

## スマートタグを用いた業務状況可視化システムの提案 Proposal of a Business Situation Visualization System using Smart Tags

中田 恵史<sup>†</sup>      岡本 東<sup>†</sup>      堀川 三好<sup>†</sup>  
Satoshi Nakata   Azuma Okamoto   Mitsuyoshi Horikawa

### 1. はじめに

近年、ICT (Information and Communication Technology) の発展により、様々な経済活動がデータ化され、そして蓄積されたビッグデータを分析、活用することにより新たなサービスや価値が生まれている。2012年にドイツで技術戦略「インダストリー4.0」が発表され、その後、各国でIoT (Internet of Things) やAI (Artificial Intelligence) を活用した社会コンセプトが提唱された[1]。特に生産・物流現場ではスマートファクトリー化を目指し、IoTにより工場の稼働状態等がデータ化され、そのデータをAIで解析し、自動化・効率化を目指す取組が行われている。しかしながら、現状におけるIoTの導入事例は、機械設備やロボット等の固定されたモノを対象としているものが多く、移動体を含んだものはあまり存在していない。スマートファクトリー化を目指すためには、移動する人・モノを含んだセンシングが必要不可欠であると考えられる。またIoT導入事例は大手企業の割合が高く、導入後のビジネスモデルが不明確、使いこなす人材の不足および導入・運用コストなどの理由から導入を検討していない企業も多い[2]。

著者らは、移動する人・モノを含めたセンサネットワークの構築を目指しており、それを実現するためのIoTデバイスであるスマートタグを開発している。スマートタグはBLE (Bluetooth Low Energy) の送受信機であり、内部には加速度、ジャイロおよび温度センサなどの複数のセンサを搭載している。そして、BLEを用いて周囲にブロードキャスト送信することで、読み取り作業無しで人・モノの位置・状態を把握することが可能である。著者らはスマートタグを用いた屋内測位手法について提案をし、評価実験を行った結果を報告した[3]。

本稿ではスマートタグを用いた、低コストで実現可能な業務状況可視化システムについて報告する。提案システムは、スマートタグを作業者に装着し、所持者の移動距離、状態遷移図、各地点での運動量および滞在時間などを可視化する。これにより、業務改善のためのレイアウト変更や作業者の行動のデータ化による新たな生産管理システムの実現に活用することを想定している。特徴として、低コストかつ環境整備が容易であり、導入しやすい点が挙げられる。実装したプロトタイプシステムを用いて生産現場での実証実験を行った結果を報告する。

### 2. 屋内測位技術

一般的に測位には、GPS (Global Positioning System) やGLONASS (Global Navigation Satellite System) などの衛星を利用した手法が用いられる。しかし、屋内や地下などで

は衛星からの信号が途切れるため、利用することが出来ない。そのため屋内での測位には、受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を用いた測位手法、複数センサを用いた自律航法など様々な手法が提案されている。本章では各手法について説明し、生産・物流現場に向いている測位技術を選定する。

#### 2.1 受信信号強度を利用する測位

Wi-Fi アクセスポイント (以下、Wi-Fi AP) やBLEビーコンからのRSSIを利用する測位手法が提案されている[4]。RSSIは送信機から受信機までの距離によって値が減衰し、複数の送信機からの受信強度の差などを利用して現在地を推定する。高精度測位は難しいものの中精度、低コストで導入できる点があげられる。すでに歩行者ナビゲーションやO2O (Online to Offline) でのマーケティングで利用され始めている。

##### 2.1.1 三角測量

RSSIの理論的な減衰モデルを用い、各送信機からの距離を算出し、円の交点の関係から位置を推定する手法である[5]。しかし、常時3つ以上の送信機からの電波を受信する必要があるため、綿密な設置計画を行う必要がある。またRSSIは障害物によって値が変化し、実環境では減衰モデルと異なるため、精度が低下するという課題がある。

##### 2.1.2 フィンガープリンティング

フィンガープリンティングは、導入環境の各地点で事前にRSSIを測定し、実際に計測した値と比較することで位置を推定する手法である[6]。理論値を用いる三角測量と比べ、障害物、建物構造が考慮されているため高精度な測位が可能である。しかし、事前計測は導入環境全体で行う必要があるため、負荷が大きく、導入に時間がかかる。

##### 2.1.3 エリア推定

一定期間に観測されたRSSIに対し、統計的検定を行うことで、どちらのエリアにいるのかを判定する手法である[7]。RSSIの性質上、送信機は一定距離離す必要があり、エリアは5m以上の間隔でのみ判定可能である。エリア推定手法は他の手法と比較し、事前計測や綿密な設置計画が必要なく簡易に導入可能であるが、細かい座標を求めることは出来ない。

### 2.2 その他の測位技術

#### 2.2.1 RFID 測位

RFID (Radio Frequency Identifier) タグを利用した測位手法が提案されている。RFIDを測位対象に装着し、読み込み機で読み取ることによって位置推定を行う。特徴として、安価かつタグに電源が必要ないことが挙げられるが、読み取り作業が必要であるため手間がかかるという欠点がある。

#### 2.2.2 自律航法

測位対象が装着する各種センサを利用して、位置の変化を推定し、測位を行う自律航法 (DR: Dead Reckoning) が

<sup>†</sup> 岩手県立大学大学院 ソフトウェア情報学研究所  
Graduate School of Software and Information Science, Iwate  
Prefectural University

提案されている。DR は車やロボットなどに利用されることが多く、タイヤの回転数などを用いたものが多い。一方、歩行者を対象とした DR として歩行者自律航法（PDR：Pedestrian DR）が提案されている[8]。PDR は加速度、ジャイロ、地磁気センサを利用して、現在地点から累積的な移動の変化を計算し、位置を推定する。特徴として、環境に機器を設置する必要がなく、導入コストが低いという利点がある。しかし、相対的測位のため誤差が蓄積するなどの課題が残されている。

### 2.2.3 UWB 測位

超広域帯域信号を利用した UWB（Ultra Wide Band）測位が提案されている[9]。人やモノに装着したタグから送信された電波を施設内 30m 間隔で設置した受信器で受信する。その電波の入射角度や到達時間差によって位置推定を行う。特徴としてセンチメートル単位の精度であるが、導入コストや規格標準化の課題から導入が進んでいない。

## 3. スマートタグ

本章では、開発中であるスマートタグについて説明する。スマートタグは、移動する人・モノを含めたセンサネットワークの構築を実現するために開発されており、要件として、位置と情報をリアルタイムに把握できる機能を必要とする。そのためセンシング機能、通信機能、測位機能、省電力機能の4つの機能を持つ。以下、4つの機能について詳しく説明する。スマートタグの特徴として、低コスト、タグの読み込み作業が必要ないという点がある。

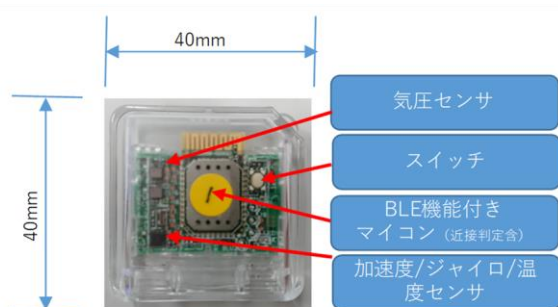


図1 スマートタグのプロトタイプ

### 3.1 センシング機能

加速度、ジャイロ、磁気、環境光、温度、湿度センサを搭載し、必要に応じてセンシングする機能を有する。そして、それらのセンサ結果からスマートタグのファームウェア内で人間の歩行状態やモノの移動の有無を判断する機能を持つ。また運動量（加速度センサの積算値）、歩数の積算値を内部で保持することが可能である。

各センサ情報から機械学習を用い、作業分類（作業・歩行、台車を押す、荷物運搬など）を行うことを可能にするため、10秒間の加速度・ジャイロセンサの全軸合成値の平均値、分散値を計算し、その結果を送信する仕様にした。センサの元の値ではなく、ファームウェア上で特徴量し、送信する理由として、無線通信の性質上、パケットロスが

発生し、それが作業分類の精度に影響を及ぼすためである。後述の実証実験に使用した際には、STmicro 社製の加速度、ジャイロ、温度センサを搭載した。

### 3.2 通信機能

省電力対応の通信規格である BLE の通信モジュールを搭載しており、BLE 通信の送受信機能を持つ。測位に利用するロケーションタグからの BLE 信号を受信結果、状態判定に利用するセンシングデータを送信することが可能である。BLE は、屋内環境では 50m 以上の通信距離を持ち、送信データはゲートウェイやスマートフォンで受信することが可能である。発信間隔は、300ms 以上でファームウェアに設定が出来る。

### 3.3 測位機能

BLE ビーコンを用いた RSSI による屋内測位のエリア判定手法を利用する。理由としては、作業者の負荷にならない点、生産・物流現場の人の動きを可視化する場合、精度は細かい座標は必要ないという点、コスト等から導入が容易であると考えたためである。また Wi-Fi AP を利用しない理由としては、駅やショッピングモールなどすでに Wi-Fi AP が多数存在している場合には有効だが、工場など未整備（存在しても1フロア1つ）の場合には、BLE ビーコンのほうが導入容易であるためである。スマートタグのファームウェア上に測位機能を実装しており、最も近接しているロケーションタグを内部で判定し、その結果を送信する。今後、技術の発展によって別手法を用いる可能性もある。

### 3.4 省電力機能

省電力化を目指すため、利用業況に応じてセンシング内容や頻度を適切に変えられることが必要になる。プロトタイプでは、高精度モード、歩行時のみ動作モード等の5つのモードを選択することが出来る。CR2032 型のボタン電池1つでモードによって3日（超高精度モード）から350日（静止時アクティブモード）の利用が可能である。併せて、センシング機能、通信機能、測位機能については、BLE を用いた通信アプリで容易に設定変更が可能である。

## 4. 業務状況可視化システム

全体像を図2に示す。施設内にロケーションタグ（BLE ビーコン）を設置し、作業者はスマートタグを所持する。そして対象施設の中心にゲートウェイを設置する。スマートタグは各ロケーションタグからの受信情報、内蔵センサ情報を配信し、ゲートウェイはそれらを受信する。

提案システムでは、生産・物流現場の作業者の行動を可視化することを目的としている。提案システムの特徴として、導入が容易という点が挙げられる。後述で示す実証実験では、1時間程度でロケーションタグの設置が終了し、データ収集開始・終了は、対象現場の担当者が行った。また一般的な生産・物流現場での作業着にはポケットまたはスマートタグを引掛けるベルトループがあり、装着時の負荷はあまりかからないと考えられる。

提案システムは、工程が標準化されていない現場での見える化や、標準化された工程通りに現場が動いているかを定量的に評価することが出来る現場の担当員のみで利用可能な可視化ツールを目標としている。

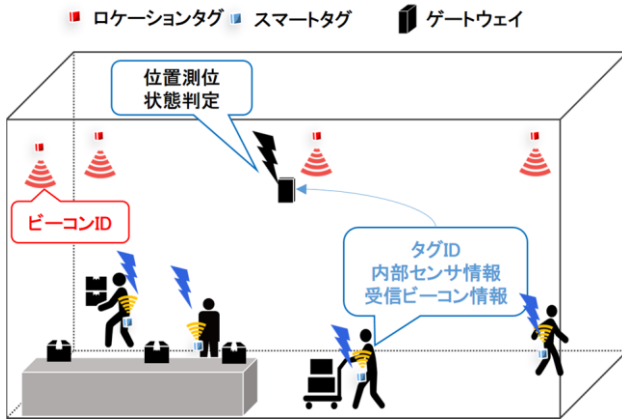


図2 業務状況可視化システムの全体像

#### 4.1 プロトタイプシステム

プロトタイプシステムでは、ゲートウェイを市販のスマートフォンとし、データの収集、簡易分析機能まで一貫して Android アプリ上にて実装した。詳細な分析にはアプリからエクスポートしたデータを用いた。構成機器は、開発中のスマートタグ、ロケーションタグには株式会社イーアールアイの BLU250、スマートフォンには Huawei 社の P20 を使用した。ソフトウェアは Android 端末用アプリとして、Java および SQLite を用いて実装を行った。

#### 4.2 プロトタイプシステムの機能

##### 4.2.1 リアルタイム機能

図3はリアルタイム機能の画面イメージであり、各スマートタグの現在の位置や状態（移動中・静止中）を表示し、またスマートタグから送信されたデータをアプリ内部のデータベースに蓄積する。スマートタグの現在位置は中心に数字を含んだ円または四角で表示する。中心の数字、アイコンの色はスマートタグごとに割り振られている。枠線の色は、赤色が現在その場所にいることを表しており、黒色はその場所から移動中であることを表す。またタグの現在位置をタップすると過去1分間の移動・静止中の割合と運動量が表示される。またヒートマップ機能も実装している。詳細については後述で示す。

##### 4.2.2 分析機能

分析機能では、各タグのロケーションタグ間の状態遷移図、滞在時間や運動量を要素としたヒートマップ、場所や作業員ごとの簡易分析が可能である。また現場担当者が必要に応じて分析を行うことを想定し、内部データベースの情報をエクスポートすることも可能である。以下、各分析機能について説明する。

##### ① 状態遷移図

状態遷移図は、各タグのロケーションタグ間の遷移確率を可視化する。全スマートタグまたは選択したスマートタ

グのみの表示も可能であり、移動傾向や作業員ごとの比較に活用できる。全体の動線を把握することで、無駄な移動の可視化やレイアウト変更等の参考情報になることを想定している。

##### ② ヒートマップ

ヒートマップは経路の使用回数、場所ごとの滞在時間・運動量を表す。

経路の使用回数はロケーションタグ間の直線の太さで表し、色は通過したタグごとに設定されたもので引かれる。複数のタグが同じ経路を通過した場合の太さは合計回数に比例し、色は各タグの合計使用回数の割合で虹のように表示される。またロケーションタグ設置地点に表示される円（以下、ビーコンアイコン）の大きさは近接回数に比例して大きくなる。

場所ごとの滞在時間は、ビーコンアイコンの色の透明度で表しており、濃い地点は他の場所と比べ、滞在時間が長いことを表す。

場所ごとの運動量は、ビーコンアイコンの色で赤・黄・青の3色で表現される。赤になるにつれ、他の場所より運動量が多いことを表す。

またシークバーにより時間の指定も可能である。

##### ③ 場所ごとの分析

場所ごとの分析機能では、場所ごとに近接した割合、滞在時間、運動量を表す。また時間、タグを限定した表示や、これらの詳細データをエクスポートすることも可能である。

##### ④ 作業員ごとの分析

作業員別に1時間毎の移動状態の確立、運動量、歩数を表す。またこれらの詳細データをエクスポートすることも可能である。

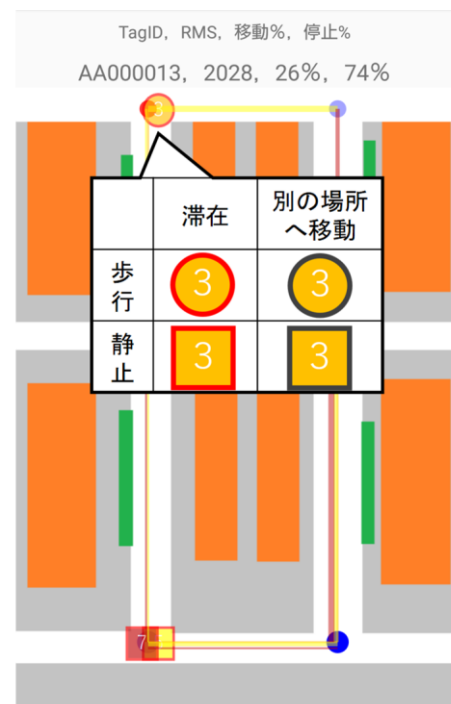


図3 リアルタイム画面

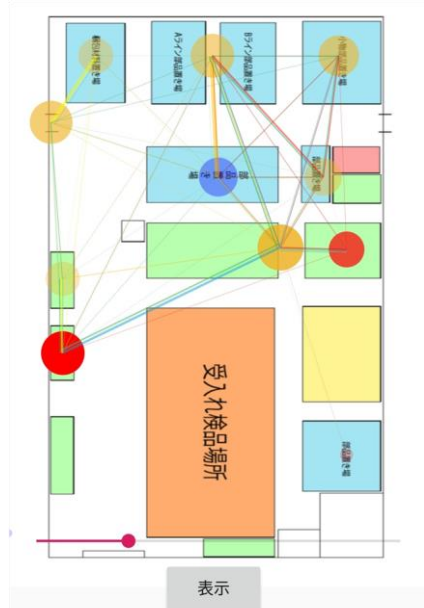


図 4 ヒートマップイメージ

## 5. 生産現場における実証実験

プロトタイプシステムの動作検証および有効性を評価するため、製造業 3 社において実証実験を行った。a 社、b 社では、部品をピックアップし、組み立てラインに運ぶ部品供給エリア担当の作業者を対象、c 社では、成型機に材料を投入、完成品を運ぶ作業者を対象とした。各社 3 日間データ収集を行った。

### 5.1 対象業務

本節では、a 社での実験結果の報告を行う。対象の部品供給エリア担当の作業者は、各組み立てラインで行われる作業に必要な部品を部品倉庫でピックアップし、部品置き場まで運搬する。そして、トレイ回収場所に置かれる空トレイを引き取り、部品倉庫に持ち帰る。作業員 6 名を対象に実験を行い、実験結果についてはそのうちの 2 名の結果を示す。

### 5.2 ロケーションタグの配置

実験環境およびロケーションタグ設置場所を図 5 に示す。ロケーションタグの配置は部品倉庫に 11 カ所、部品置き場に 4 カ所、トレイ回収場所に 4 カ所の計 19 カ所に設置した。実験環境は 20m×50m であり、ゲートウェイ（スマートフォン）は 6 番ロケーションタグ付近に設置し、環境全体からのスマートタグの電波を受信出来ることを確認した。またロケーションタグの出力は -4dbm に設定した。理由として、出力を大きくすると近接をしているロケーションタグとそれ以外で RSSI の差があまり発生せず、近接判定が困難になるためである。

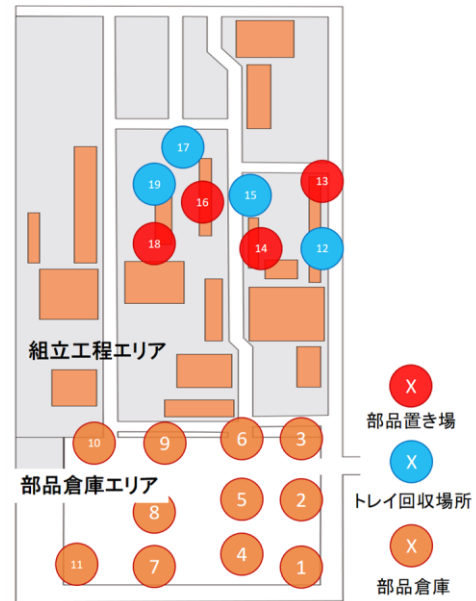


図 5 ロケーションタグ配置図

## 5.3 実験結果

### 5.3.1 プロトタイプシステムによる動態可視化

ある 1 日の 9 時台、11 時台を比較した結果を図 6 に示す。9 時台では、部品倉庫エリアの運動量が大きいのが分かる。これはトラックで輸送されてきた部品を部品倉庫内でラインごとに整理し、配置しているためである。一方 11 時台では、部品倉庫エリアの運動量が減少し、一部の組立工程エリアでの運動量が増加している。これは倉庫内の部品整理が終わり、組立行程エリアへの部品運搬が開始されているからだと考えられる。また滞在時間に関しては、常に部品倉庫エリアが大きいのが分かる。

図 7 は作業員 A、B の状態遷移図である。作業員ごとに表示することが可能であるため、個々の行動パターンを把握することが出来る。全ての遷移を表示すると見づらいため、ここでは各場所から最大の確立の遷移のみを表示している。作業員 A は倉庫内でその場所を離れて、また同じ場所に戻る行動が多いことがわかる。一方、作業員 B は別の場所への移動が多く見受けられる。

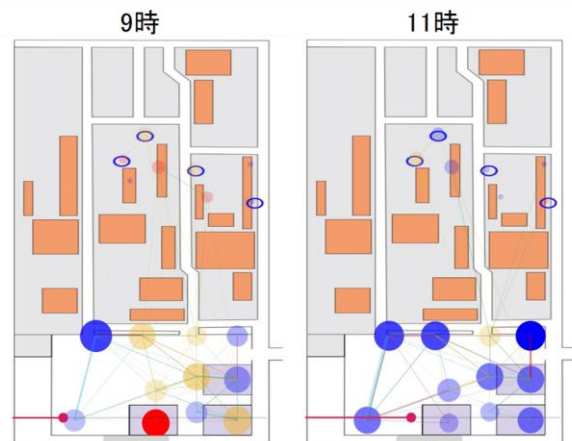


図 6 ヒートマップ時間比較

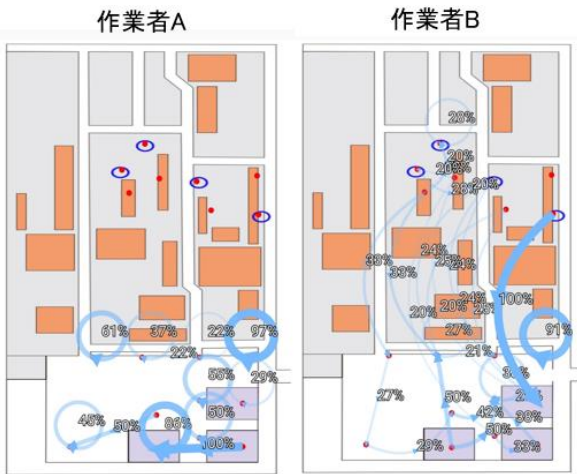


図7 状態遷移図作業者比較

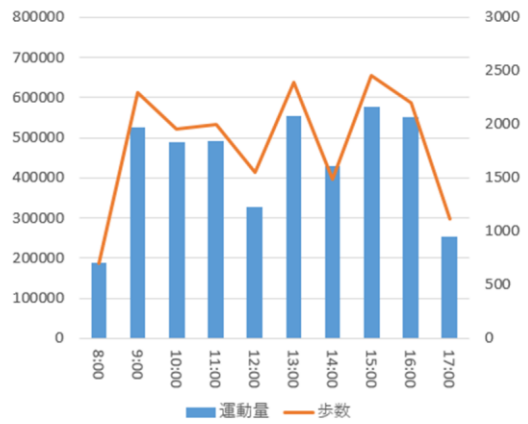


図9 作業者Bの運動量・歩数

5.3.2 作業者ごとの分析

図8から図11に作業者ごとの分析結果を示す。図8から作業者Aに関しては時間によって運動量、歩数の変動が激しいことが分かる。一方、図9から作業者Bは1日を通して歩数、運動量が平均して高いことがわかる。また作業者Bのほうが歩数と運動量の相関が強いのがわかる。このような結果になった理由として、作業者Aは1日を通して、部品倉庫エリアの整理を担当している一方、作業者Bは組立工程エリアへ部品を運搬しているためだと考えられる。作業者Bの歩数、運動量が時間によるあまり変動がない、つまり一定間隔で部品を供給していたことが分かる。このことから、組立工程では1日を通して一定の速度で製品が組み立てられていることが想定できる。

図10および図11の移動静止割合について、こちらも部品を実際に運搬している作業者Bの移動割合が全体的に高くなっている。また作業者Aの14時の結果が高くなっている理由として、本実験対象エリア外に居たため、取得したデータ数が少なくなったことが原因だと考えられる。図8の作業者ごとの運動量、歩数の14時の結果に関しては、こちらはスマートタグ内部で積算されているデータを利用しているため対象エリア外の歩数、運動量が含まれていると考えられる。

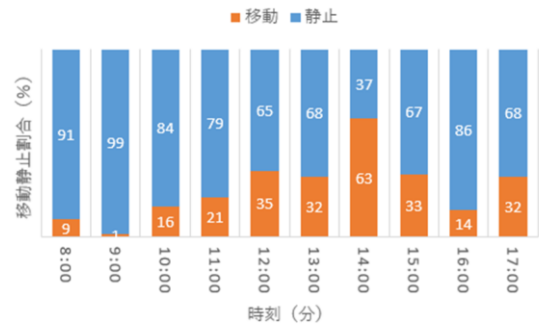


図10 作業者Aの移動・静止割合

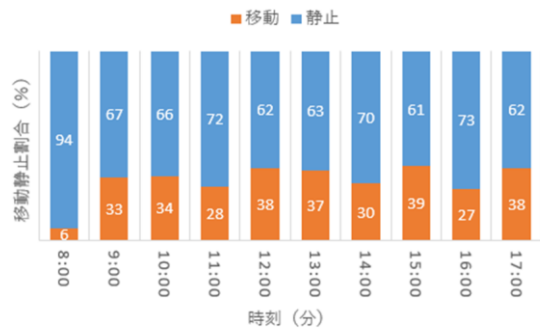


図11 作業者Bの移動・静止割合

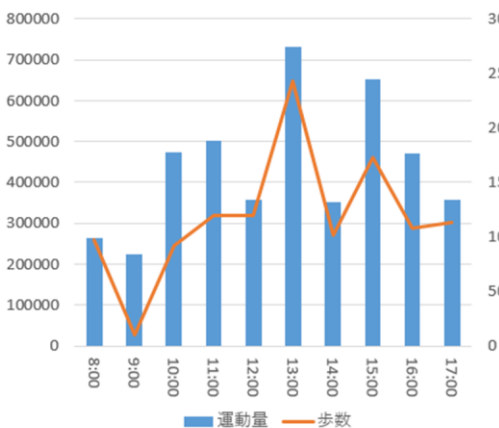


図8 作業者Aの運動量・歩数

5.3.3 場所ごとの分析

図 12 から図 17 に場所（ロケーションタグ）ごとの分析結果を示す。図 12 および図 13 は、作業者の場所ごとの滞在時間の比率の時間帯別、図 14 および図 15 は 1 日累計を表している。作業者 A は 1 日を通してロケーションタグ 7 番、10 番付近に多くいたことがわかり、また時間帯には午前 11 時までは 7 番、11 時以降は 10 番付近に多く居たことが分かる。一方、作業者 B は 1 日を通して 5 番付近の部品置き場に多く居たことが分かり、また A と比べて、場所ごとの偏りが少ないことが分かる。時間帯でみた場合にも同じ傾向が見受けられる。これは、作業者ごとの分析での考察と同様、組み立てラインへ部品を運搬しているためだと考えられる。

図 16 および図 17 は、作業者の場所ごとの運動量の比率であり、多少の差異はあるものの滞在時間と同等の傾向が見受けられた。どこの場所でも同程度の作業が発生していたことがわかる。

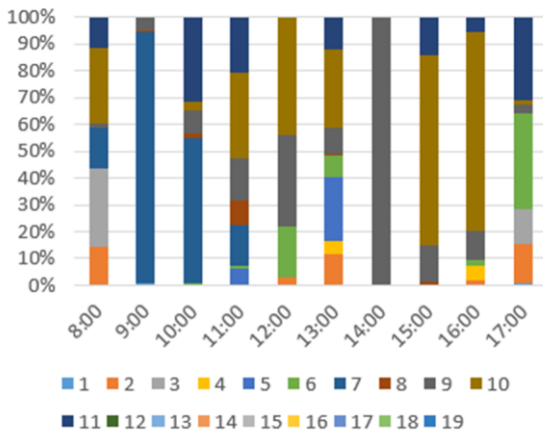


図 12 作業者 A の場所ごとの時間帯別滞在時間

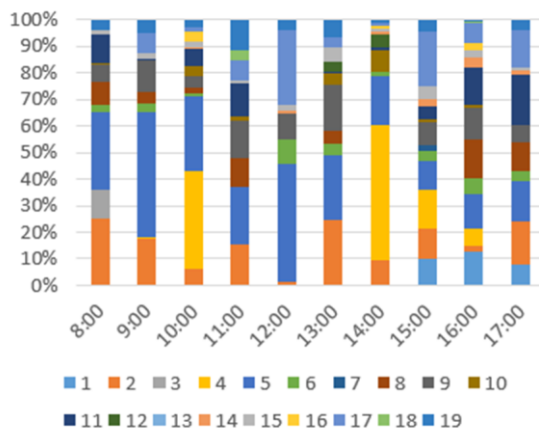


図 13 作業者 B の場所ごとの時間帯別滞在時間

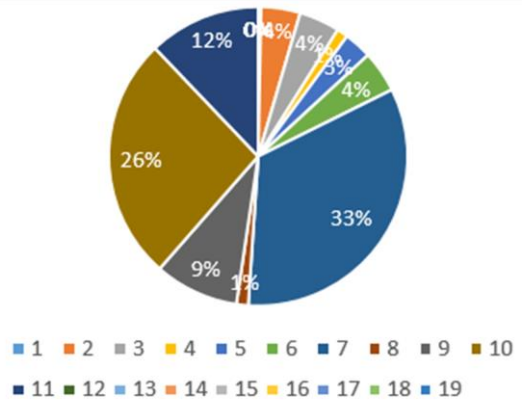


図 14 作業者 A の場所ごとの累計滞在時間

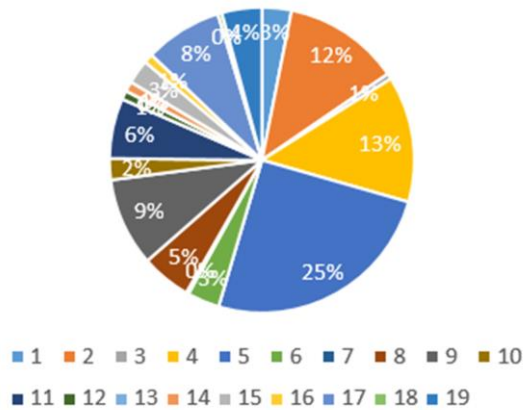


図 15 作業者 B の場所ごとの累計滞在時間

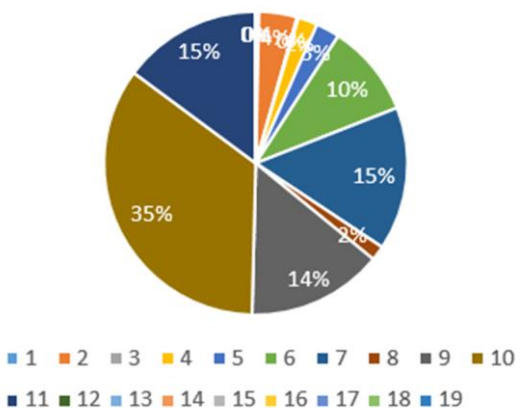


図 16 作業者 A の場所ごとの累計運動量

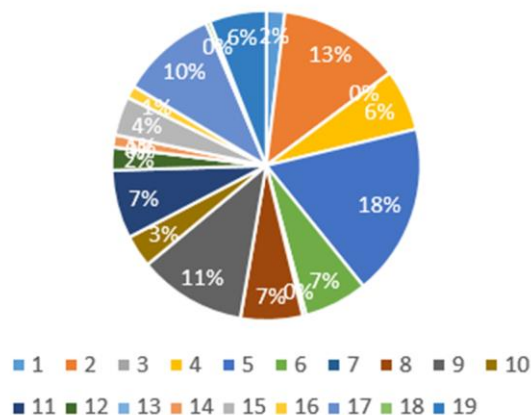


図 17 作業員 B の場所ごとの累計運動量

#### 5.4 実証実験から得られた知見

3 件の実証実験を通じて、得られた知見を以下にまとめる。b 社、c 社についても a 社と同様の結果が得られた。しかし、a 社および b 社では工程改善に活かせるという意見を頂いた反面、c 社では活かさないのと意見を頂いた。

##### 5.4.1 測位精度

スマートタグのファームウェア上に実装されている近接判定による測位精度については、先行研究で検証した実験環境における精度と比較し、低い傾向があった。これは、工場内の設備、建物の構造など電波強度に影響を与えたことが原因だと考えられる。そのため、ロケーションタグの出力の変更、金属障害物の利用、作業員が一時停止する場所の近くに配置する等の工夫を行う必要があった。今後も、実環境における測位精度を向上するためのノウハウを蓄積していく必要がある。

##### 5.4.2 導入の容易性

a 社、c 社の実証実験においては、事前に数回の打ち合わせを行い、ロケーションタグの設置計画を行ったが、b 社に関しては当日の 3 時間程度で設置計画と設置を行い、実験を開始することが出来た。また、一時的な実験ということもあり、作業員がスマートタグを着用することによる精神的な負荷についての報告はなかった。研究グループが目指す、センサネットワークの構築には日常的に装着する必要があるため、作業員の負荷面に関しては、今後も慎重に調査していく必要があると考える。

また今後は、アプリ内でロケーションタグの管理機能等を実装することにより、現場の担当者だけで導入可能な可視化ツールを目指していきたいと考えている。

##### 5.4.3 データ分析・活用方法

今回の実証実験は、主に動作検証が目的であり、収集データの分析結果の活用方法に関しては現場の担当者に一任した。

標準的な作業手順が確立されていない、部品供給を担当とする作業員を対象とした現場においては、今まで見えなかった状態が可視化され、工程改善に活用できるという意見を頂いた。一方、標準的な作業手順が導入されている作業員を対象とした現場では、作業手順通り現場が動いて

いたことがわかる程度で、工程改善は望めないとの意見を頂いた。

今回の実証実験を通し、提案システムではレイアウト変更、人員配置変更等の大規模な工程改善の実施前と後に測定することにより、工程改善の定量評価が可能であると考えられる。そして今後は位置情報、加速度、ジャイロのセンサ値から機械学習を用いて作業員の作業分類を行うモデルを構築し、システム内に実装する予定である。この機能が完成すれば、自動生成される作業手順と既存の作業手順との差異から作業員ごとの作業改善も行うことが可能になると考えられる。

## 6. おわりに

スマートタグを用い、導入が容易である業務情報可視化システムについて説明した。そしてプロトタイプシステムを用いて 3 社での実証実験を行い、動作検証および収集データの分析を行い、システムの課題、利用用途、必要機能について考察をした。特に機械学習による作業分類を行うことが可能になれば、対象領域は大きく広がる事が期待できる。

今後は機械学習を用いた作業分類機能をシステムに実装し、他の生産・物流現場で実証実験を行う予定である。またスマートタグの仕様について、システム要件を満たすための送信間隔など、省電力化についての調査も行う必要があると考えている。

## 参考文献

- [1] 総務省：平成 30 年版情報通信白書(2018).
- [2] 総務省、情報通信総合研究所 (ICR)、日本経済研究センター (JCER)：「AI・IoT の取組に関する調査」.
- [3] 堀川三好, 岡本東, 村田嘉利：「生産・物流システム向けスマートタグの開発」, 平成 30 年電気学会電子・情報・システム部門大会, MC3-4, pp.951-956(2018).
- [4] 久保田僚介, 田頭茂明, 荒川豊, 北須賀輝明, 他：「無線 LAN を用いた屋内位置推定における学習コスト削減のための高精度データ補間手法」, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1609-1618(2013).
- [5] 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田晃. 無線通信網を用いた屋内向け測位方式. 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS), Vol. 44, No. SIG10(ACS2), pp. 131-140.(2003).
- [6] 谷内大祐, 前川卓也：「位置フィンガープリントの自動更新を用いた電波環境変化に頑健な屋内位置推定手法」, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.1, pp.280-288(2014).
- [7] 藤原大希, 堀川三好, 古舘達也, 岡本東, "BLE ビーコンを用いたエリア推定による屋内位置測位手法の提案", 第 78 回全国大会講演論文集, Vol.2016, No.3, pp.425-426 (2016).
- [8] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之：「手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案」, 情報処理学会誌, Vol.52, No.2, pp.558-570(2011).
- [9] Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G.B., et al. "Localization via Ultra-Wideband Radios: a look at positioning aspects for future sensor networks", IEEE Signal Pr.ocessing Magazine, Vol.22 No.4, pp70-84(2005).