



JAEA-Review

2024-027

DOI:10.11484/jaea-review-2024-027

無線 UWB とカメラ画像分析を組合せた
リアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価
(委託研究)

—令和 4 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Development and Evaluation of a Real-time 3D Positioning Embedded System

Combining Wireless UWB and Camera Image Analysis

(Contract Research)

-FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource

Development Project-

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東海国立大学機構

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tokai National Higher Education and Research System

November 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価
(委託研究)

—令和 4 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東海国立大学機構

(2024 年 4 月 8 日受理)

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター (CLADS) では、令和 4 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 (以下、「本事業」という。) を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和 4 年度に採択された研究課題のうち、「無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価」の令和 4 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、原子炉建屋内の空間線量計測における人やロボットによる 10 cm 精度未満での簡易リアルタイム 3D 位置測位を目標とし、最新普及技術である『無線 UWB (Ultra Width Band)』と『複数カメラ物体認識』の 2 種類を組合せた組込システムの実現を目指している。その中で、岐阜大学・福島高専グループがカメラ撮影機能・カメラ分析機能・無線通信機能を有する組込装置を開発し、それら複数装置用いて、カメラ画像群の分析に基づくリアルタイム 3D 位置測位の実現を目指す。東京大学・LocationMind (株) グループが、UWB リアルタイム位置測位技術の原子炉建屋内へ適用を行い、安定性向上技術の開発を試みる。なお、名古屋大学グループが電磁波吸収材料を使用し、ハード面からの無線 UWB 安定化の検証を担当する。そして耐放射線評価は、原科研グループ・福島高専グループが協力して行う。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東海国立大学機構が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development and Evaluation of a Real-time 3D Positioning Embedded System
Combining Wireless UWB and Camera Image Analysis
(Contract Research)

— FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tokai National Higher Education and Research System

(Received April 8, 2024)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2022.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2022, this report summarizes the research results of the “Development and evaluation of a real-time 3D positioning embedded system combining wireless UWB and camera image analysis ” conducted in FY2022.

The present study aims to realize an embedded system that combines two of the latest popular technologies, "wireless UWB (Ultra Width Band)" and "multi-camera object recognition," with the goal of simple real-time 3D positioning with less than 10 cm accuracy by a human or robot for measuring air doses in nuclear reactor buildings. In this research, Gifu Univ. and National Institute of Technology, Fukushima College group have developed an embedded system with camera shooting function, camera analysis function, and wireless communication function, in order to realize real-time 3D positioning based on the analysis of camera images by using these multiple devices. The Univ. of Tokyo and LocationMind Inc. group will apply UWB real-time positioning technology to the inside of nuclear reactor buildings and attempt to develop technology to improve stability. Nagoya Univ. group will be in charge of verifying wireless UWB stability from the hardware side by using electromagnetic wave absorbing materials. The radiation resistance evaluation will be conducted in cooperation with the JAEA and National Institute of Technology, Fukushima College group.

Keywords: 3D Positioning, UWB, Object Recognition, Camera Image Analysis, Embedded Device

This work was performed by Tokai National Higher Education and Research System under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
付録 成果報告書	15

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
Appendix Result Report	15

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英共同研究）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

- 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
- 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
- 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
- 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (~R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1~)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島2・3号機ペダスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによるALPS沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (~R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1~)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2. 3. 31) 竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4.7.31) 村上 健太 (R4.8.1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー加速器研究機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・航空技術研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
 令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
 令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英・日露共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (~R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1~)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6. 令和4年度 採択課題

令和4年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学

課題名	研究代表者	所属機関
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

本報告書は、以下の課題の令和4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
無線UWBとカメラ画像分析を組合せたリアルタイム3D位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	東海国立大学機構 (岐阜大学)

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録
成果報告書

This is a blank page.

令和 4 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

無線 UWB とカメラ画像分析を組み合わせたリアルタイム

3D 位置測位・組込システムの開発・評価

(契約番号 R04I121)

成果報告書

令和 5 年 3 月

国立大学法人東海国立大学機構

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、東海国立大学機構岐阜大学が実施した「無線 UWB とカメラ画像分析を組み合わせたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価」の令和 4 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略 viii

1 はじめに 1-1

2 業務計画 2. 1-1

 2.1 全体計画 2. 1-1

 2.2 実施体制..... 2. 2-1

 2.3 令和 4 年度の成果の目標および業務の実施方法..... 2. 3-1

3 令和 4 年度の実施内容および成果 3. 1-1

 3.1 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム 3D 位置測位システムの開発
 およびシステム統合・検証..... 3. 1-1

 3.2 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発 3. 2-1

 3.3 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位システムの開発と実験・改良 3. 3-1

 3.4 カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発および計測機器等の
 耐放射線性評価..... 3. 4-1

 3.4.1 カスケード接続俯瞰画像位置計測 3. 4-1

 3.4.2 耐放射線性評価 3. 4-3

 3.5 UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証 ... 3. 5-1

 3.6 組込装置「Spresense」および無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに
 無線通信の検証試験..... 3. 6-1

 3.7 研究推進 3-7

4 結言 4-1

巻末資料 5-1

執筆者リスト

受託者（委託先）

東海国立大学機構岐阜大学
東海国立大学機構名古屋大学

准教授 松下 光次郎
助教 上野 智永

再委託先

国立大学法人東京大学

教授 柴崎 亮介
特任准教授 マナnder・ディネス

再委託先

LocationMind 株式会社

マネージャー 大平 亘

再委託先

独立行政法人国立高等専門学校機構
福島工業高等専門学校

教授 鈴木 茂和
特命教授 川妻 伸二

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
課長

田上 進

表一覧

表 3.1-1	組込装置 Spresense による物体認識精度結果	....	3.1-1
表 3.1-2	3D 位置測位結果	....	3.1-4
表 3.2-1	DWM101 の技術仕様 1	....	3.2-4
表 3.2-2	DW1000 の技術仕様	....	3.2-5
表 3.2-3	DWM1000EVB の操作モード	....	3.2-6
表 3.3-1	信号の放射パターンを測定するために実施した試験の一覧	....	3.3-10
表 3.4-1	電子部品等情報のリスト	....	3.4-3

図一覧

図 2.2-1	実施体制図	....	2.2-1
図 3.1-1	システム構成図	....	3.1-1
図 3.1-2	組込装置 Spresense による物体認識と重心算出の様子	....	3.1-2
図 3.1-3	Wi-Fi 搭載組込装置 Spresense による相互間通信に関するシステム概念図と結果	....	3.1-2
図 3.1-4	複数の組込装置（無線・カメラ画像分析）による 3D 位置測位のシステム構成概念図	....	3.1-3
図 3.1-5	組込装置（無線・カメラ画像分析）3 台による 3D 位置測位検証の様子	....	3.1-3
図 3.1-6	組込装置（無線・カメラ画像分析）4 台による 3D 位置測位検証の様子	....	3.1-3
図 3.1-7	組込装置（無線・カメラ画像分析）5 台による 3D 位置測位検証の様子	....	3.1-3
図 3.1-8	2 種類の曲面取り付け用ネオジウムマグネットシート	....	3.1-4
図 3.1-9	バッテリー着脱メカニズム（試作 1：スライド式）	....	3.1-4
図 3.1-10	バッテリー着脱メカニズム（試作 2：バネ式）	....	3.1-5
図 3.1-11	現在の組込装置ケース（バネ式・バッテリー着脱メカニズムを採用）	....	3.1-5
図 3.1-12	耐放射線試験に用いた組込装置 Spresense 1 台	....	3.1-5
図 3.1-13	耐放射線試験に用いた 6 台と比較検証のための 2 台	....	3.1-5
図 3.2-1	開発および試験の分担	....	3.2-1
図 3.2-2	UWB Device Type 1, DWM1001EVB	....	3.2-2
図 3.2-3	UWB デバイスの回路図, DWM1001EVB	....	3.2-3
図 3.2-4	UWB Device Type 2, DWM1000EVB	....	3.2-5
図 3.2-5	UWB 機器 (DW1000) ・生データと CIR を記録するための設定インターフェース	....	3.2-5
図 3.2-6	UWB Device Type 3, DWM3001EVB	....	3.2-7
図 3.2-7	直接信号と反射信号の CIR データ	....	3.2-8
図 3.2-8	信号の放射パターンを測定（左：反射なし、右：床からの反射あり）	....	3.2-9
図 3.2-9	左：アンプとケーブルの利得の測定、右：UWB 信号のパワーの測定	....	3.2-9
図 3.2-10	電波暗室での CIR データテスト（障害物有無の比較）	....	3.2-10
図 3.2-11	CIR データ反射効果の比較・左：床に電波吸収材（反射効果なし） 右：背面に反射板（光反射効果あり）	....	3.2-10
図 3.2-12	マルチパスによる First Path と Peak Value の関係	....	3.2-11
図 3.2-13	CIR データの振幅、左：PL=128、右：PL=4096	....	3.2-11
図 3.2-14	アンカーの設置レイアウト	....	3.2-12
図 3.2-15	アンカー座標の自動設定プログラムの例	....	3.2-13
図 3.2-16	半自動アンカーセッティングツールの利用手順	....	3.2-13
図 3.2-17	電波吸収体を使用した反射信号テスト	....	3.2-14

図 3.2-18	CIR データ、左：電波吸収シートなし、右：電波吸収シートあり	....	3.2-14
図 3.2-19	範囲データ平滑化の手順	....	3.2-14
図 3.2-20	フィルタリングした範囲データ例	....	3.2-15
図 3.3-1	UWB デバイスとインターフェースボードのシステムインテグレーション	....	3.3-1
図 3.3-2	アンカーとタグの間で測定された生データ	....	3.3-2
図 3.3-3	CIR データ出力ファイル例	....	3.3-2
図 3.3-4	UWB 機器 (DW3000) をセットアップし、生データと CIR 出力をロギング画面	....	3.3-2
図 3.3-5	UWB 測位精度解析のための屋内テストエリア	....	3.3-3
図 3.3-6	各アンカーからタグへの範囲データ	....	3.3-4
図 3.3-7	位置データ (青：デバイス出力、赤：フィルタリングされた距離から計算)	....	3.3-4
図 3.3-8	位置計測	....	3.3-5
図 3.3-9	UWB 測位位置精度のための室内実験サイト	....	3.3-6
図 3.3-10	アンカーとタグ間の距離	....	3.3-7
図 3.3-11	位置計測 1、青：タグ、赤：計算された距離	....	3.3-7
図 3.3-12	位置計測 2、青：タグ、赤：計算された距離	....	3.3-8
図 3.3-13	CIR データ出力、左：反射なし、中：反射大、右：反射なし：反射小	....	3.3-8
図 3.3-14	信号の放射パターンを測定するための設定	....	3.3-9
図 3.3-15	アンテナ放射パターン試験に使用した UWB デバイス	....	3.3-9
図 3.3-16	同偏波と交差偏波のためのアンテナ方向	....	3.3-11
図 3.3-17	DW3000, UWB and CW, No Reflection, 3 m	....	3.3-11
図 3.3-18	DW3000, UWB and CW, Reflection, 10 m	....	3.3-12
図 3.3-19	DW1000, UWB and CW, No Reflection, 3 m	....	3.3-12
図 3.3-20	DW1000, UWB and CW, Reflection, 3 m	....	3.3-12
図 3.3-21	DW1000, UWB and CW, Reflection, 10 m	....	3.3-13
図 3.3-22	DW1000, CW, No Reflection, 3 m / DW1000, CW, Reflection, 3 m	....	3.3-13
図 3.3-23	デバイス用バッテリー	....	3.3-14
図 3.4-1	カスケード接続イメージ	....	3.4-1
図 3.4-2	通信障害を最小限にするための無線通信系検討図	....	3.4-1
図 3.4-3	全体システム構成図	....	3.4-2
図 3.4-4	中継ロボット用小型クローラ標準モジュール	....	3.4-2
図 3.4-5	中継ロボット (俯瞰写真)	....	3.4-3
図 3.4-6	中継ロボット (前面、後面および側面写真)	....	3.4-3
図 3.5-1	試作した電磁波吸収性能の高い材料	....	3.5-1
図 3.6-1	ガンマセルのガンマ線照射線量率の評価	....	3.6-1
図 3.6-2	ガンマセルで照射した Spresense (1 回目)	....	3.6-1
図 3.6-3	ガンマセルで照射した Spresense (2 回目)	....	3.6-2
図 3.6-4	ガンマセルで照射した Spresense (3 回目)	....	3.6-2
図 3.6-5	原科研バックエンド研究施設 (BECKY) の廃液貯槽室 (I)	....	3.6-3

略語一覧

Ch	: Channel
CIR	: Cumulative Impulse Response
CSIS	: Center for Spatial Information Science
CW	: Continuous Wave
DK	: Developer Kit
El or Elv	: Elevation
EVB	: Evaluation Board
FW	: Firmware
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
H	: Horizontal
Ht	: Height
HW	: Hardware
LM	: LocationMind
LoRa	: Low Power Long Range
LOS	: Line of Sight
NLOS	: Non Line of Sight
ns or nS	: Nano Second
PDoA	: Phase Difference of Arrival
PRF	: Pulse Repetition Frequency
PSD	: Power Spectrum Density
QZSS	: Quasi Zenith Satellite System (準天頂衛星システム)
Rx	: Receiver
STD	: Standard Deviation
SW	: Software
TDoA	: Time Difference of Arrival

ToF	: Time of Flight
TWR	: Two Way Ranging
Tx	: Transmitter
UNOOSA	: United National Office for Outer Space Affairs (国際連合宇宙局)
UWB	: Ultra Wide Band
V	: Vertical
WAN	: Wide Area Network

概略

現在、原子炉建屋内の線量計測において、リアルタイム 3D 位置測位技術は利用されておらず、作業員／ロボットは目算に近い方法で線量計測位置の記録を付けている状態といえる。そのため、今後の人／ロボットによる精緻な空間線量計測の実現のためには、線量計の精度が約 10 cm 程度であるため、10 cm 精度未満での簡易リアルタイム 3D 位置測位システムの実装が急務な課題となっている。一方、近年、リアルタイム屋内位置測位技術は発展・普及し始めており、特に、『無線 UWB (Ultra Width Band) 』と『複数カメラ物体認識 (深層学習とフォトグラメトリ／光学式モーションキャプチャ) 』の 2 種類の最新普及技術が有望といえる。そこで我々グループはこれら 2 つの技術を組合せ、原子炉建屋内に対して簡単に設置でき、安定にリアルタイム位置測位可能な組込システムの実現を目指す。具体的には、岐阜大学 (岐大) グループがカメラ撮影機能・カメラ分析機能 (エッジコンピューティング) ・無線通信機能を有する組込装置を開発し、それらを複数装置用いて、カメラ画像群の分析に基づきリアルタイム 3D 位置測位の実現を目指す。なお、原子炉建屋内カメラ画像分析法は、廃炉プロジェクトにおいて先行研究を行っている福島工業高等専門学校 (福島高専) グループとともに先行研究を行っている。作業員用装置は岐大グループ、ロボット用装置は福島高専グループが担当する。また、東京大学 (東大) ・LocationMind (株) (LM) グループは、先行研究で培った UWB リアルタイム位置測位技術の原子炉建屋内へ適用を行い、安定性向上技術の開発を試みる。なお、建屋内は悪通信環境と想定されるため、名古屋大学 (名大) グループが先行研究の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の衛星内通信のための電磁波吸収材料を使用し、ハード面から無線通信の安定化のシステム構築・検証を担当する。最終的に、岐大グループが 3 年目に、上記技術のシステム統合した組込装置を開発し、原子炉建屋を想定したコンクリートで覆われた閉空間で性能評価を行う。また、実用化のためには耐放射線評価も重要であるため、日本原子力研究開発機構 (JAEA) 、原子力科学研究所 (原科研) グループ・福島高専グループが協力して行う。

1. はじめに

本事業は3年間プロジェクトであり、1年目は各グループが保有する知識技術の本プロジェクトに適用するための立ち上げおよび各グループの連携の強化を進める。2年目は、1年目の成果物の性能向上に努めて結果を出し、本事業に関連する他のグループとの連携を模索することも含める。3年目は、最終的なシステム性能を実現するために、各グループの成果を統合して結果を出し、他とのグループの連携を目標にし、実装の段階へ移行することを目標とするものである。

そのために、1年目は、岐大グループはカメラ画像分析機能・無線通信機能を有する組込装置（第一次）を開発、3D位置測位の基礎機能を証明した。また、磁石による迅速な着脱ケースも第一次試作を完成させた。東大・LMグループは、UWB装置の開発と、その特性分析を行った。名大グループは、電磁波吸収材料を作成し、東大・LMグループとともに、UWB通信改善の分析を行った。また、福島高専グループは、俯瞰画像方式位置計測法の基盤となるシステム開発を行った。また、原科研グループと協力して、組込装置 Spresense の耐放射線評価を行った。本報告書は、上記内容を詳述するものである。

2. 業務計画

2.1 全体計画

研究目標の妥当性

現在、原子炉建屋内では、リアルタイム屋内位置測位技術は実装されておらず、作業員／ロボットによる線量計測時の位置情報は目算に近い状態である。特に、今後は、人／ロボットによる精緻な空間線量計測が重要課題であるために、数 cm～10 cm 精度での簡易リアルタイム 3D 位置測位システムの実装が急務な課題となっている。

それに対して近年、リアルタイム屋内位置測位技術は発展・普及し始めており、特に、無線 UWB とカメラ物体認識・組込装置の 2 種類が有望な最新普及技術といえる。無線 UWB は、対象空間内にアンカーと呼ばれる UWB 通信機を網羅的に複数設置することで、その環境内で UWB デバイスを保有する作業員／ロボットの誤差 10 cm 未満の精度でのリアルタイム位置測位を実現できる可能性を有する。ただし、UWB デバイス間の精密測距によって測位することから、UWB デバイス同士の無線通信（伝搬）状態に精度が左右される。原子炉建屋内の電波伝搬状況を把握し、その環境に特化したリアルタイム位置測位アルゴリズム構築が不可欠となる。また、無線通信電波の不要な反射など起こさないよう、電磁波吸収材料を適切にシステムデザインに組み込むことも課題といえる。

一方、カメラ物体認識・組込装置に基づくリアルタイム位置測位法も、UWB と同様に位置測位環境を網羅するように取り付けることが不可欠である。その上で、各カメラ画像分析デバイスが物体認識（エッジコンピューティング）を行い、分析で得られた情報をローカルネットワーク通信し、空間内の特定物体の位置測位が可能となる。

すなわち、視界が悪くても動作する UWB 測位技術、信号の多重反射など生じても位置計測できるカメラ物体認識システムを組み合わせることで、より安全・安定なリアルタイム 3D 位置測位が可能な組み込みシステムの実現を目指す。また、最新普及技術の利用が前提とあるため、特に運用検証を重視しており、既に行っている事前ヒヤリングにおいて 1 回の作業期間が 2 週間であると前提条件を確認していることから、低消費電力である UWB や組込装置を選定、1 回の簡易的なバッテリー交換で 2 週間の持続を想定している。その上で、本課題の要件として、耐放射線検証が避けられないため、カメラなどの耐放射線検証の豊富な経験を有する申請者とともに、今回用いる組込装置や無線通信回路 UWB の耐放射線検証を原科研にて行う計画である。

最終的に、原子炉建屋内を想定する 20 m×3 m×3 m の閉空間にて、カメラ・UWB・バッテリーを搭載した組み込み装置 Spresense にて、約 10 cm 未満の精度にて 3D 自己位置推定を可能とし、1 個の電池で 2 週間持続可能であり、バッテリーを交換すれば繰り返し使える耐久性を有するシステムを作り上げることが最終目標である。なお、取り付け／バッテリー交換時は、1 アンカーデバイスにつき 15 秒未満での取り付け／交換可能であることも運用上の目標に含める。

研究内容の革新性、独創性、新規性

近年のエッジコンピューティング関連技術は、ハードウェア・ソフトウェアともに十分に発展しているため、現状社会実装を行い、バランスの良いハードとソフトの組合せの合理的なシステムを構築することが新規性の高い研究開発姿勢といえる。そのような理由から、エッジコンピュータとしては、Raspberry Pi、Jetson などの候補もあるが、まずは今回の前提条件に合致する Spresense を採用する。Spresense は小型・低消費電力・カメラ画像分析が可能であり、既に JAXA のプロジェクトにおいて宇宙における放射線耐性が証明されている。これを用いて原子炉建屋内に特化した組み込みシステム設計・検証を進めるものとする。

また単に、UWB（無線式）とカメラ画像分析（光学式）を別々のリアルタイム位置測位機能として利用するだけでなく、それぞれの機能を補完的に組み合わせることで、環境状態に応じた頑強なリアルタイム 3D 位置測位を実現できることが、独創性の高い点といえる。

研究効果、有効性、発展性、相乗効果

研究目標が達成された場合

- 1 基本的に製品としても用いられる回路モジュール等を主要構成部品として使用していることから、迅速な実用化・製品化が可能といえる。
- 2 今回用いている UWB は、ワイヤレス高速データ通信の特徴も有するため、単にリアルタイム 3D 位置測位だけでなく、限定空間における高速データ通信を実現する無線ネットワークへ発展させられる可能性も有する。
- 3 近年は、カメラ画像分析（フォトグラメトリ・深層学習）に基づく環境認識研究が急速に発展している。そのため、原子炉建屋内で複数カメラ画像分析・無線通信・長時間運用を想定している提案デバイスは、今後の廃炉研究プラットフォームとして、大きく貢献できるものと考ええる。

研究計画、研究遂行能力、研究体制の妥当性

研究体制は、岐大・東大・LM・福島高専・名大・原科研の 6 機関で構成される。研究遂行能力として、東大と LM が先行研究において無線 UWB を用いたリアルタイム位置測位の実績を有しており、福島高専が屋内カメラ画像分析に基づくリアルタイム位置測位およびカメラ等基盤機器の耐放射線試験の経験を有する。また名大は、JAXA などで衛星の電磁波抑制材料として使用実績があり、それらの要素技術を取りまとめ統合システムを実現し、岐大が検証を行うという構成である。

研究計画は

- (1) 複数カメラ画像分析によるリアルタイム 3D 位置測位システムの実現【R4～R5】
 - ・ 作業員のためのカメラ画像分析に基づく 3D 位置測位機能の開発検証（岐大）
 - ・ カメラ画像分析に基づく 3D 位置測位機能のロボット検証（福島高専）
- (2) 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位機能の実現【R4～R6】
 - ・ 作業員のための UWB に基づく 3D 位置測位機能の開発検証（東大・LM）
 - ・ UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証（名大）
 - ・ UWB に基づく 3D 位置測位機能のロボット検証（福島高専）
- (3) カメラ画像分析と UWB を組み合わせた組み込みシステムの開発・検証【R5～R6】
 - ・ システム統合・検証（岐大）
 - ・ 耐放射線試験（福島高専・原科研）

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

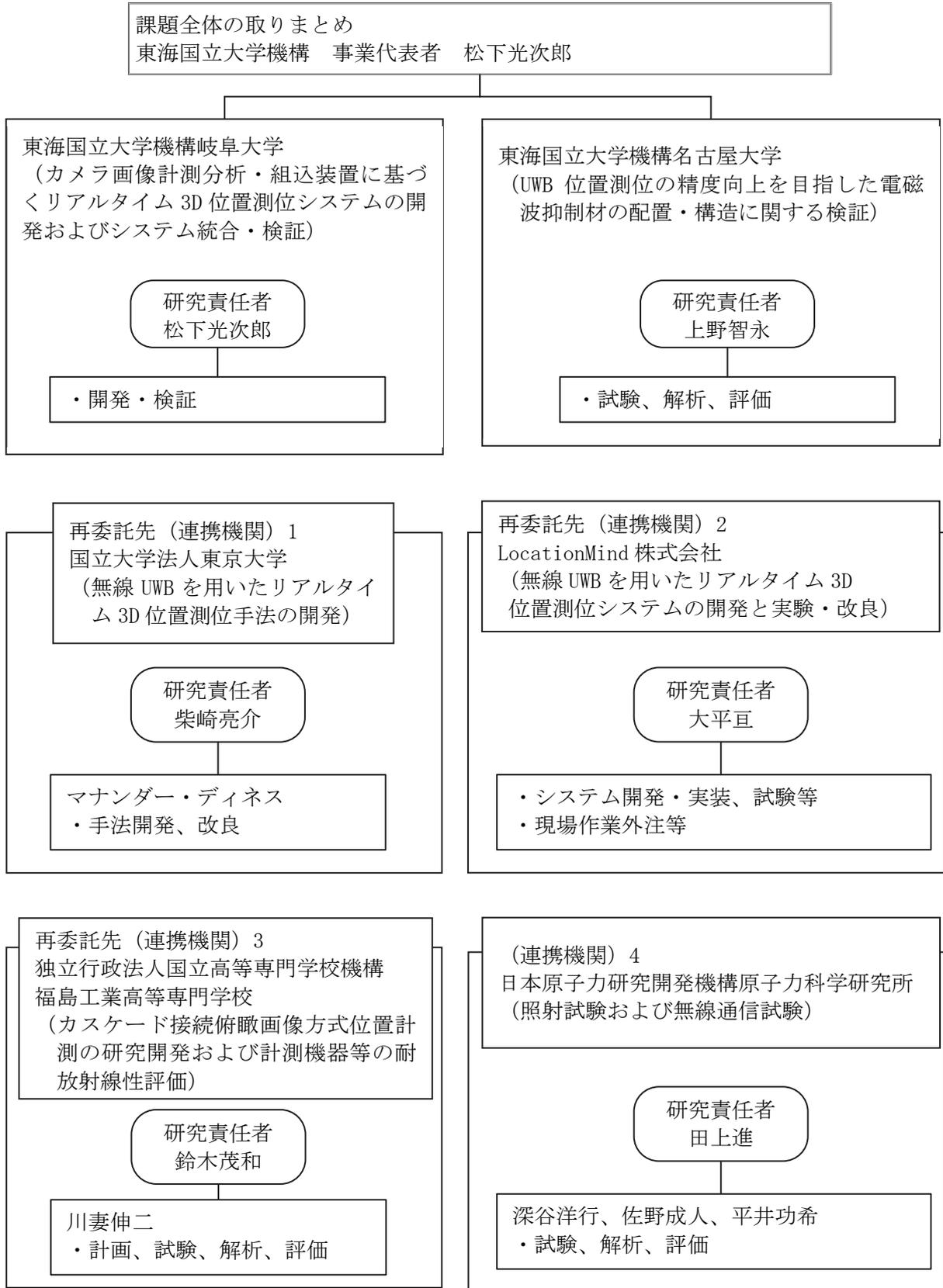


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和4年度の成果の目標および業務の実施方法

東海国立大学機構岐阜大学

(1) 研究目標

複数カメラ画像分析に基づく 3D 位置測位・組込システムの第一次開発

(2) 方法

カメラ画像撮影機能・エッジコンピューティング（画像分析）機能・無線通信ネットワーク機能を有する組込装置の開発を開発する。また、簡易取り付け・充電池の簡易交換を可能とする上記組込装置用・筐体設計製作を行う。最終的に、複数の組込装置を使用して、3D 位置測位の基本アルゴリズムの構築・検証を行う。

また、福島高専・JAEA と協力して、組み込み装置の耐放射線試験を行う。

東京大学

(1) 研究目標

無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発

(2) 方法

原子炉建屋内での UWB 測位データはマルチパスの影響を受けるため、受信機には複数の反射信号が到達する。直達波を確実に捕捉し測位精度を向上させるためのデータ解析が必要である。直達波の判定方法、LOS (Line of Sight) 条件の判定方法、反射波の影響を最小化する位置計算手法等を開発する。さらに、マルチパスの影響を最小化するための UWB デバイス（アンカーポイント等）の配置方法および配置時間を最小化するための方法を開発する。

この開発のために、いくつかのフィールドテストを LM（株）と共同で設計する。

LocationMind 株式会社

(1) 研究目標

無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位システムの開発と実験・改良

(2) 方法

マルチパス環境下での UWB 測位精度を明らかにする。このために複数の金属設備等が配置された密閉空間（共同溝や地下倉庫など）でフィールド実験を行う。この実験に基づき、東大が開発した直達波判定方法等を比較・評価する。同時に機器の設置方法、機器校正を含む展開方法についても比較・検証を行う。さらに、マルチパスの影響を最小化するための位置計算手法の比較・評価も行う。これらの評価結果に基づき方法の改良を東大と連携して行う。

また、バッテリーを長持ちさせるために、デバイスの消費電力を最小にする必要がある。これは、未使用時にスリープモードに設定することで実現する。また、電池交換の方法も検討し、15 秒以内に交換できるようにする。

福島工業高等専門学校

(1) 研究目標

カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発および計測機器等の耐放射線性評価

(2) 方法

これまで福島高専にて実施してきた高線量下での「俯瞰画像方式位置計測の研究開発」の成果を基に、見通しの効かない場所でも位置計測できるように、カスケード接続によるロボットの位置計測手法を構築する。具体的には、原子炉建屋内で位置が既知な場所に設置したこれまでのベースステーション上の俯瞰カメラと、対象ロボットとの間に中継ロボットを配置し、ベースステーション上の俯瞰カメラにて中継ロボットの位置を計測し、中継ロボットに搭載した俯瞰カメラにて、対象ロボットの位置を計測しようとするものである。

また、耐放射線性評価では岐大および東大等と連携して、UWBおよびカメラ画像計測・分析に必要な機器について、耐放射線性の評価が必要となる電子部品等のリストアップを行い、これまでの電部品等の照射試験結果により、あるいは必要に応じて新たに照射試験を実施して、耐放射線性を評価しようとするものである。

東海国立大学機構名古屋大学

(1) 研究目標

UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証

(2) 方法

電磁波遮蔽・吸収材料を作製し、電磁波遮蔽・吸収実験を行って通信への影響を評価する。実験検証は、東大およびLM（株）が行う。

日本原子力研究開発機構

(1) 研究目標

組込装置「Spresense」および無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の検証試験

(2) 方法

廃棄物安全試験施設（WASTEF）では、ガンマセルを用いた照射試験の実施に向けた実験室内の整備および予備照射試験を実施する。予備照射試験では積算吸収線量の評価手法を確認するとともに、モニタシステムの構築を進める。また、バックエンド研究施設（BECKY）では、無線通信試験を実施する試験場の整備および試験条件の検討を実施する。

3. 令和4年度の実施内容および成果

3.1 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム 3D 位置測位システムの開発およびシステム統合・検証

基本システム開発として、ケース設計・カメラ画像分析プログラミング・無線通信機能プログラミングを行った。また、位置測位システムの開発として、ネットワークプログラミング・位置測位アルゴリズムの構築を行った（第一次システム試作）。

3D 位置測位・組込システムの構成

第1段階として、指定の3次元位置・姿勢の複数のソニー社製 Spresense 組込装置を配置し、黄色い球体を対象として各組込装置でカメラ画像分析（画像内・物体重心点算出）を行い、その重心結果を無線通信 Wi-Fi ネットワークにて、ホスト PC にデータ転送し、黄色い球体の重心の 3D 位置測位算出するシステム開発を行った（図 3.1-1）。

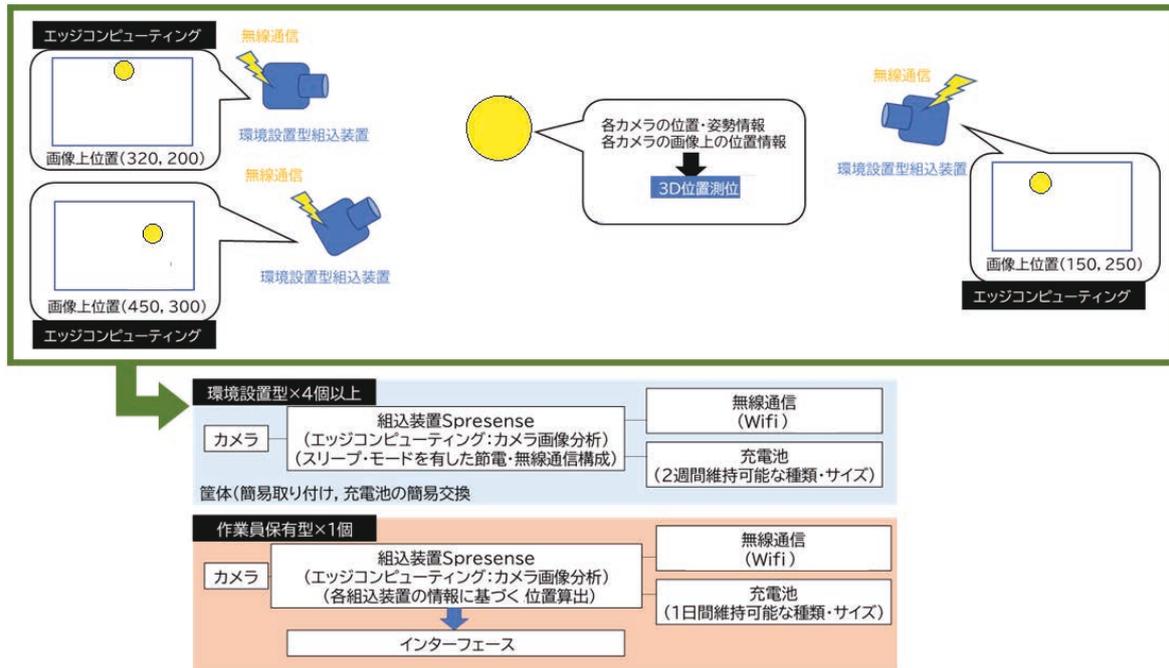


図 3.1-1 システム構成図

カメラ画像分析に基づく物体認識

ソニー社製組み込み装置単体での物体認識に基づく重心点算出プログラムを作成し、消費電力の確認および計測対象 60 mm の球体に対する画像解像度・分析時間・検出力に関する精度検証を行った。結果、無線通信無・ディスプレイ有でカメラ画像分析時の消費電力は 0.78 W（4.951V0.158A）と判明した。また、表 3.1-1 に示されるように、物体認識性能として Spresense（図 3.1-2）では1回の処理に最低 0.28 秒かかるということ、60 mm の球体で 158 cm までが現状の限界と確認した。今後、ハードウェア的にレンズを交換し、焦点距離を変更することで検出距離・範囲の改善を行う予定である。また、他の組込装置 Raspberry Pi や Vim4 との解像度を含めた性能の比較も行う予定である。

表 3.1-1 組込装置 Spresense による物体認識精度結果

	低解像度分析	中解像度分析	高解像度分析
対象画素	224×224 (圧:1/16)	112×112 (圧縮:1/4)	56×56 (圧縮:1/1)
分析時間	0.28 秒	0.28 秒	0.28 秒
最大検出距離	88cm	140cm	158cm



図 3.1-2 組込装置 Spresense による物体認識と重心算出の様子

無線通信ネットワーク (Wi-Fi)

組込装置 Spresense 間の無線通信方式として、Wi-Fi チップ (ESP-WROOM-02) を使用した無線通信ネットワークの構築を行った。今回のシステムでは、特に、複数の組込装置を網羅的に配置し、広域でのデータ通信網の実現が前提となるため、各組込装置には、単にデータ無線送信機能だけでなく、他の組込装置からデータを受信して、その他の組込装置に送信するというような中継器の役割を実現することも重要課題であった。

その結果、無線組込装置で 1 対 4 の相互間データ通信が可能であることを検証し、中継プログラムの構築に成功した。これにより、無線通信可能距離よりも遠距離な組込装置は中継によるデータ転送が可能になった。なお、利便性向上のため、各組込装置がホスト組込装置 (3D 位置検出担当) までの自らの位置を把握して、最適なデータ中継とするためのアルゴリズムも今後構築する予定である。また、Wi-Fi 搭載組込装置は、無線通信有・ディスプレイ無で 0.73 W (4.919 V、0.149 A) と消費電力を確認しているが、一般に消費電力が高いと言われていたため、低消費電力系 Zigbee 系 TWE-Lite の導入の可能性も今後検討する (図 3.1-3)。



図 3.1-3 Wi-Fi 搭載組込装置 Spresense による相互間通信に関するシステム概念図と結果

複数の組込装置 Spresense を用いた球体の 3D 位置測位システムの実現と検証

次に、カメラ物体認識機能と無線通信ネットワーク機能を組み合わせて位置測位システムを完成させ、球体 (黄色) を対象とした 3D 位置測位の基礎検証を行った。なお、検証の効率化のため、黄色・球体は 3.1.2 項と違い小型の直径 25 mm の物を使い、組込装置姿勢は水平として、300 mm 角のアルミフレームで構成した正方形の平面上に位置するものとして設置し、基礎機能・検証実験を行った。

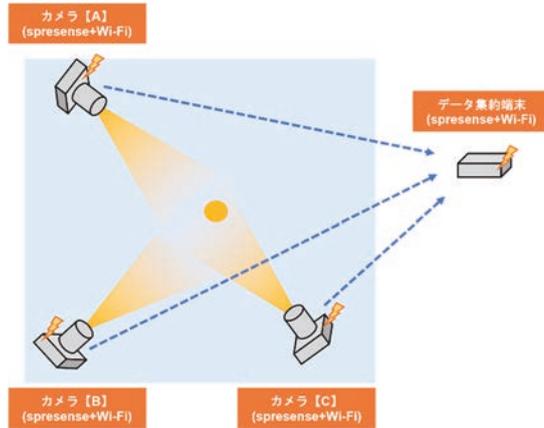


図 3.1-4 複数の組込装置（無線・カメラ画像分析）による 3D 位置測位のシステム構成概念図

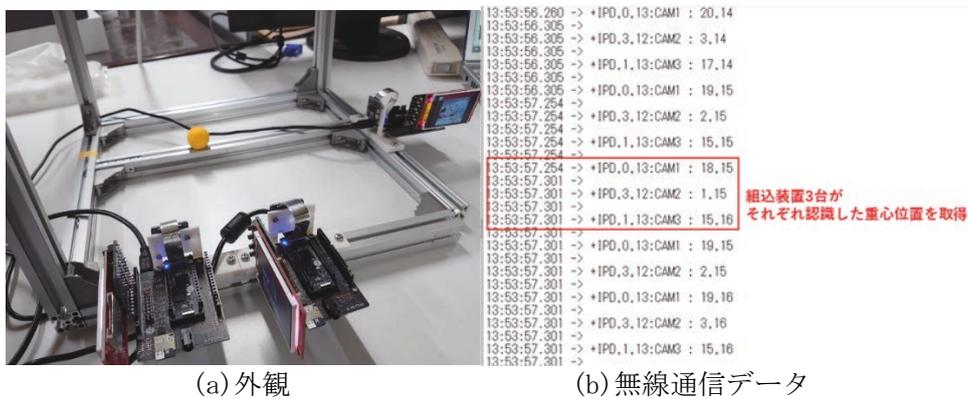


図 3.1-5 組込装置（無線・カメラ画像分析）3 台による 3D 位置測位検証の様子

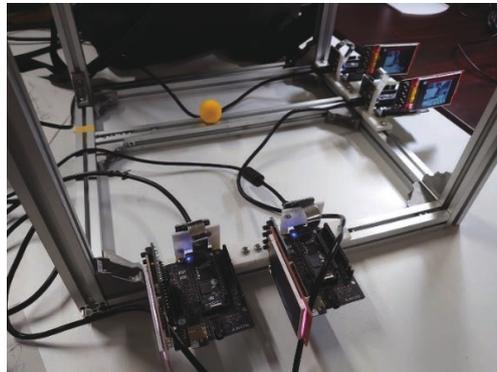


図 3.1-6 組込装置（無線・カメラ画像分析）4 台による 3D 位置測位検証の様子

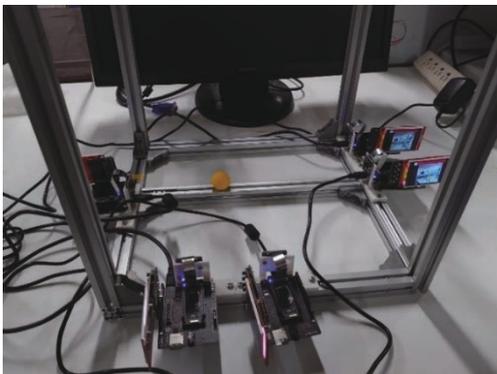


図 3.1-7 組込装置（無線・カメラ画像分析）5 台による 3D 位置測位検証の様子

表 3.1-2 3D 位置測位結果

	試行回数	真値(x, y, z)	算出値(x, y, z)
組込装置 3 台 (図 3.1-4) (図 3.1-5)	1 回目	(38, 170, 0)	(31.8, 183.9, 0)
	2 回目	(27, 140, 0)	(21.7, 143.7, 0)
	3 回目	(39, 113, 0)	(35.1, 72.1, 0)
組込装置 4 台 (図 3.1-6)	1 回目	(57, 172, 0)	(73.4, 173.9, 0)
	2 回目	(32, 190, 0)	(40.3, 200.0, 0)
	3 回目	(7, 222, 0)	(12.5, 239.2, 0)
組込装置 5 台 (図 3.1-7)	1 回目	(34, 153, 0)	(74.5, 179.5, 0)
	2 回目	(18, 142, 0)	(86.6, 171.8, 0)
	3 回目	(27, 175, 0)	(48, 181.1, 0)

結果として、カメラ 3 台における理想値と算出値の誤差は約 30 mm、カメラ 4 台における理想値と算出値の誤差は約 20 mm、カメラ 5 台における理想値と算出値の誤差は約 70 mm となった。特に、5 台の場合は、スペースの都合上、カメラ画像の外周近い位置であったため、歪みによる誤差発生と考えられる。現状、レンズ変更の検証を想定していたことから、レンズの歪み補正を行っていないため、生じる誤差と判断する。今後、レンズ選定と歪み補正での精度結果を出す予定である。

迅速な取り付けおよびバッテリー交換が可能なケース設計

迅速取り付け可能な組込装置ケースとして、金属部の取り付けを想定して、ネオジウム磁石を用いたケース設計を行った。現状までに、平らな金属面に対しては効果的な取り付けとなることを確認した上で、非平面の金属においても簡単に取り付けられるネオジウムマグネットシートを開発した。

また、バッテリー交換も重要な課題であるため、こちらもネオジウムマグネットを前提としたメカニズムを開発した (図 3.1-8 ~ 図 3.1-11)。



図 3.1-8 2種類の曲面取り付け用ネオジウムマグネットシート

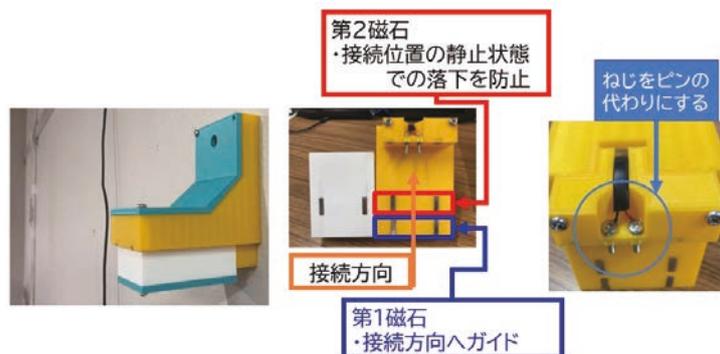


図 3.1-9 バッテリー着脱メカニズム (試作 1 : スライド式)

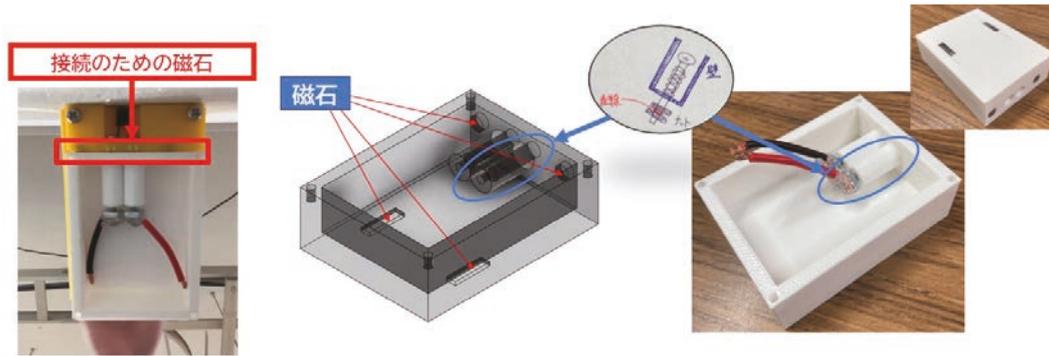


図 3.1-10 バッテリー着脱メカニズム (試作2: バネ式)

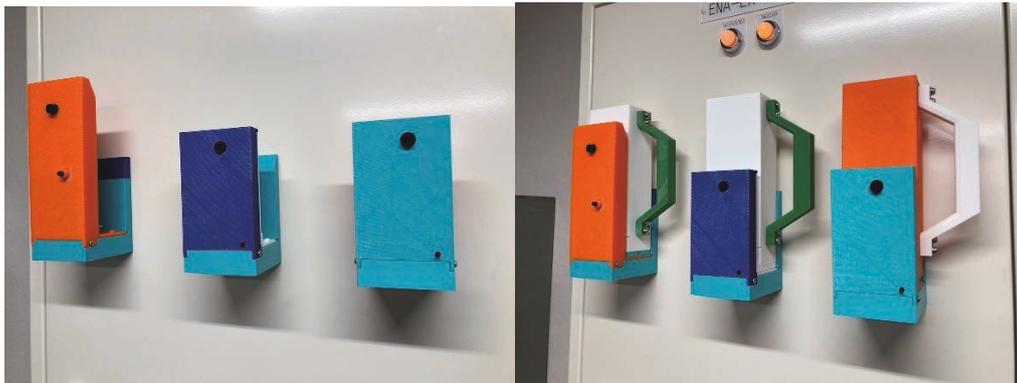


図 3.1-11 現在の組込装置ケース (バネ式・バッテリー着脱メカニズムを採用)

組込装置 Spresense の耐放射線試験

福島高専グループおよび原科研グループと協力をして、組込装置 Spresense の耐放射線試験を行った。15 分間の照射 (240) を 2 台、30 分間の照射 (480) を 2 台、45 分間の照射 (720) を 2 台行い、装置の動作確認を行った。結果、全ての SD カードは不能となったが、その他の機能は問題なく動作することを確認した (図 3.1-12、図 3.1-13)。



図 3.1-12 耐放射線試験に用いた組込装置 Spresense 1 台



図 3.1-13 耐放射線試験に用いた 6 台と比較検証のための 2 台

3.2 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発

UWB を用いた測位システムを構築するには、使用するデバイスが計測信号を出力するようにする必要があります。このため、選定したデバイスの仕様書から必要な信号や出力構造などを検討し、ファームウェアの改良を行って、計測データを記録できるようにした。

次に、信号特性を項目とその計測方法を検討し、実際の環境と同様にマルチパスが発生するフィールド環境で信号特性を計測した。これにより、測位精度を向上するための設置や使用方法、計算方法などの開発を開始することができた。

この一連の開発を LM と連携して行ったことから、本報では分担項目を以下のように区分して報告する（図 3.2-1）。

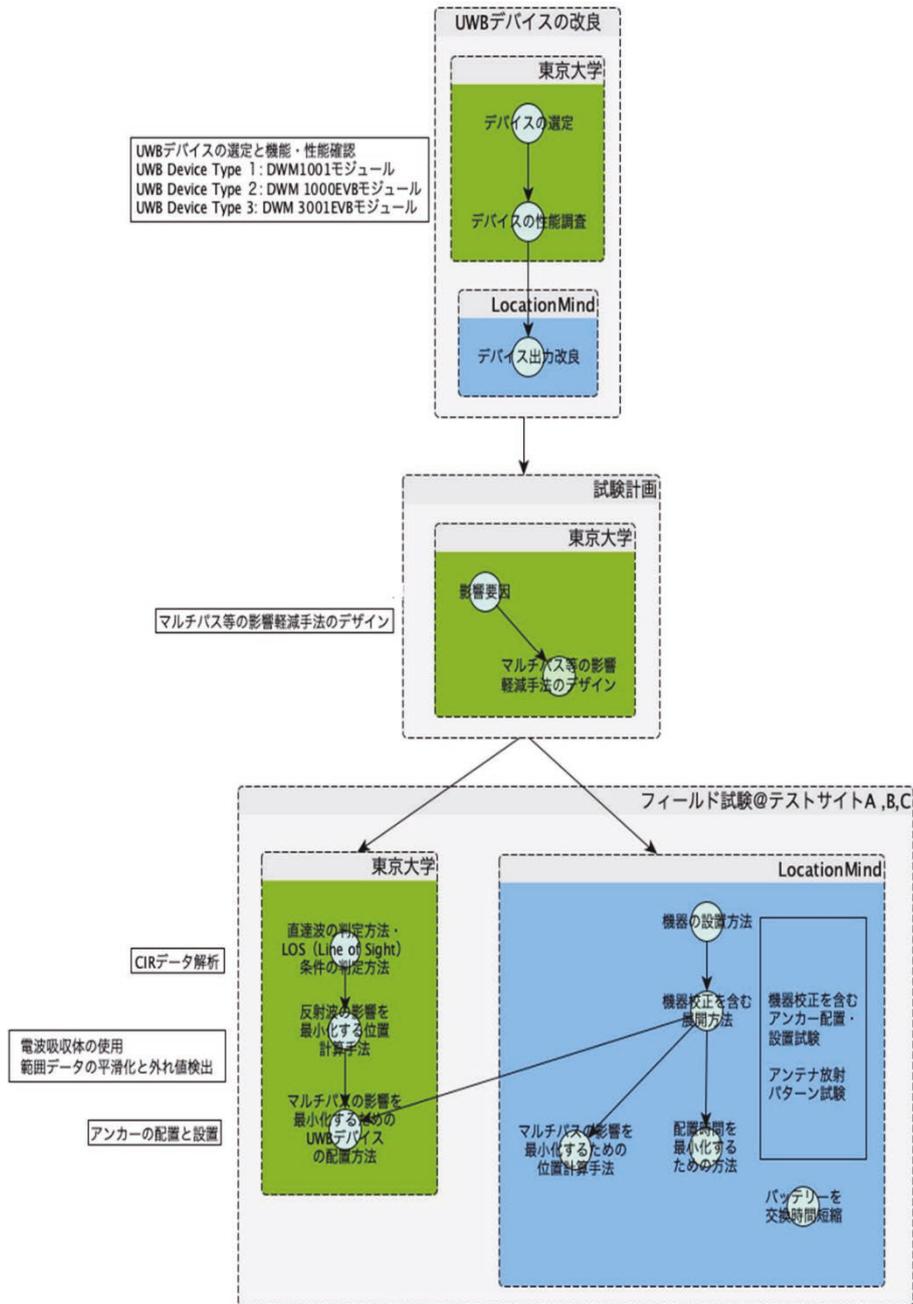


図 3.2-1 開発および試験の分担

UWB デバイスの選定と機能・性能確認

UWB 信号の特性を調べ、プロトタイプシステム開発のために、以下の 3 種類のデバイス機能・性能を調べ、試験利用した。

1. デバイスタイプ 1: Qorvo® DWM 1001EVB (図 3.2-2)
2. デバイスタイプ 2: Qorvo® DWM 1000EVB
3. デバイスタイプ 3: Qorvo® DWM 3000EVB

デバイスタイプ 1 とデバイスタイプ 2 は、UWB モジュール (Qorvo® DWM1000) を使用しており、特性や性能に共通点が多い。デバイスタイプ 1 は、RTLS (Real Time Location System) のフィールドテストやアプリケーション開発用に設計されていることから、信号解析に用いるための CIR (Cumulative Impulse Response: 累積インパルス応答) のようなオリジナル計測データを記録、出力することができない (図 3.2-2)。デバイスタイプ 2 は、オリジナル計測データを記録し、UWB 信号の特性、アンテナ性能測定、信号電力測定、マルチパス研究を行うために設計されている。これらのデバイスはいずれも 4 GHz または 6.5 GHz の周波数帯を使用する (表 3.2-1)。デバイスタイプ 3 は、UWB モジュールの新バージョン (試験計画時点) で、DWM3000 シリーズモジュールをベースにしている。デバイスタイプ 1、2 の機能に加え、チャンネル 5 (6.5 GHz 周波数) または 9 (8 GHz 周波数) が使用可能であり、他に新たな機能がいくつか追加されている。チャンネル 9 (8 GHz の周波数) は、屋内外で使用できる UWB として日本の電波規則に適合している (巻末資料参照)。

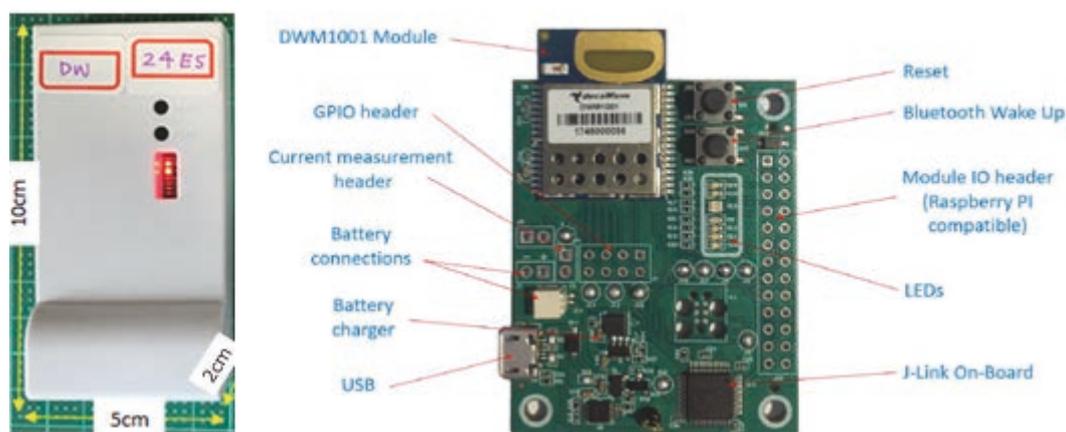


図 3.2-2 UWB Device Type 1, DWM1001EVB

UWB Device Type 1: DWM1001 モジュール

Qorvo® DWM1001 モジュールは、IEEE 802.15.4-2011 UWB を実装した Decawave の DW1000 Ultra Wideband (UWB) トランシーバ IC をベースとしている。これは、UWB と Bluetooth®を統合したモジュールで、アンテナ、全ての RF 回路、Nordic Semiconductor 社製 nRF52832、モーションセンサーを搭載している (図 3.2-3)。必要なインターフェースボードが既に実装されているため、ファームウェアのアップデートとソフトウェアのインストールおよびデバッグを行うことで、生データと CIR データのログを取ることができる。DWM1000 シリーズの周波数は、屋外での運用にのみ対応している。

- 10 cm 以内の測距精度
- UWB チャンネル 5 プリント基板アンテナ (6.5 GHz)
- 6.8 Mbps データレート IEEE 802.15.4-2011 UWB 準拠
- ノルディックセミコンダクター nRF52832

3.2-2

- Bluetooth®接続
- Bluetooth®チップアンテナ
- モーションセンサー 3軸加速度センサー
- 低消費電力スリープモードに最適化された消費電流： <math>< 15 \mu\text{A}</math>
- 電源電圧：2.8 V～3.6 V
- サイズ：19.1 mm×26.2 mm×2.6 mm
- DWM1001C の表示があるモジュールは、ETSI、FCC、ISED の各規制に適合
FCC ID: 2Aq33-DWM1001、IC: 23794-DWM1001

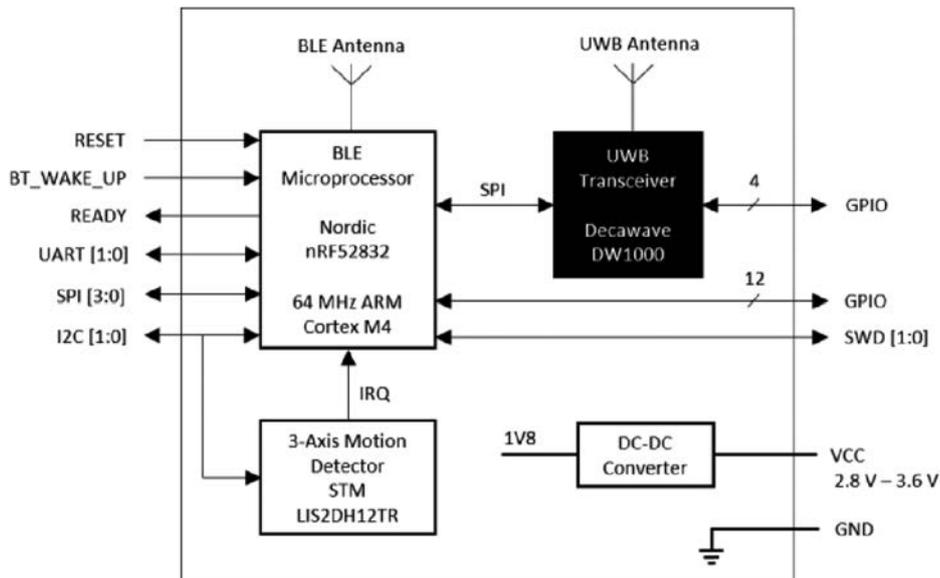


図 3.2-3 UWB デバイスの回路図, DWM1001EVb

表 3.2-1 DWM101 の技術仕様 1

Parameter	Description	Notes
RTLS System Performance		
X-Y location accuracy	<10 cm (typical)	Line-of-Sight (LOS)
System capacity / cluster	150 Hz	750 tags @ 0.2 Hz 150 tags @ 1 Hz 15 tags @ 10 Hz etc.
Max. Location Rate / Tag	10 Hz	
Min. Location Rate / Tag	0.0167 Hz	Every 1 minute
Max. # Anchors (theoretical)	Area Dependent	See section 5.1.1
Max. # Tags / cluster (theoretical)	9000	@ min. rate of 0.0167 Hz (every 1 minute)
Available Memory		
Flash Memory available to user	40kB	
RAM available to user	5kB	
Data Throughput		
Tags to gateway (sensor data)	Uplink or Downlink: 340 Bytes per second	Each tag
Anchors to gateway (sensor data)	Uplink:34 Bytes per 12 s Downlink:34 Bytes per 12 s	Each anchor
System Latency	100 ms	From tag to gateway
UWB Parameters		
UWB Channel	Channel 5 (6.5 GHz)	Fixed
Data Rate	6.81 Mbps	Fixed
PRF	64 MHz	Fixed
Preamble Length	128	Fixed
Preamble Code	9	Fixed

UWB Device Type 2: DWM 1000EVB モジュール

Qorvo® EVK1000 (図 3.2-4) は、2枚1組の EVB1000 ボードで、各ボードは、あらかじめプログラムされた複数の操作モード (図 3.2-5) で双方向間測距デモンストレーションアプリケーション「DecaRanging」を実行するように構成されている。この「DecaRanging」は、DW1000 IC (表 3.2-2) を制御してメッセージを交換し、電波到達時間を計算してボード間の距離を推定し、その結果をオンボードディスプレイに表示する。また、このモジュールは、双方向間の測距計測に加え、DW1000 の以下の機能を評価することができる。

- レンズ精度
- 送信スペクトル
- 電力/消費電流
- マルチパス耐性
- ブロッキングエミッション
- アンテナオプション



図 3.2-4 UWB Device Type 2, DWM1000EVB

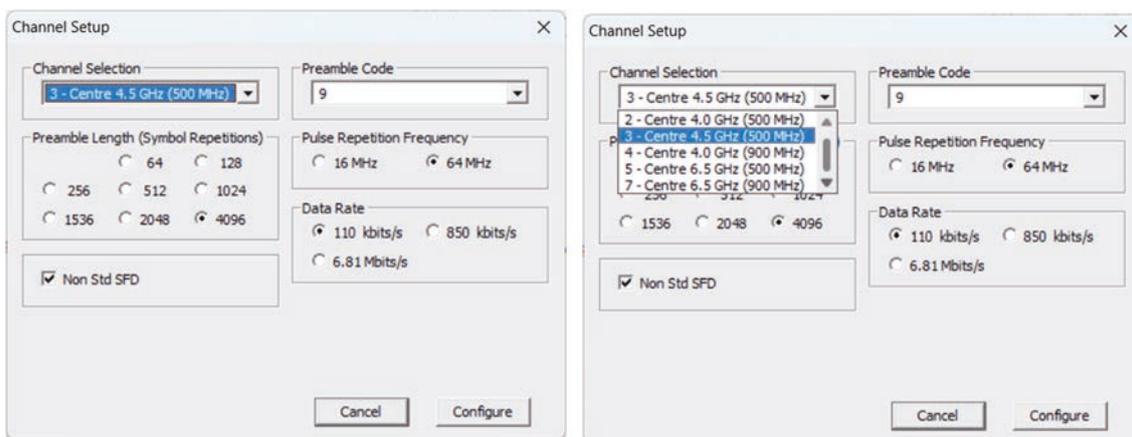


図 3.2-5 UWB 機器 (DW1000) ・生データと CIR を記録するための設定インターフェース

表 3.2-2 DW1000 の技術仕様

製品名	Decawave DW1000 UWB transceiver
規格	IEEE802.15.4-2011 compliant

- UWB PCB アンテナ (中心周波数 6.5G Hz)
- 6.8Mbps フレームデータエンコーディング
- ポイント・トゥ・ポイントの範囲：最大 60 m (ライン・オブ・サイト)
- ノルディックセミコンダクター nRF52832 SoC
- ARM Cortex M4F、512K フラッシュ
- Bluetooth®チップアンテナ
- 3 軸加速度センサー：STM LIS2DH12TR
- 低電力 - スリープモード：<5 μA
- 電源電圧：2.8 V~3.6 V
- 19.125 mm×26.125 mm×2.6 mm
- 34×1 mm ピッチのサイドカステラ
- シリアルワイヤデバッグ (SWD)
- 外部インターフェース
 - SPI スレーブ、I2C、UART
 - I2S オーディオ
 - NFC 対応
 - GPIO
 - Bluetooth ウェイクアップ

- PANS ファームウェア
 - 完全な RTLS とネットワークスタック - アンカー、タグ、ブリッジの各ノードに構成可能
 - 部分的または全面的なリフラッシュのためのユーザーオプション
 - タグの位置情報エンジン
 - BLE および UWB 空中ファームウェアのアップデート
- アプリケーションコード：
 - 双方向測距 (TWR) 型 RTLS
 - カスタムコード用アプリケーションメモリエリア
- Bluetooth®または SPI/UART コマンドによるコンフィグレーション
- MAC 層
- リソースアロケーション、フレーム&スロットタイミング
- ワイヤレスネットワーク
 - 発見、参加、離脱、スケーリング
 - クラウドからの再設定・管理
- セキュリティ
 - UWB パケットを AES で暗号化
- ファームウェアへの API アクセス
 - Nordic nRF52832 ペリフェラル (GPIO、I2C)

表 3.2-3 DWM1000EVB の操作モード

Model	Channel	Frequency GHz	Band width MHz	Data Rate	PRF	Preamble	Preamble Code	Non standard SFD
1	2	4	500	110 kbps	16	1024	3	Yes
2	2	4	500	6.8 Mbps	16	128	3	No
3	2	4	500	110 kbps	64	1024	9	Yes
4	2	4	500	6.8 Mbps	64	128	9	No
5	5	6.5	500	110 kbps	16	1024	3	Yes
6	5	6.5	500	6.8 Mbps	16	128	3	No
7	5	6.5	500	110 kbps	64	1024	9	Yes
8	5	6.5	500	6.8 Mbps	64	128	9	No

UWB Device Type 3: DWM 3001EVB モジュール

Qorvo® DWM3001EVB は、Qorvo® DW3110 IC をベースとした完全統合型超広帯域 (UWB) トランシーバモジュールで、アンテナ、全ての RF 回路、電源管理、クロック回路を 1 つのモジュールに統合し、統合を簡素化している。2 ウェイレンジングや TDoA (Time Difference of Arrival) ロケーションシステムで使用でき、10 cm の精度で資産の位置を特定し、最大 6.8 Mbps のデータレートをサポートする。また、DWM3000 は、FiRa™ PHY および MAC 仕様に準拠しており、他の FiRa™ 準拠機器との相互運用が可能である (図 3.2-6)。

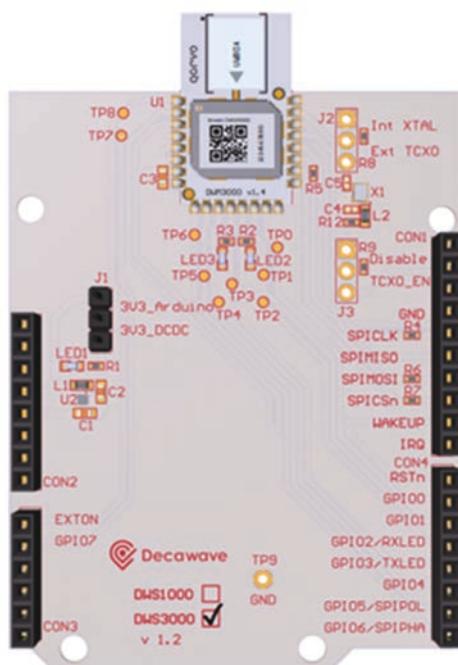


図 3.2-6 UWB Device Type 3, DWM3001EVB

- IEEE 802.15.4-2015 および IEEE 802.15.4z BPRF に準拠
 - FiRa™の PHY、MAC、認証に完全に適合
- 開発
 - UWB チャンネル 5 (6.5 GHz) および 9 (8 GHz) に対応
 - プログラマブル送信機出力パワー
 - フルコヒーレント受信機で最大限の距離と精度を実現
 - FCC & ETSI UWB スペクトルマスクに準拠設計
 - 電源電圧 VDD3V3: 2.5 V - 3.6 V
- VDD1: 1.62 V - 3.6 V
 - 低消費電力
 - データレート 850 kbps、6.8 Mbps
 - ハイデータ時の最大パケット長 1023 byte
- スループットアプリケーション
 - MAC サポート機能を統合
 - ホストプロセッサとの SPI インターフェース
 - DWM1000 とのピン・ピッチ互換性あり
- 双方向通信を利用した高精度リアルタイムロケーションシステム (RTLS)
- 位置認識無線センサーネットワーク (WSNs)

UWB デバイス DW3000 シリーズの特徴は以下の通りである。

- 低電力動作に対応した設計
- より高速な SPI に対応
- 世界各国の UWB 電波規制への対応
- UWB チャンネル 9 の動作に対応 (TELEC/日本市場で重要)
- AES-256 の暗号化により、安全なタイムスタンプが可能
- IEEE Std 802.15.4z™-2020 に準拠。

① マルチパス等の影響軽減手法のデザイン

UWB デバイスを使った測距において、通常は「タグ (tag) 」と「アンカー (anchor) 」という 2 つの役割を持つデバイスを使用する。「タグ」とは、移動可能なオブジェクトや人物に装着される小型の UWB デバイスのことで、UWB 信号を送信し、周囲のアンカーからの応答を受信して、自分自身の位置を計算する。位置情報は、測距システムによって計算する。一方、「アンカー」とは、空間内に固定された UWB デバイスのことです。アンカーは、タグから送信される信号を受信し、自身の位置情報との比較からタグの距離を計算する。

マルチパス環境下での位置精度を向上させるために、以下の試験項目を考えた。

1. CIR データ解析
2. アンカーの配置と設置
3. 電波吸収体の使用
4. 範囲データの平滑化と外れ値検出

CIR データ解析

UWB 信号の特性を理解するために、LOS:見通し環境と NLOS(Non Line of Sight):見通しなし環境における CIR データの解析が必要である。デバイス間の正しい距離測定を計算するためには、LOS 信号を使用する。しかし、無線信号には周囲の物体からの反射や機器間に障害物による遅延したマルチパス信号が、LOS と NLOS の双方の環境下で発生する。

CIR データは信号の遅延時間と電波の振幅を基に、信号取得に関連する情報を提供する他に、「First Path」ピーク、「First Reflection」ピークおよびその他の後続ピークをみることが出来る。最初の信号経路が、LOS 測定に属したデバイス間の最良の距離測定を可能にするものである。しかし、マルチパス信号が第 1 経路の信号振幅を減衰する。直接信号と反射信号、それに対応する CIR データの概念を図 3.2-7 に示す。タグ間に障害物があるため、第 1 経路の信号は第 1 反射信号より低くなる。第 1 経路の信号がノイズ閾値以上であれば、センサーはこのピークを LOS ピークとして検出し、反射ピークがあったとしても正しい距離情報を提供する。しかし、第 1 経路が大きく減衰した場合、その振幅はノイズ閾値を下回り、センサーは第 1 反射を第 1 経路のピークとして検出し、距離測定に誤差を生じる。このような第 1 経路の誤認識は、ノイズ閾値と信号のプリアンブル長を長くすることで最小化することができるが、ノイズの閾値を上げる際に、ノイズのピークを最初の経路として誤って選択しないように注意する必要がある。

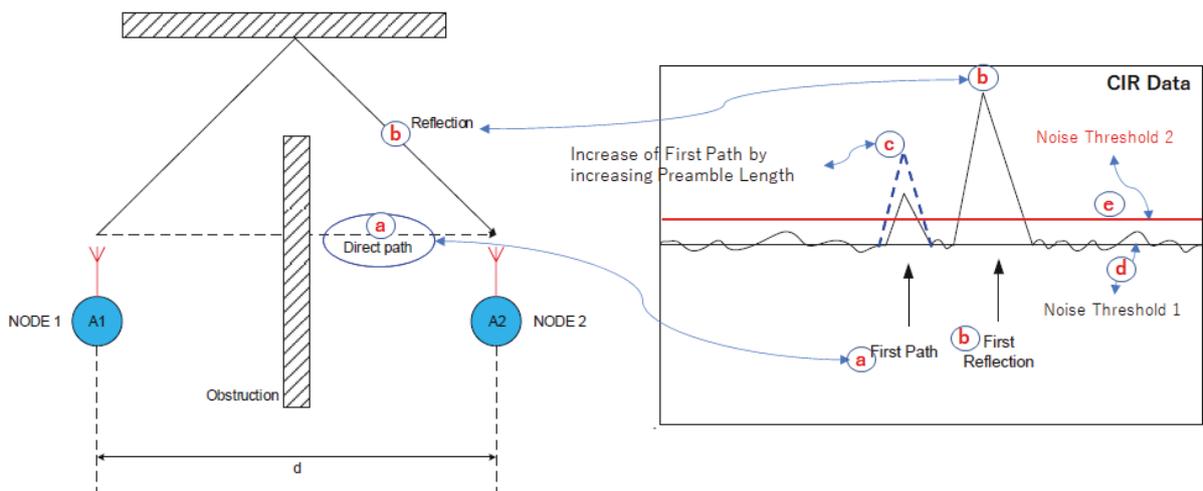


図 3.2-7 直接信号と反射信号の CIR データ

上述の特徴を確認するため試験計測を行うが、試験計測に先立ちデバイスから CIR データを出力させ記録するために、デバイスのファームウェアをアップデートし必要な改良を行った。DWM1001 モジュールは、RTLS アプリケーション専用に設計されているため、ファームウェアの変更ができないので CIR データの記録には使用しなかった。DWM1001 モジュールは DWM 1000EVB と同じ UWB モジュールを搭載していることから、性能と特性は DWM 1000EVB と同等であると考えられた。

CIR データを出力できるようにした DWM 1000EVB と DWM 3000EVB を用いてフィールドテストを電波暗室で行った（図 3.2-8、図 3.2-9）。電波暗室での信号試験からは以下の項目について検討する。

- 信号の伝搬損失
- 信号の放射パターン
- CIR データ

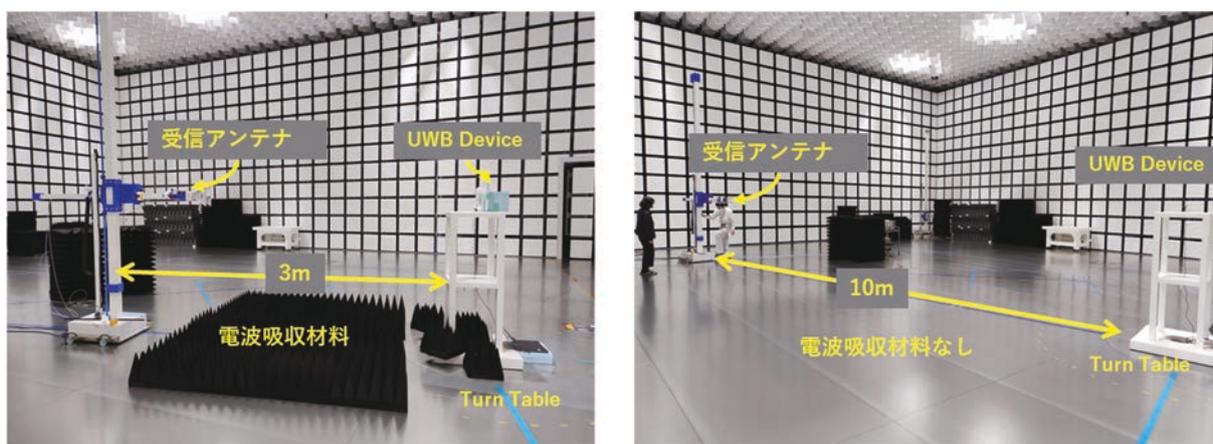


図 3.2-8 信号の放射パターンを測定（左：反射なし、右：床からの反射あり）

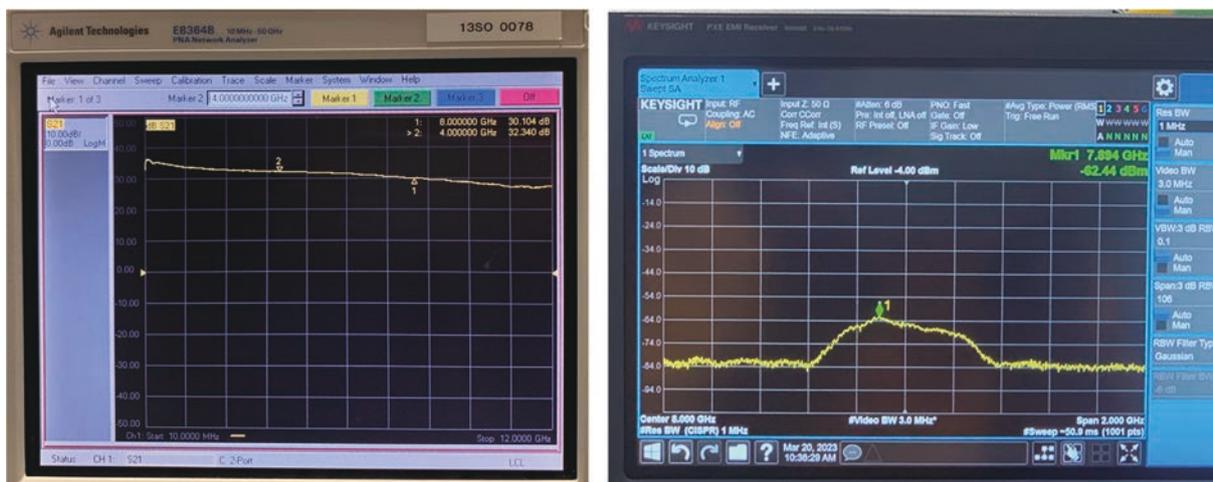


図 3.2-9 左：アンプとケーブルの利得の測定、右：UWB 信号のパワーの測定

アンカーとタグの間には、アルミ板を反射板として使用して障害物とした（図 3.2-10）。この試験計測では UWB 機器がどのように First Path ピークを選択し、他のピークがどのように現れるかを調べた。

電波暗室内で反射がない状況でのタグとアンカーの CIR データを図 3.2-10 中央グラフに、アンカーとタグの間に障害物が存在する状況を右グラフにそれぞれ示す。障害物により複数のピークが生成され、信号の総パワーが低下することを確認した。

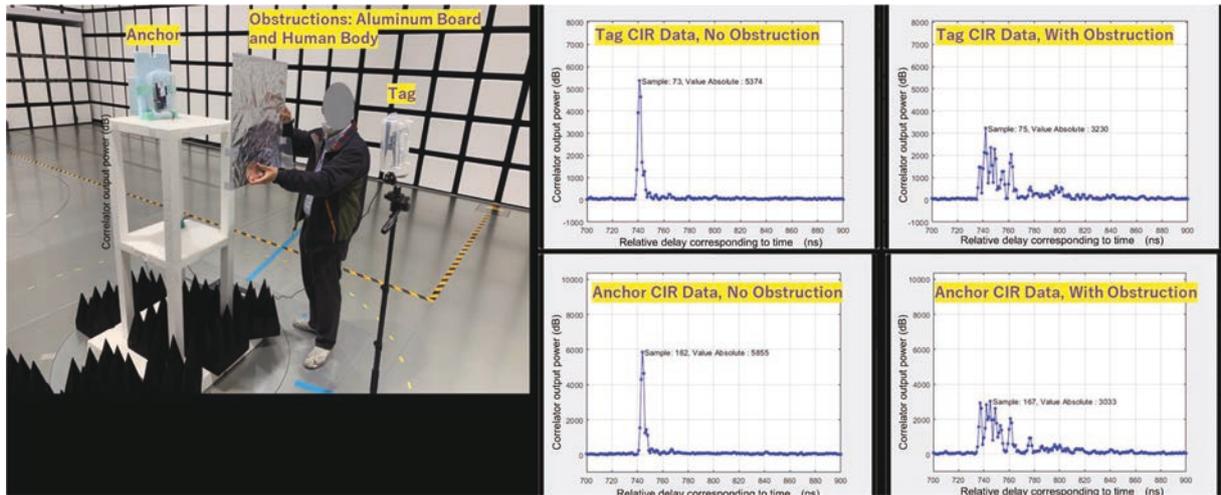


図 3.2-10 電波暗室での CIR データテスト（障害物有無の比較）

電波暗室の床に電波吸収材を敷き反射効果のない状況と電波反射板を用いて光反射効果のある状況での CIR データの比較してみると、「First Path」のピークは非常に明瞭でノイズ閾値を大きく上回り、「First Path」と「Peak Value」は一致する。この状況下ではマルチパスによる反射があってもピーク検出には影響がないことを確認した（図 3.2-11）。

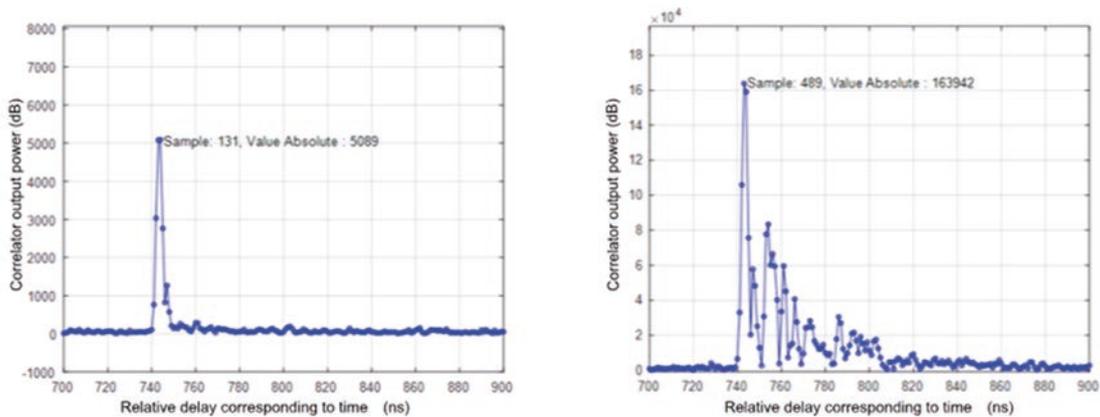


図 3.2-11 CIR データ反射効果の比較・左：床に電波吸収材（反射効果なし）
右：背面に反射板（光反射効果あり）

しかし、壁や周辺の物体による反射によってマルチパスの影響が大きい室内環境では、「First Path」と「Peak Value」が一致しないことがあり、この場合、「First Path」の振幅値は反射データである「Peak Value」よりも小さくなることもある（図 3.2-12）。このことはモジュール製造元の技術資料によると、ノイズの閾値以上であれば、「First Path」を選択する設計になっているため、正しいレンジデータの測定が可能であり、「First Path」が検出できる限り、正確なレンジデータの測定ができると考えられ、このことを今後確認していく。

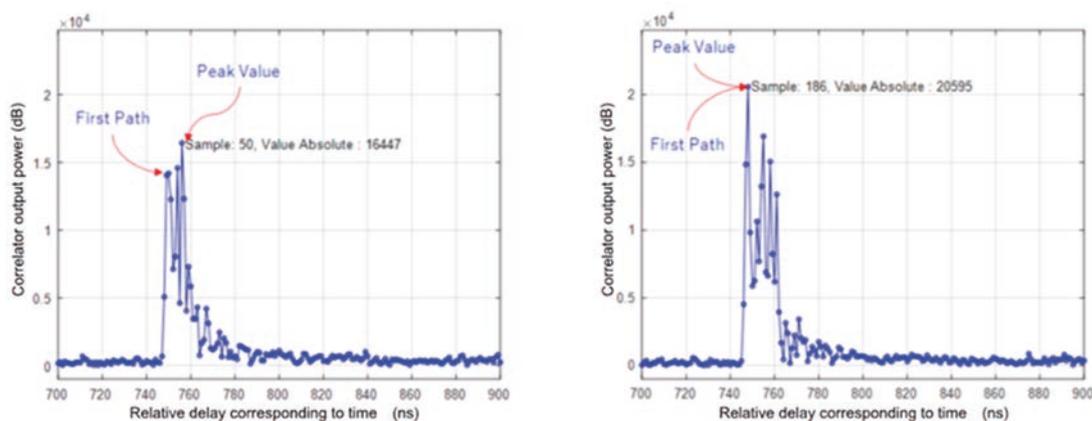


図 3.2-12 マルチパスによる First Path と Peak Value の関係

UWB デバイス製造元は、マルチパス領域において LOS 信号を正しく識別するために、より長いプリアンプルを使用することを推奨している。図 3.2-13 に、DWM3001EVB のプリアンプル長 (PL) が 128 と 4096 の場合の CIR データを示す。図からもわかるように、プリアンプル長が長くなるほど振幅値が大きくなる。これは、非常にノイズの多い環境での第 1 パスのピークを特定することを可能にする。

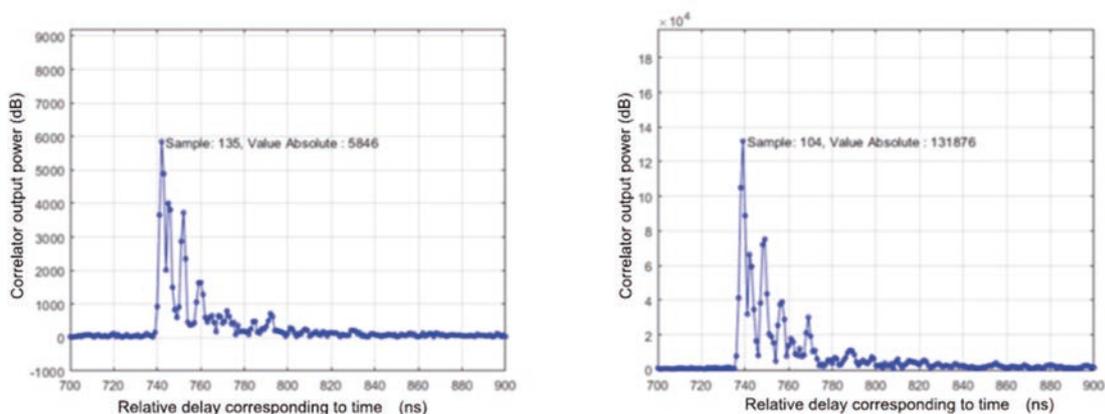


図 3.2-13 CIR データの振幅、左 : PL=128、右 : PL=4096

アンカーの配置と設置

配置：アンカーを配置する場所を選択する際には、少なくとも 3 つのアンカーが LOS を確認できるようにする必要がある。ただし、エリアが細長い場合や広い場合、または障害物が存在する場合には、可能な限り LOS を確保するために、より多くのアンカーを配置する必要がある。したがって、図 3.2-14 のように広い範囲をカバーするために、追加のアンカーを配置する必要がある。アンカー 9 と 10 がなくてもシステムは動作する可能性があるが、アンカー 6 やアンカー 3 からの信号がタグ 2 によって追加で受信されるため、障害物による大きな影響により正確な位置情報を提供できなくなる可能性がある。この場合、位置精度を向上させるために、現在のアンカーに加えて、アンカー 9 と 10 を追加配置することが推奨される。

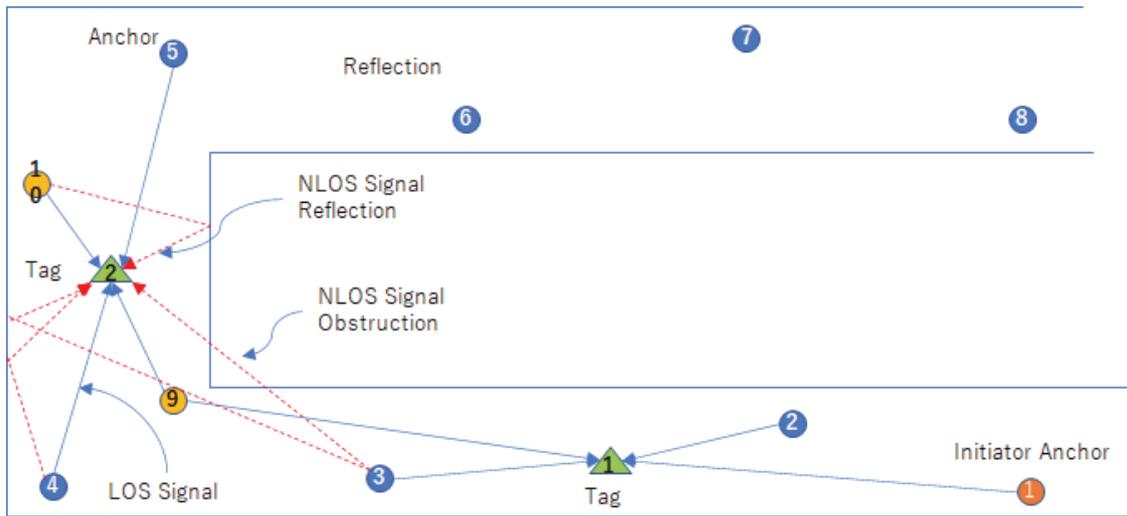


図 3.2-14 アンカーの設置レイアウト

設置：位置精度を高めるためには、アンカーを設定することが重要である。UWB RTLS では、位置データを出力するために最低 3 つのアンカーが必要であり、デバイスメーカーは 4 つのアンカーを使用することを推奨している。この試験では、1 つのネットワークに 4 つのアンカーを設定し、フィールドテストを実施した。さらに多くのアンカーを設定する場合は、各ネットワーク毎に 4 つのアンカーを割り当てられることになる。全てのアンカーの座標は正確に与える必要がある。アンカー座標の設定には 2 つの方法がある：

1. アンカー座標の自動設定
2. アンカー座標の手動設定

アンカー座標の自動設定は、Android でデカウェーブの RTLS (デバイスメーカー) プログラムを使用して、アンカー X、Y 座標を設定することができる (図 3.2-15)。ただし Z 座標は手動で入力する必要がある。アンカーを同じ高さにする事で、同じ Z 値を使用することを推奨している。アンカーが異なる高さにある場合は、アンカー位置の自動測定後に正しい Z 値を入力する必要がある。この方法は、4 つのアンカーが LOS 内にあり、測定中に障害物がない場合、数 cm の精度を提供する。アンカー座標の自動計測ができない場合は、手動で座標を提供する必要がある。アンカーを設定する別の方法として、半自動アンカーセッティングツールを開発した。このツールでは、イニシエータアンカーと他の 3 つのアンカーを手動で固定する必要がある。追加のアンカーは、アンカーをタグとして設定し、その位置を測定することで設定される。タグの位置が正しく測定されると、タグからアンカーにステータスが変更される (図 3.2-16)。

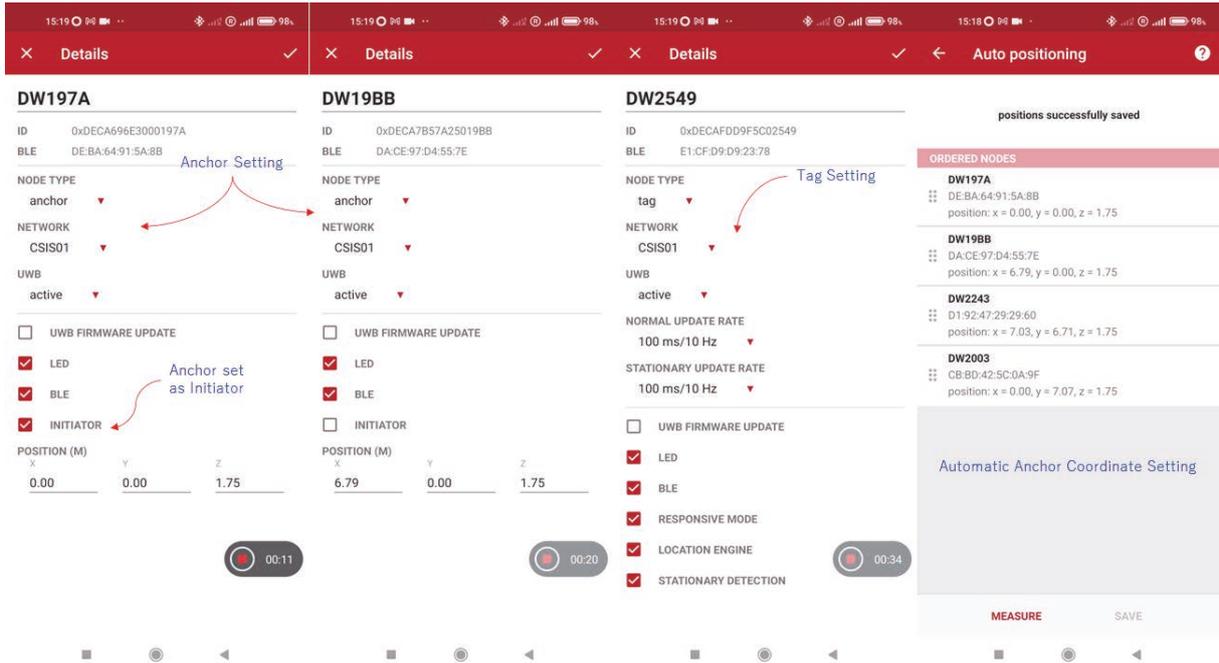


図 3.2-15 アンカー座標の自動設定プログラムの例

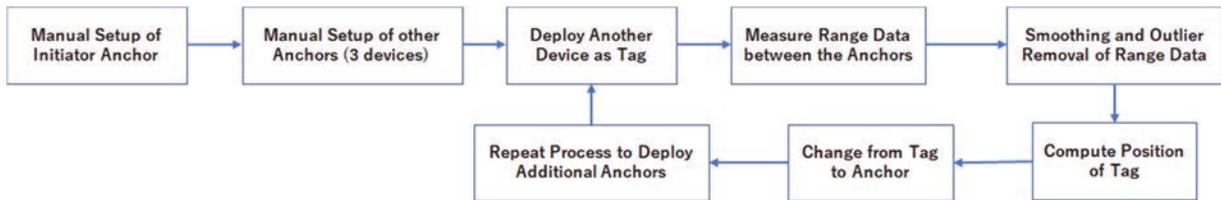


図 3.2-16 半自動アンカーセッティングツールの利用手順

電波吸収体の使用

アンカーが金属壁の近くに設置されている場合や、アンカー装置の背後に金属面がある場合、UWB 装置の裏側を電波吸収材料で覆うことで反射信号を最小限に抑えることができる場合がある。この材料で、デバイスの裏側から送信される無線信号を遮断する。

電波吸収材を使用し、信号の反射に与える影響について、基本的なテストを実施した（図 3.2-17）。UWB アンカーの裏側にアルミ板を置いた場合の反射データである（図 3.2-14 左）。この時、アンカーデバイスの裏側は電波吸収材で覆われていない。CIR データは、反射によりノイズが多くなる。次に、アンカーデバイスの裏側に電波吸収材を挿入した（図 3.2-18 右）。CIR データのノイズは少なくなる。今回、いくつかのテストを実施したが、この方法による実際の改善効果を判断するには至らなかった。

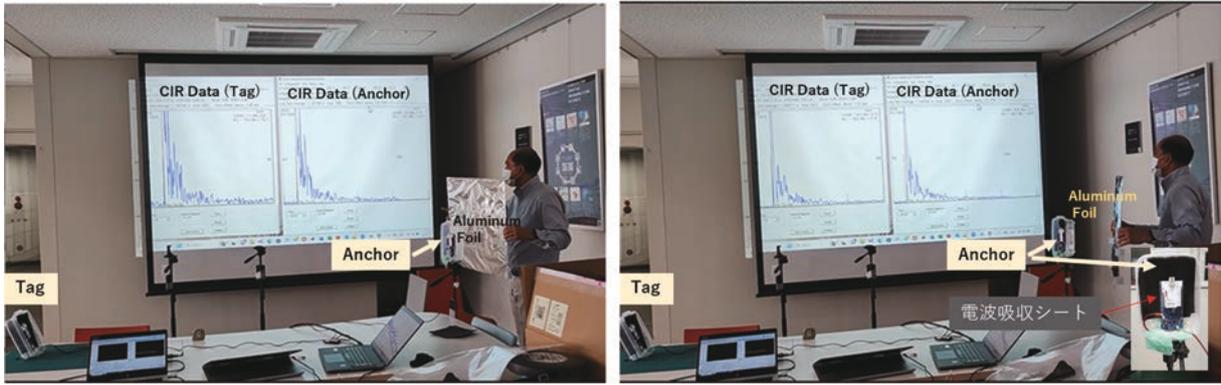


図 3.2-17 電波吸収体を使用した反射信号テスト

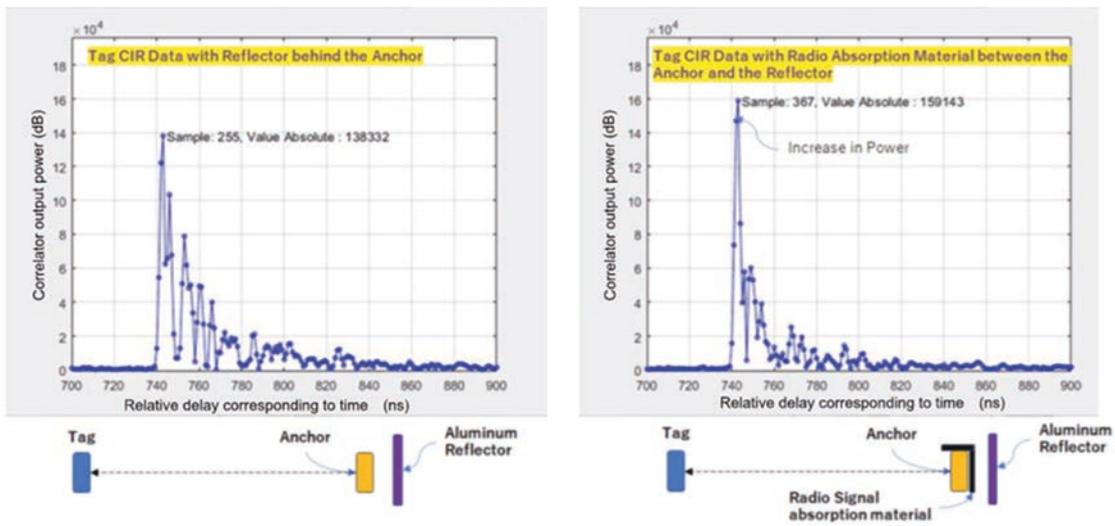


図 3.2-18 CIR データ、左：電波吸収シートなし、右：電波吸収シートあり

範囲データの平滑化と外れ値検出

範囲データを解析し、範囲データを平滑化し、外れ値を除去する適切な方法を探った。この方法は、ファームウェアのアップデートが必要なため、すぐに実システムに実装することはできないが、範囲データを平滑化し、平滑化した範囲データから位置を計算することで、位置精度が向上するかどうかを分析することが可能である。UWB 装置から 3 次元の位置データとアンカーとタグ間の距離データが出力される。そこで、範囲データを平滑化し、平滑化された範囲データから新たな位置を算出した (図 3.2-19)。

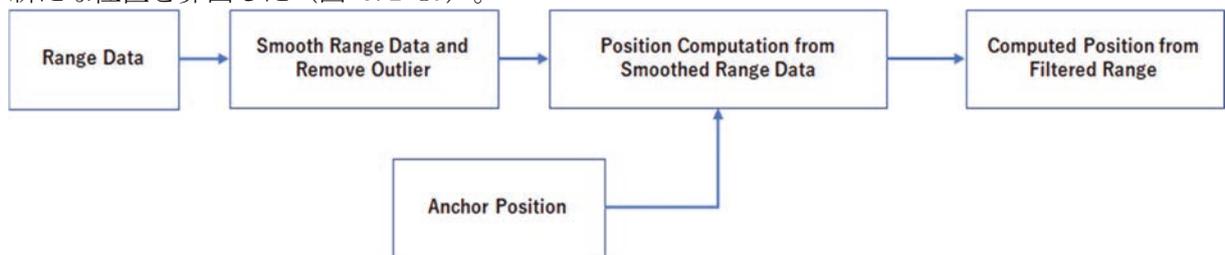


図 3.2-19 範囲データ平滑化の手順

範囲データのフィルタリングと外れ値の除去は、ウィンドウサイズ 10 で移動平均を使用することで行った。データはマルチパス環境のあるオフィスルームで、10 Hz のレートで記録された。タグはテーブルの上で固定した。アンカーID 8406 の範囲データにノイズがあるのは、アンカーとタグの間に障害物があるためと思われる。

フィルタリングして出力した範囲データを図 3.2-20 に示す。このフィルタリングにより、外れ値も除去された（図 3.2-20 右下）。レンジデータのフィルタリングは可能であり、リアルタイムでの実装は、機器のファームウェアレベルで行う必要がある。

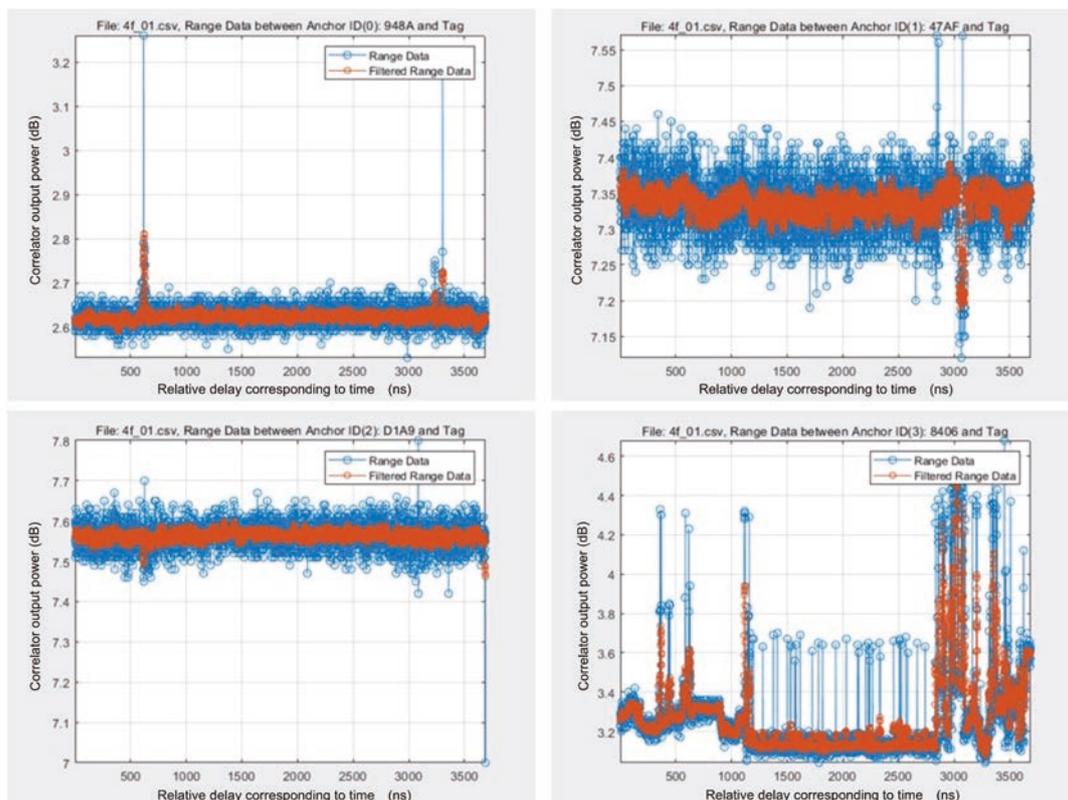


図 3.2-20 フィルタリングした範囲データ例

まとめ（東京大学の実施項目内容をまとめる。）

試験用 UWB センサーを選定し、測距計算に必要な要件の適合性を調査し、センサーからの出力を改良して以下の開発試験を行った。

- デバイスタイプ別に測距計算に必要な出力データの要件の整理：測距計算に必要なデータの種類を明確にし、試験用 UWB センサーの選定や測距計算方法の決定に役立てた。
- 測位精度に影響を及ぼすマルチパスの影響を確認する試験計測：マルチパスが測位精度にどのように影響するかを明確にし、測距計算方法やデバイスの設置方法の検討に役立てた。
- マルチパスの影響を軽減させる手法を検討：アンテナの方向性や配置調べた。また、電波吸収材の使用の効果調べた。デバイスの設置方法について検討し、アンテナの位置や高さ、アンカーの配置、電波吸収材の使用など適切な設置方法を選定することで、測距計算や測位精度の向上につなげる。
- 測距→測位→表示手法を検討：測距を行い、そのデータを基に測位を行い、最終的に位置情報を表示することを確認した。このフローで位置情報を表示させるインターフェースを開発する。

令和5年度の計画として、CIRデータの解析を進め、以下の検討を行う予定である。

- 電波吸収材が位置精度に与える影響
- プリアンブル長がファーストピークの検出に与える影響
- 重マルチパス領域での「First Peak」の検出

また、これらの検討を進め、実験を重ねて、本手法の改善効果を確認し、マルチパス環境下での位置精度の向上に役立つ予定である。フィールドテストでは、送信機と受信機の距離が5 m程度でも、通常の送信モードのUWB信号をスペクトラムアナライザで測定することができないため、CIRデータの信号測定に限定される。また、レンジデータのフィルタリングによって、どの程度位置精度を向上させることができるかを検討する予定である。この方法は、ファームウェアレベルでの実装が不可能な場合、後処理モードを検討する。

3.3 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位システムの開発と実験・改良 Raw データおよび CIR ログングツールの開発

UWB デバイスの信号特性を確認するには、以下の 2 つのタスクが必要である。

1. Raw データと CIR データのログを取得すること：UWB デバイスの評価装置は、位置と距離の情報しか出力しないため、位置精度やマルチパスの影響、機器の設定などを理解して分析するには、UWB の生データを解析する必要がある。この生データには、CIR から反射データを含む情報が含まれる。
2. 装置からの連続送信：送信装置の信号電力と放射パターンを測定するためには、スペクトラムアナライザで正確に測定できるよう、送信装置は UWB フレームを連続して送信する必要がある。

これらのタスクを遂行するには、デバイスを特別なオペレーションモードで動作させ、UWB デバイスをインターフェースボードに一体化させる必要がある。

そこで、DWM3001EVB デバイスと Nordic 社製インターフェースボード (nRF52840DK) を統合し (図 3.3-1)、UWB 測定の生データと CIR 出力をログするシステムを開発した (図 3.3-2、図 3.3-3)。具体的には DW3000 で利用可能なファームウェアの作成、インストール、セットアップ、デバッグを行った。

開発したシステムを使い、基本的に以下の設定で試験計測を行った。デバイスの周波数は 9 GHz、帯域幅を 500 MHz に設定したチャンネル 9 を使用 (図 3.3-4(左)) この周波数は日本の「電波法」の規制により UWB の使用が認められている (巻末資料参照)。このセットアップツールで、プリアンプル長、パルス繰り返し周波数、データレートの設定も可能である。製造元メーカーは、マルチパス環境でデバイスを使用する場合、より高いプリアンプル長を使用し、より良い位置精度を得ることを推奨している。そこで、低レート (128)、高レート (1024、4096) で試験を行った。図 3.3-2(右)は、スペクトラムアナライザで測定する伝搬損失解析用の信号出力電力を測定するための Continuous Frame Mode を出力する設定である。UWB パルスの変調を行わない CW (Continuous Wave) 信号の電力を測定するために連続波モードを使用した。

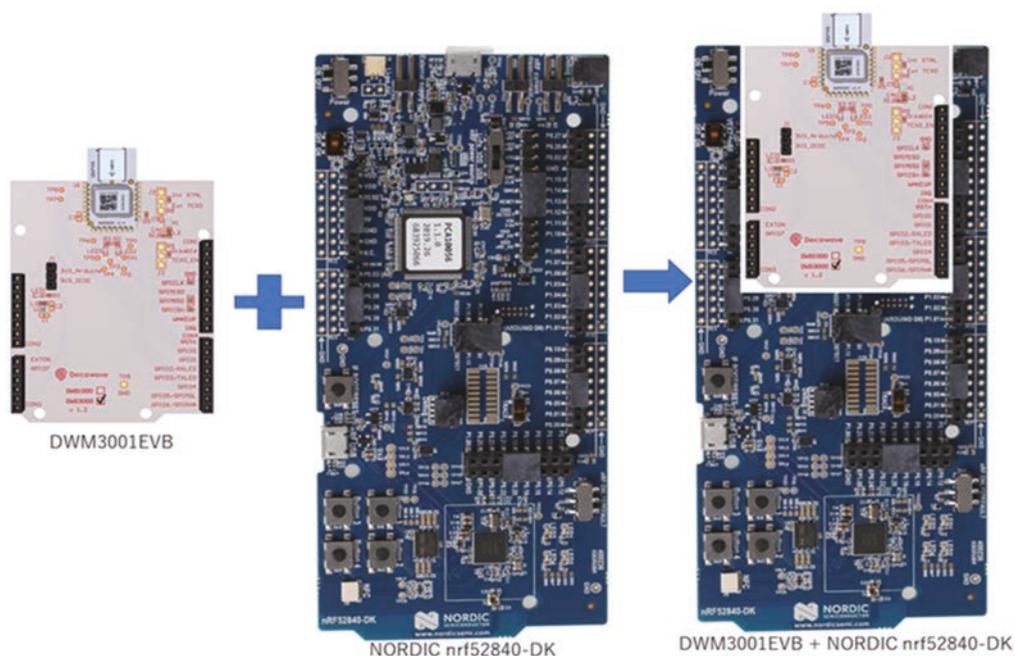


図 3.3-1 UWB デバイスとインターフェースボードのシステムインテグレーション

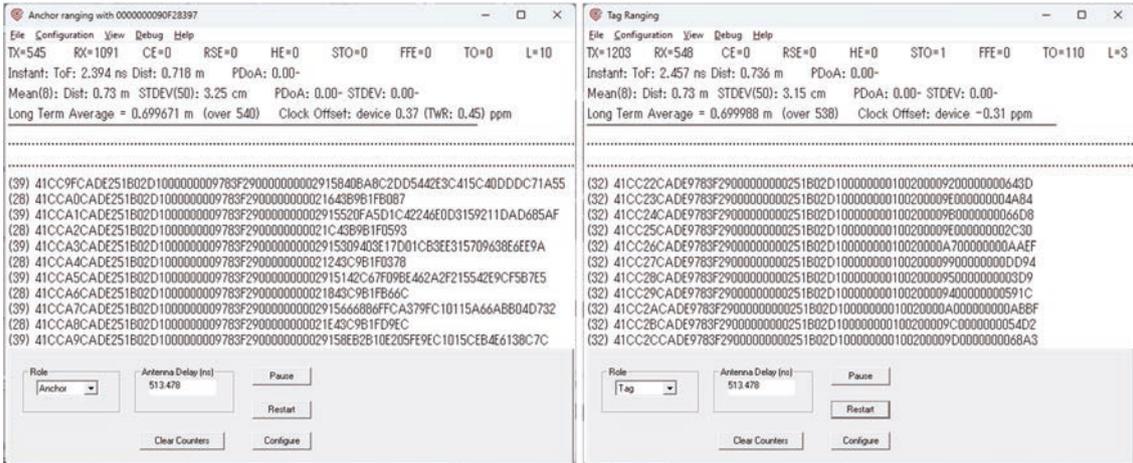


図 3.3-2 アンカーとタグの間で測定された生データ

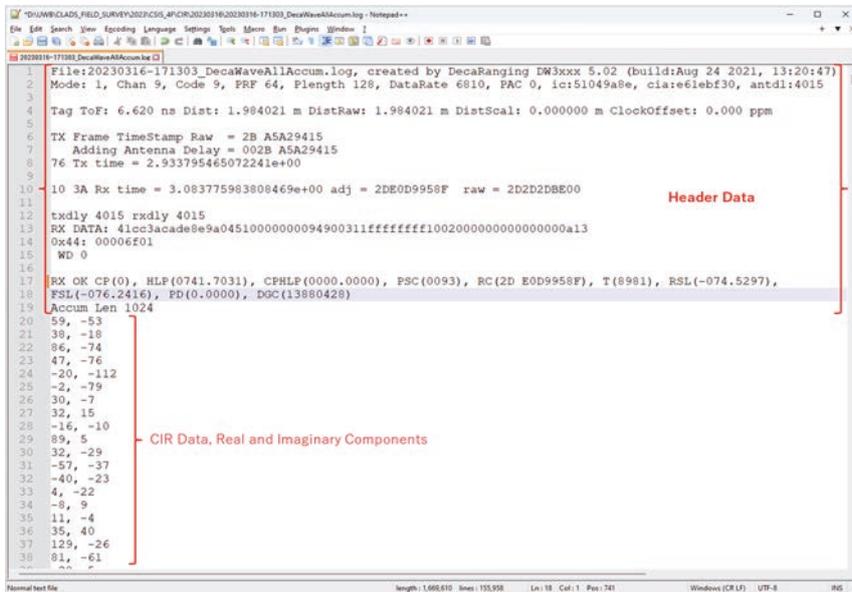


図 3.3-3 CIR データ出力ファイル例

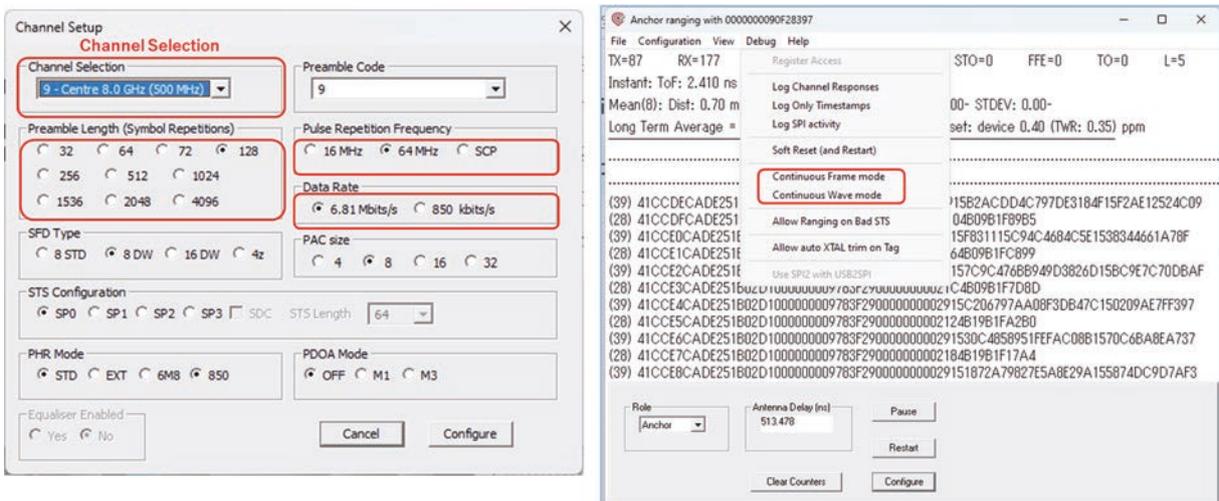


図 3.3-4 UWB 機器 (DW3000) をセットアップし、生データと CIR 出力をログ画面

機器校正を含むアンカー配置・設置試験

アンカーの最適な配置と簡易な設置方法を開発するため、室内にテーブル、椅子、ラックなどの障害物が室内にないオープンな空間で、UWB 測位試験を行った。4 つのデバイスをアンカーとして三脚を使って四隅に設置した。1 つのタグを台車に取り付け試験空間内の位置を計測した。台車は青線と赤線で示した方向に沿って動かし、各アンカーからタグまでの距離データ、そこから計算されるタグの位置データを PC に記録した (図 3.3-5)。



図 3.3-5 UWB 測位精度解析のための屋内テストエリア

アンカーの設定は設定時間短縮手法を検討するため、自動座標設定を利用した。アンカーの一つをイニシエータアンカーとして座標 $[0, 0, 1.70]$ に設定し、他のアンカーの座標はデバイスシステムが提供する自動座標を使用する方法である。自動座標は X, Y 座標を提供し、Z (高さ) 座標は、全てのアンカーの高さを同じ高さ (170 cm) を手動で設定する。デバイス製造元のユーザーマニュアルによると、アンカー間が LOS であれば、アンカーの自動設定により十分な測定精度が得られるとされており、このアンカーの自動座標は、実測値と数センチ (2~3 cm) の差であった。この試験では全体の位置精度に与える影響を確認するため、この座標の補正は行わなかった。

各アンカーからタグまでの距離データをみると、室内にはアンカーやタグの間に障害物がないため、レンジデータは外れ値のない値を示した (図 3.3-6)。本機がリアルタイムで計算した位置データ (青) と、レンジデータをフィルタリングして後から計算した位置データ (後処理) をみると、水平方向の位置データは青と赤でほぼ同じだが、高さデータはレンジデータを用いた後処理の方が優れていた (図 3.3-7)。リアルタイム位置出力 (青) の高さデータは、ポスト処理位置出力データ (赤) よりも精度が低かった。水平データの精度は、今回のテストケースでは 10 cm 程度であった。高さデータは 30~70 cm の間で変化した。高さデータの精度を確認するためには、フィールドテストのさらに多くの繰り返し試験が必要である。

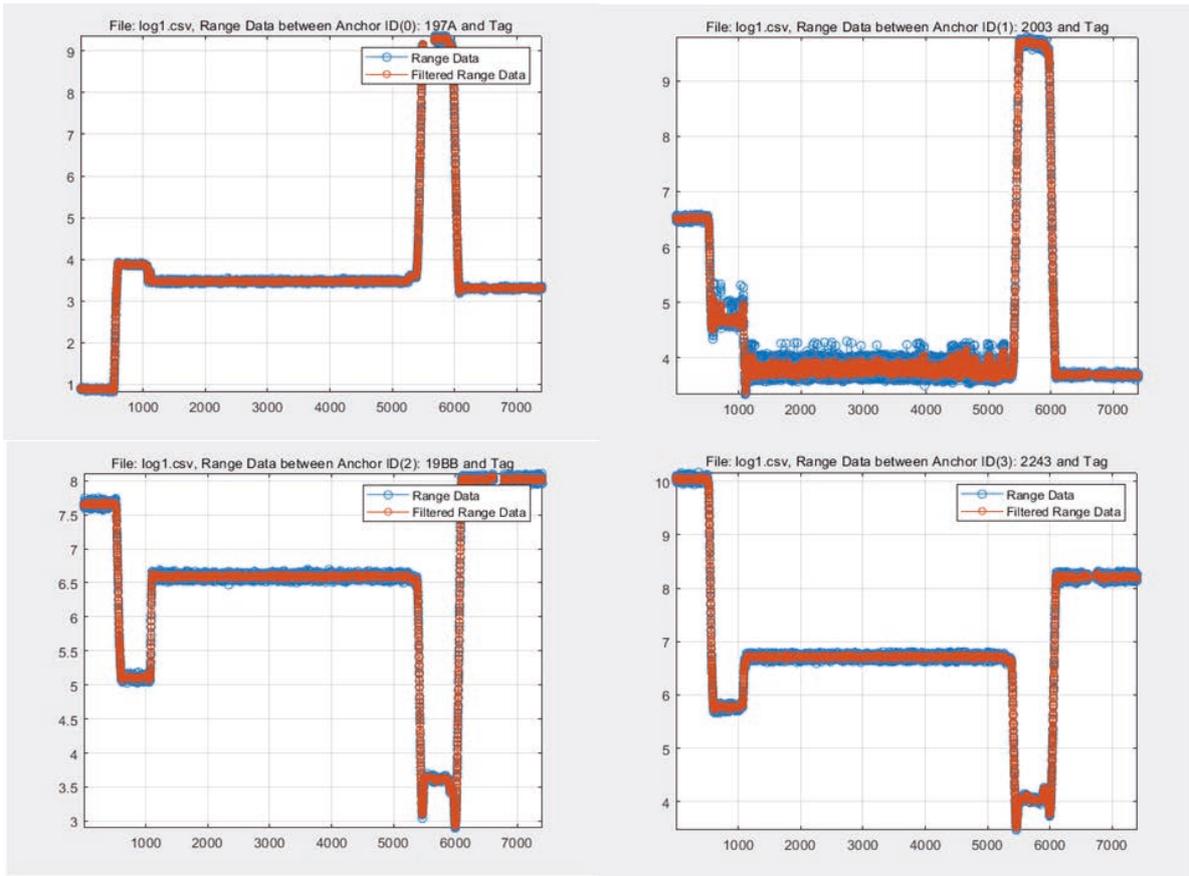


図 3.3-6 各アンカーからタグへの範囲データ

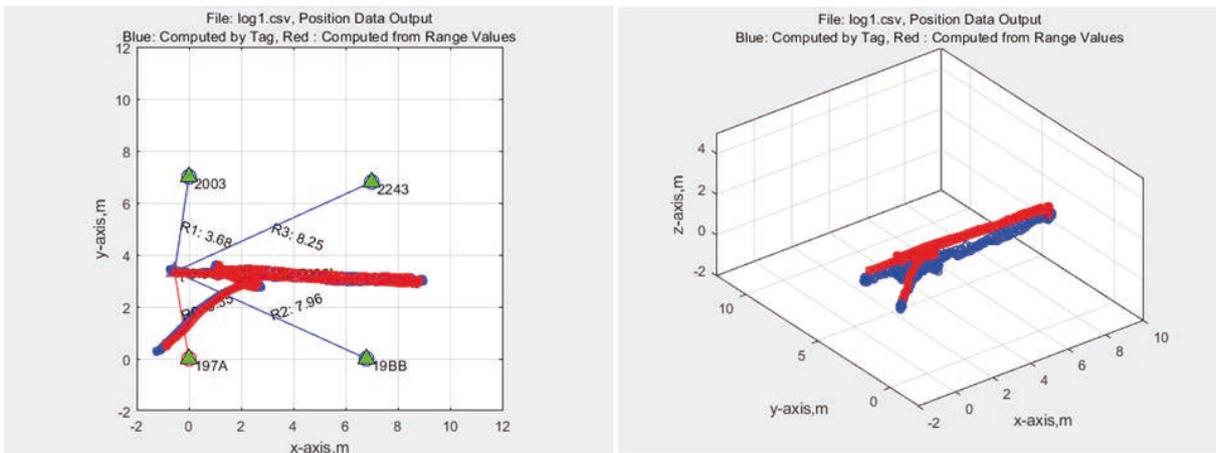


図 3.3-7 位置データ (青：デバイス出力、赤：フィルタリングされた距離から計算)

また、X 方向と Y 方向に台車を移動させ位置データを記録した (図 3.3-8)。台車を往復させたデータを記録することで、同じルートで 2 セットのデータを記録した。X 方向と Y 方向の位置測定のばらつきは 10 cm 程度であった。このことから、障害物のない屋内であれば、10 cm 程度の位置精度が得られると考えられた。

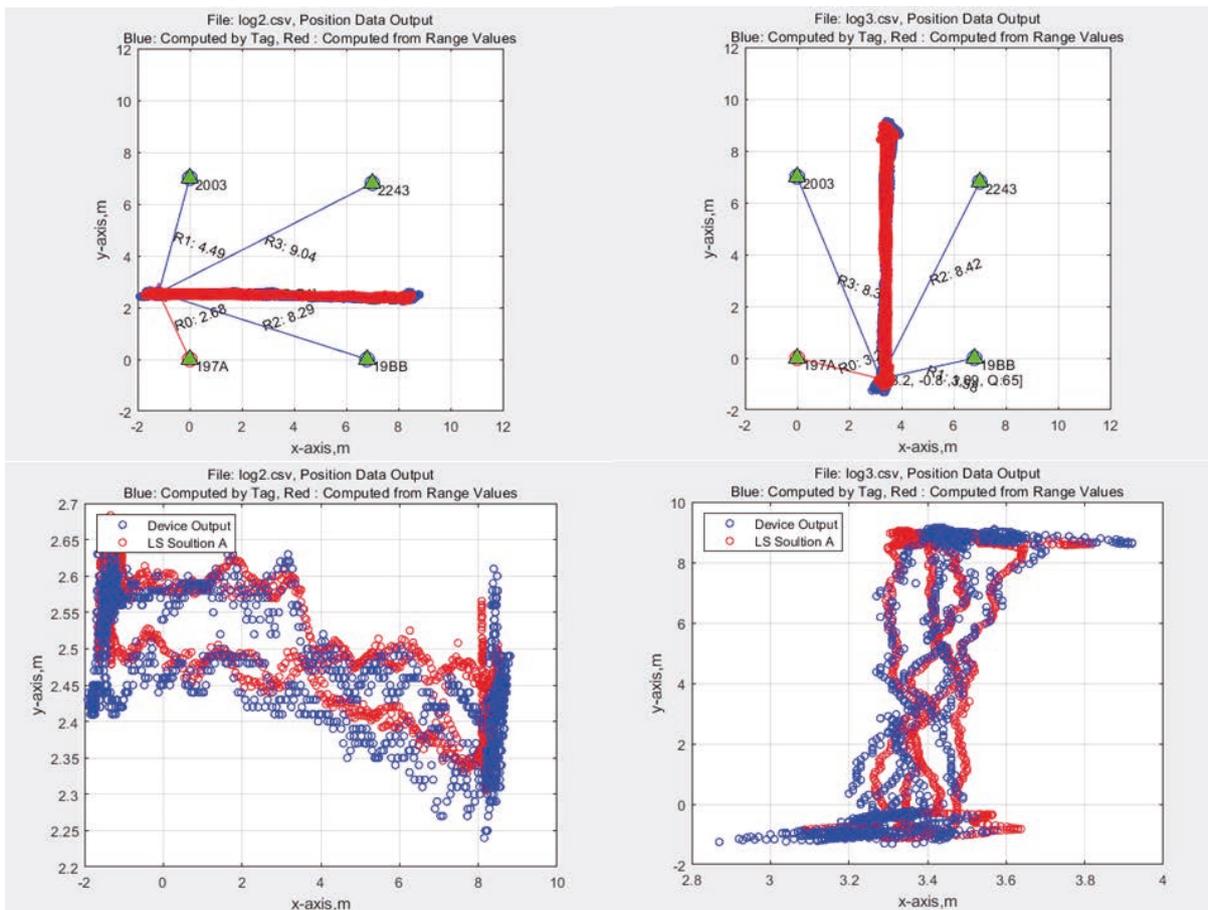


図 3.3-8 位置計測

マルチパスの影響を最小化するための位置計算手法試験

空間内にテーブル、椅子、ラック、パーテーション、ガラス窓の金属フレームなどが存在する室内の物体からマルチパスが発生するマルチパス環境下で一測位試験を行った（図 3.3-9）。

4 つのアンカーを自動設定によって設置し、2 つのタグを 1 セットして台車に取り付け、距離と位置の計測を行った。台車は Y 軸方向に移動させ、約 50 cm 間隔で数秒間停止させることでデバイス間の距離データを記録し、そこから位置を計算した。



図 3.3-9 UWB 測位位置精度のための室内実験サイト

アンカーとタグの距離は、台車のスタート位置で予想以上に誤差（距離のばらつき）が大きかった。しかし、それ以外の位置では、距離のばらつきは10 cm以下であった（図 3.3-10 右下）。

位置データ（青色はタグが算出した位置データ、赤色は距離をフィルタリングして算出した位置）（水平・垂直）をみると、タグ位置はばらつきが大きく、実際のデータ測定ルートからオフセットしている（図 3.3-11）。これらの誤差は、フィルタリングした距離を使用することである程度補正される（補正後の位置データを赤色で表示）。

Y 軸方向下端から上端まで、ほぼ直線的に台車を移動した計測で補正位置データ（図 3.3-12）は、Y 軸の上部に差が生じた。赤色で示した距離は、フィルタリングされた距離と補正されたアンカー位置データを用いて計算したものである。このデータを解析したところ、アンカー3（D1A9）のY座標が44 cmずれていることが判明した（実測値：9.87 m、使用値：9.43 m）。また、アンカー4（47AF）のX座標が32 cmずれていた（実測値：0 m、使用値：-0.32 m）。この値は、自動アンカー設定によって生成されたものであった。このことから、マルチパスの影響を受ける環境では、自動アンカー設定によって誤った座標値が得られる可能性があることがわかった。

このように、補正されたアンカーデータを使用しても、アンカーポイントによって既に座標測定に誤差がある範囲データが計算されるため、位置測定はまだ十分とは言えない。

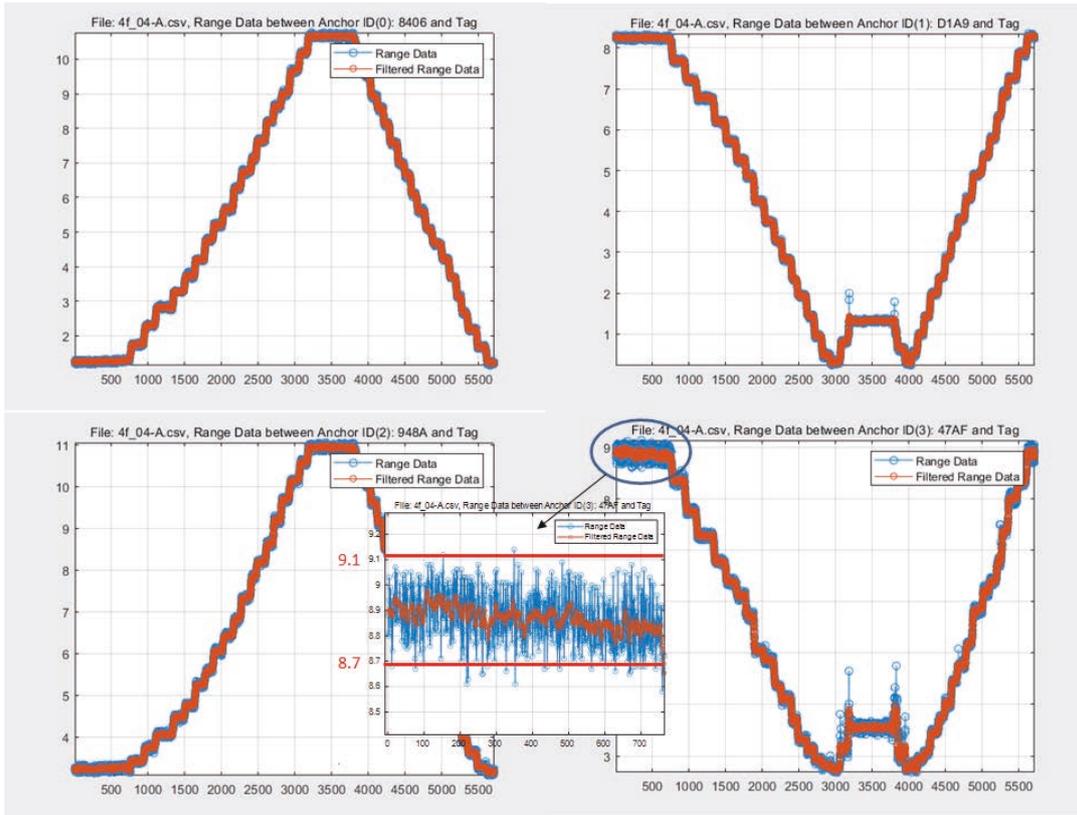


図 3.3-10 アンカーとタグ間の距離

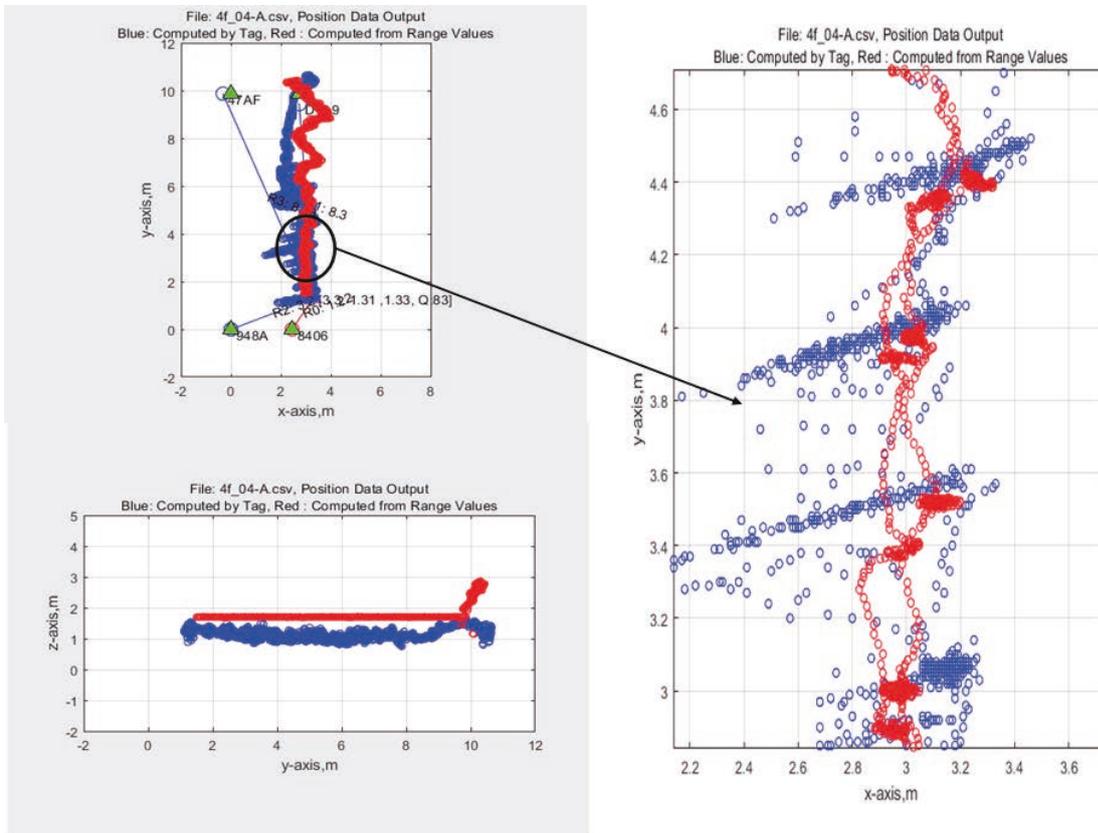


図 3.3-11 位置計測1、青：タグ、赤：計算された距離

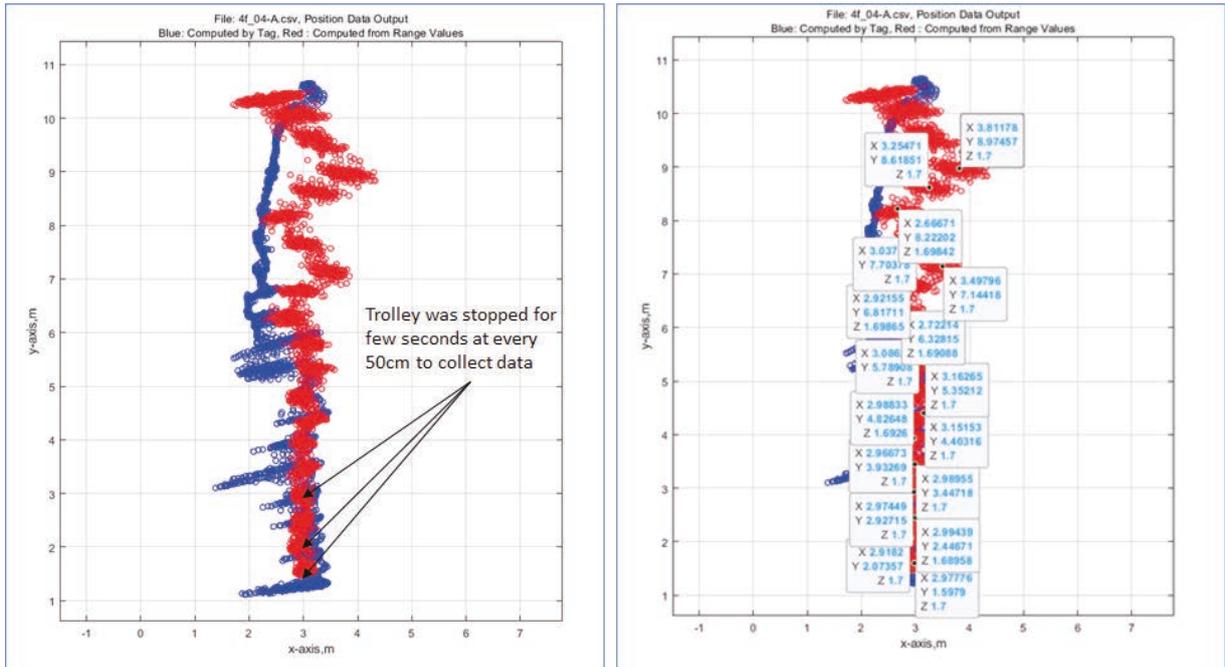


図 3.3-12 位置計測 2、青：タグ、赤：計算された距離

また、信号に与える反射波の影響をみるため、電波暗室で CIR を計測した (図 3.3-13)。記録された C 電波暗室では反射が起こらないため、CIR データには反射信号が含まれない。2 つの UWB 機器の間にアルミ板を挟み、デバイス間の LOS が遮断することで、デバイスで受信する信号を NLOS とした (図 3.3-13 中央)。アルミ板を少しずつ外に出していくと、反射量が減少することを確認した (図 3.3-13 右)。

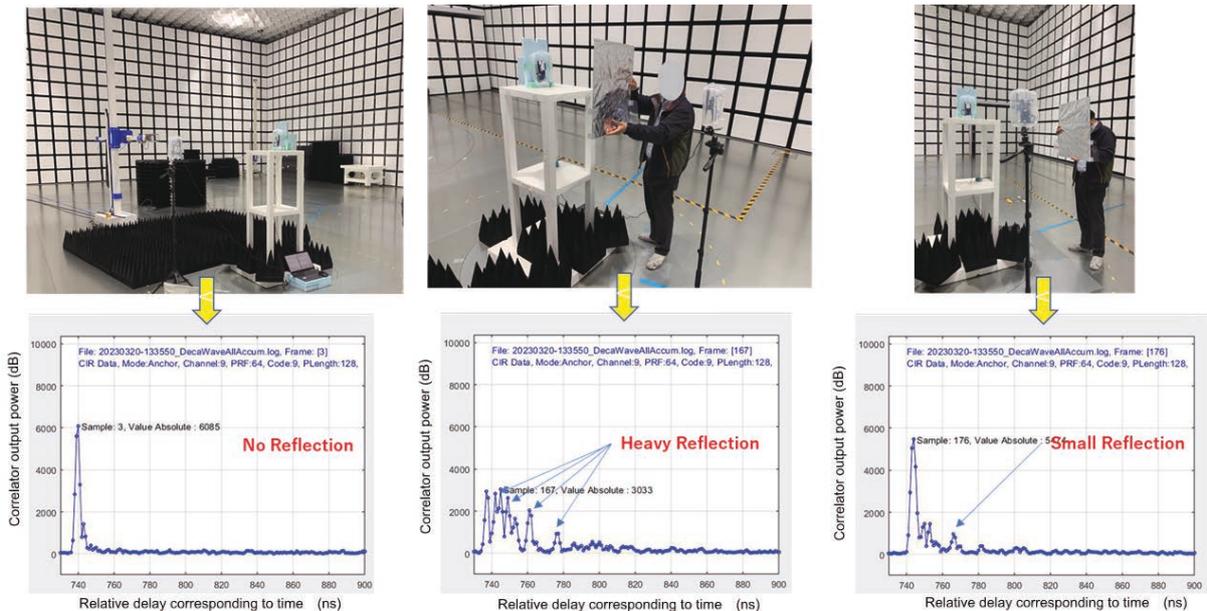


図 3.3-13 CIR データ出力、左：反射なし、中：反射大、右：反射なし：反射小

アンテナ放射パターン試験

機器校正を含むデバイスの配置方法、特にアンカーの配置・設置について効果的に配置し、アンカーとタグ間のマルチパスや障害物を最小限に抑えるためには、アンテナの放射パターンを理解する必要がある。このために、他の電波信号の影響を受けない電波暗室での計測試験を行い、アンテナ放射パターン測定した（図 3.3-14、表 3.3-1）。

電波暗室での信号試験ではデバイス DW3000 を 8 GHz の周波数の信号試験に、DW1000 を 4 GHz の信号試験に使用した（図 3.3-15）。DW1000 は位置測定精度の解析に使用された DW1001EVb と同一のチップセットを使用している。

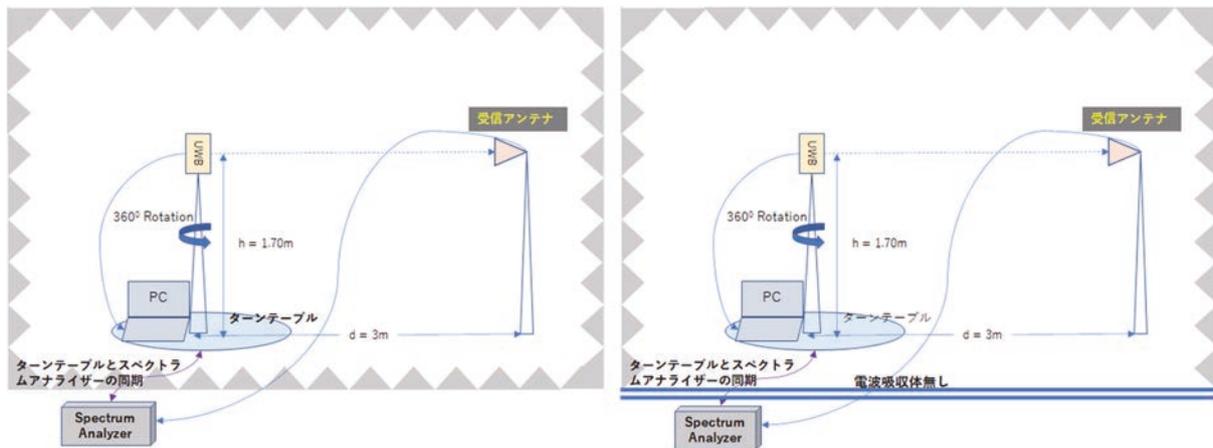


図 3.3-14 信号の放射パターンを測定するための設定

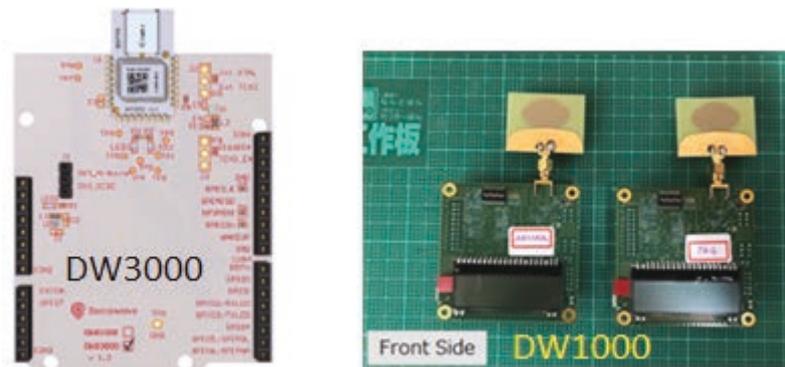


図 3.3-15 アンテナ放射パターン試験に使用した UWB デバイス

表 3.3-1 信号の放射パターンを測定するために実施した試験の一覧

Test ID	Device	Tx Ant. Orientation	Rx Ant Orientation	Reflection	Distance	Channel	Preamble Length	PRF	Data Rate	SignalType
1	3000	V	H	N	3	9	2048	64	6810	UWB
2	3000	V	V	N	3	9	2048	64	6810	UWB
3	3000	V	H	N	3	9	4096	64	6810	UWB
4	3000	V	V	N	3	9	4096	64	6810	UWB
5	3000	V	H	N	3	9	2048	64	6810	UWB
6	3000	V	V	N	3	9	2048	64	6810	UWB
7	3000	V	H	N	3	9	2048	16	6810	UWB
8	3000	V	V	N	3	9	2048	16	6810	UWB
8R	3000	V	V	N	3	9	2048	16	6810	UWB
9	3000	V	H	N	3	9	128	64	6810	UWB
10	3000	V	V	N	3	9	128	64	6810	UWB
11	3000	V	H	N	3	9	NA	NA	NA	CW
12	3000	V	V	N	3	9	NA	NA	NA	CW
13	1000	V	H	N	3	2	1024	64	110	UWB
14	1000	V	V	N	3	2	1024	64	110	UWB
15	1000	V	H	N	3	2	1024	64	6810	UWB
16	1000	V	V	N	3	2	1024	64	6810	UWB
17	1000	V	H	N	3	2	2048	64	6810	UWB
18	1000	V	V	N	3	2	2048	64	6810	UWB
19	1000	V	H	N	3	2	2048	16	6810	UWB
20	1000	V	V	N	3	2	2048	16	6810	UWB

Test ID	Device	Tx Ant. Orientation	Rx Ant Orientation	Reflection	Distance	Channel	Preamble Length	PRF	Data Rate	SignalType
21	1000	V	H	N	3	2	NA	NA	NA	CW
22	1000	V	V	N	3	2	NA	NA	NA	CW
23	1000	H	H	N	3	2	NA	NA	NA	CW
24	1000	H	V	N	3	2	NA	NA	NA	CW
25	1000	H	H	Y	3	2	NA	NA	NA	CW
26	1000	H	V	Y	3	2	NA	NA	NA	CW
27	1000	V	H	Y	3	2	NA	NA	NA	CW
28	1000	V	V	Y	3	2	NA	NA	NA	CW
29	1000	V	H	Y	3	2	2048	16	6810	UWB
30	1000	V	V	Y	3	2	2048	16	6810	UWB
31	1000	V	H	Y	3	2	2048	64	6810	UWB
32	1000	V	V	Y	3	2	2048	64	6810	UWB
33	1000	V	H	Y	10	2	2048	64	6810	UWB
34	1000	V	V	Y	10	2	2048	64	6810	UWB
35	1000	V	H	Y	10	2	NA	NA	NA	CW
36	1000	V	V	Y	10	2	NA	NA	NA	CW
37	3000	V	H	Y	10	9	1024	16	6810	UWb
38	3000	V	V	Y	10	9	1024	16	6810	UWB
39	3000	V	H	Y	10	9	NA	NA	NA	CW
40	3000	V	V	Y	10	9	NA	NA	NA	CW

図 3.3-16 に同偏波と交差偏波を測定するための送信アンテナ (UWB) と受信アンテナの向きを示す。送信アンテナと受信アンテナの向きが同じ場合は同偏波、異なる場合は交差偏波と呼ばれる。アンテナが無指向性ではなく指向性を持っている場合、同偏波と交差偏波の受信信号パワーが異なるため、測定が必要となる。このため、信号パワーが最大となる向きや、信号が急激に減衰するポイントを見つけることが重要となる。受信機の感度を下回る信号レベルでは、受信機は信号を正しく処理できない可能性がある。

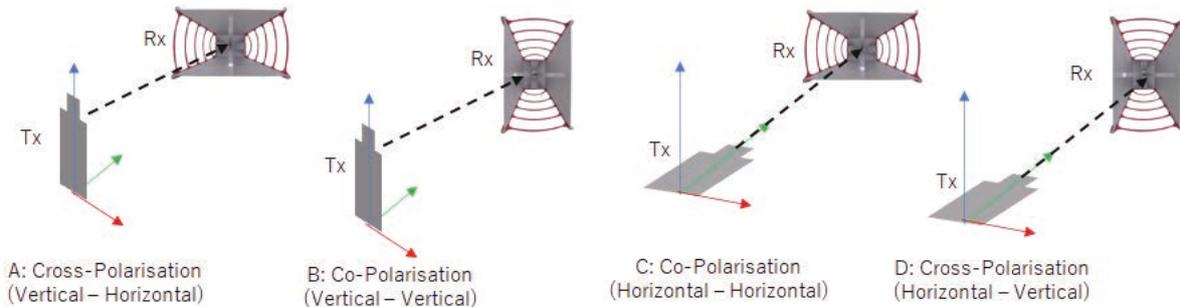


図 3.3-16 同偏波と交差偏波のためのアンテナ方向

DW3000 と DW1000 のアンテナ放射パターンを 3 m と 10 m の距離で測定した。3 m の測定では、床に電波吸収材を敷いた場合 (反射なし) と敷かない場合 (反射あり) でテストを行った。10 m の距離では、反射なしの状態です試験した。測定では、UWB 信号、CW 信号、異なるプリアンプル長、異なる PRS、データレートを送信し、約 40 種類の試験をした。測定結果は、データ解析、機器設計、アンカー展開、アンカーとタグの向き、UWB 信号のパラメータ設定に使用する。これらのテストの一部の結果を、図 3.3-17 ~ 図 3.3-22 までのグラフに示す。

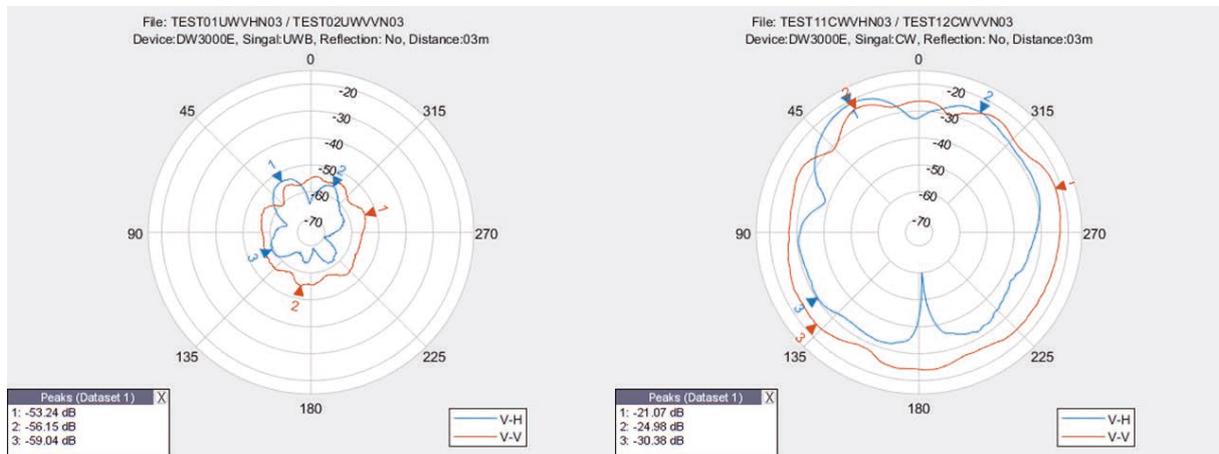
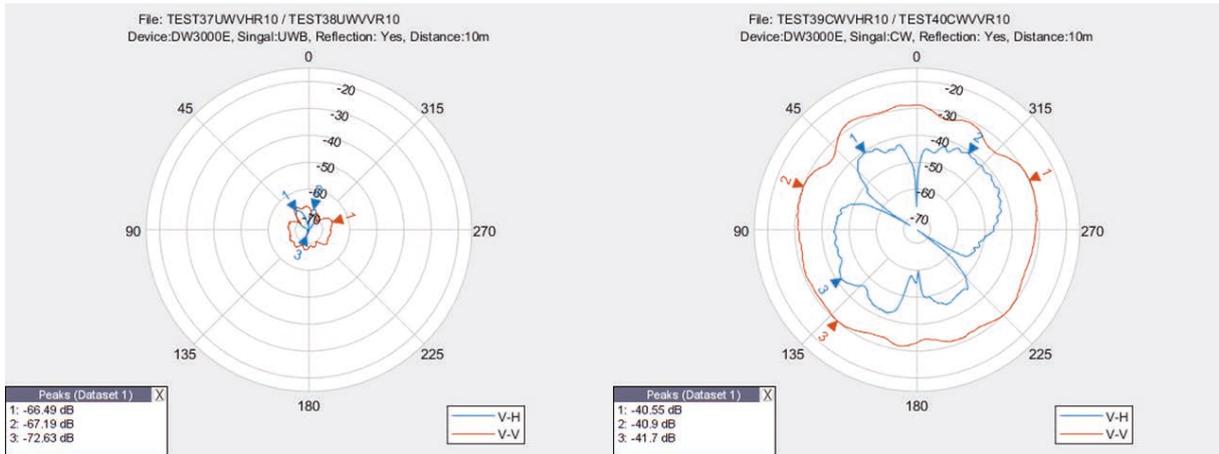
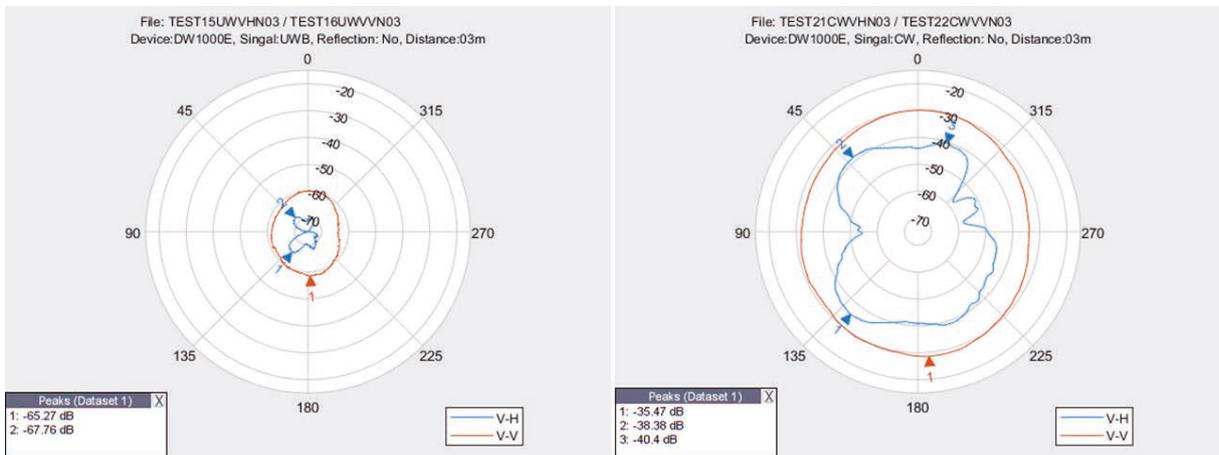


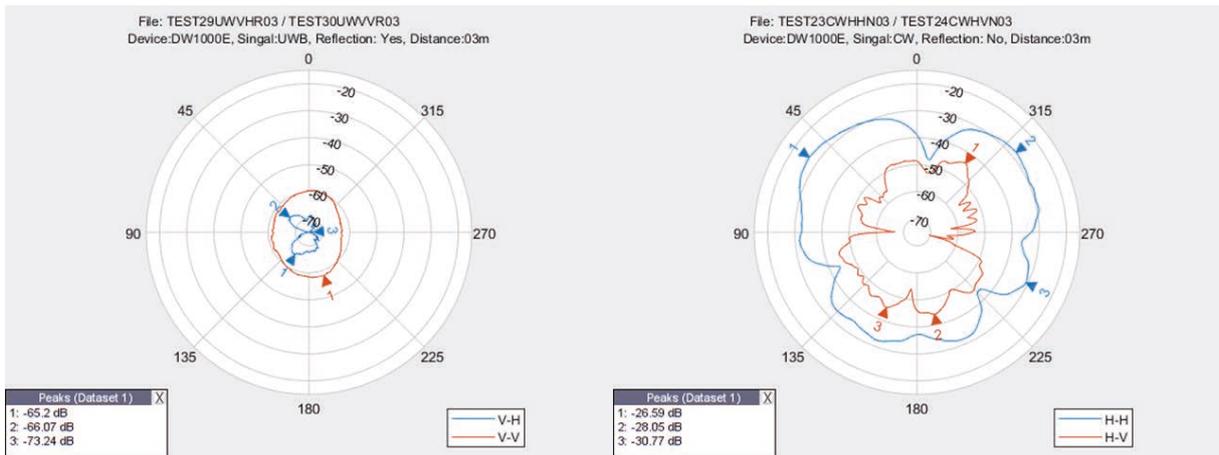
図 3.3-17 DW3000, UWB and CW, No Reflection, 3 m



☒ 3.3-18 DW3000, UWB and CW, Reflection, 10 m



☒ 3.3-19 DW1000, UWB and CW, No Reflection, 3 m



☒ 3.3-20 DW1000, UWB and CW, Reflection, 3 m

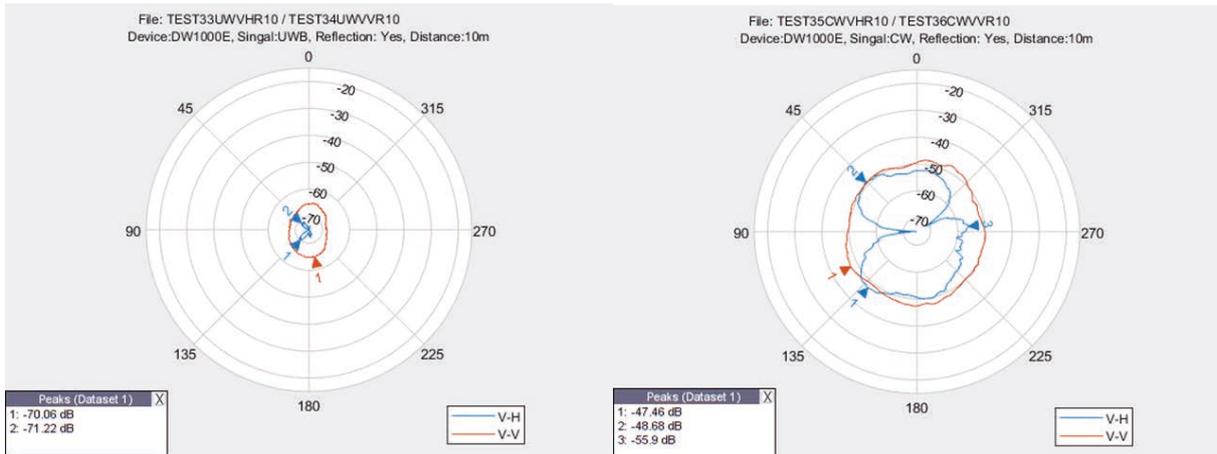


図 3.3-21 DW1000, UWB and CW, Reflection, 10 m

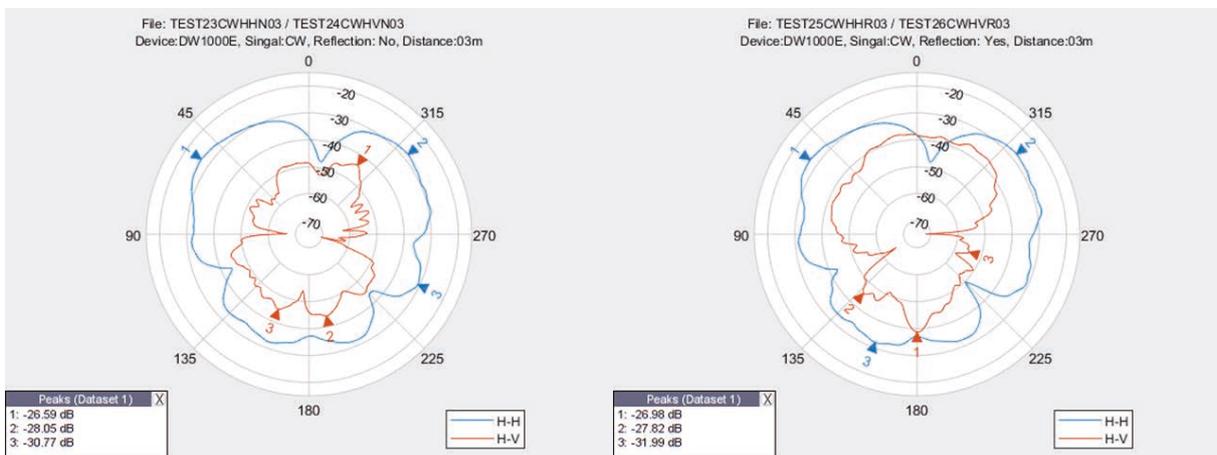


図 3.3-22 DW1000, CW, No Reflection, 3 m / DW1000, CW, Reflection, 3 m

デバイス内バッテリー

現状、DWM1001 の評価キットには充電式リチウム電池が使用されており、交換が必要な際にはカバーを開けて行う必要がある (図 3.3-23)。そのため、交換作業には時間がかかることが課題として挙げられる。具体的には、15秒での交換は難しいと考えられる。

そこで、短時間での交換を行うためには外部モバイルバッテリーを使用することが可能である。USB ケーブルを使用して接続することで、電源の持続時間を延ばすことができる。しかしながら、移動する必要がある場合や、外部モバイルバッテリーを持ち歩くことが困難な場合には限界がある。



図 3.3-23 デバイス用バッテリー

まとめ

位置精度の実験的な解析を行うために、UWB デバイスを使用した測位精度の検討と UWB アンカーの配置と設置の方法をフィールド試験により検証し、改良を行った。

フィールド試験において、直達波計測により直達波の判定方法を検討し、LOS 条件の判定として、直接的な視線が存在する場合には、マルチパスによる影響を最小限に抑えることができることが示された。また、マルチパスの影響を最小化するための位置計算手法を開発方向も示唆された。さらに、測位システムの精度向上のために、以下の手法を確認した。

- アンカーの配置・設置方法（配置間隔、自動設置を含む）を含む機器の配置方法・機器校正を行うことで、測位精度を向上させることができることが示された。
- 反射波の影響を最小化する位置計算手法
- マルチパスの影響を最小化するための UWB デバイス（アンカーポイント等）の配置方法

UWB デバイスを使用して測位するには、複数のアンカーデバイスを配置する必要があり、アンカーデバイスの配置と設置には時間がかかるため、効率的な方法を検討する必要がある。フィールド試験を通じて、アンカーデバイスの最適な配置と設置方法を検討し、効率的な自動設置方法として、一つのアンカー座標を設定することで、残りのアンカー座標を自動的に取得、設定する方法を開発した。

以上の手法の開発により、アンカーデバイスの配置と設置にかかる時間を短縮し、最適な配置と設置方法により、測位精度を向上させることができることを確認した。

令和 5 年度は、マルチパス環境下でのフィールドテストを実施し、位置測定の解析と手順の改善を行う予定である。なお、デバイス DW3000 の使用周波数は、日本の屋内・屋外の電波規制に適合していることからデバイス DW3000 をベースにした開発を進める予定である。また、アンカー配置の詳細についても再度解析を行う他、計測位置を 3D 表示するインターフェースの開発を開始する予定である。

3.4 カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発および計測機器等の耐放射線性評価

3.4.1 カスケード接続俯瞰画像位置計測

カスケード接続俯瞰画像位置計測、これまでに福島高専にて実施してきた高線量下での「俯瞰画像方式位置計測の研究開発」の成果を基に、見通しの効かない場所でも位置計測できるように、中継ロボットを配置して中継ロボットに搭載した俯瞰カメラで対象ロボットの位置を計測しようとするものである（図 3.4-1）。

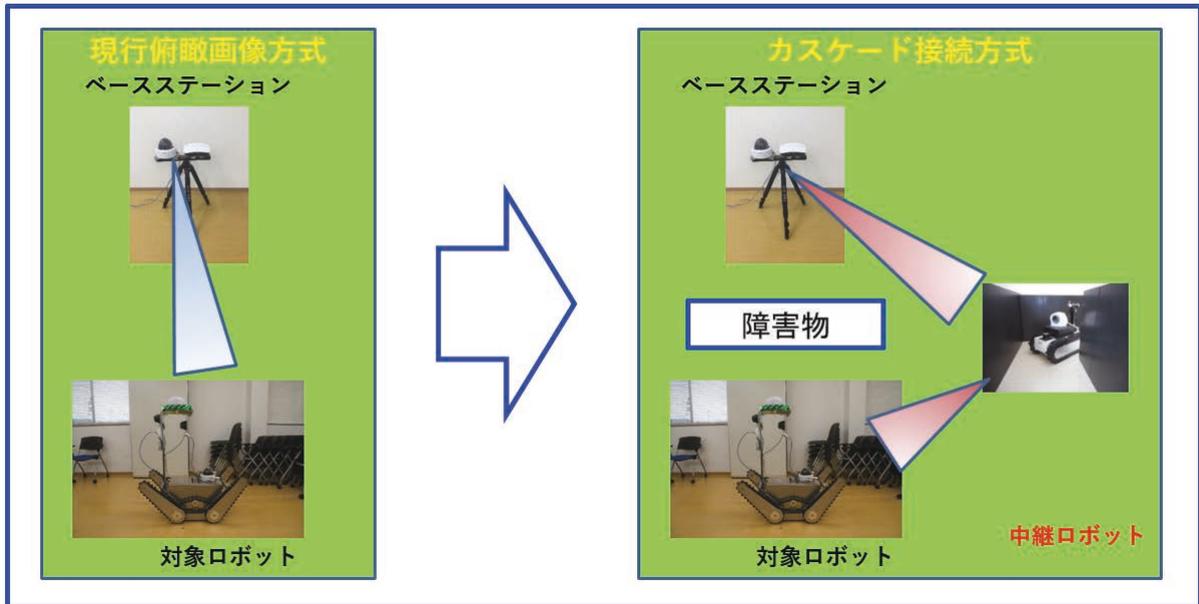


図 3.4-1 カスケード接続イメージ

カスケード接続の検討では、中継用小型ロボットでの通信が混線あるいは遅延が発生すると、その先の調査または作業ロボット等の操作および制御に支障が出る可能性があることから、中継用小型ロボットにはレシーバーとアクセスポイントを搭載することとした。上記結果に基づき、カスケード接続試験に必要な中継用ロボットの試作等を行った（図 3.4-2 ～ 図 3.4-6）。

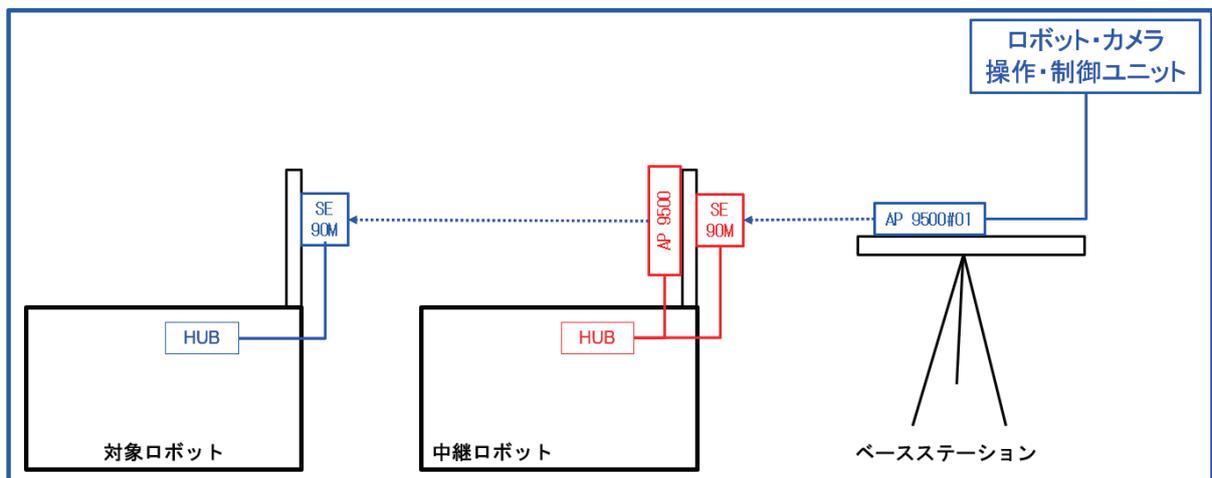


図 3.4-2 通信障害を最小限にするための無線通信系検討図

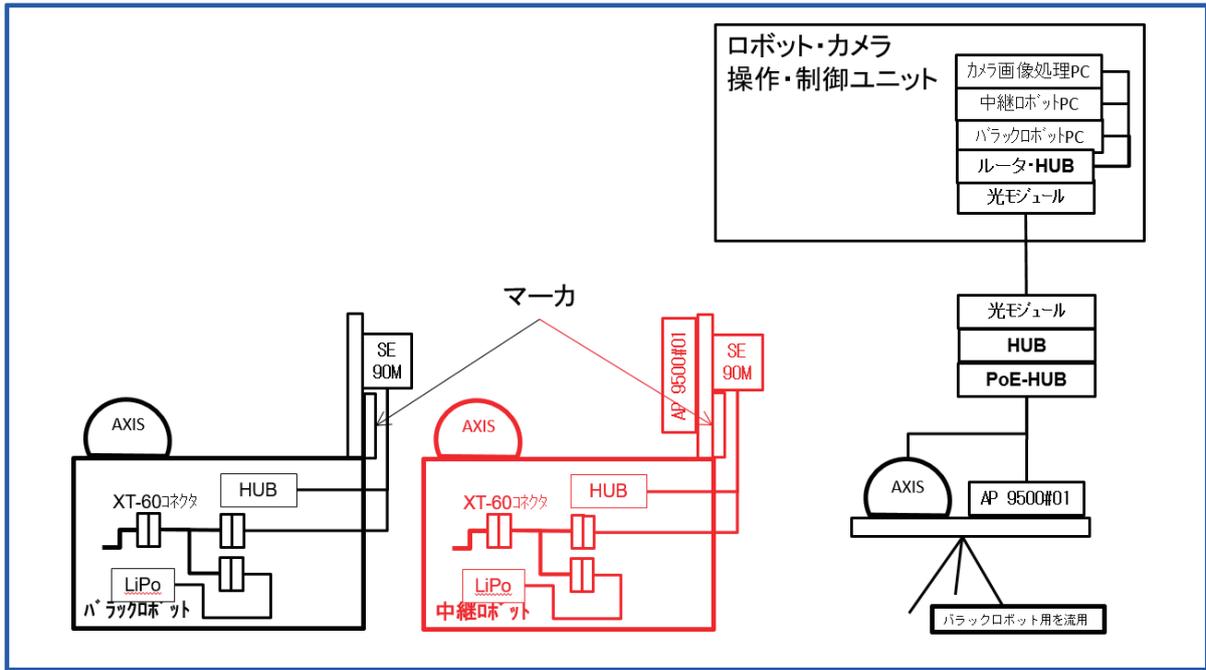


図 3.4-3 全体システム構成図

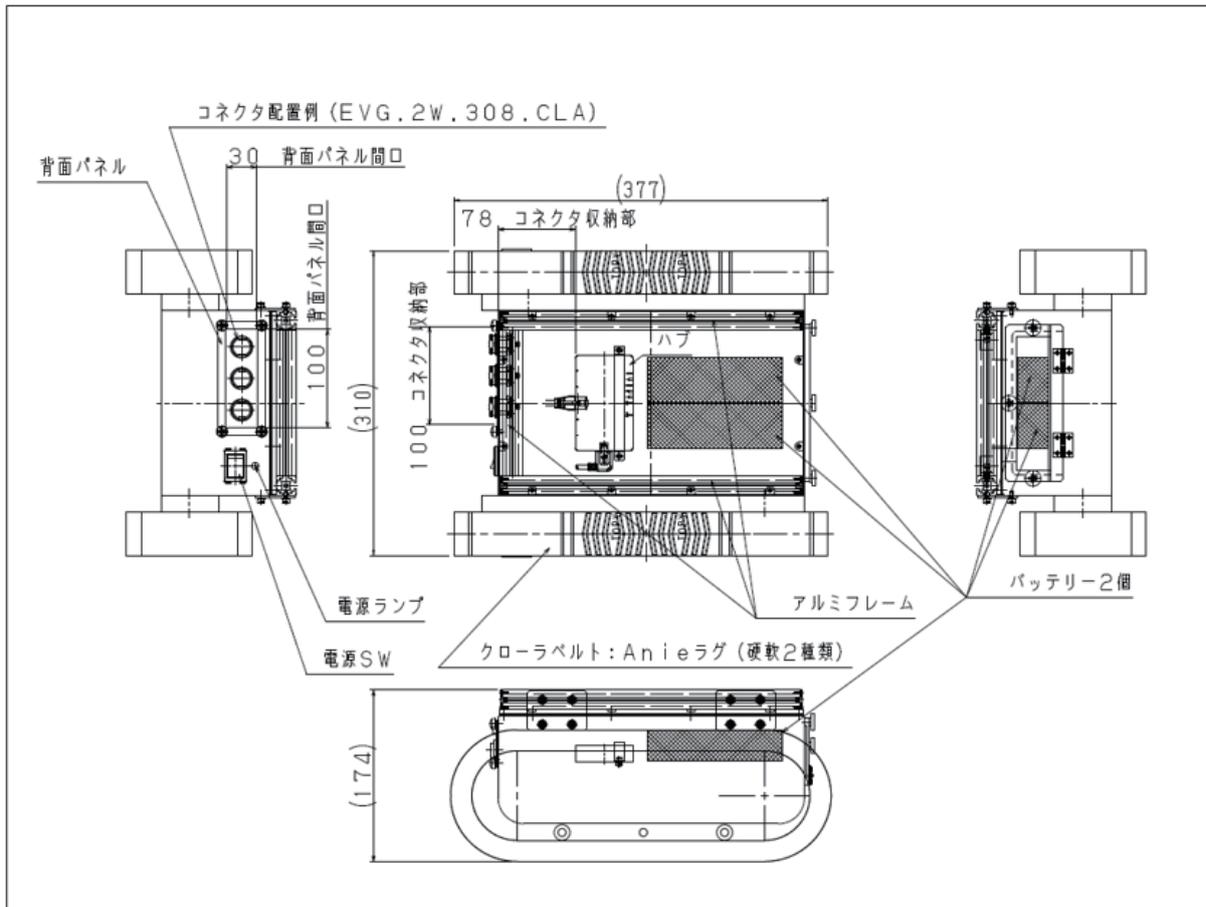


図 3.4-4 中継ロボット用小型クローラ標準モジュール



図 3.4-5 中継ロボット（俯瞰写真）



図 3.4-6 中継ロボット（前面、後面および側面写真）

令和5年度に2段カスケード接続による俯瞰画像方式位置計測の試験を実施予定である。

3.4.2 耐放射線性評価

岐大および東大等と連携して、UWB およびカメラ画像計測・分析に必要な機器のうち、耐放射線性が低く、評価が必要となる電子部品等情報のリストアップを行った（表 3.4-1）。

表 3.4-1 電子部品等情報のリスト

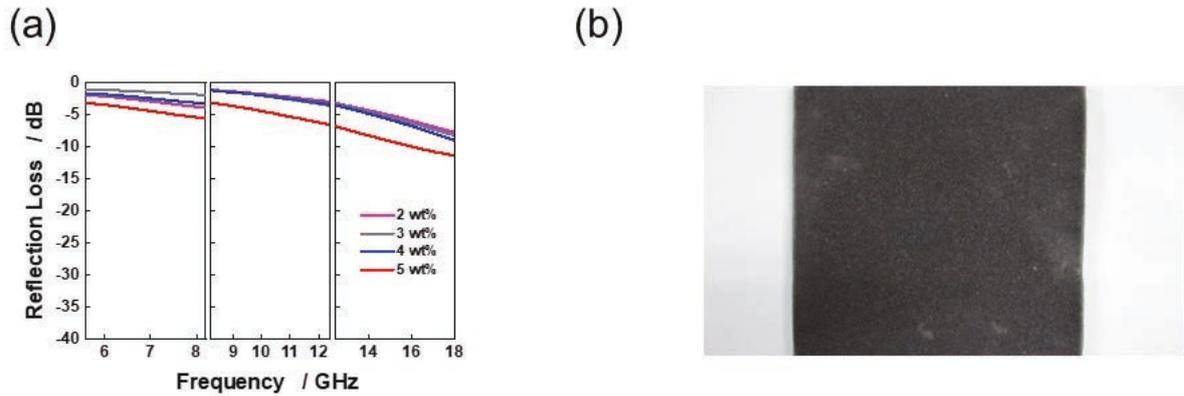
名称	メーカー	型番	評価
カメラボード	Sony	SPRESENSE HDR カメラボード	①
ボードコンピュータ	Sony	SPRESENSE メインボード	①
拡張機能	Sony	SPRESENSE 拡張ボード	①
無線通信ボード	Sony	SPRESENSE 用 Wi-Fi	①
ボードコンピュータ	Khadas	VIM4 Amlogic A311D2	②
カメラ	ELP	ELP-USBFHD06H-L21-JP	②
カメラ	ELP	ELP-USB16MP01-H120	②
カメラ	ELP	ELP-USB500W02M-AF170	②
無線通信セット	Qorvo	MDEK1001	②
無線通信セット	Qorvo	DWM1001-DEV	②
無線通信セット	Qorvo	DWM3000EVB	②
無線通信セット	Qorvo	DMW3001CDK	②
ボードコンピュータ	Nordic Semiconductor	nRF52840-DK	②

机上評価結果

- ① これまでの知見から十分（1 kGy 程度）の耐放射線性を有する可能性があるとして評価できる。
- ② これまでの知見から耐放射線性を評価できない。

3.5 UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証

令和4年度は、電磁波遮蔽・吸収材料を試作し、UWB 位置測位の精度向上にどのように寄与するかを検証した。図 3.5-1 に示すように、材料の組成を制御することで導電率などを調整し、電磁波吸収性能の高い材料を試作した。これを UWB 位置測位のためのデバイス後部に配置し電磁波吸収材料の有無が測位シグナルに与える影響を評価した。評価結果の詳細は東大の報告に示されている。今後は、さらなる評価を進め、効果の有無の確認と最適な配置について検討を行う。



(a) CNT 濃度と電磁波吸収特性との関係 (b) 試作した電磁波吸収性能の高い材料 (CNT5wt%品)

図 3.5-1 試作した電磁波吸収性能の高い材料

3.6 組込装置「Spresense」および無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の検証試験

ガンマセルを用いた予備照射試験

原科研 WASTEF において、ガンマセルによる照射における吸収線量率評価を実施した。ガンマセルは密封の Co-60 線源を内蔵しており、照射対象物を放射性同位元素で汚染させることなく高線量率のガンマ線照射試験を実施することが可能な装置である。

照射試験の準備として、モニタシステム「EMF521 型電位計 (EMF ジャパン製)」による吸収線量率の測定を実施した (図 3.6-1)。当該測定の結果、吸収線量率を 944.4 Gy/h と評価した。

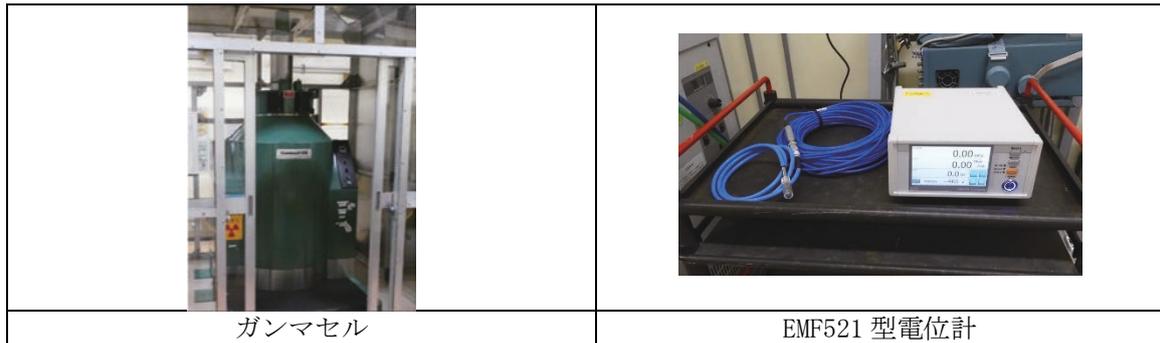


図 3.6-1 ガンマセルのガンマ線照射線量率の評価

組込装置「Spresense」の予備照射試験

令和 4 年度は、組込装置「Spresense」の耐放射線性能を確認するため予備照射試験を実施した。予備照射試験は、Spresense を 8 台準備し、照射時間 0 分、15 分、30 分、45 分について 2 台ずつ照射を行った。ボードのみの照射とし、照射したボードは岐大において動作確認を実施した。

1 回目照射

組込装置「Spresense」2 台を所定の容器に収納し、ガンマセルによる照射を実施した。照射時間は 15 分間とし、積算吸収線量は 236.1 Gy と評価した (図 3.6-2)。

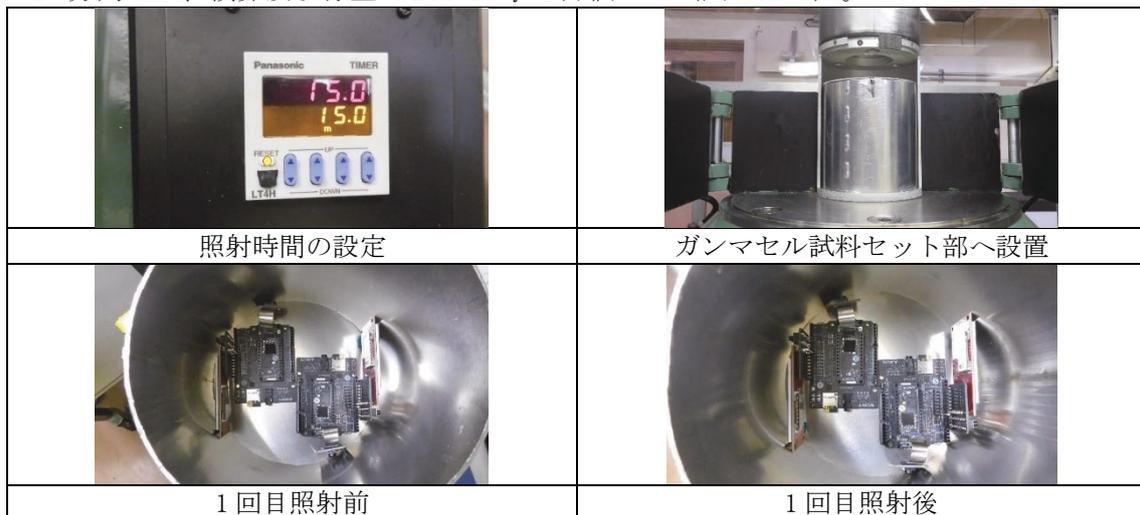


図 3.6-2 ガンマセルで照射した Spresense (1 回目)

2回目照射

組込装置「Spresense」2台を所定の容器に収納し、ガンマセルによる照射を実施した。照射時間は30分間とし、積算吸収線量は472.2 Gyと評価した（図 3.6-3）。

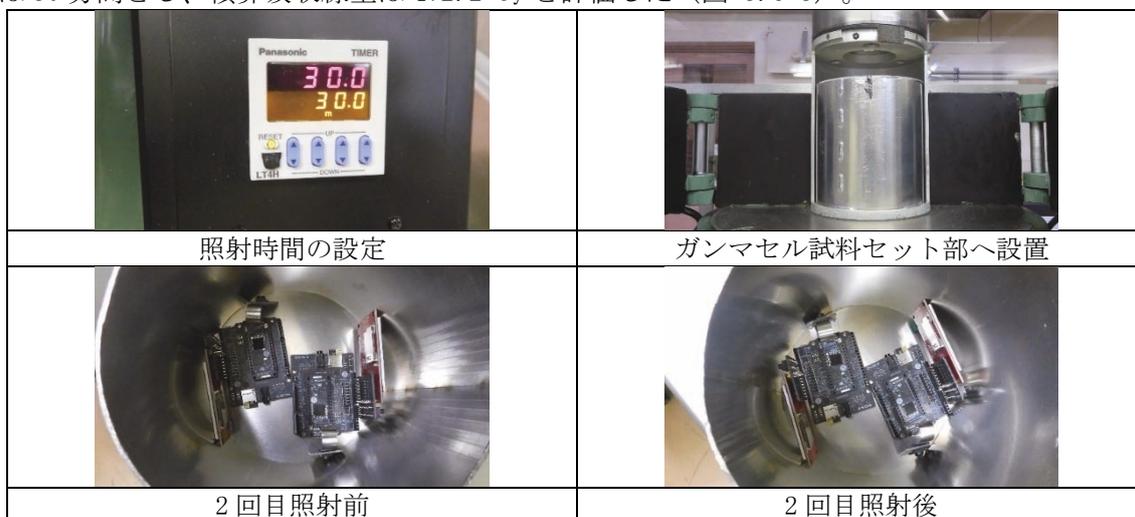


図 3.6-3 ガンマセルで照射した Spresense (2回目)

3回目照射

組込装置「Spresense」2台を所定の容器に収納し、ガンマセルによる照射を実施した。照射時間は45分間とし、積算吸収線量は708.3 Gyと評価した（図 3.6-4）。



図 3.6-4 ガンマセルで照射した Spresense (3回目)

予備照射試験の結果

予備照射試験において、Co-60 ガンマ線照射時間 0 分、15 分、30 分、45 分を実施した Spresense 全 8 台について、岐大で動作確認を行った。照射時間 15 分、30 分、45 分の Spresense は、USB、LAN、HDMI のポートは全て正常に動作した。SD カードについては照射後正常に動作しないことを確認したが、SD カードを新品に交換したところ正常に動作した。このことから、SD カードポートは健全であるが、SD カードが照射により損傷したことが確認できた。

無線通信の検証試験

原科研 BECKY では、無線 UWB 通信の検証試験を実施予定である廃液貯槽室 (I) の整備および試験条件の検討を実施した。

廃液貯槽室 (I) は、幅約 2 m × 奥行約 5 m × 高さ約 6 m の床面がステンレスライニングされた室 (図 3.6-5) であり、室の中央に約 6 m³ のステンレス製堅型円筒の廃液貯槽が設置されている。コンクリート壁や貯槽での UWB 反射の影響を考慮する必要が考えられ、令和 5 年度以降に試作機を用いた検証を実施する。



図 3.6-5 原科研バックエンド研究施設 (BECKY) の廃液貯槽室 (I)

3.7 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するため、適宜東京電力HD（株）を交えた会議等を開催した。

研究立ち上げ期の1年目は、岐大が中心として各研究グループの進捗状態を確認し、各研究項目間での連携の促進を行った。結果、岐大・東大・LM・名大が連携したUWB実験（東大、テレコムエンジニアリングセンター）、岐大・福島高専・JAEA（WASTEF）が連携したSpresense耐放射線実験を成功させた。その上で、1年目の研究成果をまとめ上げ、2年目に向けた情報収集・資料作成を行い、CLADS・東京電力HD（株）を交えた会議を行うための準備を行った。

研究責任者・研究分担者により、以下の研究討論会・共同実験を実施した。

令和4年11月9日 15:20～15:45 (Webex)	参加者：全員
令和4年12月6日 15:00～16:00 (ZOOM)	参加者：岐大・東大・LM
令和4年12月27日 14:00～15:00 (ZOOM)	参加者：岐大・福島高専・JAEA
令和4年12月26日 9:00～15:00 (茨城県東海村)	参加者：岐大・福島高専・JAEA
令和5年1月20日 15:00～16:00 (ZOOM)	参加者：全員
令和5年2月1日 9:00～15:00 (茨城県東海村)	参加者：岐大・JAEA
令和5年2月2日 9:00～15:00 (茨城県東海村)	参加者：岐大・福島高専・JAEA
令和5年2月3日 16:00～17:00 (Webex)	参加者：全員 (中間フォロー)
令和5年3月7日 11:00～12:00 (ZOOM)	参加者：岐大・名大・東大
令和5年3月8日 9:00～15:00 (茨城県東海村)	参加者：岐大・福島高専・JAEA
令和5年3月20日 10:00～15:00 (東京都大田区・テレコムエンジニアリングセンター)	参加者：岐大・東大・LM

4. 結言

本研究では、原子炉建屋内に対して簡単に設置でき、安定にリアルタイム位置測位可能な組込システムの実現を目指している。初年度において、岐大グループがカメラ撮影機能・カメラ分析機能（エッジコンピューティング）・無線通信機能を有する組込装置（第一次）を開発し、3D位置測位の基礎機能を証明、また、磁石による迅速な着脱ケースも完成させている。東大・LMグループは、UWB装置の開発と、その特性分析を行った。名大グループは、電磁波吸収材料を作成し、東大・LMグループとともに、UWB通信改善の分析を行った。また福島高専グループは、俯瞰画像方式位置計測法の基盤となるシステム開発を行った。また、原科研グループと協力して、組込装置 Spresense の耐放射線評価を行った。

令和5年度は、岐大グループが3D位置測位の性能向上させた第二次システムを完成させた上、模擬環境でのリアルタイムでの計測を行う予定である。東大・LMグループは、模擬環境にてUWB装置による3D位置測位の性能向上を行う予定である。名大グループは、さらにUWBに調整した電磁波吸収材料を作成し、引き続き東大・LMグループのUWBシステムの性能向上を目指す。福島高専グループは、俯瞰画像方式位置計測法の検証を行い、性能向上を目指す。また引き続き、原科研グループと協力して、UWBを含めた他の組込装置の耐放射線評価を行う予定である。

巻末資料

UWB 電波規制関連

DWM1000 シリーズは屋内のみ対応ですが、DWM3000 シリーズは UWB に関する日本の電波法規上、屋内・屋外ともに対応する。

https://www.arib.or.jp/english/std_tr/telecommunications/desc/std-t91.html?fbclid=IwAR0lyBLCI28AeS_51-xDp1FKI00beee67LjxwV0p6ckIJdMadLk8WVaQ0fA

UWB 電波規制（日本）

STD 番号 ARIB STD-T91

規格名 UWB（ウルトラワイドバンド）無線方式

本標準規格は、電波法施行規則第 4 条の 4 第 2 項第 2 号に規定する UWB（超広帯域）無線システム用無線局の無線設備について規定するものである。

指定された周波数帯は以下の通りである。

屋内用： 3.4 GHz 以上 4.8 GHz 未満
7.25 GHz 以上、10.25 GHz 以下

屋外での使用：7.587 GHz 以上、8.4 GHz 以下
7.25 GHz 以上、9 GHz 以下

UWB 無線システムは、広い帯域幅に電力を分散させることで、近距離高データレート通信や精密距離測定などのアプリケーションに使用できる。

第 1 編 屋内において、3.4 GHz 以上 4.8 GHz 未満または 7.25 GHz 以上 10.25 GHz 未満の周波数の電波を使用する無線設備について規定したものである。

第 2 編 屋内および屋外（上空で運用するものを除く。）において、7.587 GHz 以上 8.4 GHz 未満または 7.25 GHz 以上 9 GHz 未満の周波数の電波を使用する無線設備について規定したものである。

This is a blank page.

