

Internet of Things 向けスマートタグの提案

堀川三好^{†1} 岡本東^{†1} 村田 嘉利^{†1}

概要：本研究は、生産・物流現場を移動するモノや人を対象に、位置と状態をセンシングすることを意味する IoMT (Internet of Moving Things) を実現することを目的としている。生産・物流分野における IoT (Internet of Things) は、現在は機械設備やロボット等の固定されたモノを対象としたセンシング技術の開発が中心に進められている。また、移動するモノを識別する技術としてバーコードや RFID が普及しているが、対象の状態を含めたセンサネットワークの構築には適していない。そのため、新たなスマートタグを開発し、移動するモノを含めたセンサネットワークの構築を可能とする。本稿では、IoMT を実現するために必要なスマートタグの要件定義を行い、生産・物流向けセンサネットワーク構築方法および既存の業務システムとの連携方法を提案する。また、屋内測位技術を組み込んだスマートタグのプロトタイプを開発し、測位性能について評価実験した結果を報告する。これにより、新しいトレーサビリティシステムの構築やスマートファクトリの実現に向けた知見を得ることを目的としている。

キーワード：IoT, センサネットワーク, スマートタグ

Proposal of smart tags for Internet of Things

MITSUYOSHI HORIKAWA^{†1} AZUMA OKAMOTO^{†1}
YOSHITOSHI MURATA^{†1}

1. はじめに

現在進行している IoT の技術革新により、人だけでなくモノのデジタル化・ネットワーク化が拡大し、CPS (Cyber Physical System) によるデータ駆動型社会の到来が期待されている [1]。IoT (Internet of Things) は、CPS のデータ収集において欠かせない技術であり、センシング技術のコモディティ化により進展し、製造プロセスやモビリティの分野で急速に導入が進められている [2]。例えば、CPS の概念をものづくりに適用した Industry 4.0 では、ロボットと人間が高度に協調した変種変量生産による「自ら考える工場」を実現するために、機械・モノ・人が「どこで」「どのような状態」にあるかを即時かつ正確に把握する仕組みの構築に取り組んでいる。現状は、固定されている設備にセンサを取り付け、データ解析や機械学習と組み合わせた異常検出や設備保全に活用する取り組みが盛んである。今後は、移動するモノを含めたセンサネットワークを構築することで、スマートファクトリの実現を目指す必要がある。

一方で、生産・物流現場におけるモノの位置の把握については、RFID やバーコードを利用した現物管理が主な技術である。また、深層学習は様々な分野への適用が行われる中、作業研究や動態分析に活用されつつある。しかしながら、これらの技術は移動するモノを含めて位置や状態を把握し、センサネットワークを構築することはできず、変種変量生産を見据えた生産システムの実現のための代替技術が求められている。

本研究は、生産・物流現場を移動するモノや人を対象に位置と状態をセンシングすることを意味する IoMT (Internet of Moving Things) を実現し、既存の IoT や生産情報システムと連携可能なセンサネットワークを構築することで、IoT 時代の新しい生産システムを設計することを目的としている。本稿では、IoMT によるセンサネットワークの概要や既存の生産情報システムとの連携方法について提案する。また、機能として「センシング機能」「測位機能」「通信機能」を持つスマートタグのプロトタイプを開発し、測位精度について評価実験した結果について報告をする。

2. 関連研究

本研究と関連する CPS の概念および CPS をものづくりの分野に適用した Industry 4.0 との関連について述べる。また、提案する IoMT に関連して IoT や屋内測位技術についてまとめる。

2.1 Cyber Physical System

CPS は、実世界のデータを収集しセンサネットワークを構築し、サイバー空間でビッグデータ解析、人工知能等を用いて知識化を行うことで、新しい価値の創出や社会課題の解決を行う概念を示す [3]。CPS は、分野横断的に IoT、ビッグデータ解析、人工知能などを用いる概念であるが、ものづくりの分野に適用したものが Industry 4.0 や Industrial Internet である。Industry 4.0 は、ドイツ政府が推奨する製造業のデジタル化・コンピュータ化を目指すコンセプトであり、CPS の概念を取り入れた国家プロジェクトとして取り組まれた初めての事例として知られている。以

^{†1} 岩手県立大学
Iwate Prefectural University

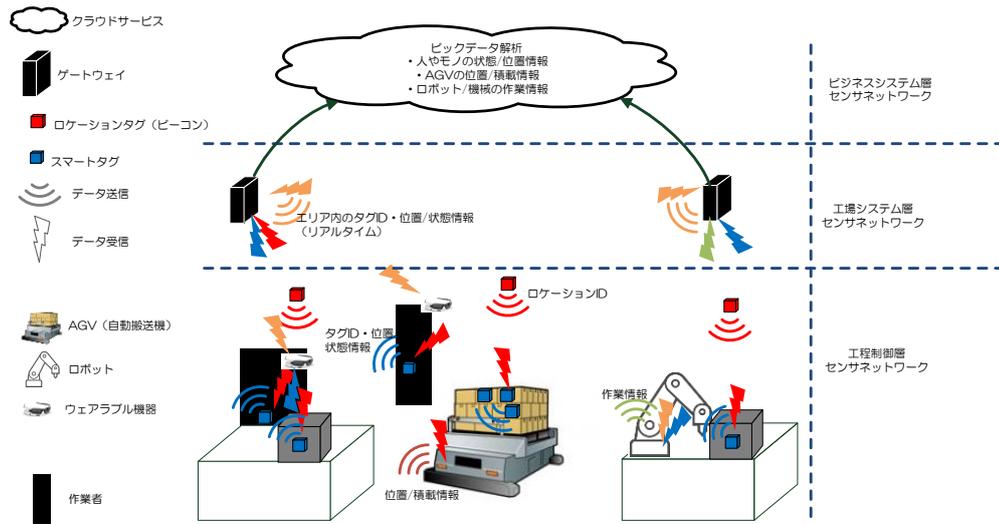


図1 移動するモノを対象としたIoTの概要

Figure1. The overview of IoT

下の4つの重要な側面がある [3].

- ①価値ネットワークを横断する水平統合
- ②垂直統合とネットワーキングされた生産システム
- ③価値連鎖全体を通じたエンジニアリングのデジタル一貫性
- ④価値創造の指揮者として人間

IoTによりセンサネットワークを構築し、オフィスフロアとショップフロアを人工知能等により共通セマンティックモデルで接続するスマートファクトリの実現は、生産システムの垂直統合を目指すものである。スマートファクトリは、2000年初頭からある言葉ではあるが、IoTの普及により注目を集めている。Martinら [4] は、スマートファクトリの実現には、リアルタイム情報を収集した上で、生産情報システムと統合することの重要性を述べている。リアルタイム情報とは、人や物の位置および状態を把握しセンサネットワークを構築することを意味しており、生産情報システムとはMES (Manufacturing Execution System) やERP (Enterprise Resource Planning) 等、ビジネス層から工程制御層までの幅広い情報システムを指す。一方で、3Dプリンタ、AR/VR、ウェアラブルデバイス等を用いたエンジニアリングのデジタル化によるデジタルマニュファクチャリングが注目されている。これらを融合することにより、デジタルツイン等の新たなサービスも誕生しており、CPSの具体的な事例として注目されている。

2.2 Internet of Things

IoTは、RFIDによる商品管理をサーバー上で行う技術としてKevin Ashton [5] により用いられたのが最初だが、現在のセンシング技術として確立されたのはCPSが提言された2007年のPCAST (米・科学技術政策提言) の中で

ある。IoTは、電子機器・ソフトウェア・センサ・アクチュエータにデータ接続や交換を可能にするインターネット接続機能を組み込んだ物理デバイス・車両・家電製品などのネットワークを意味する。ものづくり分野では、現物管理のためにRFID、QRコードおよびバーコードを用いた位置把握の導入が進んでいる。また、作業者のウェアラブルデバイス装着および加工設備、ロボットへのセンサ装着により、センサネットワーク構築が進められている。

2.3 屋内測位技術

工場や物流センターなどGPS信号が受信できない屋内においては、モノの位置を把握するために屋内測位技術を確立する必要がある。屋内測位手法としては、Wi-FiやBLE (Bluetooth Low Energy) ビーコン等の受信信号強度を用いた測位手法、加速度・ジャイロ・地磁気センサを用いた歩行者自律航法、地磁気フィンガープリンティング、音波測位、可視光測位など様々な手法が提案されている [6] [7] [8] [9]。また、工場における高精度な測位方法として、UWB (Ultra-Wide Band) の導入が注目を集めているが、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。スマートタグにおいては、低コスト・省電力で生産システムの用途に応じた精度の測位を実現する必要がある。

3. 移動するモノを対象としたIoT

本研究で提案するIoMTの概要について述べ、その実現に欠かせないスマートタグの要件定義について述べる。また、スマートタグの主要機能である屋内測位手法について提案を行う。

3.1 Internet of Moving Things の概要

提案するIoMTは、生産・物流現場で移動するモノや人

を対象にセンシングする技術である。すなわち、既存の現物管理や位置情報を取得する技術であるバーコードやRFIDに加え、センシング、通信、測位機能を持つスマートタグを開発し、利用目的やモノの付加価値に応じて利用する技術を意味する [10]。

図1に提案するスマートタグを活用したIoMTの概要を示す。まず、生産・物流現場にロケーションタグ（BLEビーコン）を設置する。その上で、移動するモノや人がスマートタグをつけることにより位置を把握し、センサで取得する状態と併せてBLEのブロードキャスト機能を利用して配信する。配信された情報は、ロボットやウェアラブルデバイスが受信し現物管理に活用すると同時に、エリアごとに設置されるゲートウェイで受信する。また、メッシュ機能を用いて近隣のゲートウェイ同士で情報共有し進捗管理などに活用する。さらに、ゲートウェイで収集された情報はクラウド上に集約し、生産管理に活用する。すなわち、工程制御層、工場システム層、ビジネスシステム層の3階層からなるセンサネットワークを構築する。

3.2 スマートタグの要件定義

図1のIoMTを実現するため、以下の3つの機能を持つ小型・省電力・低価格なスマートタグの開発を行う。

(1) センシング機能

加速度、ジャイロ、磁気、環境光、温度、湿度、近接等のコモディティ化している各種センサを搭載し、必要に応じてセンシングする機能を有する。また、センシングデータを用いて、歩行・移動検知などの処理を可能とする。

(2) 通信機能

BLEやLPWA（Low Power Wide Area）の省電力対応の通信機能を持ちセンシング機能で取得したデータをクラウド上に送信する。IoTでは大量のデバイスの通信が発生する一方で、1件あたりのデータは少量であるため高速通信である必要性は少ない。また、従来以上に消費電力を抑えながらも広域で通信できる必要がある。

(3) 測位機能

GPS（Global Positioning System）、各種センサおよび測位技術を用いて、リアルタイムに位置情報を取得する機能を有する。屋外においては、GPSとLPWAを用いることで広範囲で位置情報を取得することができる。しかしながら、屋内においては優位性を持つ技術が存在しておらず、各種センサや電波強度を用いた測位技術を確立する必要がある。

3.3 提案するセンサネットワーク

提案するセンサネットワークと既存の生産システムの間を工程制御層、工場システム層、ビジネスシステム層の3階層に整理する。

(1) 工程制御層

仕掛り品や作業者に付けたスマートタグからBLEでブロードキャストする情報に基づき、ショップフロア内のセ

ンサネットワークを構築する。スマートタグのID情報と紐づけられた製品・設計情報を用いてロボット、マシニングセンタ、AGVや作業者のウェアラブル機器と連携をする。すなわち、読み込み作業なしで近接しているモノや人を判別する近接検知型の測位により、柔軟な生産システム設計や変種変量生産が可能な生産ラインの構築を目指す。

(2) 工場システム層

ゲートウェイ周辺にあるスマートタグ情報を収集し、ゲートウェイ間で相互にメッシュ機能を用いてリアルタイムに情報交換を行う工場システム層のセンサネットワークを構築する。MES等と連携することにより工程管理に活用し、自由度の高いレイアウトでの作業を可能とする。そのため、ゲートウェイにエリア判定型の測位技術導入し、周辺のモノや人の動きや状態を把握可能とする。

(3) ビジネスシステム層

スマートタグからの位置情報やセンシングデータをゲートウェイ経由でクラウドサービス上に収集する。リアルタイム情報のみでなく履歴情報を蓄積し、ERP等と連携することでトレーサビリティや生産管理に活用する。従来のトレーサビリティシステムは、追跡・遡及を行うためのデータ収集としてICタグやバーコードを使うことが多い。しかしながら、位置情報の取得に読み取り作業を必要とし、また状態情報を取得するには入力が必要となり、作業負荷が大きいために課題となっている。そのため、座標測位型の測位技術を導入し、モノや人の動きを把握すると同時にセンサ情報を活用して把握する状態と結びつけることで、追跡・遡及を容易に可能とする。併せて、生産履歴を詳細に把握することにより生産管理に活用する。

3.4 屋内測位技術とセンサネットワーク

屋内測位技術はスマートタグの機能として重要でありながら、確立されていない技術である。受信信号強度（RSSI）を用いた測位タイプとしては、3.3節で述べたような座標を求める座標測位型、エリアを推定するエリア型、接近を感知する近接検知型の3つがあげられる。各階層のセンサネットワークで利用目的にあった測位手法を適用する必要がある。著者らは、これまでに各測位タイプについて開発・導入をしている [8] [9] [10]。

受信信号強度（RSSI）は、壁や天井、障害物のない自由空間において電波送信機と受信機間の距離 d に応じて送信機を中心とする球の表面積に反比例しながら値が減衰する（式1）。しかしながら、屋内環境における計測では、様々な変動要因により、実測値は変動する。図2に屋内通路において電波発信機としてBLEビーコン、電波受信器としてスマートフォンを設置し、1mごとの計測場所で1分間に観測されたRSSIの平均値を示す。式（1）で算出される理論値に対し、実測値がばらばらしているのがわかる。その要因として、マルチパスフェイジングやシャドウウィングが

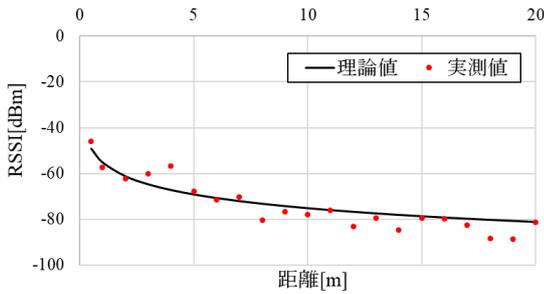


図 2 距離と RSSI の関係

Figure2. The relationship between distance and RSSI

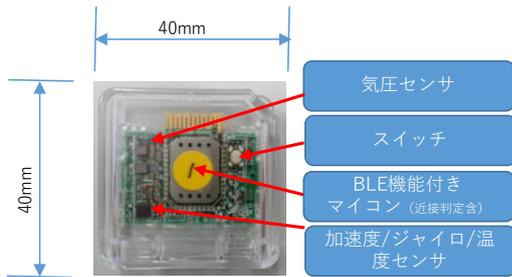


図 3 スマートタグのプロトタイプ

Figure3. Prototype smart tags

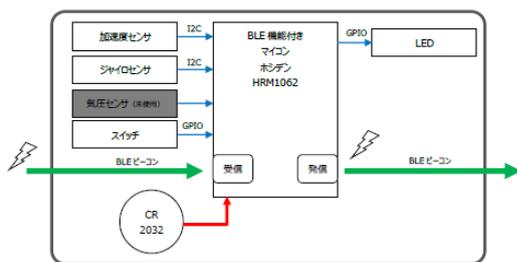


図 4 スマートタグのブロック図

Figure4. Block chart for smart tags

あげられる。マルチパスフェージングは、反射や屈折、錯乱した電波が受信地点で合成し、RSSI が変動する事象である。特に屋内環境では、送信機から発信された電波が受信機まで直接到達する直接波と、地面や壁と反射して受信機まで到達する反射波が合成することで、RSSI が複雑に変動することが知られている。また、シャドウイングは、送受信機間に存在する障害物によって電波が遮蔽され、RSSI が変動する事象である。屋内環境では人体のような動く障害物や壁のような固定された障害物など、様々な障害物で電波が遮蔽され RSSI が減衰する。そのため、これらの変動要因に対応できる屋内測位手法を適用する必要がある。

$$P_r = P_t + G_r + G_t - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (1)$$

P_r : RSSI[dBm]

P_t : 電波発信機の送信電力[dBm]

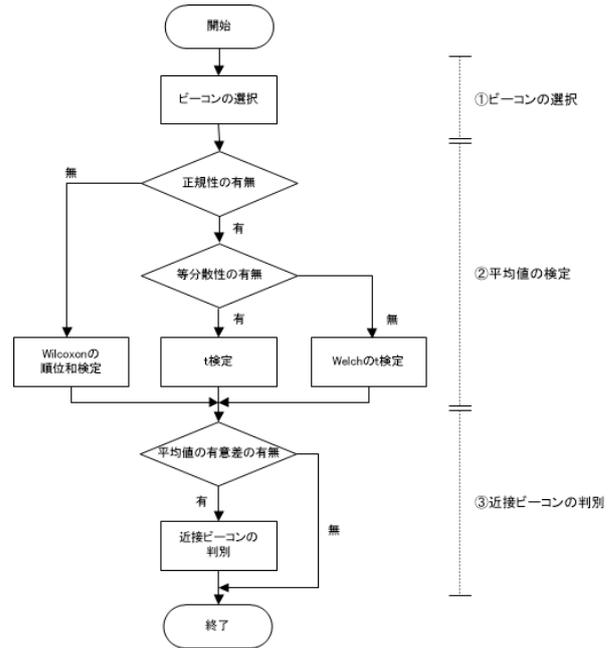


図 5 近接判定のフローチャート

Figure5 flowchart of Proximity determination method

G_r : 受信アンテナの利得[dBi]

G_t : 送信アンテナの利得[dBi]

L : 自由空間損失 [dBm]

d : 距離[m]

f : 周波数[Hz]

c : 光速 2.99792458×10^8 [m/s]

4. スマートタグのプロトタイプ

3.2 節で述べたスマートタグの要件定義に基づき、以下の機能を持つプロトタイプを開発した (図 3)。図 4 にスマートタグのブロック図を示す。まずは、生産・物流現場の屋内利用を想定した機能を実装している。

4.1 センシング機能

STmicro 社製の加速度、ジャイロ、温度センサを搭載する。また、スマートタグ内で加速度データから動作状態をセンシングする。すなわち、人間の歩行状態やモノの移動の有無を判別する機能を持つ。

4.2 通信機能

屋内利用を想定し、BLE 通信機能のみを持つ。BLE ビーコンからのブロードキャスト通信を受信すると共に、センシング機能で取得した各種センサデータ、人やモノの動作状態および近接判定結果をブロードキャスト送信する。BLE は、屋内環境では 50m 以上の通信距離を持ち、ゲートウェイやウェアラブルデバイスで受信可能となる。発信間隔は、300ms 以上でファームウェアに設定ができる。

4.3 測位機能

スマートタグのファームウェアに著者らが提案する統

計的検定を用いた近接検知型の近接判定プログラムを実装する。RSSIは、先述のマルチパスフェイジングやシャドウウィングの影響でばらつく。そのため、RSSIの大小や閾値設定のみでは、正確な近接判定が行えない。著者らは観測されたRSSIをもとに平均値の検定を繰り返し、有意差の有無で近接判定する手法を提案している[9]。スマートタグのファームウェアに図5に示す近接判定プログラムおよび近接エリア判定を行うため閾値判定を加えたプログラムを実装する。測位タイミングは、BLEの発信間隔に併せて設定する。

4.4 その他

省電力化をはかるため、高精度モードや歩行時のみの動作モード等、5つのモードを選択できる。R2032型のボタン電池を搭載し、モードにより理論上は約1日(高精度モード)から約350日(静止時アクティブモード)の継続利用が可能となる。併せて、センシング機能、通信機能や測位機能については、BLEを用いた通信アプリで任意に設定変更可能である。

5. スマートタグの評価実験

5.1 実験概要

スマートタグの性能評価として、センシング機能、通信機能および測位機能の評価を行う必要がある。本稿では、独自手法を取り入れている測位機能の検証を中心に報告する。

実験は、図6に示す環境で静止状態および移動状態につ

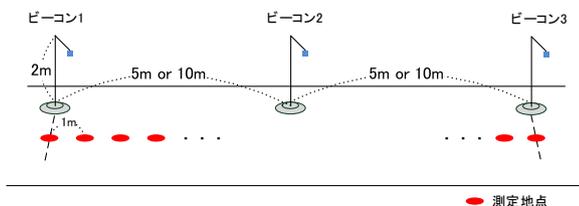


図6 実験環境

Figure6. Experimental environment

表1 タグの仕様

Table1. Specification of tags

	項目	内容
ロケーションタグ	製品名	BLU250-H
	販売会社	(株)イーアールアイ
	送信強度	+4dbm
	発信間隔	100ms
スマートタグ	スキャンインターバル	100ms
	スキャンウィンドウ	50ms
	送信強度	+4dbm
	アダプタイズインターバル	300ms×3

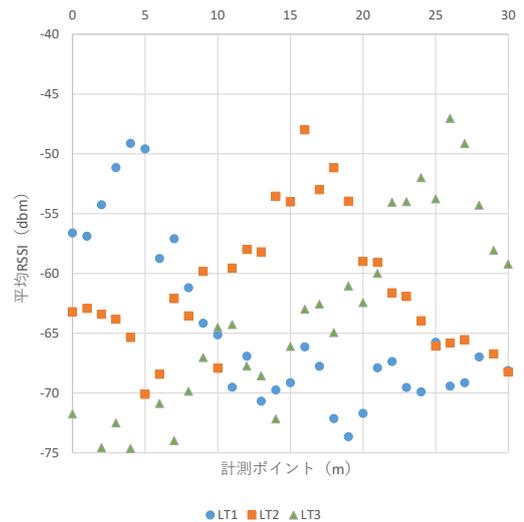


図7 各計測ポイントにおける平均RSSI
 (静止状態, 5m 間隔)

Figure7. The relationship between distance and average of RSSI

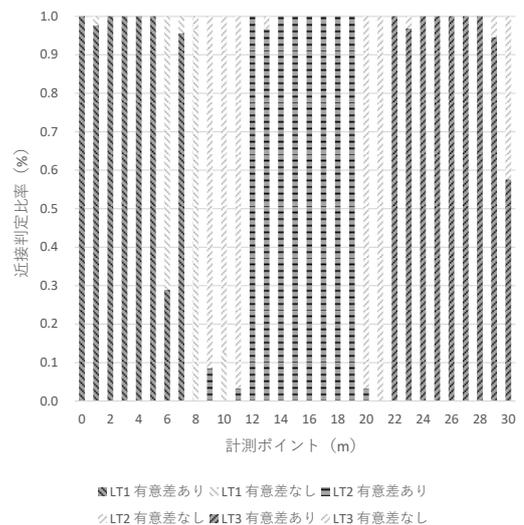


図8 各計測ポイントにおける近接判定比率
 (静止状態, 5m 間隔)

Figure8. The relationship between distance and proximity determination ratio

いて大学構内の自遊空間(体育館)で計測する。ロケーションタグは、高さ2mに設置し、5mまたは10mの間隔で設置する。静止状態の実験は、各計測ポイントで1分間近接判定を行う。また、移動状態の実験では、荷物の移動を想定し、カートにスマートタグを置いてロケーションタグ1(LT1)の前5mからLT3の後ろ5mまで、ゆっくり歩きである0.5m/秒で20回歩行を行う。実験時のロケーションタグであるBLEビーコンの仕様およびスマートタグの設定を表1に示す。

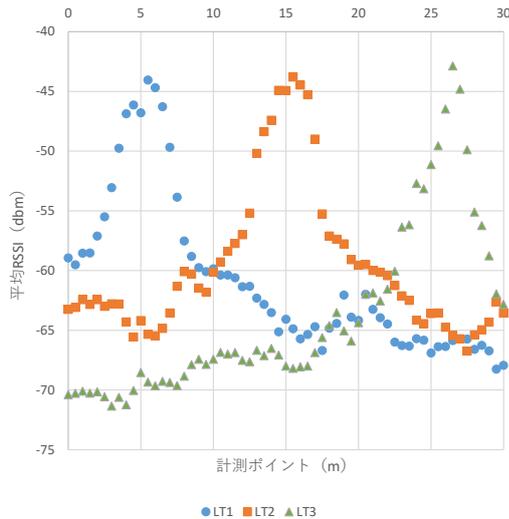


図9 各計測ポイントにおける平均 RSSI
 (移動状態, 5m 間隔)

Figure9. The relationship between distance and average of RSSI

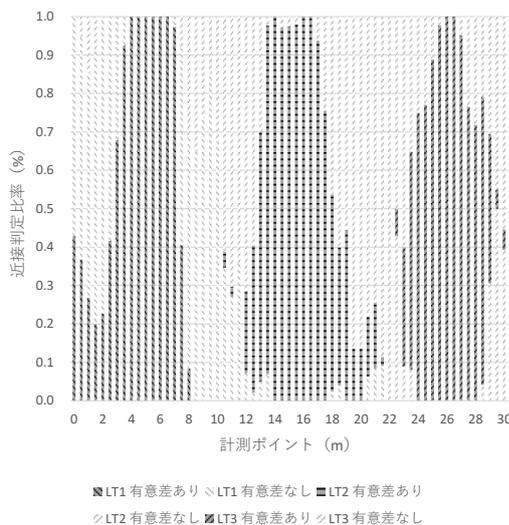


図10 各計測ポイントにおける近接判定比率
 (移動状態, 5m 間隔)

Figure10. The relationship between distance and proximity determination ratio

5.2 実験結果

図7および図8は、静止状態で計測した場合の結果を示している。

図7は、10m 間隔でロケーションタグを設置した場合の計測ポイントの座標と1分間に観測されたRSSIの平均値の関係を示している。5m, 15m, 25mに各ロケーションタグ(LT1~LT3)が設置されている。概ねロケーションタグが近い場合にRSSIは強く観測されているのがわかる。例えば、15mに設置されているLT2に着目すると、直下付近でRSSIが強く観測される。局所的にはRSSIがばらついている場合も観測される。例えば、10mではLT2のRSSIが

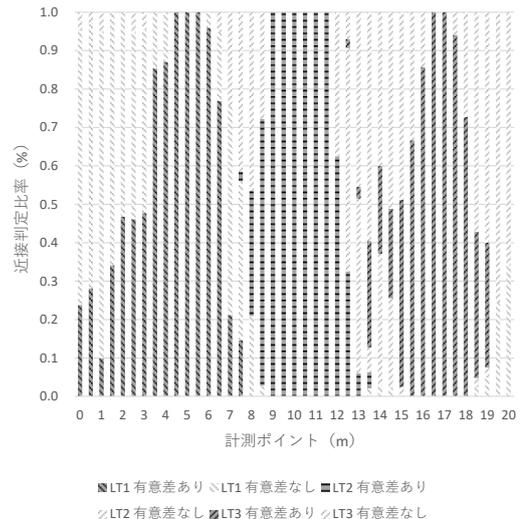


図11 各計測ポイントにおける近接判定比率
 (移動状態, 10m 間隔)

Figure11. The relationship between distance and proximity determination ratio

-68 dbm となり、LT3よりも弱く観測されている。自由空間であっても直接波と床反射波の合成によるマルチパスフェージングの影響を受けるためである。しかしながら、静止状態にけるロケーションタグ付近ではRSSIのばらつきは小さいため、RSSIの大小比較や閾値による判定で近接判定も可能なのがわかる。

図8は、図7と同じ条件の時の計測ポイントと近接判定比率を示している。近接判定比率とは、計測時の統計的検定における全検定回数に対し、最も強く観測された各ロケーションタグの比率を有意差の有無別に表示したものである。例えば、図8における計測ポイント6mでは1分間に135回実施された検定のうち、LT1が有意差なしで一番強いロケーションタグとして観測された比率が71.1%であり、有意差ありで観測されたのが28.9%であることを意味している。ロケーションタグ間に有意差なしの領域が観測されたため、特定の領域の中へのIn/Outを判別できるのに利用できるのがわかる。

図9から図11は、移動状態で計測した場合の結果を示している。

図9は、10m 間隔でロケーションタグを設置した場合の計測ポイントと座標と平均RSSIの関係を示している。5m, 15m, 25mに各ロケーションタグが設置されている。観測されるRSSIは、静止状態に比べて強く観測される。また、移動状態の場合は、最も強く観測される計測ポイントが、処理速度のタイムラグからロケーションタグ設置場所とずれる傾向がある。

図10は、図9と同じ条件の時の計測ポイントと近接判定比率を示している。静止状態に比べて、ロケーションタ

グ直下の観測ポイントで有意差がある割合が少なくなる。
例えば、LT2 の直下では 97.5%の割合で有意差が観測されるものの、有意差が観測されずに正しく測位できない可能性があることを意味する。また、静止状態にくらべて RSSI のばらつきが大きいため、各計測ポイントで最も強く観測されるロケーションタグが変化する場合も見られる。例えば、計測ポイント 21m では、LT1 から LT3 が有意差なしで最も強く観測されるのは、それぞれ 8.5%, 59.6%, 14.9% であり、17.0%は LT2 が有意差有りで観測されている。すなわち、83.0%は有意差がないため近接しているロケーションタグはないと判別している。

図 11 は、5m 間隔でロケーションタグを設置した場合の計測ポイントと近接判定比率を示している。10m 間隔の場合と比べ、ロケーションタグ間の有意差のない領域が小さくなるが、近接判定は適切にされているのがわかる。しかしながら、適切に特定領域の In/Out を検知する場合には、5m 以上間隔を空けてロケーションタグを設置する必要があることがうかがえる。

6. おわりに

本研究は、生産・物流現場を移動するモノや人を対象に位置と状態をセンシングすることを意味する IoMT (Internet of Moving Things) を実現するために、「センシング機能」「測位機能」「通信機能」を持つスマートタグのプロトタイプを開発し、測位機能について評価実験した結果について報告した。

生産・物流現場にも IoT, ビックデータ解析, 人工知能の導入が進んでいるものの、単なる工程改善で留まる事例やロボット等を完全導入した先端工場での取り組みが多い。既存の生産システムを有効活用しながら、Industry 4.0 を目指すには、生産・物流現場のセンシングや見える化に取り組む必要がある。そのためには、提案するスマートタグのような既存技術の代替技術が必要である。

今後は、まず、工程制御層のセンサネットワークを構築するためのシステム開発を行い、実証実験を行うと同時に、他階層のセンサネットワークの仕様について議論を進める予定である。

参考文献

- [1] 産業構造審議会商務流通情報分科会. CPS によるデータ駆動型社会の到来を見据えた変革. 2015.
- [2] 経済産業省商務情報政策局. IoT 時代に対応したデータ経営 2.0 の促進のための論点について. 2015.
- [3] 日本貿易振興機構. インダストリ 4.0 実現戦略 プラットフォーム・インダストリ 4.0 調査報告. 2015.
- [4] Martin Bauer et al.. Smart Factory - Mobile Computing in Production Environments. Proceedings of Mobisys 2004 Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems. 2004.
- [5] Kevin Ashton. That 'Internet of Things' Thing. RFID journal. <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>, (参照

- 2018-04-30).
- [6] Digital Manufacturing and 5G Communication for Future Smart Industry: Johan Stahre, 47th International Conference on Computer & Industrial Engineering Keynote speech, 2017
- [7] 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ドレコニング手法の提案. 情報処理学会誌. 2011. Vol.52. No.2. p. 558-570.
- [8] 古舘達也, 堀川三好, 橋本和幸, 工藤大希, 岡本東. Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた歩行者測位手法の提案. 第 15 回情報科学技術フォーラム講演論文集第 4 分冊. 2016. pp.249-250.
- [9] D. Kudo, M. Horikawa, T. Furudate and A. Okamoto. Indoor Positioning Method Using Proximity Bluetooth Low-Energy Beacon. Proceedings of the 17th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference. 2016.
- [10] M. Horikawa, D. Kudo, A. Okamoto. Indoor Positioning Method for Internet of Moving Things. Proceedings of 47th International Conference on Computers & Industrial Engineering. 2017.