

【公開版】

令和元年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度な人間センシングを低コストで実現するためのウェアラブル
IoT センサの開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人 京都高度技術研究所

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1	研究開発の背景	1
1-1-2	研究目的及び目標	2
1-2	研究体制	3
1-3	成果概要	4
1-3-1	IoT センサの技術開発【1-1】	4
1-3-2	静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】	4
1-3-3	静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】	4
1-3-4	統合測位システムの技術開発【3-1】	4
1-3-5	性能検証技術の開発【4-1】	4
1-4	当該研究開発の連絡窓口	4

第2章 本論

2-1	IoT センサの技術開発【1-1】	5
i)	研究開発の具体的内容	5
ii)	重点的に実施した事項	11
2-2	静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】	12
i)	研究開発の具体的内容	12
ii)	重点的に実施した事項	15
2-3	動的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】	16
i)	研究開発の具体的内容	16
ii)	重点的に実施した事項	18
2-4	統合測位システムの技術開発【3-1】	18
i)	研究開発の具体的内容	18
ii)	重点的に実施した事項	21

2-5	性能検証技術の開発【4-1】	21
2-5-1	製造現場における計測による性能検証技術の開発	21
i)	研究開発の具体的内容	21
ii)	重点的に実施した事項	24
2-5-2	視覚障害者に対するピッキング支援効果の検証	24
i)	研究開発の具体的内容	24

最終章 全体総括

3-1	複数年の研究開発成果	32
3-1-1	IoT センサの技術開発【1-1】	32
3-1-2	静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】	32
3-1-3	動的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】	33
3-1-4	統合測位システムの技術開発【3-1】	33
3-1-5	性能検証技術の開発【4-1】	33
	製造現場における計測による性能検証技術の開発	
	視覚障害者に対するピッキング支援効果の検証	
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	34
3-2-1	研究開発後の課題	34
3-2-2	事業化展開	34

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

近年、Industry4.0をはじめ、IoT（Internet of Things）技術で部品の在庫・投入の状況や生産状況等の情報を収集・分析し、実世界の変化に柔軟に対応した開発や製造、生産管理等のプロセスの最適化を実現する仕組みが世界で注目されている。工業のデジタル化のみならず、様々な分野での活用が期待されているが、実世界情報をITと緊密に連携させるシステムにおいては、実世界情報の精度がシステムの有効性を左右する。

しかし現時点では、温湿度等、静的にセンサを設置して取得する情報や、コンベア上の製品等、制御されて動くモノの情報を精度よく取得する仕組みは確立されているが、自律的に動くものについては、十分な精度が確保されているとは言えない。特に「人」の動きについては、現在主流の電波による検知では数m程度の精度にとどまり、作業員の居場所や作業状況等の情報を精度よく取得できない。

機械化、自動化、IT化と産業革命が進み、様々な分野で省人化が進んできたが、新しい技術が生み出され、その技術を活用した製品を開発、製造するプロセスには必ず人が大きく介在する。ロボット化が進み、従来は人が操作していた機械が自律的に動作するようになってきているが、安心・安全といった観点からも人との関わり方は重要な課題となっている。再生可能エネルギーを利用するスマートシティ構想においては、多様なセンサとネットワークを活用してエネルギー配分や交通等を最適化することを目指しているが、こうした都市全体を対象としたシステムにおいても人やモノの動きや位置から判断する要素は多い。

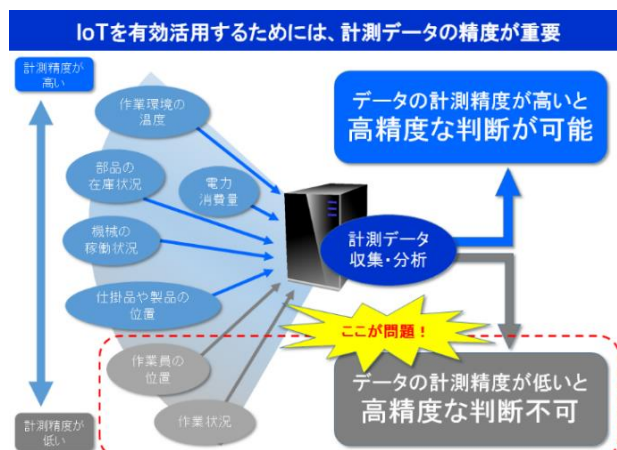
システムが実現する機能が高度化するほど詳細で正確な「人」の情報が必要になる。

モノのインターネットであるIoTに、人のインターネットIoH（Internet of Human）技術を組み合わせることによって、作業効率や作業精度の向上だけでなく、安全確保や健康管理等も可能となり、日本版Industry4.0である**Connected Industries**が目指す“人間中心の産業社会”の実現に大きく貢献する。

株式会社ゴビでは、2000年頃から、人が電磁誘導式のICタグリーダを手装着し、環境側にICタグを設置して、その検知状況から人の動作や位置を検知・推測する仕組みの研究を大学と行ってきた。その成果の一部は、現場での作業ミス防止システムとして、トヨタ自動車及びグループ企業、日立物流、三協アルミ等、大手企業に導入し活用されている。

電磁誘導式のICタグは、定期券のように、タグとリーダを意識的に近づけ、読み取るのに十分な時間だけ静止させて使っている。リーダが動きながら読み取るという使い方を想定した製品が存在しなかったことや、検知対象によっては読取距離が不足するため、電磁誘導式のICタグが安価で、精度よくかつ安定的に位置を検知できるにも関わらず、そうしたセンサとしての活用はされてこなかった。

そこで、人の動作や位置を高精度かつ安定的に検知するウェアラブルIoHセンサを考案した。ICタグをセンサとして活用するためには、従来はあまり行われてこなかった電磁誘導式ICタグとリーダの相対速度や接近時間等による検知状況の変化（動的性能）の検証を行い、その適用方法、適用可能範囲等を明確に



する必要があった。そして、10 軸センサ（加速度、角加速度、地磁気、気圧）を搭載し、自らの位置を自蔵センサのみで計測する“自律測位技術”を組み合わせ、IC タグのない場所の検知も可能とし、人の位置や動作を低コストかつ高精度に検知する人間センシング技術の開発を進めることにした。

本技術開発により、作業員の位置や手の位置が高精度に取得できるため、居場所に合わせた作業指示、作業ミスの検知をはじめ、作業状況に応じた作業員の動的再配置や休憩指示、事故防止等、作業の効率化・高精度化のみならず、安全確保や健康管理も可能になり、“人間中心の産業社会”の実現に大きく貢献できる。

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

(二)情報処理に係る技術に関する事項

1 情報処理に係る技術において達成すべき高度化目標

(3)川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

イ. 新たな活用分野の開拓

近年、ネット通販の普及等によって商品の流通量が急増し、製造や物流の現場にとって作業の効率化・高精度化は喫緊の課題となっているが、作業員への負荷の増加に伴って定着率が低下し、慢性的な人材不足に陥っており、外国人労働者に頼らざるを得ない状況になってきている。習熟する前に辞めてしまう、言葉や慣習の違いで理解が進まないといった状況に加え、製品単価、配送料等も低下して改善費用の捻出もままならず、低コストで作業効率・作業精度を向上させられる仕組みが強く求められている。

本研究開発の成果によって、低コストで人の動きを精度よく検知できれば、その情報を有効に活用した作業の効率化・高精度化が実現され、作業員の負荷軽減につながる。作業状況をリアルタイムに把握できるため、労働時間に応じて休憩を促す、動作の状況から疲労度を推測するといった健康管理にも活用でき、労働環境の改善へとつながる。そこで、①独自の IC タグ検知技術、②自律測位技術、③動作分析技術を組み合わせ、高精度な人間センシングを実現するウェアラブル IoH センサを開発することにした。

1-1-2 研究目的及び目標

(二)情報処理に係る技術に関する事項

(3)川下分野横断的な共通の事項

②高度化目標

ア. 当該技術により実現される機能の高度化

高精度な人間センシング技術で作業の効率・精度を向上させるために、人の位置や動作を検知する技術を高度化して、開発テーマごとに、以下の機能・性能を達成することを目標として取り組んだ。

1. 静的性能の追求

【1-1】IoH センサの技術開発

高精度な人間センシングを実現するため、必要な IC タグ読取性能、自律測位性能をウェアラブルなサイズで実現する。回路を収容するユニット部の長さ・幅共に 50mm 以下、厚さ 15mm 以下、重さ 60g 以下、アンテナ出力 100mW 以下、アンテナ径 8cm 以下とし、100%の性能で 20 時間の稼働を実現することを目指した。回路を収容するユニット部の長さ（50mm）、幅（43mm）、厚さ（15mm）、重さ（24g）、アンテナ出力（100mW）、アンテナ径（8cm）については、いずれも達成したが、連続稼働時間は達成できなかった。（括弧内は試作品のスペック）

【1－2】静的性能向上用拡張アンテナの技術開発

タグシートを並べて検知範囲を設定できるようにするため、並べた時の性能劣化を最小限に抑えた拡張アンテナを開発し、カードサイズの IC タグを 30cm の間隔で並べた時に、IoH センサで 20cm 以上の距離で読み取れる性能を実現することを目標とし、目標通り達成した。

2. 動的性能の検証・追求

【2－1】動的性能向上用拡張アンテナの技術開発

移動しながら確実に IC タグを読み取るため、拡張アンテナを開発し、カードサイズの IC タグを 6km/h で移動する IoH センサで 100%読み取れる性能を実現することを目標とし、目標通り達成した。

3. 実用性能の強化・低コスト化

【3－1】統合測位システムの技術開発

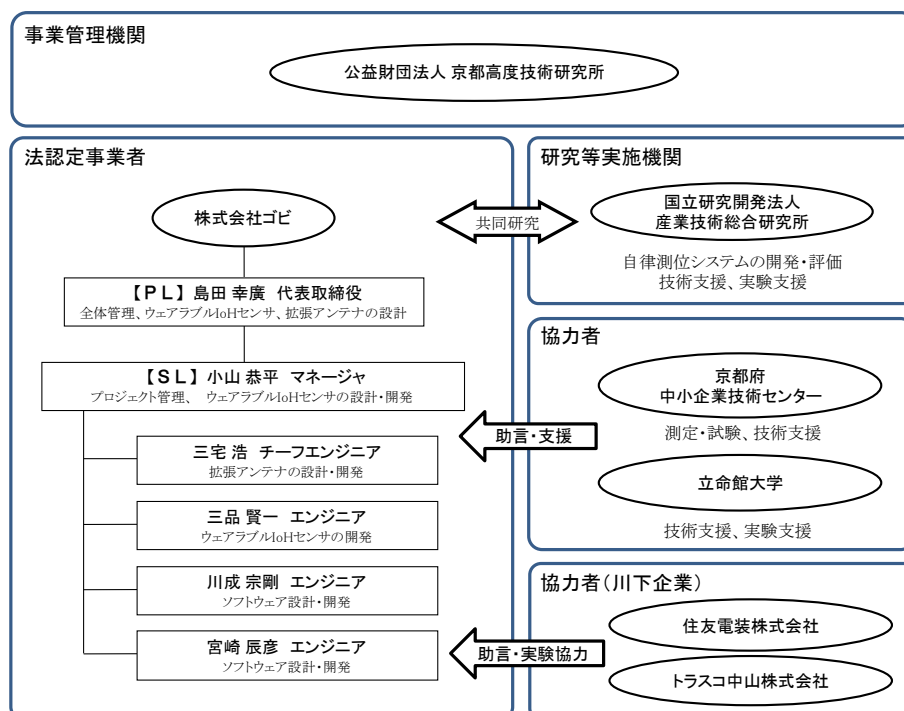
IC タグのない場所での位置検知を可能にするため、自律測位技術を組み合わせ、自律測位の誤差を 5% 以内としてタグシートの設置数を 1/10 に削減する。手に IoH センサを装着すれば動作検知が可能であるが、日立製作所の画像分析式システムの導入コスト（数百万円）の 1/10 を実現することを目標とし、目標通り達成した。

4. 有効性の実証

【4－1】性能検証技術の開発

本技術開発の有効性を確認するため、検証用のソフトウェアを開発して実際の作業現場における人の動作検知を行い、検知できる動作の種類、速度等の条件について明らかにし、5 つ以上の動作に適用できることを検証し、作業効率については 20%以上向上、作業精度はミスをゼロにすることを目標とし、目標通り達成した。

1－2 研究体制



1-3 成果概要

1-3-1 IoH センサの技術開発【1-1】

IoH センサとして、必要な IC タグ読取性能、自律測位性能を、ウェアラブルなサイズでほぼ実現することができた。目標としていたサイズは、回路を収容するユニット部の長さ・幅共に 50mm 以下（長さ 50mm、幅 43mm）、厚さ 15mm 以下（15mm）、重さ 60g 以下（24g）、アンテナ出力 100mW 以下（100mW）、アンテナ径 8cm 以下（8cm）であるが、いずれも達成した。（括弧内は試作品のスペック）

連続稼働時間については、20 時間が目標であったが、約 10 時間にとどまった。当初想定していたピエゾのバイブレータが製造中止となり、代用できる製品もなかったため、通常の振動モータを使わざるを得なくなったことで、消費電流が 10 倍以上（6mA→80mA）になったことが大きな要因である。

1-3-2 静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】

IC タグ読み取りの静的性能としては、カードサイズの IC タグを 30cm の間隔で並べた時に、IoH センサで 20cm 以上の距離で読み取れることが目標であったが、並べた時の性能劣化を最小限に抑えた拡張アンテナを開発して達成した。特に足用 IoH センサでは目標を大幅に上回る 30cm を実現した。

1-3-3 動的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】

IC タグ読み取りの動的性能としては、カードサイズの IC タグを 6km/h で移動する IoH センサで 100% 読み取れることが目標であったが、目標通りに達成した。

1-3-4 統合測位システムの技術開発【3-1】

本テーマでは、独自の IC タグ検知技術、自律測位技術、作業動作認識技術を用い、高精度かつ低コストで人の行動を計測する、ウェアラブル IoH センサ用統合測位システムを開発した。自律測位の誤差を 5%以内としてタグシートの設置数を 1/10 以下にすることが目標であったが、達成できた。誤差については、測位誤差の検証方法である EAG（誤差累積勾配）を用いて評価した。IoH センサによる動作分析は数十万円が可能であり、既存の画像分析式システムの 1/10 程度のコストで導入が可能である。

また、より詳細な作業分析を実現するために、IoH センサを装着することで作業の内容を認識するシステムを開発した。

1-3-5 性能検証技術の開発【4-1】

【3-1】で開発した統合測位システム技術の有効性を確認するため、作業者の動線計測および作業動作認識に関する評価手法を検討した。検討の結果測位精度の評価については PDR ベンチマーク標準化委員会において提唱する誤差累積勾配指標（EAG: Error Accumulation Gradient）を採用した。また、実際の作業現場における実証実験を通して、測位精度の評価を実施するとともに、開発した作業認識技術で認識できる動作の種類、速度等の条件について明らかにするとともに、5 つ以上の動作に適用できることを検証した。また、視覚障害者を対象とした実験の結果、IoH センサの有効性を検証する実験のデザインに成功し、視覚障害者就労支援などの応用の可能性を見出した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社ゴビ 島田 幸廣

e-mail: shimada@go-v.co.jp

TEL: 075-315-3621

FAX: 075-315-3653

第2章 本論

2-1 IoH センサの技術開発【1-1】

i) 研究開発の具体的内容

IoH センサについては、ハードウェアの完成度を高め、製品化までに技術のトレンドに変化があっても大幅な変更が必要ないようにするため、採用する部品の性能や機能について、技術動向を踏まえて詳細に検討するとともに、将来の製品化も視野に入れ、信頼性、入手性、長期供給等についても評価した。また、ソフトウェアを効率よく開発するため、開発環境の整備状況、メーカーのサポート体制等についても調査・検討した。

設計を進める中で、産総研から 10 軸センサのデータ処理による CPU 負荷の削減策として、10 軸センサのデータ処理を行う専用のプロセッサ（センサーハブ）を使用する提案があり、採用することにした。これによって CPU の負荷軽減が可能となり、省電力化も図ることができた。

RFID モジュールについては、メーカーの協力を得て、通常よりも低消費電力で IC タグを検知するモードを追加していただき、約 60%の省電力化が可能になった。

その他、小型化、省電力化を追求しながら設計を進めて機能仕様を確定し、回路設計、基板設計、筐体設計を行い、その成果に基づいて IoH センサの一次試作機（手用、足用、カート用）を完成させた。（図 1～3）



図 1 手用



図 2 足用



図 3 カート用

二次試作においては、本体ケースとアンテナアタッチメントの着脱構造の検討・実装を行った。簡単に着脱でき、かつ使用中は容易に外れない構造を検討・設計した。当初は本体ケースと強固にかみ合い、アンテナアタッチメントが壊れるくらいの力でないと外れない構造を考えたが、通常の使用状況で外れない程度にし、それを越える力が加わった時は、作業員、アンテナアタッチメントを保護する観点からは、外れてしまったほうがよいと考え、本体ケースにアンテナアタッチメントを挟むフタを形成し、それ以上の力が加わった場合は抜けたり、フタが外れたりする構造とした。



図 4 アンテナアタッチメント取付構造

手用のアンテナアタッチメントについては、屈曲性能を向上させるとともに、製造コストを下げるため、アンテナ基板はフレキシブル基板で作成することにした。銅線と比較して抵抗値が上がるため、従来の設計方法では性能が確保できなかったが、パターンの形状の工夫やチップ部品の配置等を工夫して、銅線アンテナと同等以上の性能を実現した。

また、防水性を確保し、製造コストを下げるため、この基板をゴムで覆う方法について、検討・実験を実施した。アンテナ基板をフレキシブル基板にしたため、厚みがかなり薄く、平面方向の引っ張りの力には弱くなり、最初の実験では成型のための加圧に耐えられず裂けてしまったが、フレキシブル基板の厚み、ゴム成型時の圧力・温度等を工夫し、想定通りの形状に成型することができた。

足用のアンテナアタッチメントについては、伸縮する電線を使用してアンテナを構成することで、コネクタ等の着脱が不要でサポーター感覚で装着できるものを目指して開発を進めた。使用する伸縮電線は、導電性のゴム等ではなく、通常の電線をコイル状にすることで実現している。このためループアンテナを形成した場合の磁界の方向が揃っておらず、電磁誘導には向かないが、試作してみたところ、通常の電線に比べると読取性能は落ちるが、床面の拡張アンテナによる延長効果と合わせれば読み取りアンテナとして利用できることがわかった。さらにチューニングを実施することで、通常の電線以上の性能を実現することができた。

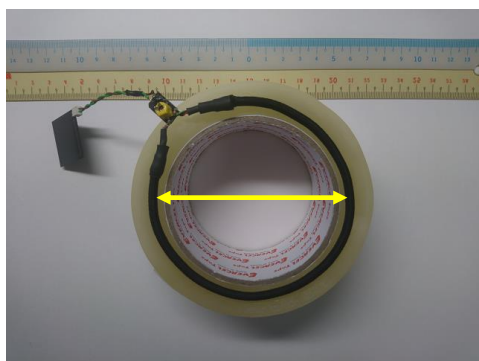


図 5 通常時

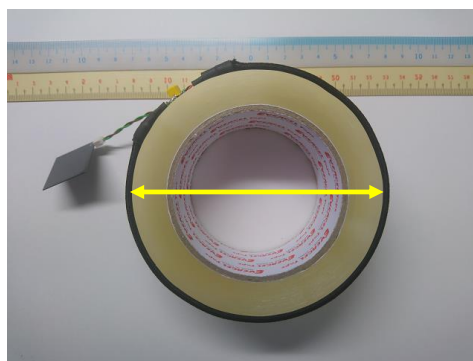


図 6 伸長時

その他、小型化、省電力化を追求しながら設計を進めて改善仕様を確定し、回路設計、基板設計、筐体設計を行い、その成果に基づいて IoH センサの二次試作機（手用、足用、カート用）を完成させた。（図 7～9）



図 7 手用



図 8 足用



図 9 カート用

最終年度は、実用性の高いアンテナアタッチメントを完成させた。アンテナアタッチメントは、手の甲に添わせるように装着することが必要である。TECCOでは、ゴム輪を付け、指に引っ掛けるようにしているが、IoHセンサのアンテナアタッチメントはシリコンゴムの一体成型であるため、同様の構造

にするのが困難であったが、指掛け用のゴムパーツを新規開発し、アンテナアタッチメントに穴を空けて止める方法とした。本体との着脱構造は、通常の使用状況以上の力で引っ張られた時には、作業
者、アンテナアタッチメントを保護する観点から、外れてしまうようにしたが、指掛けについても同様に、強い力で引っ張られた時はアンテナから外れ、容易に元に戻せるようにした。



図 10 アンテナアタッチメント付き IoH センサ



図 11 指掛け部

IoHセンサ本体も実用化に向けて機能・性能改善の検討・設計を行い、その結果に基づいて二次試作機の改造版を完成させた。さらに、製品化に向けて、本体ケースは、完全防水を実現するための二重成形について検討し、基板についても冷凍室で使用するためのモールド処理等についての検討を行った。

また、IC タグセンサ機能と自律測位機能を連携させ、IC タグを利用した統合測位機能を実現した。自律測位技術は低コストであるが、絶対値補正の方法と精度が課題であった。IC タグでの補正は、低コストを維持しながら高精度に補正ができる技術であるが、それを実現した機器はなく、IoH センサが初めてである。IC タグセンサ部の実装仕様と、自律測位アルゴリズム、データ構造との整合性等についての検討を行い、BLE (Bluetooth Low Energy) の限られた帯域で IC タグの ID、および自律測位の相対位置データを 100ms の周期で送信できる性能を実現した。

●磁界強度、共振周波数測定

事業開始以前に TECCO で実施した拡張アンテナを用いた時の磁界強度、共振周波数の測定を IoH センサで実施し、TECCO との比較を行った。

まず単体での測定を行ってサイズ毎の特性を明らかにし、2枚並べた時の測定は、単体での測定結果を活用して、有効と考えられるサイズを選択して実施した。複数枚並べる時は、間隔を変更しながら測定を行い、サイズによる磁気干渉の傾向を調査した。

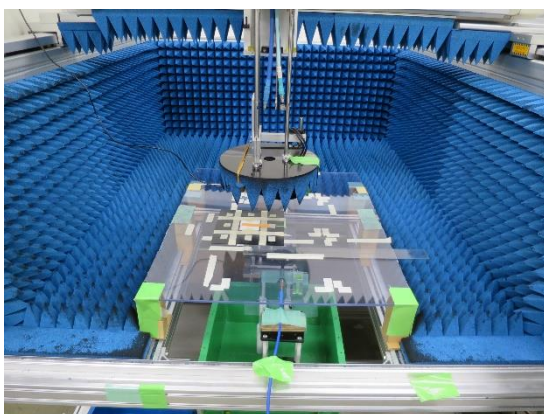


図 12 測定環境

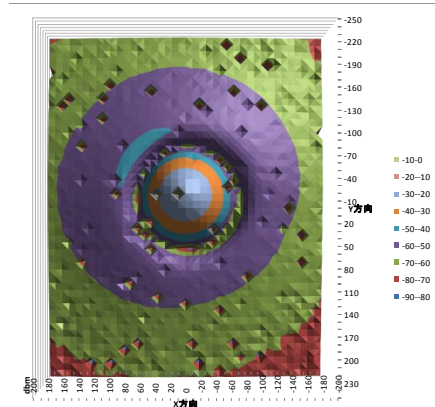


図 13 測定結果例：磁界強度

下図 14 は、タグを読み取らない状態での TECCO 及び IoH センサの発する磁界の強度のグラフである。アンテナサイズに応じて磁界が広がっており、TECCO のほうが広く分布しているが、側面から見ると、中心部分の磁界強度は IoH センサのほうが高いことがわかる。

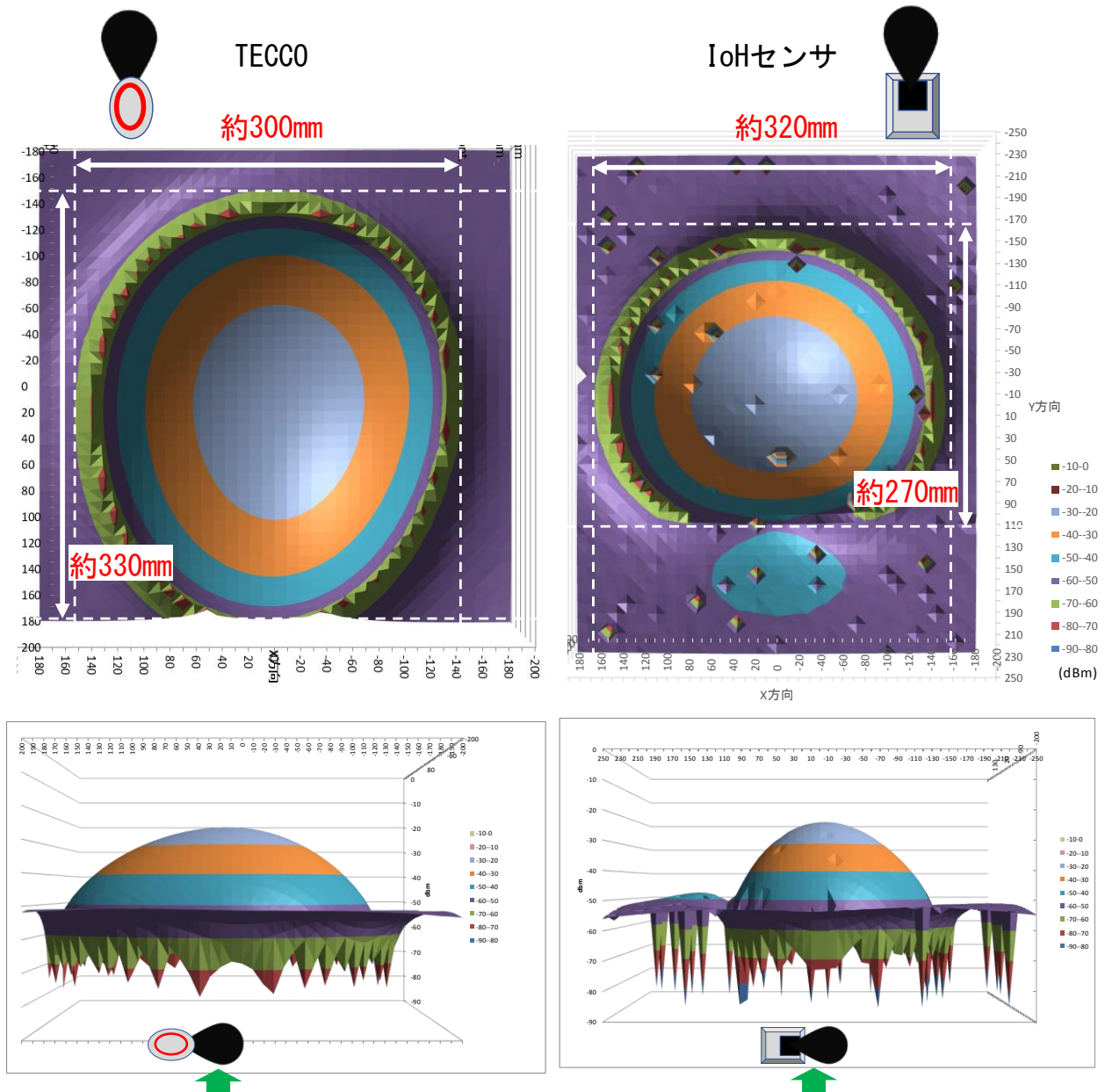


図 14 TECCO と IoH センサの磁界強度（タグなし）

下図 15 は、180mm 角の拡張アンテナの真ん中に 45mm 角の IC タグを置き、TECCO 及び IoH センサで誘導磁界を与えた時の磁界強度のグラフである。磁界はアンテナ上部に円形に発生しており、アンテナの面積が TECCO のほうが大きいため、磁界が発生している範囲はやや広いが、アンテナ内部の磁界は IoH センサの中心部分（薄緑の部分）は 10-0dBm と TECCO より強いことがわかる。

また、TECCO のアンテナが IC タグモジュールと電線で直結されているのに対し、IoH センサは磁界結合であるため、磁界が干渉して複雑な強度分布になっているのがわかる。

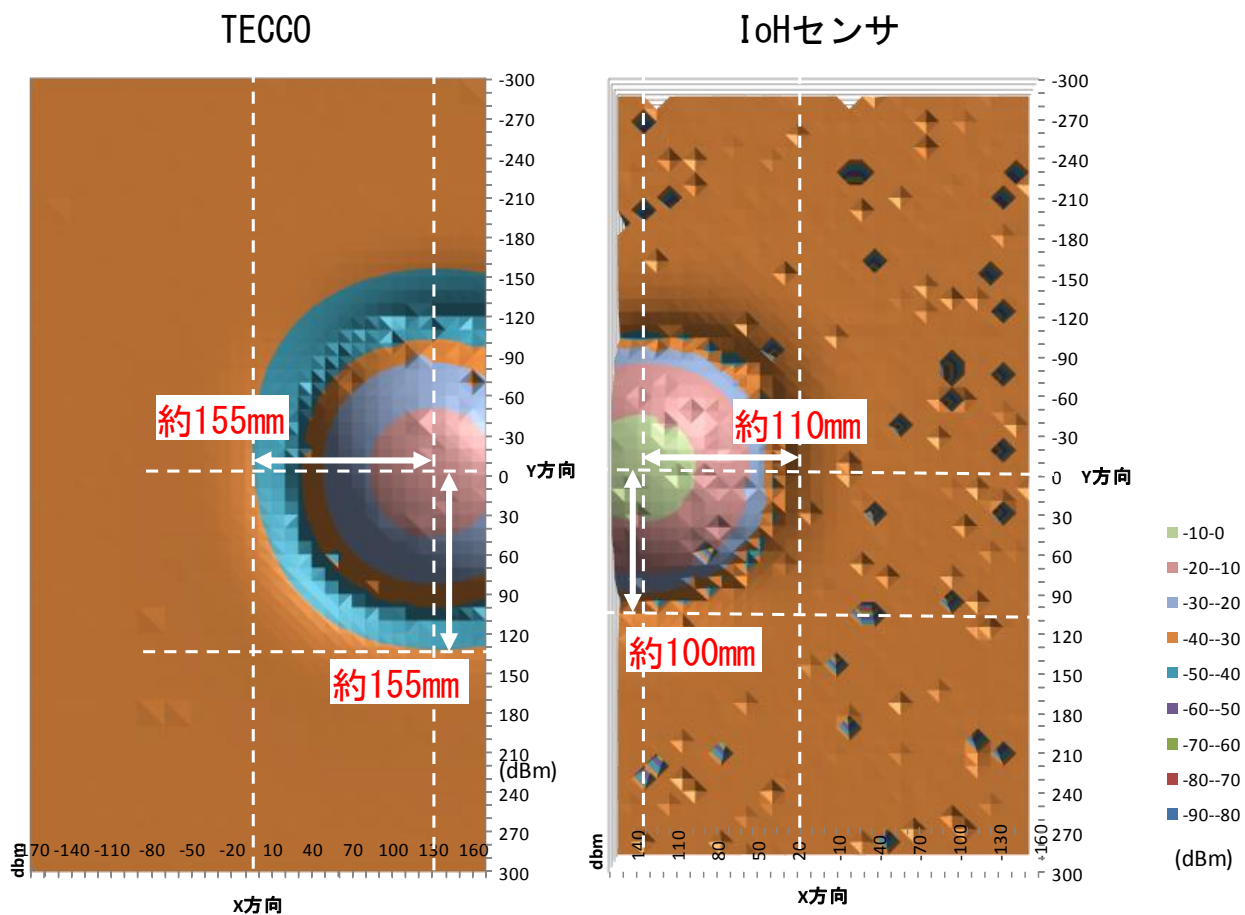


図 15 180mm 拡張アンテナ+45mm 角 IC タグ（中央配置）

このグラフを側面から見ると、明らかに IoH センサのほうが最大値が大きく、-30dBm 以上の範囲（灰より上の部分）が広いことがわかる。また、-40~-30dBm の部分（茶色の部分）がアンテナの外に広く分布しており、アンテナの外の読み取り性能も TECCO より高いことがわかる。

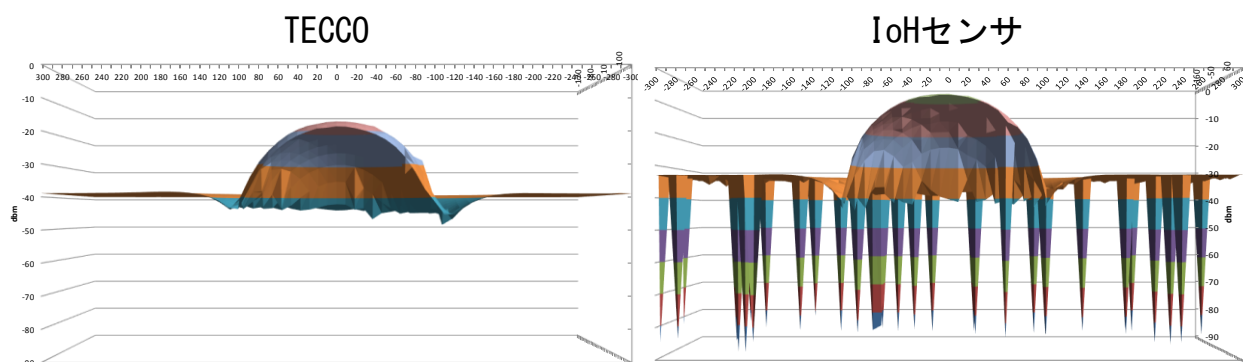


図 16 180mm 拡張アンテナ+45mm 角 IC タグ（中央配置）側面

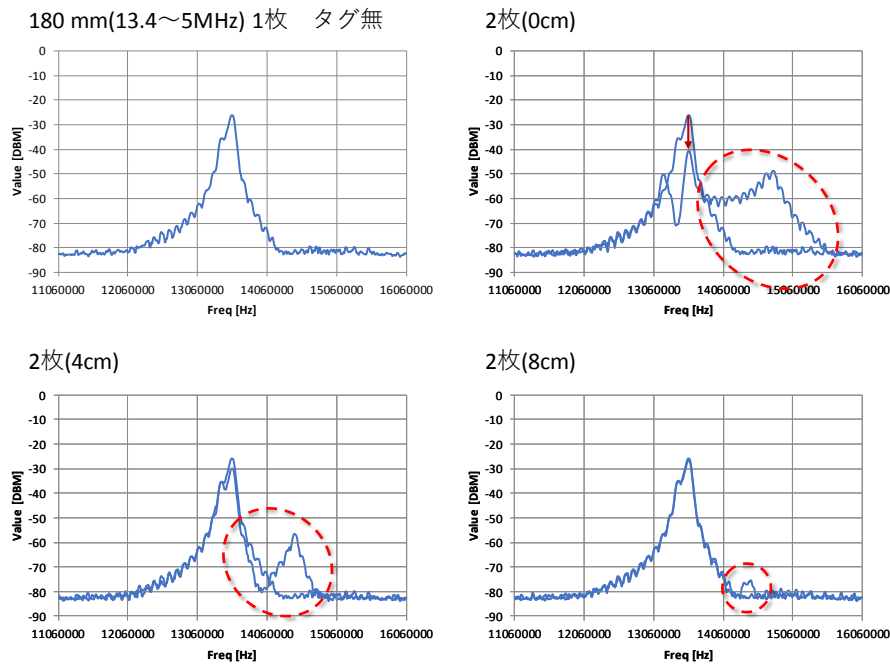


図 17 180mm 拡張アンテナ 2 枚配置時の周波数分布 (TECC0)

上図 17 は、180mm の拡張アンテナの上に TECC0 を配置して共振させた時の共振周波数のグラフで、もう 1 枚の同サイズの拡張アンテナを隣接させ、距離を離していくことでその影響の減少の傾向を調査したものである。（左上の 1 枚の時の波形と重ねて比較）

拡張アンテナ単独の場合、13.5MHz あたりにピークがあり、IC タグの読取に適した特性であるが、もう 1 枚を隙間なく並べると、磁気干渉によって 13.5MHz あたりは減少し、他の周波数成分が増加しており、性能が低下している。4cm 離すと 13.5MHz あたりのピークが復活するが、まだ他の周波数成分が強く残っており、8cm 離れた時にようやく元の波形に近くなるが、まだ高周波側に影響が出ている。

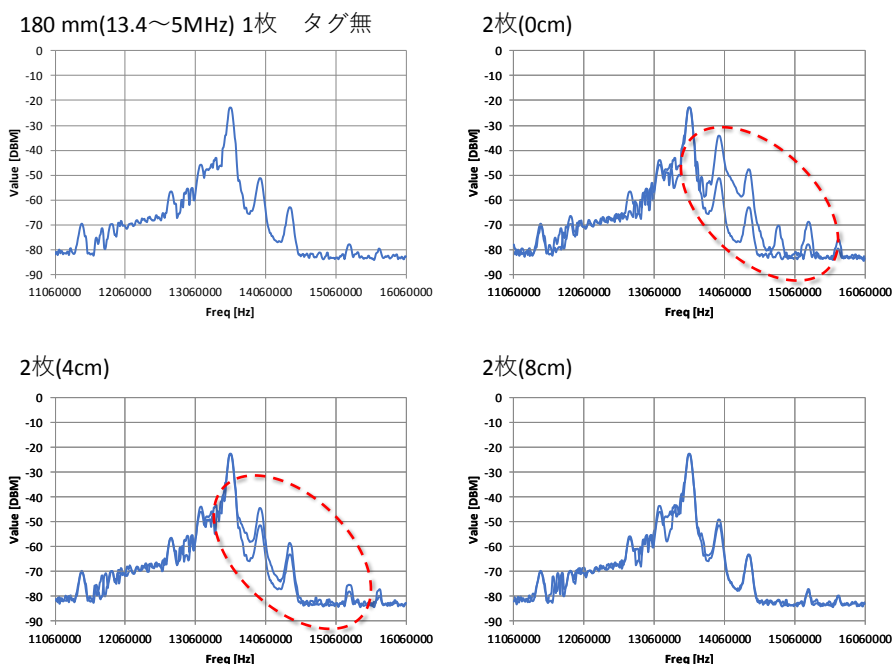


図 18 180mm 拡張アンテナ 2 枚配置時の周波数分布 (IoH センサ)

上図 18 は、TECCO を IoH センサにして、同様の測定をしたものである。

隣接して拡張アンテナを置いた時には、高周波側に影響が出ているが、13.5MHz あたりのピーク成分については、ほとんど低下していない。4cm 離すとほぼ元の波形に戻り、8cm では完全に戻っている。

上記の通り、IoH センサは、拡張アンテナが隣接することで磁気干渉し、性能低下を引き起こすという現象に対する耐性が TECCO よりも高い。

拡張アンテナはサイズが大きいほうが性能が高いが、磁気干渉による性能低下も引き起こしやすいトレードオフの関係にあるが、IoH センサの方が同じ面積内に、より大きな拡張アンテナを利用できるため、IC タグの検知性能をより向上させることができることがわかった。

●国際規格認証試験

製品化後の海外展開に向けて、国際規格認証取得に向けての試験を実施した。

ヨーロッパで必要になる CE 認証とアメリカで必要になる FCC 認証の試験を実施した。主要なターゲットである国内企業の海外工場が多い東南アジア諸国の認証も CE を取得していると取得しやすくなり、FCC もカナダの認証取得に有効であるため、最初に取得する国際規格認証として最適である。

Bluetooth については、使用しているモジュールが FCC 認証を取得しており、CE 認証についても必要なテストレポートが入手できたため、RFID についてのみ実施した。

実施項目は、以下の通り。

【CE 認証】

無線試験

EN 300 330

EN 301 489-1/EN 301 489-3/EN 301 489-17

EN 50364

EMC 試験

EN 55032

EN 55024

【FCC 認証】

無線試験

FCC Part 15 Subpart B

FCC Part 15 Subpart C

結果は、すべての試験において CE 認証、FCC 認証の規格を満たし、IoH センサの電磁波妨害、電磁感受性における性能が、国際規格レベルを達成していることが確認できた。

ii) 重点的に実施した事項

ウェアラブルデバイスは、作業性や装着感といった観点から、できるだけ小さく軽いほうが望ましい。しかし、IoH センサに内蔵する IC タグセンサのアンテナ径を小さくすると検知性能が低下し、バッテリーを小さくすると連続稼働時間が短くなる等、デバイスのサイズと性能は相反する面がある。

また、超小型かつ高性能な部品を使って機器を構成することになるが、小型にするほどセンサ同士の干渉や放熱等、設計上の制約が多くなる。しかし、ここの最適な条件を見出して実用レベルのサイズと性能を両立させることが、IoH センサの開発、普及には不可欠であり、大きな優位性となるため、重点的に実施した。

現在販売中の IC タグリーダ TECCO のアンテナは、ユーザでは交換できない構造になっており、故障等の際には、引き取って修理する必要がある。また、布製であることから防水性がなく、複数の作業者間で共用するのには不都合、何かに引っかかった際に無理やり引っ張って壊してしまう、といった課題がある。これらは「水を扱う食品分野での利用ができない」、「共用を好まない女性中心の職場では敬遠される」といった販売上の支障になってしまっており、IoH センサにおいて解決することは必須であるため、重点的に実施した。

手用 IoH センサのアンテナアタッチメントは、「容易に取り付け、取り外しができる」とことと「強い引張り力がかかったりした時には、容易に外れて作業者を保護し、アンテナアタッチメントの破損を防ぐ」とことの両立や、防水機能を達成するため、アンテナをフレキシブル基板で作成し、シリコンゴムで覆う構造にしたが、アンテナを手の甲に沿わせるための指掛けの取り付けが、想定外に難しくなり、重点的に検討を行って実現した。TECCO は指掛けを縫製して固定しているが、アンテナアタッチメントの指掛けの位置に縫製すると、内部のフレキシブル基板にも穴が空き、シリコンゴムとの密着性が低下して、防水性能が低下するだけでなく、内部に空気が入って覆っているゴムが剥がれてしまう恐れがある。表面に接着することも試したが、想定される引張りの力に耐えられず、穴を空けて指掛けを通し、接着剤で強力に固定することはできたが、今度は「強い引張り力がかかった時に、破損防止、安全確保のために容易に外れる」という機能が損なわれた。フレキシブル基板や指掛けの形状を工夫し、ゴムの硬度や成形方法等についても試行錯誤を重ねて上記の課題を解決し、当初想定通りのアンテナアタッチメントを実現した。

また、ICタグセンサ部と自律測位部の連携機能の開発は、ICタグを利用した統合測位というIoH センサの最も特長的な機能を実現するための実施事項であるが、限られた通信帯域の中で、自律測位に必要な相対位置データとICタグの位置データを、取りこぼしのないように送受信することが必須であり、技術的難易度が高いため、重点的に実施した。

2-2 静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】

i) 研究開発の具体的内容

拡張アンテナについては、まず簡易な試作を行って、事前に動作検証を行った。

データ測定用には 150mm 角、180mm 角、220mm 角、270mm 角、330mm 角、400mm 角の 6 種類の拡張アンテナを内蔵した「タグシート」を作成した。拡張アンテナの特性は、磁束の通る面積に依存するため、6 種類の拡張アンテナは面積比 1.5 倍の関係とした。

また、複数並べて使用する時にはその間隔によって隣接する拡張アンテナ同士が磁気干渉を起こし、共振周波数が高いほうへずれることがわかっているため、単体でほぼ規格通りの 13.56MHz で共振するように調整したものと、共振周波数が高くなることを見込んで、あらかじめ規格の範囲の下限まで下げて調整したものを作成し、その影響についても調査した。

また、共振回路を構成する部品の精度によって共振周波数に変動するが、拡張アンテナ毎にばらつきがあると、精度のよい特性計測ができないため、部品の選別を行い、ばらつきを最小限にした。

測定は、読取性能に直接的に影響する磁界強度と共振周波数について行った。

まず単体での測定を行ってサイズ毎の特性を明らかにし、2～9枚並べた時の測定は、単体での測定結果を活用して、有効と考えられるサイズを選択して実施した。複数枚並べる時は、間隔を変更しながら測定を行い、サイズによる磁気干渉の傾向を調査した。

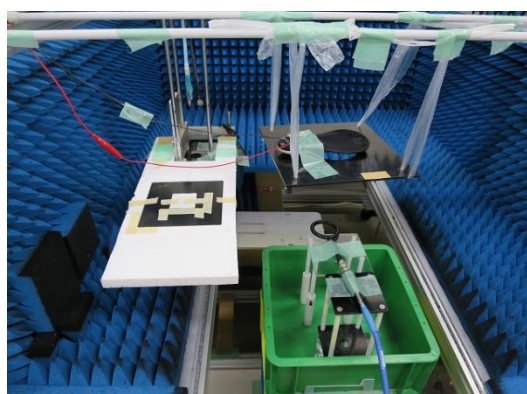


図 19 測定環境

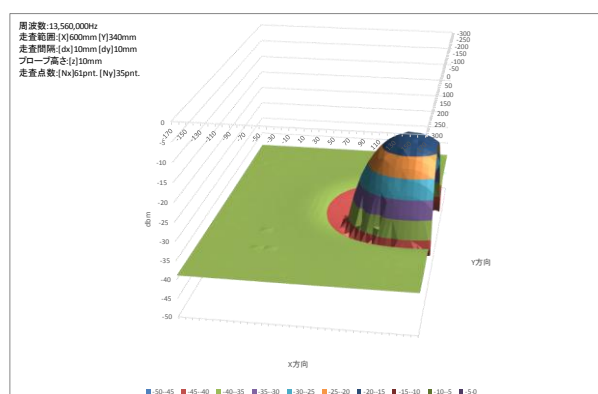


図 20 測定結果：磁界強度

下図 21 は、400mm 角の拡張アンテナの真ん中に 45mm 角の IC タグを置き、TECCO 及び IoH センサで誘導磁界を与えた時の磁界強度である。アンテナよりも拡張アンテナのサイズがかなり大きいいため、磁界の分布も拡張アンテナの形状に近づいて四角くなっている。こちらにおいても、アンテナ内部における磁界強度は、IoH センサのほうが高いことがわかる。実際の読取においても、TECCO がアンテナ内部において近距離であっても読めないポイントが散在するのに対し、IoH センサでは安定して読み取ることができる。

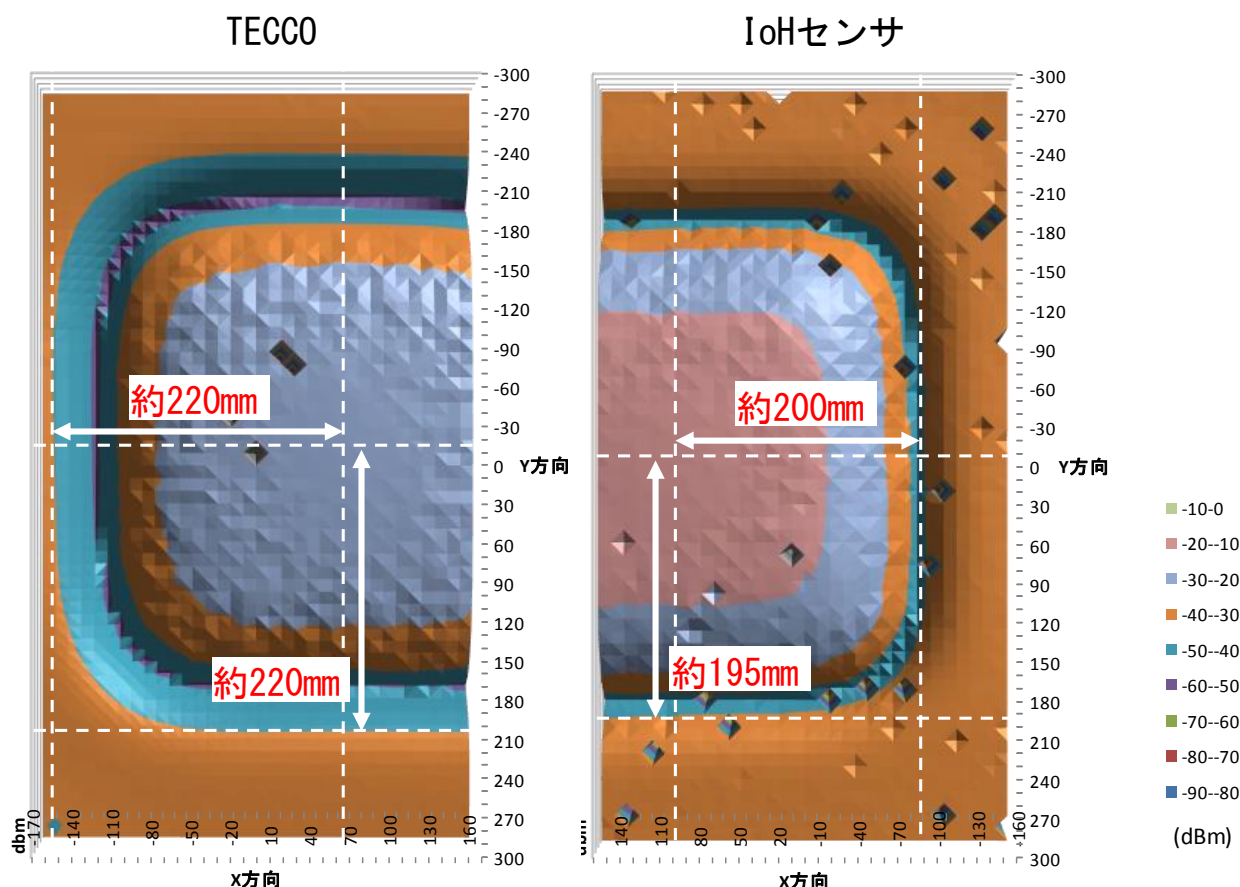


図 21 400mm 拡張アンテナ+45mm 角 IC タグ（中央配置）

側面から見ても、IoH センサのほうが磁界強度が高く、特に拡張アンテナの端に近づいても TECCO に比べて高い磁界強度を保っていることがわかる。

実際に最大読取距離を測定してみると、TECCO の約 13cm に対し、約 24cm と飛躍的に性能が向上している。

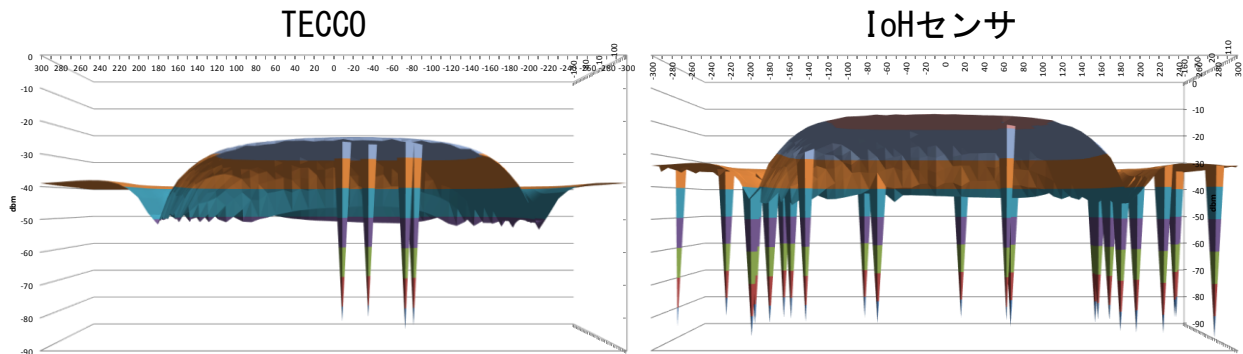


図 22 400mm 拡張アンテナ+45mm 角 IC タグ（中央配置）側面

また、作業現場にはフォークリフトのような重量物が通るため、その重量に耐えられる素材、構成についての検討を行い、フォークリフトが乗った際にかかる荷重を想定し、荷重試験機で実験を行って検証した。

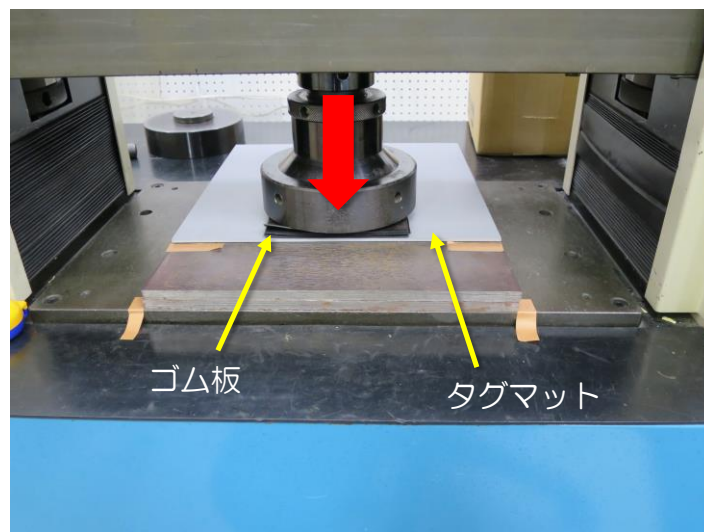


図 23 荷重試験

タグマットの中でも最も壊れやすいチップ部品の上に集中して荷重をかけることにした。フォークリフトのタイヤで踏まれる状態に近づけるため、チップ部品の上にゴム板を敷き、その上から荷重をかけることにし、荷重をかけた後に、タグマットに内蔵された IC タグが荷重をかける前と同じ距離で読み取れるかどうかを確認した。

当初は 200kg 刻みで荷重を上げていったが、壊れないため、途中から 500kg 刻みに変更した。

その結果、6,500kg の荷重をかけた時に内蔵された拡張アンテナが壊れた。IC タグは壊れなかったため、距離は短くなるものの読み取りはできた。

6,000kg の荷重をかける実験をタグマット 10 枚について実施したが、1 枚も壊れず、通過する程

度の短時間であれば 6,000kg の荷重に耐えられることがわかった。

次に連続的に荷重をかける実験として 1 分間連続で荷重をかけたが、5,500kg の荷重に耐えられることがわかった。

ゴビ社がターゲットとしている屋内の工場や倉庫で使われるフォークリフトは、一般的に最大積載量が 1,500kg～2,500kg のものが多い。車両重量は最大積載量の 2 倍程度であることから、最大積載量を積んだ状態だとして $2,500\text{kg} + 5,000\text{kg} = 7,500\text{kg}$ になるが、四輪あり、一輪あたり 5,500kg 以上の荷重がかかることはないため、ターゲットとして想定する工場や倉庫で使われるフォークリフトに踏まれても問題ない耐久性を実現できていることが確認できた。

最終年度は、実用性をさらに高めるべく、電線タイプの拡張アンテナを開発した。従来の基板タイプの拡張アンテナと同等の性能を保ちながら、平坦でないスペースへの設置を可能としたため、より適用範囲が広がった。特に、実証実験を実施した工場は、多くの突起がある形状の作業スペースであったため、他に選択肢はない状況で、非常に効果的であった。

IoH センサでの読取りにおいては、従来の基板タイプの拡張アンテナと同等の読取距離を実現できた。真円が基本であるが、扁平率 66%（直径を 2/3 に）でも、性能低下は計測誤差範囲に収まり、ほぼ元のままという性能を実現した。

実証実験では、線状の拡張アンテナを作業スペース上に設置し、作業者に手用 IoH センサを装着して実作業を行ってもらう実験で検証し、20cm 以上の距離で読み取れていることを確認した。

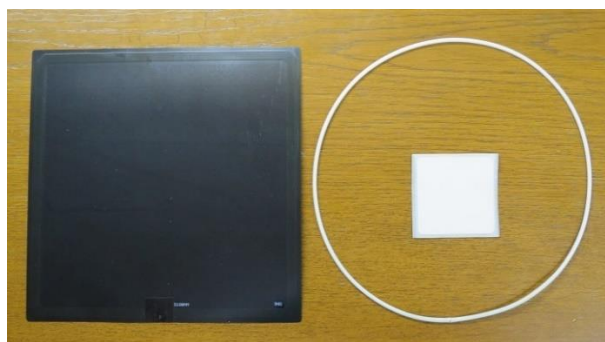


図 24 基板型拡張アンテナと線状拡張アンテナ

ii) 重点的に実施した事項

IC タグの読取性能については、センサの性能やタグのサイズ等、性能決定要素が多岐にわたるが、IoH センサの製品化の際の要件から条件を絞り込んで、重点的に調査・実験を実施した。

ウェアラブルな IoH センサを前提とし、アンテナ出力は 100mW 以下、アンテナ径は 8cm とした。また、床面に敷かれるタイルは 30cm 角、50cm 角のものが多いため、実用場面においては拡張アンテナもその間隔で並べることが想定されるが、事前検証の結果、50cm 間隔の場合は先述のアンテナ出力、アンテナ径では不足することがわかり、30cm 間隔における最適化条件を明らかにすることを重点的に実施した。

また、現場で使用するには、現場が必要とする検知範囲、測位精度や耐久性等に合ったスペックを実現することが肝要であることから、読取距離だけを追求するのではなく、「広範囲で安定して読み取れること」「フォークリフトの荷重に耐えられること」等を実現する方法について、重点的に調査・実験を実施した。

組立工場で実証実験を実施するにあたり、作業スペース上のどの位置に作業者の手があるかを検知することが必要であったが、作業スペースが平坦ではないため、凹凸を避けて設置できるような拡張アンテナが必要になり、重点的に実施した。凹凸を避けられるように、線状の拡張アンテナを開発したが、取り付け箇所によっては、変形して取り付ける必要があったため、多少変形させても性能が落ちないように設計・開発を進め、実現した。

2-3 動的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】

i) 研究開発の具体的内容

拡張アンテナの動的な読取性能の検証は、150mm 角、180mm 角、220mm 角、270mm 角、330mm 角、400mm 角の 6 種類の拡張アンテナを内蔵した「タグシート」で実施した。

IC タグとセンサとの相対速度だけでなく、距離の違いによる読取状況の変化に留意した。床面に配置した IC タグの読取においては、センサはできるだけ床面に近いほうが有利であるが、床面の状態によってはあまり近づけられないケースがあり、取り付け位置の自由度は高いほうがよい。IC タグの読み取れる範囲は読み取る距離が長くなる（センサがタグから離れる）ほど狭くなり、移動しながらの読み取りには不利になる。実用においてはその限界を見極めておくことが必須であるため、高さを 5cm～30cm まで 5cm 刻みで変化させて実施した。

実験は、電動カートに TECCO を取り付け、床面に配置した IC タグを 6km/h で走行しながら読み取り、その状況を観測した。（図 25～26）

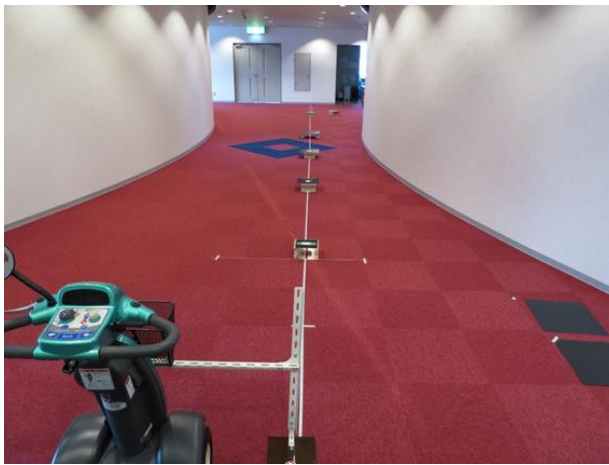


図 25 実験環境

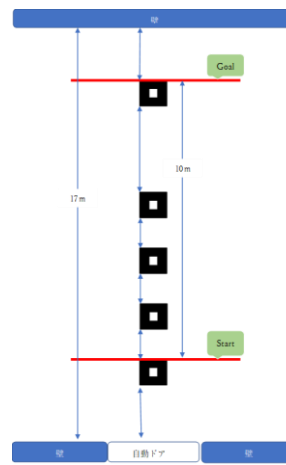


図 26 タグシート設置図

カードサイズの IC タグを、6km/h で移動する IC タグセンサで 100%読み取れることが目標であったが、6 種類のサイズのうちの最小の 150mm 角においても達成できた。

IC タグセンサ部の完成後、電動カートに IC タグセンサを取り付け、床面に配置した IC タグを 6km/h で走行しながら読み取り、その状況を観測した。（図 27～29）



図 27 実験環境

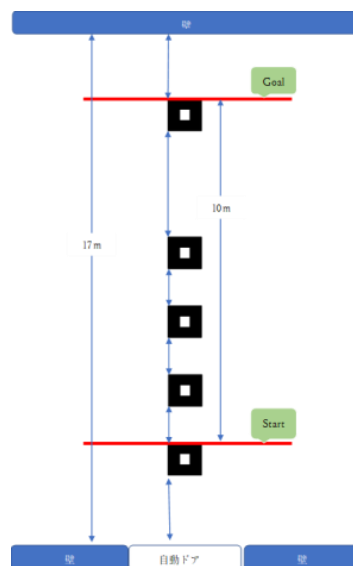


図 28 タグシート設置図



図 29 IoH センサ固定状況

前年度の TECCO と比較して、床面からの高さが高い時は読取性能がやや低下しているが、低い時は向上している。これは、IC タグセンサが、距離よりも幅広く読み取れる特性となっているためである。カートやロボット等の測位に利用する際には、アンテナは下部、即ち比較的低い位置に取り付けられるため、この特性は非常に有効であると考えられる。

読取実験の結果、IC タグと IC タグセンサの距離が 15cm 以内の場合、アンテナのコイルが 150mm 角以上のサイズであれば 100%読み取れ、一般的なカートへの装着、使用に問題がないことがわかった。また、40cm 角の拡張アンテナを使用した際に生じていた不感エリアを大幅に減少させ、移動しながらの読み取りについても安定性を向上させることができた。

動的性能についても、線状の拡張アンテナを作業スペース上に設置し、作業者に手用 IoH センサを装着して実作業を行ってもらう実験で検証した。読取可能な範囲に IoH センサがある限り、早い動きであっても落とすことなく、設定した読取周期で読み取っており、動的性能の面でも実用性の高い拡張アンテナを実現できた。

ii) 重点的に実施した事項

IC タグの動的な読取性能について、まず TECCO で移動速度、及びどのくらいの高さまで読み取れるかを見極めたが、理想的な条件での基本性能の確認であった。現場は場所ごとに条件が異なる。できるだけ多様な現場で使えるようにするため、IoH センサでは読み取りの安定性を確保する方法について、重点的に検討を行った。

2-4 統合測位システムの技術開発【3-1】

i) 研究開発の具体的内容

歩行時の測位（PDR: Pedestrian Dead Reckoning）と作業動作認識の2つの観点からセンサの装着位置による計測の特性を分析した。IoH センサを試作中の期間には、ATR-Promotions 製 10 軸センサや従来製品を用いてデータを取得し、オフラインで統合測位のアルゴリズムを検証するソフトウェアを開発した。最終年度には IoH センサのファームウェア上に PDR および IC タグによる絶対位置補正機能を実装した。



図 30) 統合測位システム開発に用いたセンサ：

(左) 初年度：ATR Promotions 製センサモジュール。

(中) 2 年目：GOV 製 Tecco (従来品) + IMU センサモジュール。

産総研が独自に開発を進めてきた歩行動作パターン認識を用いる PDR 手法を腰部と手首に、ゼロ速度更新 (ZUPT: Zero velocity UPdaTes) に基づく二重積分を用いる PDR 手法を足の甲（靴）、足首に適用して評価した。【4-1】で初年度に検討して採用した性能検証技術 EAG による評価では、IoH センサを装着することが想定される足の甲（靴）、足首のうち、足の甲が最適であることが確認できたが、足首でも妥当な結果が得られた（後述）。なお、PDR のためのセンサ装着部位として頻繁に選択される腰部については、知見の蓄積もあり初年度の評価結果では足の甲よりも高い精度が得られたが、床の IC タグの読み取りに基づく統合測位のためには適した部位ではないことから、

IoH センサを用いる統合測位システムを開発する場合にはコストとの兼ね合いから装着部位の選択肢には入りづらいと判断した。そこで 2 年目以降は ZUPT に基づく手法を更新して適用した。本方式は腰に取り付けたセンサでは計測が困難な横歩き等の歩行時においても測位が可能な手法であり IoH センサに適していることが確認された。このとき、産総研で開発された着地判定しきい値を動的に変化させて認識する手法を適用することで、歩行動作の認識精度を向上した（図 31）。

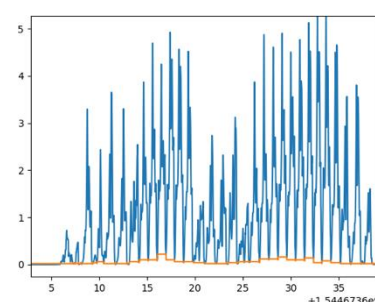


図 31) 加速度の分散値（青）と動的に変化する歩行動作判定しきい値（オレンジ）の例

最終年度には実際の IC タグ検知機能との連携機能の IoH センサ上への実装を完成した。【 4 - 1 】
で開発した評価手法をもとに検証した結果、実証現場における実際の計測データを用いた測位結果
の誤差は 5.0% であり（後述）、目標を達成した。

作業動作認識技術の開発に向け、初年度にユーザーニーズ調査を兼ねて、開発するセンサに必要な
性能を検討するためにヒアリング調査を実施した。ヒアリング対象者やその対象者の属している
現場を訪問してのヒアリング調査では、製造業（5 社）、物流業（1 社）、飲食・サービス業（1 社）、
IT ベンダー（1 社）において計 15 名から、IoH センサのニーズや期待に関する意見を収集した。ス
マート工場 EXPO（東京ビッグサイト）では、IT、コンサルティング、物流業、製造業（自動車）、
製造業（機械）2 社、商社（情報・通信）、商社（機械、鉄鋼）、情報・通信 2 社からの聞き取り
を行った。実施したニーズ調査から、「嵌める、切る、締める、貼る、持ち運ぶ、押す、巻く、束
ねる、取る、置く、梱包する、お辞儀する、拭く」という作業への認識のニーズが明らかになった
（表 1）。この結果は本事業により開発する IoH センサによる動作認識対象の基準となるとともに、
産業ニーズについて重要な知見が得られたと考える。

表 1 ニーズとして確認された認識対象の動作

聞き取り先	動作	使用例
製造	嵌める	コネクタを嵌める
製造	切る	カッターでインシュロックを切る
製造	締める	インシュロックを締める、ねじを締める
製造	貼る	ラップを金型に貼る
製造、物流、飲食	操作する	PC を操作する、注文をハンディターミナルに入力する、 装置を操作する
製造、飲食	持ち運ぶ	ポッドを持ち運ぶ、料理を持ち運ぶ
製造	セットする	材料を装置にセットする、金型を装置にセットする
製造、物流、飲食	押す	台車を押す
製造	巻く	テープを巻く
製造	束ねる	線を束ねる
製造、物流、飲食	取る	棚から物を取る
製造、物流、飲食	置く	テープを図板上に置く、物を置く
製造、物流	しまう (物を格納する)	棚に物をしまう
物流	梱包する	出荷品を梱包する
飲食	お辞儀する	来店客にお辞儀する
飲食	拭く	テーブルを拭く
飲食	配置する	テーブルをセットする
視覚障害者	前腕を前に出す、白 杖を振る	空間認知の度合いに応じて、前腕を前に差し出したり、白 杖の振り方を変えたりする。その計測により不安感の把握 し、支援につなげる
視覚障害者	腕振りジェスチャ	ジェスチャで指示し、音声や振動で情報提供するようなイ ンタフェース

ニーズ調査から出てきた動作の多くが手足の動きを伴うことや、安価な IC タグを作業環境や道具等に設置することでコンテキストを限定することができるため、認識可能であると考えた。身体負荷の計測や、つまずき、転倒といった突発的な動作の識別への期待も多く聞くことができた。

また、作業動作認識技術を開発する上で、実際の作業時の動きの認識に有効となりそうなセンサ装着箇所について検討するために、腰、上腕部、手首、大腿部、足首、足の甲における動きを記録して、可視化して検討した（図 32）。なお、大腿部、上腕部については、センサの固定や IC タグの読み取り距離に関する観点から、PDR、作業動作認識の双方にとってあまり適切ではないことを確認した。

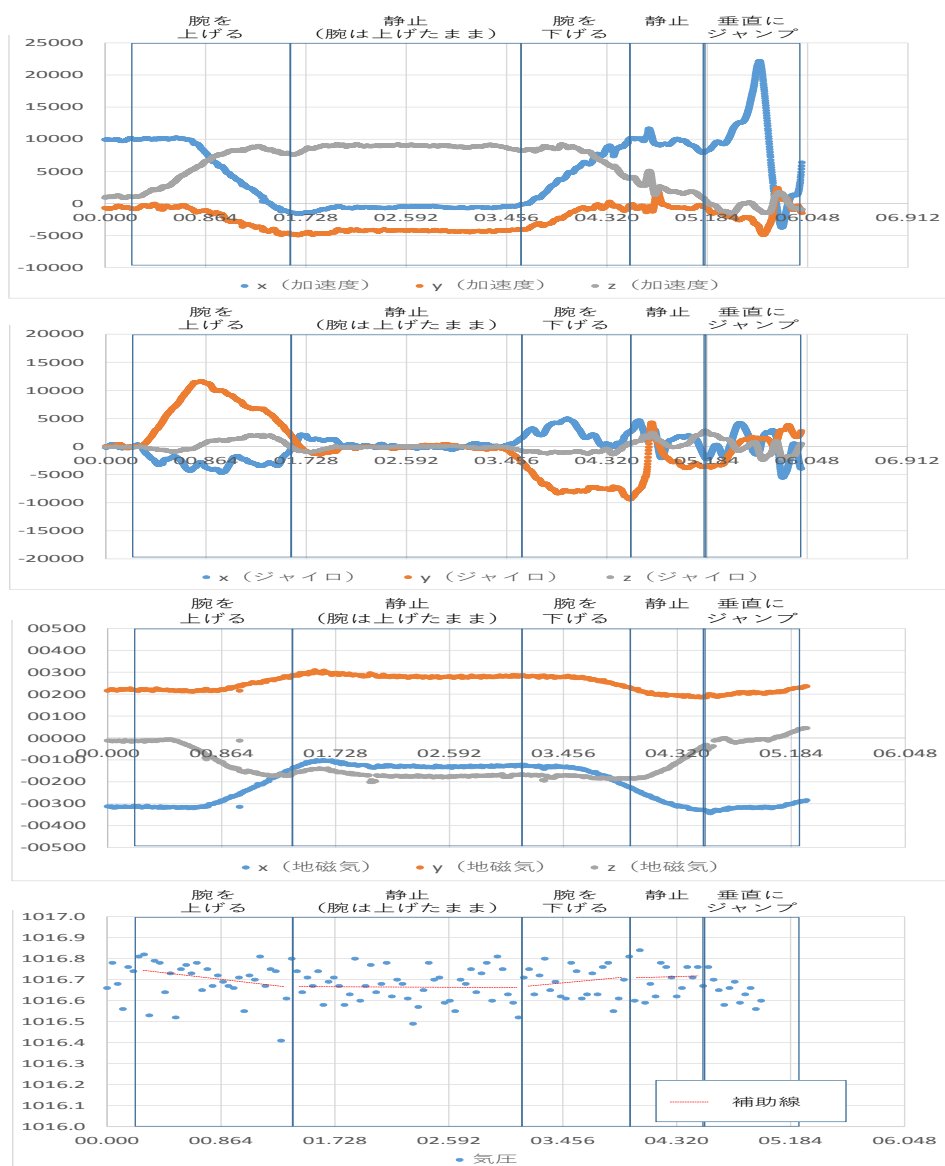


図 32 左腕を肩の高さまで上げて下げる動作をした場合の上腕部に装着したセンサから得られた加速度、角速度、磁気、気圧

最終的に、加速度や角速度といった IMU センサ情報をベースに、作業対象に設置した IC タグによる位置補正情報を同時に用いることで高い認識精度を実現する作業動作認識技術を開発した。本手法は、

- ・ピーク周波数
- ・周期性指標（ピーク周波数でのスペクトル値とスペクトル積分値の比）
- ・タグ検知結果
- ・姿勢情報（高頻度で観測される姿勢か、そうでないか）

を基本特徴として様々な組み合わせを用いたランダムフォレストにより実現された。【４－１】で実施した評価の結果認識精度は 81.70%であった（後述）。

ii) 重点的に実施した事項

事業期間を通して、IoH センサに適した統合測位手法について検討を進めるとともに、IoH センサが有するタグ検知機能による屋内測位の精度向上と動作認識手法の高度化を重点的に実施した。最終年度には実際に試作された IoH センサのファームウェア上に実装するとともに、BLE 通信経由で実時間記録できるデータ量での屋内測位と行動認識を実現するために、IoH センサ上で学習・認識に適した情報圧縮を実装して稼働させた。その結果、約 1/10 にデータ圧縮をして実際に BLE 通信経由でデータを記録し、屋内測位については目標の誤差水準(EAG: 5 %以下)を達成し、精度 81.70%で動作認識できることを確認した。さらに、この高い認識率の達成には IoH センサによる高い IC タグ検知能力（手足が触れる可能性のある個所に広く設置した IC タグのうち、8 割程度を作業中に検知）に基づく位置情報が貢献していることを確認した。

2－5 性能検証技術の開発【４－１】

2－5－1 製造現場における計測による性能検証技術の開発

i) 研究開発の具体的内容

【３－１】で開発した IoH センサ用の統合測位手法と動作認識手法が産業界における実用性能を有していることを検証するための手法の検討及び性能検証を実施した。統合測位の性能を示すための検証方法には、相対測位である PDR の特性である誤差累積を定量的に推定する方法について調査・検討をすすめ、PDR ベンチマーク標準化において提唱される EAG（誤差累積勾配指標：Error Accumulation Gradient）を採用した。動作認識の性能評価については、正解ラベルをつけたデータセットを用いてのクロスバリデーション法を採用して評価することとした。

実際の産業現場における実用性を評価するために、実験室実験ではなく、手足の動作を活用する製造業における実際に稼働中の生産ラインで業務する作業者の協力を得て検証実験を実施した。

初年度は協力いただいた製造現場に実際に勤務している作業者の協力を得て、各種センサ（表 2）からデータを取得し、測位精度検証手順の具体化を進め、データを可視化して確認する段階までを進め、2 年目に実際のデータを取得した。

表 2 計測に用いたセンサ

No.	機器名称(販売元)	用途および目的
1	TECCO RFID リーダー (株式会社ゴビ)	組立作業者の手の動きと、足の位置を記録する。
2	TECCO IC タグ (株式会社ゴビ)	図板に取り付け、作業者の手の位置を記録する。
3	TECCO 床用拡張アンテナ (株式会社ゴビ)	工場内の通路に設置し、みずすまし作業者の通過を記録する。
4	小型無線多機能センサ TSND151 (株式会社ATRプロモーションズ)	作業者の手の動きから作業内容を推定するために使用します。 また、作業者の足の甲に取り付けたセンサから、作業者の工場内の位置を推定します。
5	スマートフォン Google Nexus (Google)	スマートフォン内蔵のセンサ(加速度、ジャイロ、地磁気、気圧)で作業者の動きを記録したものに PDR (Pedestrian Dead Reckoning) アルゴリズムを適用し、作業者の移動軌跡を得るため。
6	UbiSense RTLS システム (ユビセンス・ジャパン株式会社)	作業者の工場内の位置を計測し記録するために使用します。
7	ビデオカメラ	作業者の作業内容と位置を記録します。

広い範囲を移動する作業者については映像ログから正解データを作成して評価に用いた。開発する IoH センサでは、環境側に電源のいらぬパッシブ IC タグを敷設して利用することを想定しているため、IC タグリーダによる位置補正が頻繁に入ることが想定される。

そこで2年目の取り組みとして、計測時間に対して誤差が累積する相対測位手法を、移動コースの形状などに依存しない評価指標である EAG をベースに、頻繁に補正が入ることが想定される IoH センサの実現場での作業を適切に評価する手順を設計した。設置型の IC タグおよび足首に設置される IC タグリーダが完成するまでの間は、位置の補正タイミングを 10 秒、20 秒、30 秒、60 秒、120 秒、180 秒間隔に設定して正解位置を用いて補正をシミュレーションし、得られた測位結果を比較して評価を実施した。評価指標には誤差累積勾配の中央値である EAG50 を重要指標として選定した。本指標は計測時間に対して誤差が累積することが原理上避けられない相対測位手法を評価する上で極めて合理的な指標ではあるが、本課題の目標値のように、誤差を正解に対する割合で表現するためには正解「位置」ではなく正解「速度」を知る必要がある。そこで2年目の目標達成判断については、標準的な歩行速度である時速 4km を想定した場合の EAG50 値を計算することとした。

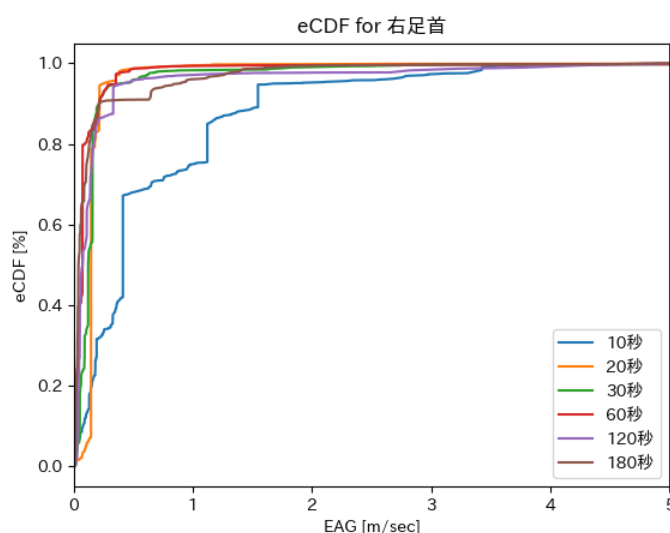


図 33 EAG に対する EAG の累積割合 (eCDF) 変化の補正秒数による比較

EAG による PDR の性能評価では、測位のために IoH センサを装着することが想定される身体部位である足の甲(靴)、足首のうち、足の甲が最適 (EAG=5.1cm/sec) であることが確認できた (図 33)。また、多少精度が低下するが、足首においても妥当な結果 (EAG=9.6cm/sec) が得られた。なお、PDR のためのセンサ装着部位として頻繁に選択される腰部については、EAG=2.3cm/sec という結果となり、足の甲よりも現状では精度がよいが、IC タグの読み取りに基づく統合測位のためには適した部位ではないことから統合測位システムを開発する場合には、装着部位の選択肢には入りづらいと判断した。

また、これまでの検討結果から実際の装着箇所として有望と思われる右足首装着センサデータを用いて 180 秒ごとに IC タグによる補正が入ると仮定した場合の誤差を計算した。その結果、累積割合 50%地点の EAG (EAG50) で約 3.79cm/s という値が得られた。この値は時速 4km(111.1cm/s)を想定すると 5%未満の誤差と換算できる。この結果は 180 秒程度の補正間隔がある場合にも 5%以内の誤差で計測できることが示されたことから、IC タグの設置間隔をどの程度広くしても実用上問題ないかという検討につなげることができると考えられる。

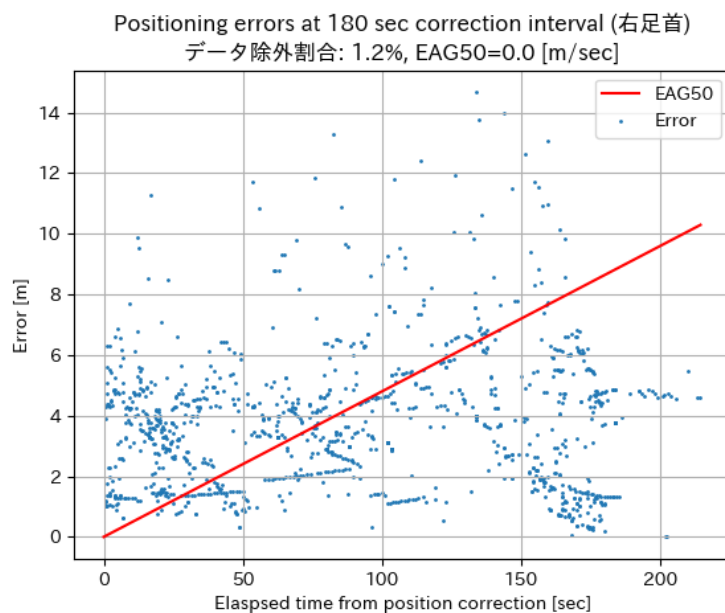


図 34 右足首 180 秒ごとの補正が入ることを想定したシミュレーションの誤差

最終年度には製造現場の生産ラインに IC タグを敷設し、想定される利用環境を実際に構築して精度の検証実験を実施した。その結果、重要指標として選定した EAG50 で 5.0%の誤差であり、【3-1】の開発目標値を達成していることを確認した（図 35）。

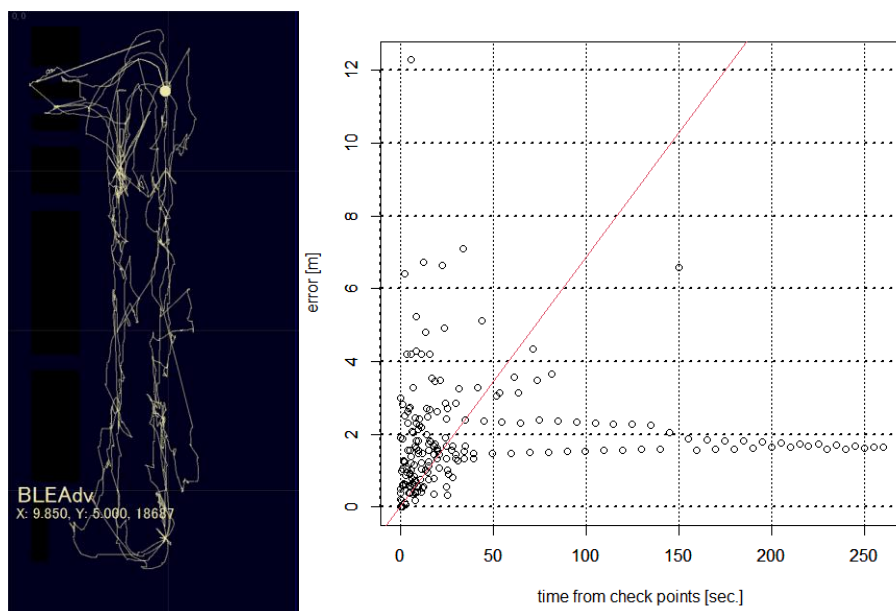


図 35) (左) 計測した動線の可視化結果 (右) 正解位置と誤差の対応関係のプロット

また、【3-1】で開発した作業動作認識手法について、クロスバリデーション法により精度を評価した。実証協力現場で作業分析に重要であると判断された十一種類の動作について評価した結果、認識精度は 81.70%であった（図 36）。

accuracy		81.690%																
		Predicted Class																
ID	CLASS	RECALL	PRECISION	F-MEASURE	Actual Class	ID	CLASS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	外装テープ巻き	95.41%	81.36%	87.83%		1	外装テープ巻き	95%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%
2	部分止め	75.64%	88.38%	81.52%		2	部分止め	0%	76%	0%	0%	0%	10%	0%	1%	14%	0%	0%
3	分岐結束	92.89%	62.83%	74.96%		3	分岐結束	0%	0%	93%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%
4	COT	66.95%	93.73%	78.11%		4	COT	6%	1%	4%	67%	6%	0%	4%	9%	0%	1%	2%
5	バンドクリップ	83.65%	94.91%	88.92%		5	バンドクリップ	0%	0%	2%	3%	84%	0%	3%	0%	1%	6%	1%
6	クランプ	73.53%	76.48%	74.97%		6	クランプ	1%	13%	0%	0%	0%	74%	0%	10%	3%	0%	0%
7	タテワリ	98.42%	89.35%	93.66%		7	タテワリ	0%	0%	1%	1%	0%	0%	98%	0%	0%	0%	0%
8	プロテクタ	82.99%	61.86%	70.88%		8	プロテクタ	2%	7%	0%	0%	0%	7%	0%	83%	0%	0%	0%
9	PVC	93.75%	36.64%	52.68%		9	PVC	0%	4%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	94%	0%	0%
10	バンドカット	93.90%	74.15%	82.86%		10	バンドカット	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	94%	0%
11	歩行	83.65%	70.16%	76.32%		11	歩行	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	84%

図 36 クロスバリデーション法による精度評価

ii) 重点的に実施した事項

本項目では特に実際の産業界における実用性を評価することに重点を置いた。このため、上述した様に実際の製造業の稼働中の製造ラインで評価用のデータを現実的に取得可能な評価手順について重点的に検討し、全ての実証実験を現場で実施するとともに評価用の正解データ作成を含め、現実的な評価手順の構築を重点化して研究開発を実施した。

2-5-2 視覚障害者に対するピッキング支援効果の検証

i) 研究開発の具体的内容

IoH (Internet of Human) センサにより、視覚障害者がどれだけの確に“ピッキング作業（倉庫の棚から必要な部品を収集する作業）”を行えるようになるかを評価することを目的とした研究を実施した。

性能検証の実験手法を設計し、まず予備実験によって、その実験手法の妥当性を検証した。

●予備実験

条件に合致する視覚障害者および晴眼者計 4 名を実験の被験者として募集・選定し、実験を実施した。募集・選定ならびに日程調整の結果、実験に参加した被験者の一覧は以下の通りである。

表 3 被験者一覧表

属性	被験者コード	年齢	性別	実験参加日
晴眼	0996	22	男	1月25日(金)
晴眼	1001	20	男	1月25日(金)
ロービジョン	1476	22	男	1月25日(金)
全盲	1475	22	男	1月25日(金)

1.1. 実験場所

つくば研究支援センター 研修室 B 茨城県つくば市千現 2-1-6 B 棟 2F

1.2. 実験期間

平成 31 年 1 月 25 日 (金)

1.3. 実験回数および時間

実験は、1 回 3 時間（実験説明・準備・片付け・途中の休憩等を含む）の内容を、被験者に対して 1 回（1 日）実施した。実験日には 3 時間の枠を 4 回分設定した。

1.4. 作業フロー

実験は、以下の流れで実施した。

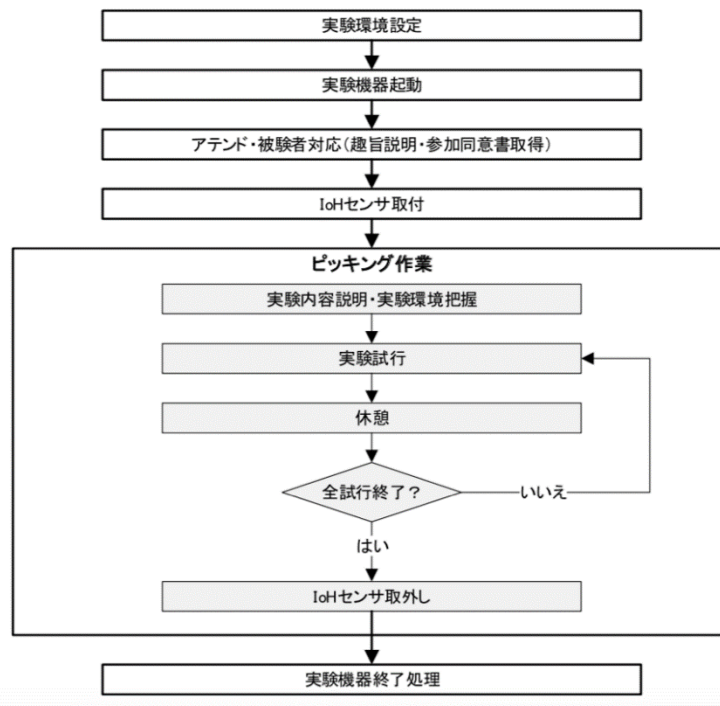


図 37 作業フロー

1.5. 実験内容

1.5.1. 実験環境

実験場所において、倉庫を見立てた高さ 1,800mm・4x4 段の棚を 2 台用意し、耐震固定した。

各棚の前・両側およびスタート/ゴール地点には、被験者の右足に取りつけた IoH センサで位置情報を読み取れるよう、床に IC タグ内蔵シートを設置した。2 台の棚には、被験者が判別できるよう名称を記したプレートとともに IC タグ内蔵の部品票を計 32 個用意し、各箇所に取りつけた。

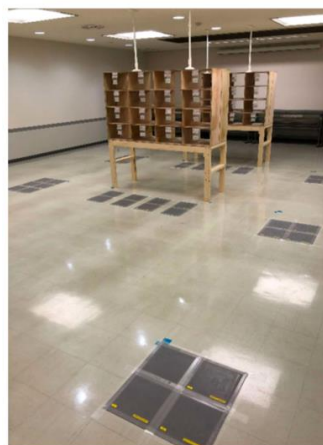


図 38 実験環境

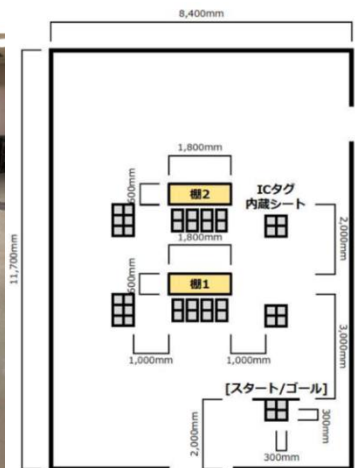


図 39 寸法図

1.5.2. IoH センサ取付

被験者の手（利き手側の手首近傍の前腕部分）および足（右足の足首近傍の下腿部分）にマジックテープ式のベルトにより IoH センサを取りつけ、情報が正常に読み取れることを確認した。



図 40 IoH センサ（利き手）取付時の様子 図 41 IoH センサ（右足）取付時の様子

1.5.3. 実験試行

実験試行では、被験者がスタート地点に立った状態から、徒歩で移動しながら複数の棚に配置されている部品を収集し、もとのスタート（＝ゴール）地点まで戻るまでの作業を計 10 回被験者に実施した。実験中は音声によって、被験者の手足等の IoH センサからの位置情報や、収集する部品に関する情報、指示情報等を受け取りながら移動・収集をおこなった。その際、被験者が指示を受けてから棚からの取り出しの正確さ・所要時間・効率等のパフォーマンスデータを計測し、基幹システム PC に記録した。



図 42 実験風景

図 43 は、試行回数に対する手の IoH センサで計測した所要時間の変化、図 44 は試行回数に対する足の IoH センサで計測した所要時間の変化である。ともに、正眼者とロービジョンはほとんど差がなく、全盲者の所要時間は最初大きいを試行が進むにつれ減少し晴眼者やロービジョンに近づいていくことを表している。

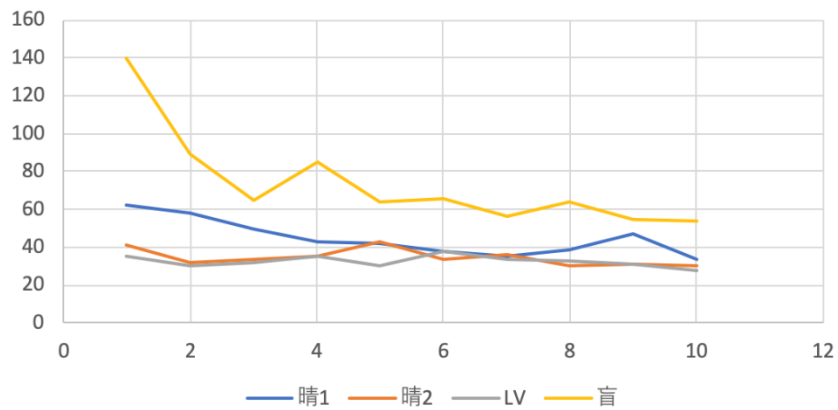


図 43 試行回数（横軸）に対する、手の IoH センサで計測した所要時間[s]（縦軸）

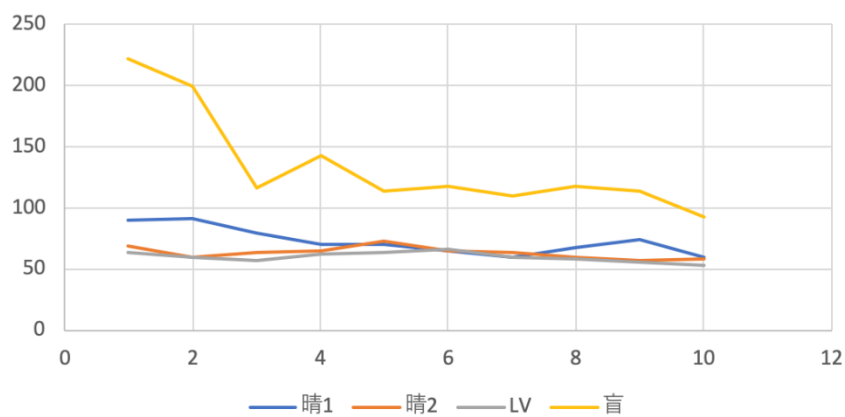


図 44 試行回数（横軸）に対する、足の IoH センサで計測した所要時間[s]（縦軸）

図 45 は、試行回数に対する手の IoH センサで計測した IC タグの数である。今回の実験では個数が 6 個である場合、ピッキングの間違いがないことを意味する。7 個以上は間違いが含まれる。結果は、全盲が少し間違いが多い傾向にあるものの、晴眼者やロービジョンと大差はないことを表している。

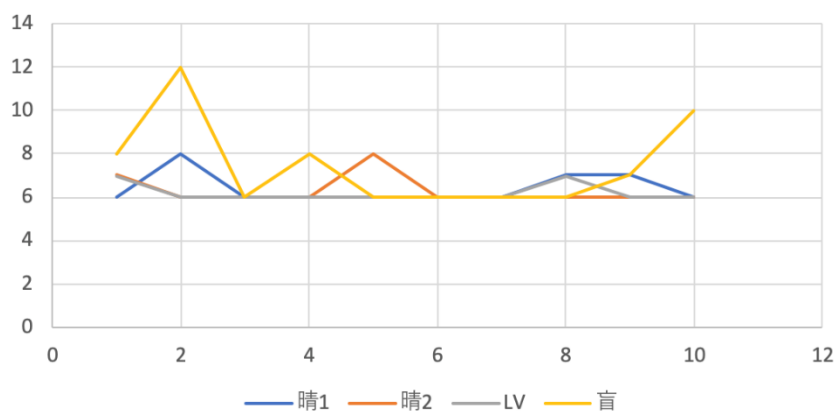


図 45 試行回数（横軸）に対する、手の IoH センサで計測した IC タグの数（縦軸）

●本実験

予備実験において確認した実験手法を用いて、本実験を実施した。被験者数を増やし、音声システムを構築して、実際に企業がピッキングに使用している倉庫を用いてピッキング作業を行った。

条件に合致する視覚障害者および晴眼者計 20 名を実験の被験者として募集・選定し、実験を実施した。募集・選定ならびに日程調整の結果、実験に参加した被験者の一覧は以下の通りである。

表 4 実験参加者一覧表

No.	実施日	開始	終了	年齢	性別	属性
1	11月16日	10:57	12:35	69	男	全盲
2	11月16日	12:50		54	男	ロービジョン
3	11月16日	13:40	13:55	52	男	全盲
4	11月16日	14:10	14:20	50	男	ロービジョン
5	11月16日	14:30	14:41	68	女	晴眼
6	11月16日	14:55	15:14	55	男	ロービジョン
7	11月16日	15:25	15:43	32	男	ロービジョン
8	11月16日	15:53	16:01	56	女	ロービジョン
9	11月16日	16:21	16:44	49	男	全盲
10	11月30日	10:15	10:23	32	男	晴眼
11	11月30日	10:26	10:33	31	男	晴眼
12	11月30日	11:30	11:47	57	男	ロービジョン
13	11月30日	12:30	12:55	79	男	全盲
14	11月30日	13:15	13:40	70	男	全盲
15	11月30日	13:51	14:09	62	男	ロービジョン
16	11月30日	14:13	14:25	51	男	晴眼
17	11月30日	14:38	14:50	54	女	晴眼
18	11月30日	15:03	15:21	49	男	ロービジョン
19	11月30日	15:30	15:44	38	男	ロービジョン
20	11月30日	15:50	16:16	40	男	ロービジョン
21	11月30日	16:20	16:42	48	女	ロービジョン

1.1 実験場所

トラスコ中山株式会社 プラネット埼玉 埼玉県幸手市神明内赤木 988 番 7

1.2 実験期間

2019 年 11 月 16 日 (土)、2019 年 11 月 30 日 (土)

1.3. 実験回数および時間

実験は、1 回 3 時間以内（実験説明・準備・片付け・途中の休憩等を含む）の内容を、実験参加者に対して 1 回（1 日）実施した。実験日には 3 時間の枠を 2 回分設定した。

1.4 作業フロー

実験は、以下の流れで実施した。

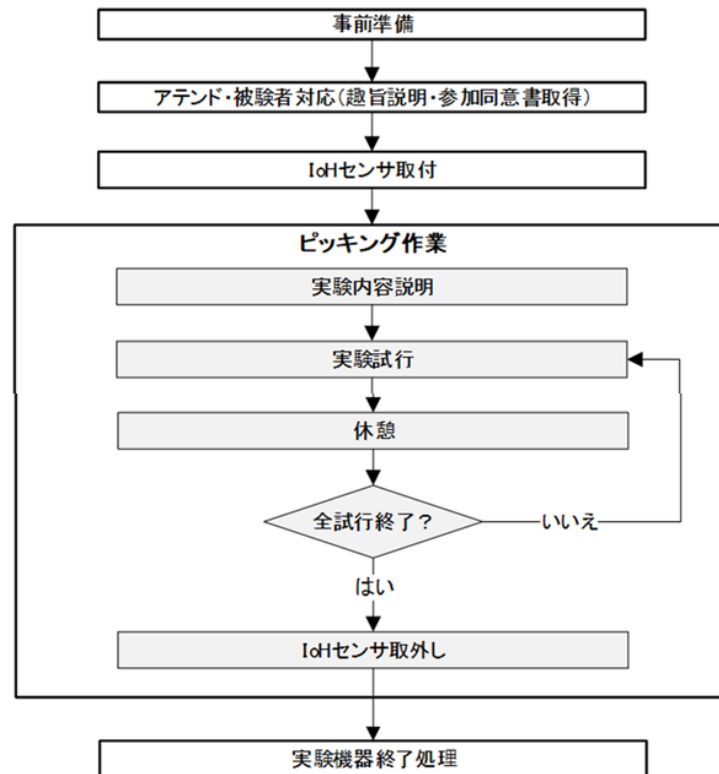


図 46 作業フロー

1.5 実験内容

1.5.1 実験環境

実験場所において、実験中の実験参加者の位置情報を読み取れるよう、棚の前の床には IC タグ内蔵シートを設置した。また、棚には、発注担当者が用意する IC タグ内蔵の部品票を発注担当者が指定する量を各棚に入れ、実験参加者がどの棚かを判別するために部品票名称を点字等で記したプレートをつけた。実験参加者にどの棚の部品を取り出すかなどの収集する部品情報、現在の倉庫内での位置情報、移動して部品を取集する指示情報を音声で指示出来る様にするため、ノート PC、タブレット、スマートフォンを用意し、実験参加者が携帯して基幹システムとなる PC とこれらをネットワーク接続した。



図 47 実験環境

1.5.2 IoH センサ取付

実験参加者の手（利き手側の手首近傍の前腕部分）および足（左足の足首近傍の下腿部分）にマジックテープ式のベルトにより IoH センサを各 1 個取りつけるとともに、情報が正常に読み取れることを確認した。

1.5.3 実験試行

実験試行では、実験参加者がスタート地点に立った状態から、徒歩で移動しながら複数の棚に配置されている部品を収集し、元のスタート（＝ゴール）地点まで戻るまでを実験参加者に作業させた。実験参加者が携帯した情報端末は、基幹システム PC にネットワーク接続し、実験参加者の手足の IoH センサからの位置情報や、収集する部品に関する情報、指示情報等を受け取りながら移動・収集を行った。その際、実験参加者が指示を受けてから棚からの取り出しの正確さ・所要時間・効率等のパフォーマンスデータを計測し、基幹システム PC に記録した。

データ計測の際は、後日、産総研で行うデータ解析の際に被験者の行動を確認することが出来るような記録（動画など）をした。



図 48 実験風景

実験結果を次に示す。

予備実験によって、被験者の振る舞いの属性間の違いが所要時間に現れることが分かったので、本実験では手の IoH センサで計測した所要時間に着目する。

図 49～51 は、試行回数に対する手の IoH センサで計測した所要時間の変化であり、図 49 は盲、図 50 はロービジョン、図 51 は晴眼の結果である。なお実験に際し、盲は 5 名中 2 名、ロービジョンは 11 名中 10 名、晴眼は 5 名中 4 名のデータの取得に成功し、残り 5 名は計測システムの不具合などでデータ取得に失敗した。

これらの実験結果は、予備実験の結果同様、晴眼者とロービジョンはほとんど差がなく、全盲者の所要時間は最初大きい試行が進むにつれ減少し晴眼者やロービジョンに近づいていくことを表している。

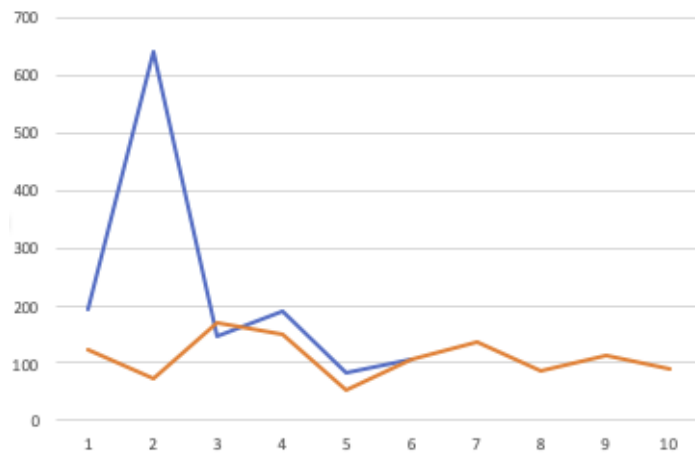


図 49 試行回数（横軸）に対する、手の IoH センサで計測した所要時間[s]（縦軸）
被験者：盲 5 名中 2 名

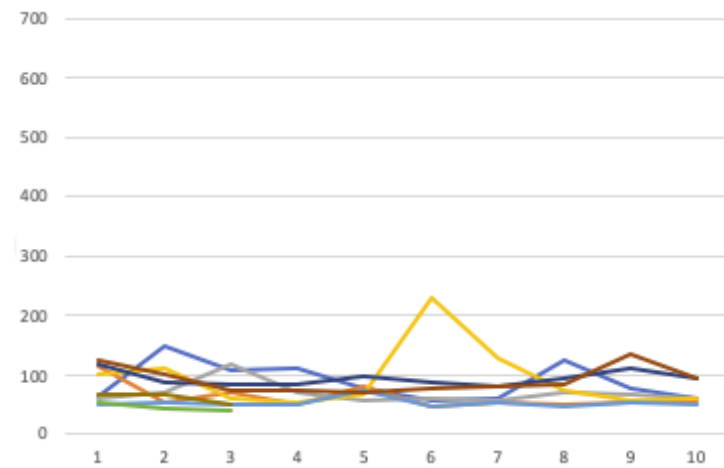


図 50 試行回数（横軸）に対する、手の IoH センサで計測した所要時間[s]（縦軸）
被験者：ロービジョン 10 名中 11 名

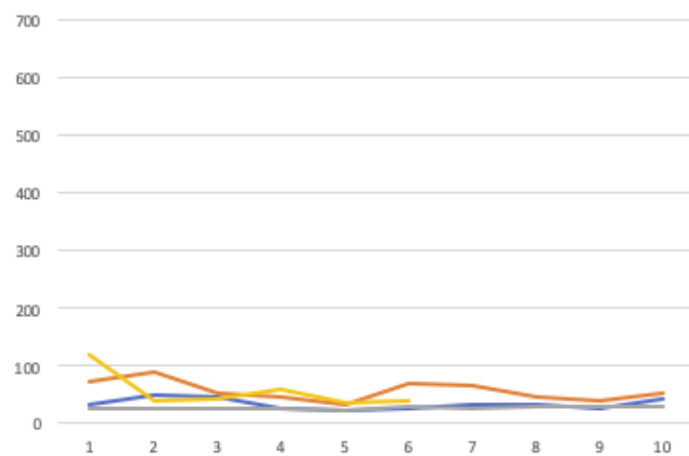


図 51 試行回数（横軸）に対する、手の IoH センサで計測した所要時間[s]（縦軸）
被験者：晴眼者 4 名中 5 名

以上本実験により、IoH センサを使用したピッキング支援技術が、視覚障害者のピッキング作業の支援に有効であることが分かった。

最終章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

3-1-1 IoH センサの技術開発【1-1】

3年度の研究開発の結果、IoH センサについては、実用性能を確保しながら、既製品を大きく上回る小型化を実現することができた。小型化によって、読み取り性能が低下することが懸念されたが、想定以上の性能を実現できた。特に通常は用いられない伸縮電線をアンテナ線とした足用 IoH センサは、拡張アンテナを組み合わせると読み取り距離 30cm と目標を大きく上回る性能を実現した。また、サポーター感覚で装着でき、実用時の使い勝手の面も飛躍的に向上した。

手用のアンテナアタッチメントについてもフレキシブル基板で作成し、シリコンゴムにインサート成型することで、高耐久の電線の 10 倍以上の耐屈曲性と防水性を実現した。本体ケースとアンテナアタッチメントの取付部については、「容易に取り付け、取り外しができる」とこと、「強い引張り力がかかったりした時には、容易に外れて作業者を保護し、アンテナの破損も防ぐ」ことを両立できる構造を実現した。

また、アンテナ径をさらに小型化しても実用性能を実現できる可能性が高いため、さらに性能改善を進めながら、最適径を調査するための実験を進めた。その結果、70mm 径でも TECCO 以上の 13~14cm（カードサイズのタグ読取距離）を実現できており、余裕を持った製品設計ができる目処がついた。

さらに、製品化後の海外展開に向けて、国際規格認証取得に向けての試験を実施し、全ての試験にパスした。

読み取り距離や小型化だけでなく、省電力化に向けた回路、ファームウェアの改善、実用を前提とした防水構造のアンテナアタッチメント、使い勝手がよく、かつ安全に配慮した本体への取付構造を設計・開発することで、ウェアラブルデバイスとしての機能・性能を強化し、IoH センサは、目標通り、実用可能なレベルを達成した。

3-1-2 静的性能向上用拡張アンテナの技術開発【1-2】

目標通り、カードサイズの IC タグを 30cm の間隔で並べた時に、IoH センサで 20cm 以上の距離で読み取れる性能を実現する拡張アンテナを開発した。

6 種類のサイズの拡張アンテナを開発し、その特性についての測定を実施することによって、サイズや配置による性能の傾向をデータ化することができた。実用場面での様々なニーズ（読取可能範囲）に対応する際の最適な条件を特定するのに活用することができ、従来はなかった設計指標を確立するという目的を達成できた。

IC タグセンサによる読取試験では、1 枚の場合は、中央部の読取距離は TECCO と比較して約 10% 向上し、マット端部の読取距離は約 15% 向上した。2 枚並べた時は、読取距離が約 15% 向上したのに加え、TECCO では境界で読み取れない範囲があったが、IC タグセンサではごくわずかになり、実用上はなくなった。また、磁界強度や共振周波数の測定の結果、30cm 間隔で並べる際の拡張アンテナのコイルのサイズは 180mm 角が最適であることがわかった。

タグマットは作業現場に設置されるため、フォークリフトが通過することも想定して、厚さや拡張アンテナ、IC タグの内蔵方法を決定し、耐荷重試験において、5,500kg の荷重に耐えられることを検証した。

また、実用性をさらに高めるべく、電線タイプの拡張アンテナを開発した。従来の基板タイプの拡張アンテナと同等の性能を保ちながら、平坦でないスペースへの設置を可能としたため、より適用範囲が広がった。真円が基本であるが、扁平率 66%（直径を 2/3 に）でも、性能低下は計測誤差範囲に収まり、ほぼ元のままという性能を実現した。

3-1-3 動的性能向上用拡張アンテナの技術開発【2-1】

電動カートを利用し、6 種類のサイズの拡張アンテナを 6km/h で移動しながら読み取る実験を実施することによって、動的性能を確保するための条件を見出した。

実験の結果、アンテナのコイルが 150mm 角以上のサイズであれば、6km/h でも 100%読み取れることがわかった。

TECCO と比較して、床面からの高さが低い位置の読取性能が向上した。これは、IC タグセンサと拡張アンテナの組み合わせが、最大距離よりも幅広く読み取れる特性となっているためである。カートやロボット等の測位に利用する際には、アンテナは下部、即ち比較的低い位置に取り付けられるため、この特性は非常に有効であり、動的性能の面でも、より実用性の高い拡張アンテナを実現できた。

3-1-4 統合測位システムの技術開発【3-1】

事業期間全体における研究開発の成果として、以下の 2 つの技術を IoH センサ上で実現した。

1. EAG50 基準において誤差 5%以内で屋内における作業位置を計測する統合測位手法
2. 11 種の認識対象作業を 80%以上で認識する動作認識手法

IC タグセンサと自律測位技術を組み合わせ、誤差累積勾配指標（EAG: Error Accumulation Gradient）による自律測位の性能評価で、誤差 5%以内を実現できた。これにより、自律測位の絶対値補正用に設置するタグシートの設置数を、従来の 1/10 以下に削減できる。

TECCO での IC タグのみによる測位では、測位したい場所にタグシートを敷き詰める必要があり、コスト面で課題となっていたが、1/10 になれば測位精度、コストともに他の測位技術に対しての優位性を高めることができる。

3-1-5 性能検証技術の開発【4-1】

事業期間全体を通じた性能検証技術の研究開発の成果として、

1. 実際の製造現場における制約を考慮した屋内測位技術の評価手順および評価用のプログラム群
2. 作業動作認識手法の評価手順及び評価用のプログラム群

が得られた。

計測時間に対して誤差が累積する相対測位手法を、移動コースの形状などに依存しない評価指標である EAG をベースに、頻繁に補正が入ることが想定されるウェアラブル IoH センサの実現場での作業を適切に評価する手順を設計し、IoH センサ用統合測位システムの性能評価に用いる重要指標である EAG50 とその計算用ソフトウェアを開発することができた。

また、本開発を通して、当初想定していた以上の成果として幾つかの知見が得られた。

1. IC タグ設置前に想定誤差を事前検討する手法

一定の時間ごとに IC タグによる補正が入ると仮定したシミュレーション時の誤差を検証することで、IC タグの設置間隔をどの程度広くしても実用上問題ないかという点にある程度見積もれるということで、現場ごとの設置コストなどを見積もる際に活用できる重要技術である。

2. 作業動作認識へのニーズ

初年度に実施したニーズ調査から、「嵌める、切る、締める、貼る、持ち運ぶ、押す、巻く、束ねる、取る、置く、梱包する、お辞儀する、拭く」という作業への認識のニーズが明らかになった（19 ページ 表 1）。この結果は本事業により開発する IoH センサによる動作認識対象の基準となっただけでなく、今後の製品の改良などにもつながる重要な知見である。

視覚障害者に対するピッキング支援効果の検証については、実証実験により、特に全盲者において、試行が進むにつれピッキングの成績が向上することを確認し、視覚障害者の就労支援への IoH センサの有効性が示された。従来は視覚障害者にとって不可能とされてきたピッキング作業が可能となり、もって視覚障害者の雇用促進に寄与することとなる。

また、IoH センサおよび拡張アンテナを展示会（ウェアラブル EXPO）に展示し、多くのご意見・ご要望を聞き取ることができた。「作業者の位置を精度よく検知したい」というニーズが多く、測位精度が高いことに加え、周りに機器を設置しなくてもよく、低コストである点も評価された。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

3-2-1 研究開発後の課題

(1) IoH センサの製品化

IoH センサを開発するにあたり、使用する部品については、信頼性、供給の持続性等の調査を行った上で採用したが、省電力を目的として採用したピエゾ・バイブレータが生産中止となり、代用品もないため、一般的な振動モータを使用せざるを得なくなった。想定より消費電力が増加し、連続稼働時間が短くなったため、新たなデバイス調査とさらなる省電力制御が必要となった。

また、アンテナアタッチメントについては、実証実験の際に、正常ではない取り付け方をしたことで壊れてしまった。正常な使い方をすれば起きないが、現場ではどう扱われるかわからないので、そうできないように対策を施す必要がある。

【3-1】で開発した屋内測位技術や作業動作認識技術は、【4-1】で実施した評価により、実証協力現場において目標性能を達成することができた。今後はより多くの現場において検証を繰り返すことで汎用性を確認するとともにさらなる性能向上に努める必要があると考えている。

3-2-2 事業化展開

(1) 想定している具体的なユーザ、マーケット及び市場規模等に対する効果

本事業で開発した試作機は、現行の他社のウェアラブルタイプのセンシング機器と比較して圧倒的に小さく軽い。人の位置に加えて 10 軸センサによる動作の検知も可能であるため、作業の状況、効率、精度等をきめ細かく把握することができ、作業ミス防止、作業性改善、事故防止等、作業現場が抱える課題を解決する最も有効なソリューションのひとつとなる。

また、視覚障害者の就労支援としてピッキング作業での実験を行い、その有効性を確認できた。社会の高齢化、就労人口の減少が進み、障害者の就労が社会的要請となってきている中、視覚障害

者は就労できる職種が限られていたが、IoH センサによる支援は、ピッキング等、他の職種へと就労の可能性を広げていくための合理的配慮として有効な手段であることがわかった。

IoH センサは、まずは自動認識機器市場がターゲットとなるが、2019 年の出荷金額は 2,526 億円（一般社団法人日本自動認識システム協会）、前年比 2.7%増であったが、2020 年の予想は 2,620 億円、前年比 3.7%増となっている。この 10 年はほぼ横ばいであったが、ものづくり、物流をはじめとする作業の効率化・高精度化が強く求められるようになり、そのためには自動認識技術が欠かせないため、この数年は増加率が拡大している。自動運転のように機械がインテリジェント化していく中で、「人と知能機械の協奏」に向けての動きが活発になっているが、機械の状態に比べて人の状態はセンシングが難しく、最も大きな課題となっている。IoH センサは、このような将来に向けての課題解決に貢献でき、今後、コンビニ等での利用拡大が期待される UHF 帯 RFID と並んで自動認識市場をさらに拡大するキーデバイスになる。

（２）事業化見込み

事業化の時期については、本事業完了の 1 年後の令和 3 年度から本格的に販売を開始することを目標としていたが、市場のニーズはますます高まっており、研究開発も順調に進んでいることから、前倒しにすることも検討している。

既存の顧客からは現時点でも要望を受けており、今年度、実証実験を実施した企業からもサンプル提供可能時期、発売時期について頻繁に問い合わせがあり、事業完了後、間もない時期の試験導入が見込める。現在、ゴビ社の製品の IC タグセンサの売上が急激に上昇しており、その発展型である IoH センサの初年度の売上は、当初目標の 2,200 万円の 2 倍以上に達すると考えられる。これまでの製品は国内専用で「海外の工場で使いたい」といったご要望に応えられず、サイズの問題から狭い箇所に手を入れる組立作業では使いにくい、防水仕様ではないため屋外や食品業界等での使用は難しいという課題があったが、IoH センサはこれらの課題をクリアできるため、5 年後の 6 億 7,800 万円という当初計画はゴビ社直接販売分のみで達成でき、協力会社分を合わせると 10 億円規模になることが見込める。

（３）事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール

本事業の 3 年度目から、実証実験と並行してパッケージ、サービスの開発を進めており、本事業完了後は主に既存の顧客に対してレンタルをしながら実用性の評価を行う。その結果を元に機能・性能を製品レベルに高めて量産設計・試作を行い、本格的に販売を開始する。

当初は、既存顧客を中心に、工場内、倉庫内といったクローズな空間を対象として事業を開始するが、システム、機器としての有効な利用シーン、活用する上でのノウハウ等が蓄積されてきた段階で公共空間へと展開する。現在、大手メーカーと視覚障害者のホームからの転落防止を主眼とした案内システムの試作・実験を継続的に行っており、そのシステムに要求される性能を持っている IoH センサが製品化されれば、実現を一気に加速できる。

また、近年、UHF 帯 RFID を商品に取り付けることで効率化を図る動きが活発化してきているが、UHF 帯 RFID は長距離・一括読取りが大きな特長であり、決済や棚卸し等での活用が想定されている。ゴビ社は、IoH センサと UHF 帯 RFID の連携により、新しい作業支援を実現する手法を考案し、その実現に向けて具体的に検討を始めている。完成すれば、従来にはないハイブリッド IoH センサとなり、次世代ピッキング作業の有力なデバイスとなる。

表 5 本事業完了後のスケジュール

想定するサンプル出荷先		住友電装、トラスコ中山、トヨタ自動車、日立物流、オムロン等				
スケジュール	事業年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度
	サンプルの出荷・評価					
	パッケージレンタル					
	追加研究 (UHF 帯 RFID 連携等)					
	量産設計・試作					
	量産					
	販路開拓					
	販売					
	クローズ空間への導入 (工場・倉庫等)					
	公共空間への導入 (公共施設・商業施設等)					
売上高 (千円)		22, 000	75, 000	144, 000	376, 000	678, 000

以 上