動が保護方策導入後に増加したのか減少したのか、あるいは不変なのかを示さなければ本当の評価とはいえない。もちろん主観的に作業者が、保護方策を導入してどのように感じたのかを知ることも大切ではあるが、作業者の安全を考えた場合には、少なくともそれに加えて直接の行動変化を定量化することが必要と思われる。

今まで機械安全の領域では「人は間違える・機械は壊れる」という考えかたで、機械をいかに

安全に稼働させるかを考えてきた。フェール・セーフという概念もそこから生じている。いかに安全に機械を提供するかについて試行錯誤を重ね、様々な保護方策、付加保護方策が考え出されてきた。しかし、最終的に機械を使うのは人間である。機械安全側としては、ユーザが正しく使用すれば 100 パーセント安全に稼働する機械を提供することに力を注いでいる。しかし、機械が一旦ユーザ側に渡ってしまえば、あとはユーザ側の使用方法にゆだねるしかないのが現状である。もちろん正しく使うための作業標準は設計者側が作成し、ユーザ側も正しく使用する工夫を重ねている。しかし、機械を使用する際に、必ずしも機械安全側が期待している使用法をユーザ側が行っているとは限らない。これには、二つの問題がある。一つは、機械安全側で講じた保護方策が作業員によってどのように使用されているかを評価する手段がないことである。現在、リスクアセスメントは行われているが、機械を使用する側のユーザの作業行動が、保護方策が導入される前と後でどのように変化したかについては評価項目が存在しない。したがって、講じられた保護方策が有効であるのかどうかを作業員側から評価することができない。二つ目も関連するが、設計段階の問題である。機械を設計する際には、機械安全の専門家がいかに安全に機械を稼働するか苦心しているが、そこに作業員の使い勝手がよくなる仕様や、保護装置を正しく使用するための誘導を行うような仕組を組み込むことができれば、より安全が高まる可能性がある。そのためには、作業員の安全行動に着目した発想が必要である。すなわち、機械導入前後の作業員の安全行動を定量化することにより、その機械の保護方策が有効かどうかを評価する手段が必要なのである。そこで我々は保護方策の評価手法として行動分析学的手法を取り入れた。

また、新規の保護方策を作業現場に導入した際に、新しい作業標準の発生による作業効率の低下が懸念される。これに対し、行動分析学的手法を用いて介入を行うことで、作業効率を低下させずに SSS を導入する手法を検討した。

4. 研究目的

本研究では、作業員とモバイルロボットが共存する IMS を導入した作業現場を想定し、労働安全衛生総合研究所（清瀬市、東京）内に実証実験現場を構築した。その現場を使用し、モバイルロボットが作業員の行動に与える影響を検討した。

それに加えて、新規に SSS を導入した際には新しい作業標準が発生し、従来よりも作業の手順が増えてしまうことや、新しいシステムに慣れていないなどの理由により、作業現場での生産性が落ちてしまう可能性がある。そこで、より安全かつ効率的な作業を行うために作業員に行動分析学的介入を行い、その効果を検証する。

また、SSS の機能の 1 つとして作業員やモバイルロボットの位置情報を測位するためのビーコンセンサシステムを作業現場に導入し、その精度を検証した。

5. 実験概要

モバイルロボットが存在する IMS を仮想し、図 3 のような 5m×10m の作業現場を作成した。

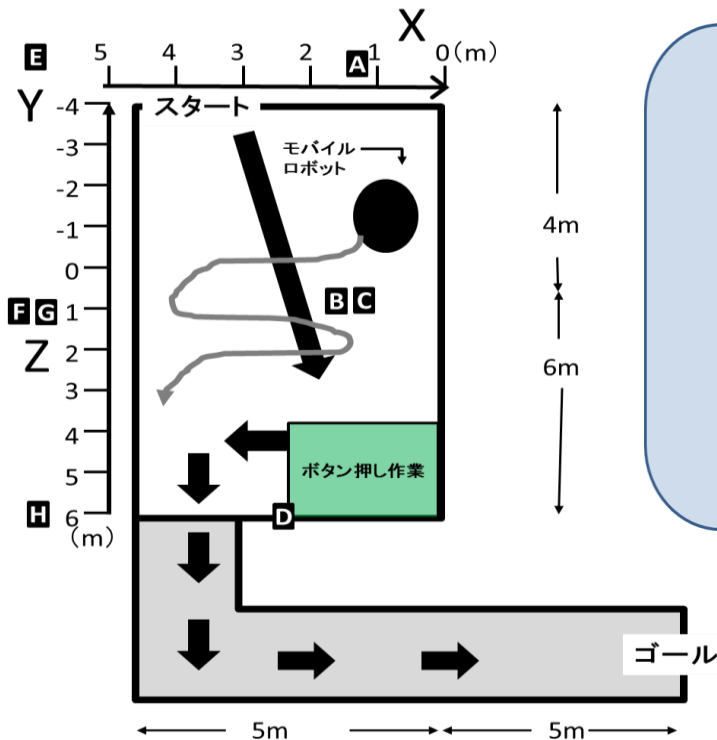


図 3 実証実験用作業現場

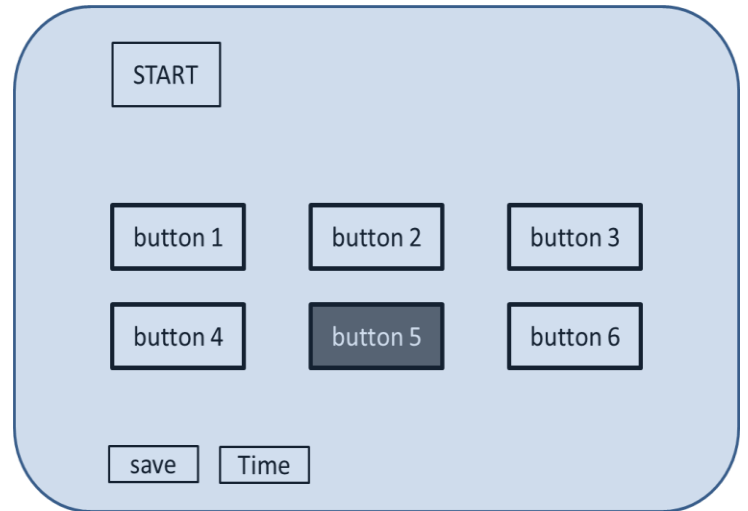


図 4 ボタン押し作業の画面

被験者：成人 10 名（男性 5 名、女性 5 名）

実験手順：被験者全員にヘルメットを装着させた。ヘルメットの内側にはビーコンセンサシステムのタグを取り付けた。被験者は全員次の手順で作業を 10 試行繰り返した。

スタート位置に立ち、実験者の「スタート」の呼びかけで、スタートラインから作業現場に入場した。作業エリア（図 3 の緑色の四角部分）へ移動し、PC の置かれた机の前に設置した椅子に座りボタン押し作業を行った。ボタン押し作業終了後は通路（図 3 の矢印）を通過してゴールまで移動した。スタートからゴールまでを一試行とし、かかった時間を計測し、「総時間」とした。

ボタン押し作業（図 4）：作業エリアで椅子に座り、PC の画面に現れる START ボタンを押すと、button1～button6 のうち、どれか一つの色が緑に変化する。色が変わったボタンを可能な限り早く押す。

以上を一回とし、10 回繰り返す。10 回終了したら椅子から離れゴールに向かった。

5.1. モバイルロボットの作業者への影響の検証

モバイルロボット（LD-60、オムロン株式会社）稼働の有無による作業者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停止させた。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（(L)699×(W)500×(H)383mm）が 0.9m/s でランダムに走行していた。本来のモバイルロボットの走行速度は 1.8m/s であるが、ビーコンセンサが 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、速度を下げた使用した。

5.2. 行動分析学的介入の効果の検証

行動分析学的介入の効果の検証のために、10名の被験者をフィードバックあり条件群とフィードバックなし条件群それぞれ5名に分けた。フィードバックあり条件群にはボタン押し作業にかかった時間がPC画面上に表示された。また、1試行が終わる毎に報酬を一つ与えた。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が表示されず、報酬は10試行がすべて終了してから10個まとめて与えた。報酬は、複数の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条件群、フィードバックなし条件群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。

5.3. ビーコンセンサの精度の検証

作業現場にはSSSの機能の1つである作業者の位置把握のためにビーコンセンサシステム（EXBeacon、株式会社WHERE、東京）を導入した。ビーコンセンサの精度の検証のために作業現場を図5のように、1L、1R、2L、2Rの4つに分割した。作業現場内のA~Hの8つの固定器のうち、電波強度の高い3つで3点観測を行い、作業者やモバイルロボットがどのエリアにいるかを推測した。ビーコンセンサのログ画面（図6）と定点カメラの映像（図7）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を検証した。作業者のビーコンセンサのタグは図8のようにヘルメットの裏に取り付けた。

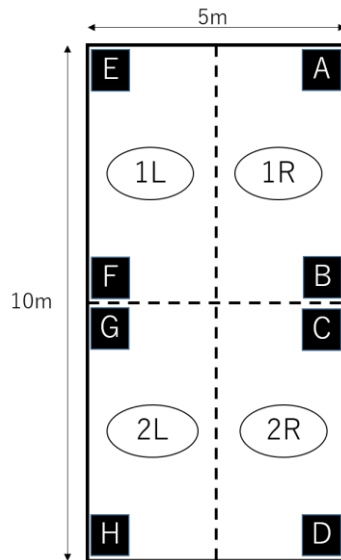


図5 エリア分割



図6 ビーコンセンサのログ画面



図7 定点カメラの映像



図8 作業者携帯用のタグ（左）と固定器（右）

6. 結果

6.1. ロボットの作業者への影響の検証

フィードバックあり条件群、フィードバックなし条件群の各群について、ロボット稼働時と非稼働時のスタートからゴールまでの総時間の平均を表1に示す。

表1 総時間の平均

フィードバック	ロボット稼働	平均時間[s]
あり	あり	46.00
	なし	45.79
なし	あり	41.79
	なし	41.33

フィードバックあり条件群、フィードバックな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認められなかった。これより、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が示唆された。

6.2. 行動分析学的介入の効果の検証

フィードバックあり条件群、フィードバックなし条件群の各群において、被験者 5 名の総時間の平均の推移を図 9 に示す。また、1 回目の試行を 1 としたときの割合で表したものを図 10 に示す。

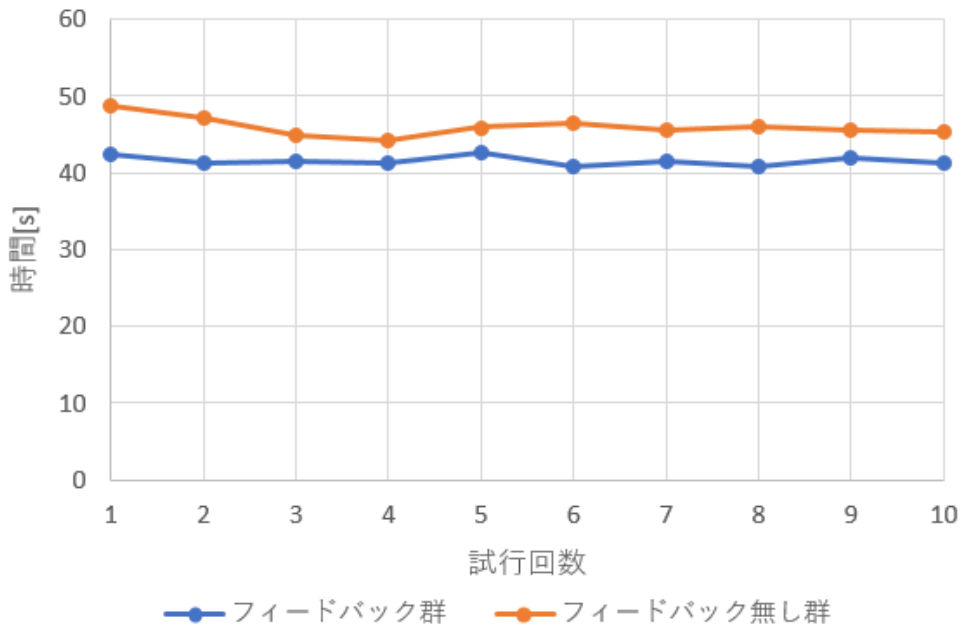


図 9 総時間の平均の推移

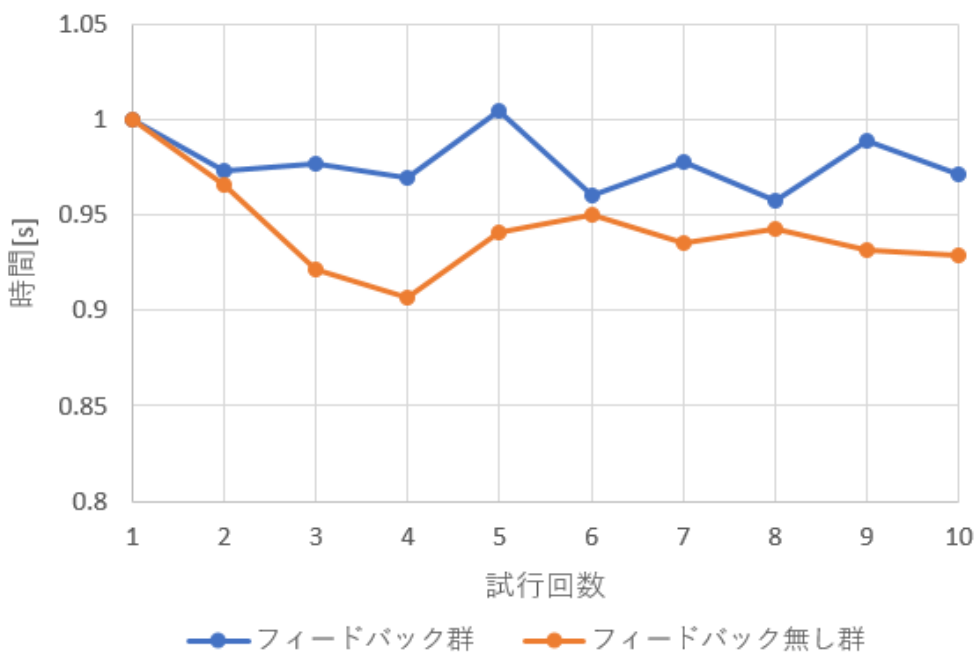


図 10 平均時間の割合の推移

総時間の平均はフィードバックあり条件群では 46.6 秒、フィードバックなし条件群では 41.6 秒であった。しかし、図 10 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が得られた。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が示唆された。

6.3. ビーコンセンサの精度の検証

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。①ログとカメラで同じエリアにいる、②隣のエリアにいる、③全く別のエリアにいる、の3つの場合に分け、それぞれの割合を算出した。同じエリアにいる割合は 42%、隣のエリアに居る割合は 41%、別のエリアに居る割合は 17%であった。

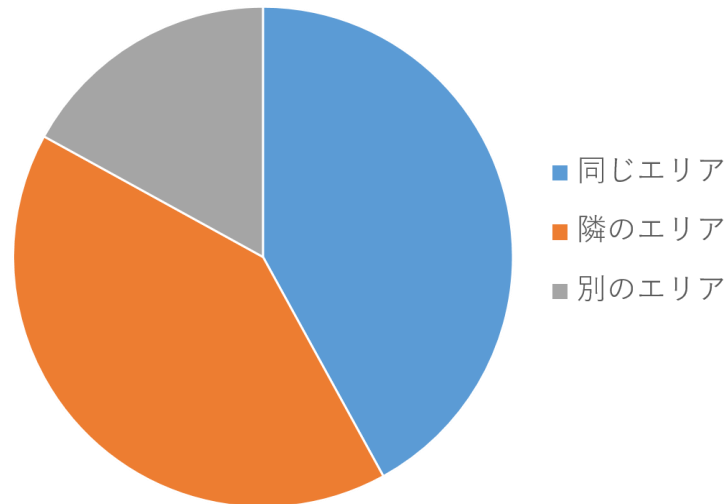


図 11 ビーコンセンサの精度

7. 考察

今回の実験ではロボットが作業者に影響を与えることはなかった。しかし、今回はセンサの都合でモバイルロボットを通常よりも遅い速度で用いたため、今後は更なる条件で検証を行っていく必要がある。また、ロボットの大きさも作業者の行動に影響を与えている可能性があるため、今後は異なるサイズでの実験も考えていきたい。

フィードバックについては、作業時に即時にフィードバックを与えることでより効率的な作業を行えることが示唆された。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、SSS 導入時にもより効率的にシステムに慣れることができると考えられる。今回の実験では各条件群の平均時間に差が出たが、これは今回の実験の時間的制限から被験者のフィードバックあり条件群が全員女性、フィードバックなし条件群が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と考えられる。今後は、性別による差が出ないように被験者を各群に割り振って検証を行う必要がある。

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。先行実験においては UWB (Ultra Wide Band) を使用した測位システムが用いられた。UWB では 80%の精度で作業者の移動軌跡を記録することができた。しかし、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適しているといえる。今後は、固定器の数を増やすことで精度を上げて検証を行っていく。

8. 参考文献

- [1] EN ISO12100, “2010 一般設計原則-リスクアセスメントとリスク低減” ,2003.
- [2] 日本機械学会論文集(C編) 71 巻 711 号, “危険点接近作業の災害防止戦略に関する基礎的考察” ,2005.
- [3] International Organization for Standardization, ISO11161, “Safety of machinery - Safety of integrated manufacturing systems -” Basic requirements,2007.
- [4] 日本機械工業連合会, “平成 26 年度報告書「複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書」” ,2014.
- [5] 日本機械工業連合会, “平成 27 年度報告書「複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書」” ,2015.
- [6] 日本機械工業連合会, “平成 28 年度報告書「複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書」” ,2016.