

IoT センシング技術とその基盤となる無線方式の概要と動向

報告書

令和8年4月

一般財団法人 テレコム先端技術研究支援センター

調査委員会名簿

(順不同 敬称略)

委員長	牟田 修	九州大学 大学院システム情報科学研究院 情報知能工学部門 教授
事務局	吉田 努	一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター 研究企画部 部長
事務局	牧野 淳一	一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター 事業部 調査役

目次

第1章 調査の背景と目的.....	4
1.1 調査の背景.....	4
1.2 調査の目的.....	5
1.3 調査報告の構成.....	5
第2章 IoT センシングの要素技術と概要.....	7
2.1 IoT センシングの概要と基本構成.....	7
2.2 IoT センシングの構成要素と関連技術.....	8
2.3 無線センシング技術.....	11
2.4 無線信号を用いた測位・位置推定技術.....	22
2.5 まとめ.....	26
第3章 IoT センシングとユースケース.....	27
3.1 スマート交通.....	27
3.2 スマートファクトリー.....	32
3.3 スマート医療.....	37
3.4 まとめ.....	41
第4章 調査報告のまとめ.....	42
参考文献.....	43

第1章 調査の背景と目的

1.1 調査の背景

センサ技術、無線通信技術、および情報処理技術の進展に伴い、IoT (Internet of Things) を活用したセンシング技術(以下、IoT センシング)が急速に普及している。IoT では、各種センサにより取得された情報を無線通信等によりクラウドやエッジコンピューティング環境に伝送し、収集した情報を解析・活用することで、環境監視、設備管理、健康管理、交通制御等の多様な分野において様々なサービスの提供を可能としている。こうした IoT センシングの発展の背景には、情報通信技術の高度化に加えて、センサデバイスの小型化・低消費電力化や情報処理技術の進展があり、例えば、ウェアラブル機器や環境センサを活用した多様なセンシングを実現している。その結果、交通・医療・産業分野等において IoT センシングの応用範囲は急速に拡大している。その全体構成の概念図を図1に示す。IoT は、センサ情報の取得にとどまらず、センサ、通信、計算、および人工知能(AI: Artificial Intelligence)による情報処理を統合したシステムとして発展しており、情報通信技術を基盤とする重要な応用分野の一つとなっている。本調査報告では、これらの要素を統合したシステム全体を IoT センシングとして扱う。

IoT センシングでは、無線を中心とした通信技術も不可欠な要素である。IoT センシングを支える通信方式としては、セルラー通信(LTE: Long Term Evolution、5G:第5世代移動通信システム)、無線 LAN (Local Area Network, Wi-Fi)、Bluetooth Low Energy (BLE)、LPWAN (Low Power Wide Area Network)、UWB (Ultra-Wide Band) など多様な方式が存在し、それぞれ通信距離、消費電力、データレート、遅延特性といった性能が異なる。そのため、一般的には目的や用途に応じて適切な方式を組み合わせることでシステム構築が行われる。第6世代移動通信(6G)に向けた無線通信の高度化技術として、通信とセンシングの統合(ISAC: Integrated Sensing and Communication)に関する技術が注目されている。ISAC は、通信とセンシングを統合的に扱うことで、通信ネットワークに新たな付加価値を与えるアプローチとして注目されている。それらは既存の通信インフラをセンシング用途に拡張する、あるいはセンシング用途のシステムに通信機能を付加する考え方に大別される。このような技術は、IoT センシングの高度化に向けた重要な方向性の一つであり、本調査で扱う各ユースケースにおいても関連技術として位置づけられる。

IoT センシングの応用分野としては、交通、製造、医療等の多様な応用が考えられ、目的や要求条件等に応じて様々なセンシング技術が活用されている。例えば、スマート交通では広域かつリアルタイムなモニタリングや交通制御等、スマートファクトリーでは高信頼・低遅延な制御や設備監視等、スマート医療では高精度かつ非接触なバイタルセンシング等の要件が求められる。このようにユースケース毎に目的や要求される性能が異なるため、それぞれに適した無線通信方式およびセンシング技術を選択あるいは組み合わせることが重要となる。

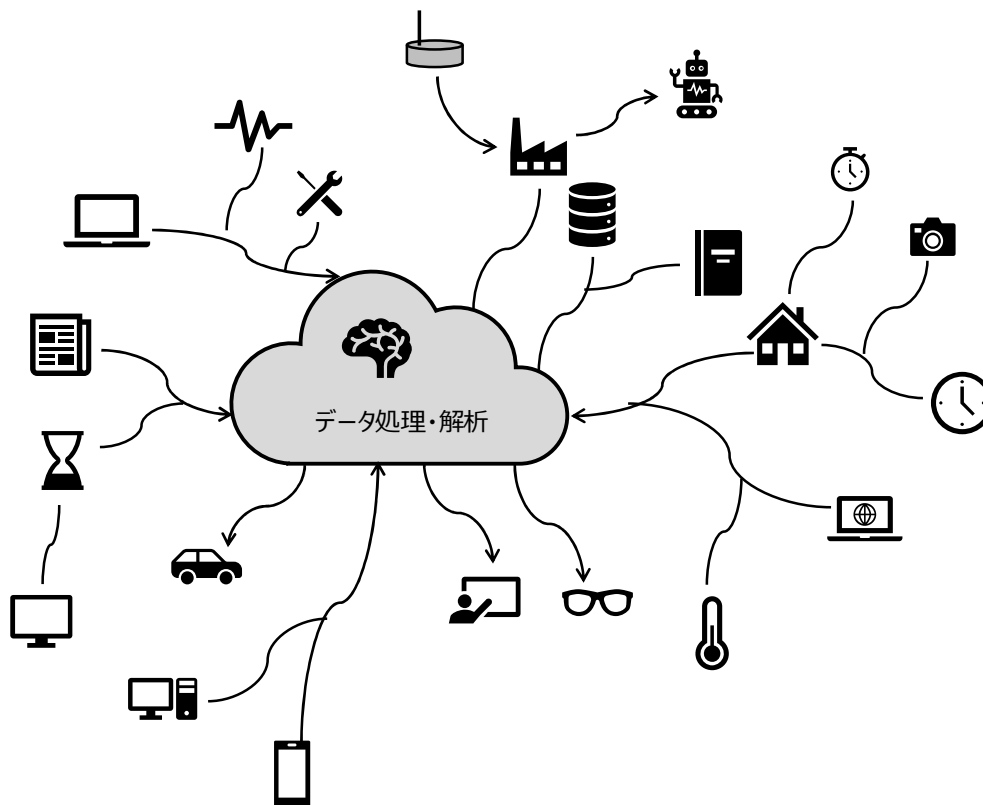


図 1.1 IoT センシングシステムの全体構成の概念図

1.2 調査の目的

本調査では、IoT システムを支えるセンシング技術について、特に無線信号を用いた技術(以下、無線センシング)を中心として、その概要と技術的特徴、ならびにユースケースへの適用例を整理することを目的とする。

1.3 調査報告の構成

本調査では、第2章においてIoTセンシングの概要と要素技術の概要について述べる。次に第3章において、ユースケース毎のIoTセンシング技術の適用例を示す。最後に第4章において本調査報告のまとめを示す。

IoTセンシングとは、センサまたは無線通信を利用して対象の状態等を取得・推定し、通信ネットワークを介してそれらの収集・解析を行う技術やそれらを含む枠組みを指し、一般的には以下の3つの要素から構成される。

- センサ(データ取得)
- 無線通信(データ伝送)
- データ処理(クラウド/エッジコンピューティング、AI 解析)

本報告では、特に無線信号を用いたセンシング技術(無線センシング)に着目し、第2章でその概要を整理する。

IoT センシングの代表的な応用分野として、以下の3つのユースケースを対象とする。

- スマート交通
- スマートファクトリー
- スマート医療

例えば、スマート交通では車両や人の位置・動き、交通流の把握を通じて交通効率や安全性の向上を図る技術等があげられる。また、スマートファクトリーでは設備や作業者の状態を把握することで生産性向上および安全管理の高度化を実現する技術、スマート医療では患者の状態を継続的に把握することで医療・介護の質の向上および負担軽減を図る技術等があげられる。これらのユースケースにおける適用例については、第3章で詳述する。

第2章 IoT センシングの要素技術と概要

IoT センシングとは、センサを内蔵したデバイス(モノ)により計測した情報(データ)を無線通信等の通信ネットワークを介して収集することで、現実世界の情報をデジタル化(数値化・可視化)して活用する技術的枠組みである[1]-[3]。例えば、温度、湿度、光、位置、動き、生体信号などの多様な物理量を計測し、それらを数値データとして取得・共有することで、環境や対象の状態を遠隔から把握することが可能となる。本章では、IoT センシングの概要と、その基盤となる要素技術について述べる。

2.1 IoT センシングの概要と基本構成

IoT(Internet of Things:モノのインターネット)とは、センサや家電、自動車などのさまざまな「モノ」がインターネットを介して相互に接続され、データの収集・共有・活用が行われる仕組みである。従来のインターネットが主に計算機同士の接続を対象としていたのに対して、IoT ではその枠組みを拡張し、多様なモノ(デバイス等)がネットワークに接続される。IoT では、モノに組み込まれたセンサが環境や対象の状態を計測し、そのデータをネットワーク経由で収集・共有する。さらに、取得されたデータはクラウドやエッジサーバ上のプロセッサにおいて解析され、その結果に基づいて制御や意思決定が行われる。このような一連の処理は、センサによるデータ取得、通信によるデータ伝送、情報処理・分析、アクチュエータによるデバイスの動作という流れとして整理でき、現実世界の状態をデータとして取得・表現・活用する仕組みとみなせる。このような IoT の仕組みにおいて、特にセンシング機能に着目したものが IoT センシングである。本報告では、IoT センシングを、センシング、通信、およびデータ処理を統合したシステムとして扱う。

このような IoT センシングの発展の背景として、半導体技術および微細加工技術の進展により多様なモノにコンピュータ・プロセッサを組み込めるようになったこと、低消費電力で多数の機器を接続可能な通信技術やネットワークプロトコルの発展、および音声や映像、環境情報など多様なデータを共有・解析できる情報処理基盤の高度化が進んだことなどが要因としてあげられる。IoT を用いたセンシング技術は、観測対象の状態把握や制御を可能とし、例えば、スマートホーム、スマートファクトリー、交通、医療・ヘルスケア、農業等の分野での応用が進んでおり、新たな価値を創出する基盤技術として期待されている。本章では、IoT の中でも特に無線通信を利用したセンシング技術に着目し、その概要について整理する。

まず、IoT センシングにおける基本的な処理の流れを図 2.1 に示す。IoT センシングでは、外界の物理的な変化をセンサ等により計測し、温度や光、位置、動きなどの情報として取得する。取得されたデータは必要に応じてクラウドやエッジサーバへ伝送され、その後、AI・機械学習を含むデータ処理や解析が行われる。さらに、その結果に基づいて意思決定がなされ、アクチュエータを介した物理的な動作として出力される。この一連の処理により、現実世界の状態をデジタル情報として取得・活用し、必要に応じて物理世界へフィードバックすることが可能となる。

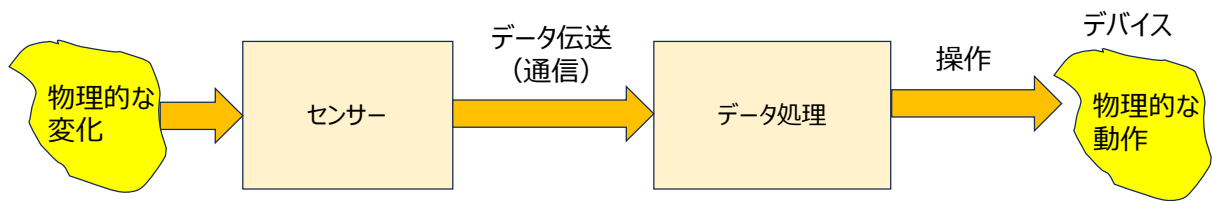


図 2.1: IoT センシング処理の基本フロー

2.2 IoT センシングの構成要素と関連技術

IoT センシングでは、外界の物理的な変化を検出するセンサ技術、取得した情報を伝送する通信技術、および AI・機械学習を含むデータ処理・解析技術が基盤となる。以下では、これらの構成要素について順に述べる。まず、IoT センシングの基盤となるセンサ技術[1]について説明する。

センサ技術

センサは、温度、光、圧力、加速度などの物理量の変化を検知し、それを取得可能な測定データに変換するものであり、環境や対象物の状態を定量的に把握することを可能とする[1]。IoT センシングでは、多種多様なセンサを用途に応じて組み合わせることができる。例えば、環境モニタリングのユースケースでは温度・湿度・気圧センサ等を、人流検知や行動認識では加速度センサや近接センサの活用が期待される。また、同一の物理量に対しても複数のセンシング方式が存在し、それぞれに得失を有する。したがって、計測精度、感度、応答時間、消費電力等の性能指標の他、設置環境、利用および実装のコスト、用途やアプリケーション要件に応じて適切なセンサを用いることになる。IoT センサから収集した情報を解析処理することで、人物の行動認識を実現する技術も検討されている[4]。さらに、IoT センシング端末は単独で動作するだけでなく、複数の端末が通信ネットワークを介して連携することで、分散センシングや協調センシングといった高度なセンシングを実現する。これにより、広域かつ高精度な環境把握や状況認識が可能となる。

上述の通り、IoT センシングでは多様なセンサが用いられるが、本報告ではこれらを網羅的に扱うのではなく、特に通信システムの機能を活用したセンシング技術に着目する。具体的には、無線通信システムにおける無線信号はデータ伝送だけではなく、周囲環境の状態を取得するセンサとしても機能し得る。例えば、Wi-Fi やセルラー通信などの無線信号の伝搬特性を解析することで、人や物体の位置、動き、状態を推定する手法等も検討されている。このように通信とセンシングを一体的に実現する技術は、Integrated Sensing and Communication (ISAC) として注目されており、第 6 世代移動通信 (6G) に向けた重要な研究分野の一つである[5]-[10]。無線通信を利用したセンシングを含む代表的なセンサ種類とその特徴を表 2.1 に示す。本表は文献[1], [6]等を参考に整理したものである。

表 2.1 代表的なセンサ類

センサ種別	測定対象	性質	適用例
温度センサ	温度	抵抗変化、熱起電力	環境監視、空調制御
光センサ	照度・光強度	光電流、抵抗変化	照明制御、検知
加速度センサ	加速度・振動	MEMS	行動認識、振動検知
圧力センサ	圧力・応力	圧電、ひずみ	構造監視
近接センサ	距離・接近	赤外線、超音波	障害物検知
タッチセンサ	接触・操作	静電容量、抵抗	ユーザインタフェース
ガスセンサ	ガス濃度	抵抗変化、吸収特性	環境・安全監視
無線センシング	位置・動き・状態等	電波伝搬特性	行動認識、人流検知

IoT 通信におけるプロトコルスタック

IoT システムでは、センサによるデータ取得、通信、データ処理、アプリケーションといった機能を複数の層に分けて捉える階層モデルが一般的に用いられる。このような階層構造は一般にプロトコルスタックとも呼ばれ、IoT においても様々な階層モデルが提案されている。ここでは、文献[1]で紹介されている4層モデルを取り上げる。

- アプリケーション層 (Application Layer)
- 処理層 (Processing Layer)
- ネットワーク層 (Network Layer)
- 知覚層 (Perception Layer)

このモデルでは、センサ等によりデータを取得する知覚層、取得したデータを伝送するネットワーク層、データの蓄積・解析を行う処理層、およびユーザサービスを提供するアプリケーション層から構成される。さらに、これらの機能を拡張したモデルとして、ネットワーク層を細分化した伝送層 (Transport Layer) や、データ分析および意思決定を担うビジネス層 (Business Layer) を含む階層モデルも提案されている。伝送層はデータの信頼性の高い転送を担い、ビジネス層はシステム全体の運用や意思決定を支援する役割を持つ。なお、IoT の階層モデルは必ずしも一意に定まるものではなく、3層モデルや5層モデルなど様々な構成が提案されている。例えば、文献[11]では、Perception Layer、Transport Layer、Processing Layer、Application Layer、Business Layer から構成される5層モデルが紹介されている。

無線通信技術

IoT センシングでは、センサにより取得されたデータを収集・伝送するために通信技術が用いられる。通信技術は IoT を実現する上で不可欠な要素であり、特に無線通信を介して他の端末やクラウドへデータを伝送する方式が広く用いられている。IoT では用途や要求条件に応じて、広域通信から近距離通信まで多様な無線通信方式が利用されている[11]。

代表的な無線通信方式としては、表 2.2 に示すように、セルラー通信 (LTE-M、NB-IoT、5G 等)、LPWAN (LoRaWAN や Sigfox などの非セルラー系方式)、無線 LAN (Wi-Fi)、および BLE や Zigbee といった近距離無線通信があげられる。無線通信方式は通信距離、データレート、消費電力などの特性が大きく異なるため、それぞれに適したユースケースで利用されている。

セルラー通信は移動体通信に用いられる通信技術であり、多数の基地局によってサービスエリアを形成することで広域カバレッジを実現している。セルラー通信においては、LTE をベースとした低消費電力広域通信技術として LTE-M および NB-IoT が規格化されている。また、第 5 世代セルラー通信 (5G) では、大容量通信 (eMBB: enhanced Mobile Broadband)、高信頼低遅延通信 (URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications)、多数接続 (mMTC: massive Machine Type Communications) の 3 つの主要な適用シナリオが定義されている。LTE-M および NB-IoT は、5G システムにおいても継続利用される通信技術であり、広域 IoT センシングへの応用が期待される。

LPWAN (Low Power Wide Area Network) は低消費電力で数 km 以上の長距離通信が可能であり、遠隔地の環境モニタリングなどの用途に適している。セルラー網を利用する LTE-M や NB-IoT も広義では LPWAN に分類されることもある。一方、非セルラー系の代表的な規格として、LoRaWAN や Sigfox 等が知られている[12]。これらは免許不要帯を利用する LPWAN の方式であり、例えば日本においては 920MHz 帯が広く利用されている。

さらに、近距離通信方式として、無線 LAN、BLE、Zigbee、可視光通信などが挙げられる。無線 LAN (Wi-Fi) は主に屋内環境において高いデータレートを実現でき、スマートホーム等に利用される。BLE や Zigbee は低消費電力で動作するため、ウェアラブル機器やセンサネットワーク用途に適している。可視光通信は光を媒体とする通信方式であり、RF 通信とは異なる特性を有するため、照明インフラを活用したセンシングや高精度な位置推定への応用が期待されている[10]。

ISAC (Integrated Sensing and Communication) に代表されるように無線通信信号そのものを利用したセンシング技術も注目されている[7]-[10]。この手法では、Wi-Fi やセルラー通信などの既存インフラを活用し、信号の伝搬特性の変化から人や物体の存在、位置、動きなどを推定することが可能である。これに

より、専用センサを追加することなくセンシング機能を実現できる可能性があり、今後の重要な技術分野として期待されている。

表 2.2 無線通信方式の分類

無線通信方式	代表例
セルラー通信	LTE, 5G, LTE-M, NB-IoT
LPWAN(非セルラー)	LoRaWAN, Sigfox
無線 LAN (Wi-Fi)	IEEE 802.11 系
近距離無線通信	BLE, Zigbee
可視光通信	VLC (Visible Light Communication)

データ処理

IoT センシングにおいては、センサにより取得された計測データを通信ネットワークを利用してクラウドやエッジコンピューティング環境に伝送し、蓄積・解析することが一般的に行われている。IoT デバイス自体の計算能力が限られている場合でも、エッジコンピューティングやクラウドコンピューティングを活用することで、高度なデータ処理や AI・機械学習を用いた解析が可能となる。このようなデータ処理技術により、医療、交通、産業分野などにおける多様な応用が実現されている。IoT センシングの具体的な応用については、第 3 章で述べる。

2.3 無線センシング技術

本節では、無線信号を利用したセンシング技術(無線センシング)について、その基本原理および技術的特徴を整理する。無線センシングは、無線チャネルにおける電波伝搬特性を観測・解析することで、対象物の挙動等(存在や動きなど)を推定する技術である。近年では、通信とセンシングを一体的に実現する Integrated Sensing and Communication (ISAC) が注目されており、Beyond 5G/6G における重要な技術として位置づけられている。無線センシングにおいて、対象がデバイスを持たない場合のセンシングはデバイスフリーと呼ばれる。本節では、デバイスフリーの無線センシング方式を中心に述べる。

2.3.1 無線センシングの原理

無線信号は、送信機から受信機へ伝搬する過程で、反射、散乱、回折などの影響を受ける。このため、受信信号は複数の伝搬経路(マルチパス)の重ね合わせとして観測される。各伝搬経路は利得、遅延、角度、ドップラーシフトなどのパラメータで特徴付けられ、対象の存在や動きに応じて変化する。このような変化を観測・解析することで、環境や検知対象に関する情報の推定が可能となる。

無線センシングにおける代表的な観測量としては、一般的に、受信信号強度(RSS: Received Signal Strength)やチャンネル状態情報(CSI: Channel State Information)、ドップラー成分等があげられる。RSSは受信信号の電力レベルを表す観測量であり、CSIは一般的にはチャンネルの周波数応答(CFR: Channel Frequency Response)やインパルス応答(CIR: Channel Impulse Response)等として表現される。また、レーダにおけるセンシングでは、対象物の反射特性を表すレーダ断面積(RCS: Radar Cross Section)も観測量となる。

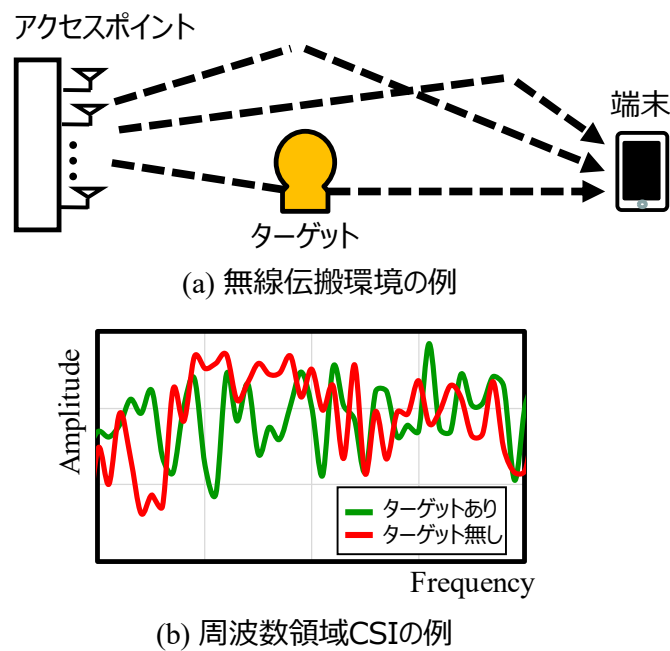


図 2.2 無線センシングにおける伝搬環境と伝搬路特性の例

図 2.2 に、無線センシングにおける伝搬環境と観測信号(周波数応答特性)の例を示す。図 2.2(a)に示すように、検知対象(ターゲット)の存在はアクセスポイントと端末間の伝搬経路に影響を与える。その

結果、図 2.2(b)に示すように、ターゲットの有無に応じて周波数応答特性(例えば CSI)に変化が生じる。このような伝搬環境特性の変化を利用することで、検知対象の有無や挙動を推定することが可能となる。例えば、CSIを特徴量としたAIや機械学習を用いた解析により、対象物の存在や動きを推定できることが報告されている[6]。

2.3.2 無線センシング方式の分類とトポロジー

無線センシングは、その構成や利用する信号等の複数の観点から分類することができる。例えば、観測信号を能動的に送信するかどうかに基づく分類(アクティブセンシング/パッシブセンシング)や、利用する信号の種類に基づく分類(レーダ信号/通信信号)などが挙げられる。一般に、無線センシング方式はこれら複数の観点を組み合わせて構成される。

無線センシングの性能は、送信機と受信機の配置や構成(トポロジー)にも大きく依存する。単一の送受信ノードによる構成に加え、複数ノードを用いた分散・協調構成が考えられる。これらの構成により、観測可能な信号情報や推定精度が異なるため、用途に応じた適切なトポロジー設計が重要となる。無線センシングにおける代表的なトポロジー構成を図 2.3 に示す。無線センシングのトポロジーは、送信点と受信点の関係に基づき、モノスタティック構成とバイスタティック構成に大別される[6]。モノスタティック構成では送信点と受信点が同一であり、主にレーダーなどで用いられる。一方、バイスタティック構成では送信点と受信点が分離され、例えば無線通信システムにおいて基地局と端末間の伝搬特性を利用する場合などが該当する。さらに、複数の送受信ノードを用いるマルチスタティック構成も広く検討されている。

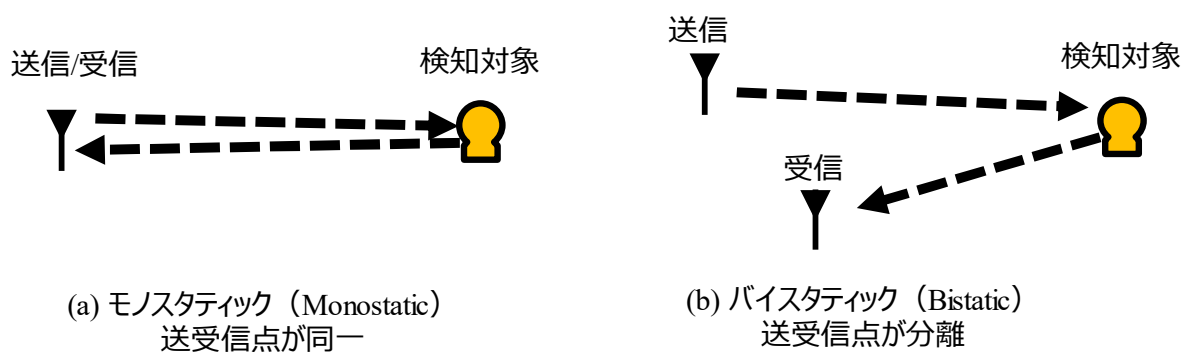


図 2.3 無線センシングにおける代表的なトポロジー構成

上記に加えて、センシングシステム的设计の観点からは、センサをどのような場所に設置するかに基づ

く分類も考えられる。センサを用いた手法は、人体に装着するウェアラブル型、物体に設置するオブジェクト型、環境に設置するアンビエント型等に分類される[4]。例えば、ウェアラブル型では人体の動作や生体情報の取得、オブジェクト型では物体の操作や使用状態の把握、アンビエント型では環境中の状態変化や人の行動の間接的な観測が可能となる。このように、目的やユースケースに応じて適切な形態を選択することがセンシングシステム設計では求められる。

2.3.3 センシング処理の一般的な処理フロー

無線センシングは、観測信号や伝搬環境に依存して様々な形態をとるが、その処理は共通の枠組みとして整理できる。以下に、一般的な処理フローを示す。

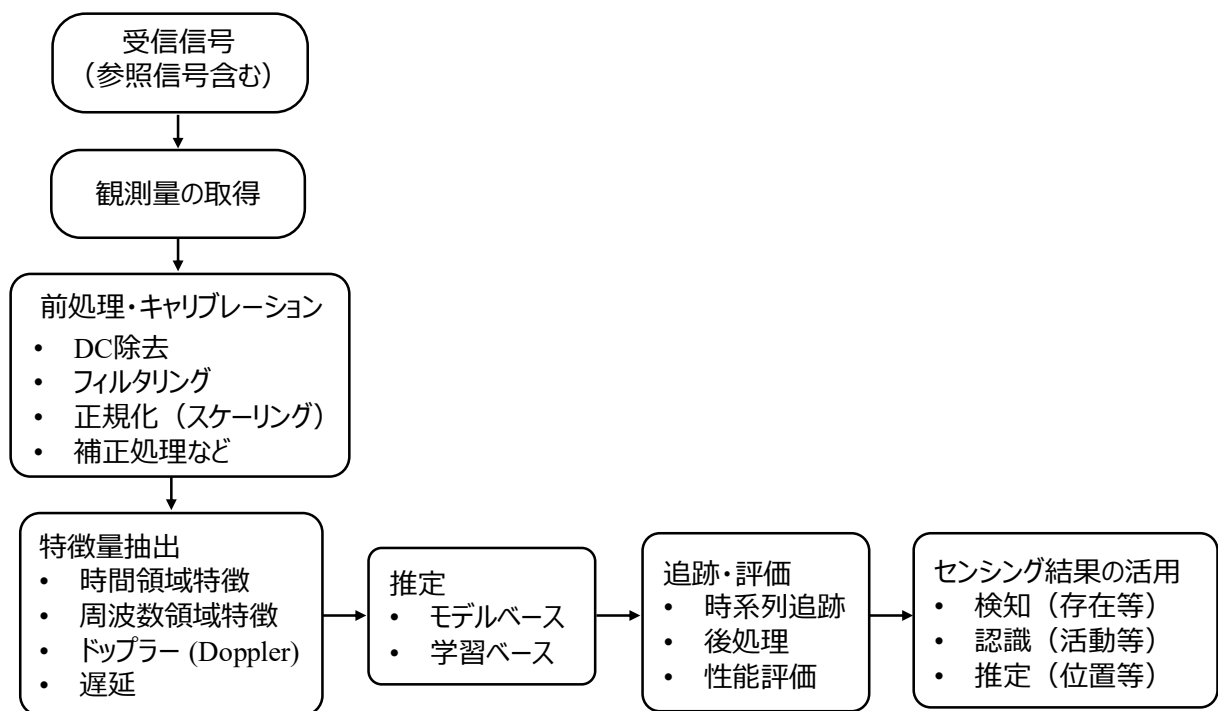


図 2.4 無線センシングにおける一般的な処理フロー

(1) 観測量の取得

受信信号や参照信号を用いて、チャンネル情報 (CSI など) や受信信号強度 (RSS) といった観測量を取得する。

(2) 前処理・キャリブレーション

ハードウェア起因の誤差(位相誤差、周波数オフセット、利得変動)や雑音の影響を低減するため、補正やフィルタリング等の前処理を行う。

(3) 特徴量抽出

伝搬路等に関する観測情報に基づき、遅延(ToF: Time of Flight)、速度(ドップラー)、角度(AoA: Angle of Arrival)などの物理量や、それらに基づく特徴量を抽出する。これらの物理量は測位にも利用され、その詳細は 2.4 節で述べる。

(4) 推定

モデルベース手法(幾何・伝搬モデル)または学習ベース手法(機械学習・深層学習)を用いて、対象の存在や動き、状態などを推定する。これらの手法は、物理モデルやルール等の知識に基づく知識駆動型(Knowledge-driven)と、データに基づくデータ駆動型(Data-driven)に大別されることもある[1]。

(5) 追跡・評価

カルマンフィルタ等による時系列追跡や、各種評価指標に基づく性能評価を行う。

上述の無線センシングにおける一般的な処理フローを図 2.4 にまとめる。

2.3.4 無線センシングの代表的技術とその特徴

無線センシングは、観測する信号や伝搬媒体、目的やユースケースに応じて様々な形態をとる。本節では、一般的に用いられるいくつかの代表的な技術を取り上げ、それぞれの特徴について概説する。これらの技術は、対象の存在検知や位置推定に加えて、人の行動や状態の推定(HAR :Human Activity Recognition)等にも応用されている[14]-[19]。

(1) CSI を用いた無線センシング

CSI(Channel State Information)は無線伝搬路の状態を表す情報であり、一般には周波数領域の伝搬路応答(CFR: Channel Frequency Response)、または遅延時間領域のインパルス応答(CIR: Channel Impulse Response)として表現される。伝搬路周波数応答(CFR)は次式のように与えられる。

$$H(f, t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) e^{-j 2\pi f \tau_l(t)}$$

ここで、 $\alpha_l(t)$ および $\tau_l(t)$ はそれぞれ l 番目の伝搬経路の利得と遅延を表す。対象の移動や環境変化によりこれらのパラメータが時間的に変動するため、その結果としてドップラー周波数成分が観測される。OFDM 信号を用いて CFR を測定する場合、周波数応答がサブキャリアごとに離散的に取得される。さらに、周波数領域のチャンネル応答に逆フーリエ変換を適用することで、伝搬路インパルス応答(CIR)が得られる。

$$h[n, t] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k, t] e^{j \frac{2\pi k n}{N}}$$

ここで、 N はサブキャリア数、 k はサブキャリアインデックス、 n は遅延インデックス、 $H[k, t]$ は時刻 t における周波数領域チャンネル応答(CFR)を表す。

上記の CFR および CIR は、無線伝搬路におけるマルチパス構造を反映した観測量であり、各伝搬経路の遅延や利得といった情報を含んでいる。このため、対象の存在や動作に伴う伝搬特性の変化をセンシング対象の変動として捉えることで、対象の状態を推定することが可能となる[14]-[19]。例えば、伝搬路応答におけるドップラー成分を抽出することで、対象の動作や速度の推定が可能となる。一方で、実測 CSI にはキャリア周波数オフセット(CFO: Carrier frequency offset)やサンプリング周波数オフセット(SFO: Sampling frequency offset)などに起因する位相歪みが含まれるため、これらを補正し、環境に依存しない変動成分を抽出するための前処理(位相補正や静的成分の除去など)が重要となる。

(2) RIS を用いる無線センシング

Reconfigurable Intelligent Surface(RIS)は、反射特性を制御可能なメタサーフェスであり、無線伝搬環境を動的に制御可能とする技術である。RIS を用いることで伝搬環境を能動的に制御できるため、従来のセンシングの枠組みを、チャンネルを能動的に制御しながら観測を行う形へ拡張できる点に特徴がある。すなわち、従来のセンシングが環境に依存したチャンネル変動を受動的に観測するのに対し、RISを用いることでチャンネル自体を人為的に変化させながら観測を行うことが可能となる。RISを導入した場合、受信信号は、RIS で反射された経路成分とそれ以外の経路成分の和として表される。

$$H_{eff} = H_{rx,ris} \Phi H_{ris,tx} + H_{direct}$$

ここで、 $\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$ は RIS の位相制御行列である。RIS の各要素の位相 θ_n を制御するこ

とで、伝搬経路の位相および利得を操作することが可能となる。RIS の位相を、例えば推定精度や識別性に関する目的関数を最適化するように制御することで、対象に関する情報を観測量(CSI 等)に有効に反映させることができる。その結果としてセンシング精度の向上が期待できる。さらに、RIS により伝搬環境を制御することで、通信とセンシングに関わる伝搬特性を同時に制御・最適化することが可能となり、両者の統合的な設計(ISAC)への応用が期待されている[9]。図 2.5 に RIS を用いた無線センシングの概念図を示す。なお、図 2.5 では簡単化のため、RIS を経由しない経路成分は省略している。

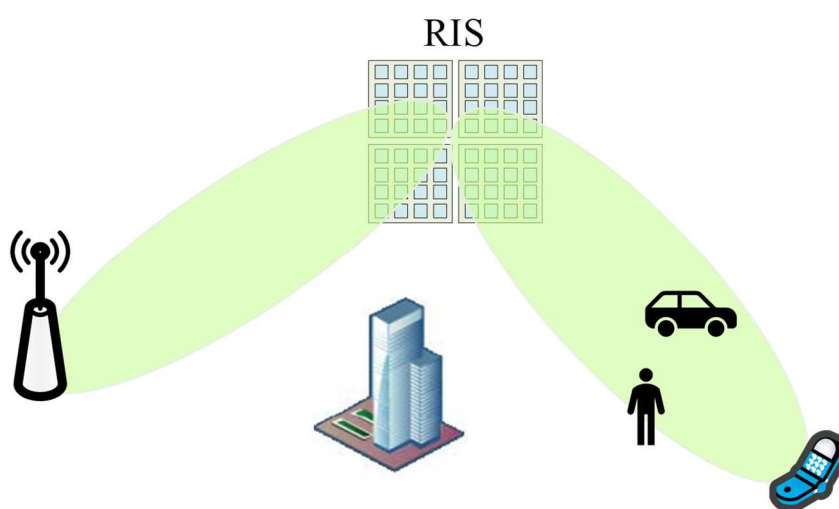


図 2.5 RIS を用いた無線センシングの概念図

(3) 可視光を用いたセンシング

可視光を用いたセンシングの概念を図 2.6 に示す[13]。可視光は直進性が高く壁透過がないため、空間的に局所的なセンシングが可能であり、秘匿性やプライバシーの観点で有利と考えられる。一方で、遮蔽や照明条件の影響を受けやすいことが課題となる。一般に、光源として LED、受光器としてフォトダイオードを用い、光強度の変化を観測する。可視光通信では強度変調・直接検波(IM/DD: Intensity Modulation / Direct Detection)が用いられ、受信信号は非負実数信号として次式のように表される。

$$y(t) = h(t)x(t) + n(t)$$

ここで、 $h(t)$ は光チャネル利得であり、RF 通信とは異なり実数かつ非負の値をとる。このため、主に

強度情報に基づいてセンシングを行う点が特徴である。可視光センシングでは、対象による遮蔽 (shadowing) や表面での反射 (reflection) により光強度が変化することを利用する。光チャンネルは送受信機の幾何配置に強く依存し、位置や姿勢の変化が受信信号強度に反映される。このため、受信信号の時間変動や空間分布を解析することで、対象の存在や動き、位置に関する情報を推定することが可能となる。光チャンネル利得は、一般に Lambertian モデルに基づき以下のように表される。

$$h \propto \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos^m \psi$$

ここで、 d は距離、 ϕ および ψ はそれぞれ放射角および入射角を表す。このように、位置や姿勢の変化が受信信号強度に直接反映されるため、幾何情報の推定に適している。対象が受光デバイスを持たない場合にも適用可能なデバイスフリー型センシングとして利用できる[13]。一方で、周囲光やデバイス特性の影響を受けやすいため、このような影響を低減するための対策が求められる。

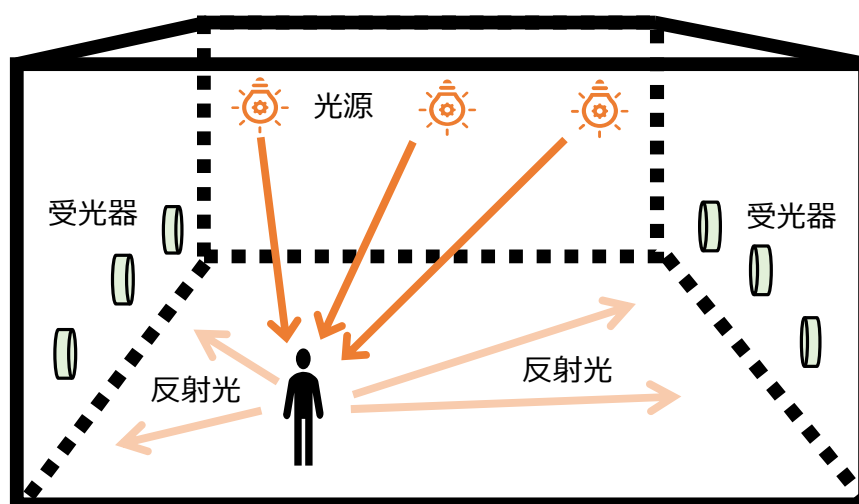


図 2.6 可視光を用いたセンシングのイメージ図

(4) 技術的な課題

無線センシングにおいては、一般に以下のような課題が指摘されている。

- データ収集およびラベル付けのコスト(主にデータ駆動型手法)
- センシング環境への依存性やモデル誤差

- センシングデバイスの非理想性や測定誤差の影響

機械学習等のデータ駆動型手法では大量の教師データが必要となるため、データ収集およびアンテナに大きなコストがかかる。また、データの不規則性や個人差、環境差による性能変動も課題となる。さらに、デバイスの非理想性等による観測データのばらつきも劣化要因となる。センシングの手法によっては送受信機間の高精度な同期が求められる場合がある。特に、ISAC のように通信とセンシングで同一の受信機を共用する場合には、受信機の AD 変換器において要求されるダイナミックレンジが通信とセンシングで異なるため、センシング精度の劣化要因となり得ることが指摘されている[19]。さらに、無線通信では送信機と受信機で異なる発振器を用いるため、周波数オフセット(CFO)等の個体差が存在し、これらがセンシング性能に影響を与える可能性があり、その考慮が必要であること等も報告されている[19]。

2.3.5 ISAC に向けた無線センシング技術

ISAC (Integrated Sensing and Communication) では、同一の信号およびハードウェアを用いて通信とセンシングを同時に実現する。ISAC の実現形態は、通信信号をセンシングに活用する通信中心型 (communication-centric) と、センシング機能を主目的として専用波形を用いるセンシング中心型 (sensing-centric) に大別される[10]。通信信号はセンシング信号としても利用可能であり、伝搬路特性として観測されるチャネル情報 (CSI) には対象の存在や動作に関する情報が反映される。したがって、CSI をセンシング用途に活用することで通信機能とセンシング機能を統合的に実現することが可能となる。また、センシングにより得られた環境情報を通信に活用することで、通信性能の向上も期待される。

ISAC では、既存の通信インフラをセンサとして活用できるため、新たな専用センサを設置することなくセンシング機能を実現できるという利点がある[20][21]。一方で、通信機器は本来センシングを目的として設計されていないため、前節(4)でも述べたように、受信機のダイナミックレンジや周波数同期精度などの特有の検討課題も指摘されている[19]。また、通信とセンシングでは性能指標 (KPI: Key Performance Indicator) が異なるため、波形設計やリソース配分においてトレードオフが存在する。通信とセンシングを両立させる波形設計は重要な課題の一つであり、変調波形とレーダー波形の統合に関する検討も行われている[22]。現在の無線通信システムでは OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が広く用いられているのに対して、ISAC に向けた高速移動環境にロバストな方式として、OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) 変調や ODDM (Orthogonal Delay-Doppler Division Multiplexing) 等の検討も行われている[22]。

上記に加えて、通信システムにおける帯域幅や信号フォーマット (例えば OFDM におけるサブキャリア数)、アンテナ数などの構成はセンシング性能にも影響を与えるため、これらを考慮した設計が必要となる。ISAC の実現に向けては、5G NR のミリ波 Massive MIMO 基地局を用いた物体 (車両等) の位置推定

や、ミリ波レーダーを用いた屋内人数推定などの実証実験結果が報告されている[23]。さらに、RIS 等の伝搬環境制御技術と組み合わせる考え方[9]や、エッジおよびクラウドで処理を分担する ISAC 向けのアーキテクチャ設計とその実証結果[24]も報告されており、ISAC の実用化に向けた研究開発が進められている。

ISAC の標準化に関する取り組みとして、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) による第6世代移動通信システム (6G) の標準化規格 IMT-2030 において、ISAC (通信とセンシングの統合) に関する検討が行われている[21]。さらに、移動通信システムの技術仕様を策定する国際的な標準化のプロジェクトである 3GPP においても、ISAC の実現に向けて、ユースケースの整理や要件定義等の検討が進められており、以下のような多数のユースケースが 3GPP において規定されている[21][25]。

- ・ 屋外におけるユースケースとして、線路や高速道路への人や動物の侵入検知、人流推定、交差点におけるセンシング (死角における物体検知や混雑状況のモニタリング等)、UAV の侵入検知や飛行軌跡の追跡、天候モニタリング (豪雨や洪水の検知等) 等があげられている[21][25]。
- ・ 屋内におけるユースケースとして、工場におけるセンシング (自動搬送車や自律移動ロボットの位置追跡や周辺環境のモニタリング等)、自宅におけるセンシング (侵入者の検知やヘルスマニタリング等) 等があげられている[21][25]。

これらのユースケースに関連する検討として、例えば、商用基地局から送信される LTE や 5G の通信信号を活用した ISAC 実験システムが提案されており、商用基地局の電波を用いて人流推定を行った場合の実験結果に基づき無線センシング (人流検知への応用) の有効性について報告されている[20]。

一方、無線 LAN の分野においても、IEEE において無線センシングに関する標準化に向けた取り組みが行われている。IEEE 802.11mc では、RTT (Round Trip Time) に基づき端末と AP 間の距離を測定する機能 (FTM: Fine Timing Measurement) が導入されている[26]。FTM を利用することで測位や位置推定が可能であるが、これは次節で述べるデバイスベースの方式 (対象が無線端末を有することを前提) に相当する。一方、IEEE 802.11bf では、無線 LAN の CSI を用いたデバイスフリーセンシングに向けて、センシング開始から測定結果取得までの手順に関する検討が進められている[26]。IEEE 802.11bf 準拠の無線 LAN が普及することで、既存の Wi-Fi インフラを活用したデバイスフリーセンシングの利用と高度化が期待されている。

2.3.7 その他

上記の無線センシング技術は、Wi-Fi に代表される WLAN 環境に限らず、例えば、ミリ波 (mmWave)

帯のシステムや超広帯域(UWB)通信、さらにはセルラー通信システムにおいても適用可能であり、周波数帯や帯域幅の違いを活かした多様なセンシング手法が検討されている。これらのシステムでは、信号帯域や周波数特性(帯域幅や中心周波数)の違いによりセンシング性能が変化する。mmWave や UWB のような広帯域信号[27]を用いる場合、時間分解能および距離分解能を向上できるため、測位・位置推定への適用も検討される。測位・位置推定技術については次節でも述べる。

2.4 無線信号を用いた測位・位置推定技術

無線信号を利用した位置推定はIoTセンシングにおける重要な技術の一つである。例えば、受信信号強度(RSS: Received Signal Strength)に基づく測位手法は、対象が無線デバイスを有することを前提とするデバイスベースのアプローチとして広く利用されている。一方、2.3節で述べたデバイスフリー型の無線センシングに対し、位置推定のように対象が無線デバイスを有することを前提とする手法は、デバイスベースのアプローチに分類される。本節では、このような無線信号を用いたデバイスベースの位置推定技術について、その基本的な考え方と代表的な手法を概説する。

一般に、位置推定問題は観測データに基づいて未知位置を推定する統計的推定問題として定式化され、最小二乗法や最尤推定法などにより非線形最適化問題として解かれることが知られている。本節では、位置推定の原理的な説明の一例として、線形最小二乗法(LLS: Linear Least Squares)を用いた手法[28]について述べる。なお、本節では、太文字の記号はベクトル・行列を、上付の添字-1, T はそれぞれ行列の逆行列、転置を表す。

まず、位置が既知であり基準として用いられる無線局(アンカーポイント)と、位置が未知の対象(位置推定対象、ターゲット)を考える。

位置推定対象の座標を

$$p_t = (x_t, y_t, z_t),$$

固定局の座標を

$$p_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (i = 1, \dots, N)$$

とする。このとき、両者間の距離は以下で与えられる。

$$d(p_t, p_i) = \sqrt{\{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2\}} \quad (1)$$

また、RSSは距離減衰モデルにより次式で表される。

$$\tilde{Z}(p, p_i) = \tilde{Z}_0 - 10\tilde{\alpha}\log_{10} d(p, p_i) + \omega \quad (2)$$

ここで、パスロス係数 $\tilde{\alpha}$ 、基準受信電力 \tilde{Z}_0 、固定局の座標 p_i 、および対象の z 座標は既知と仮定する。

これらの式は未知変数 (x_t, y_t) に対して平方根および対数を含むため、位置推定問題は非線形方程式として定式化される。ここで、 ω は平均0、分散 σ^2 のガウス確率変数、 $\tilde{\alpha}$ はパスロス係数、送信電力を P_T とし、 \tilde{Z}_0 は下式で与える。

$$\bar{Z}_0 = 10 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi} + 10 \log_{10} P_T \quad (3)$$

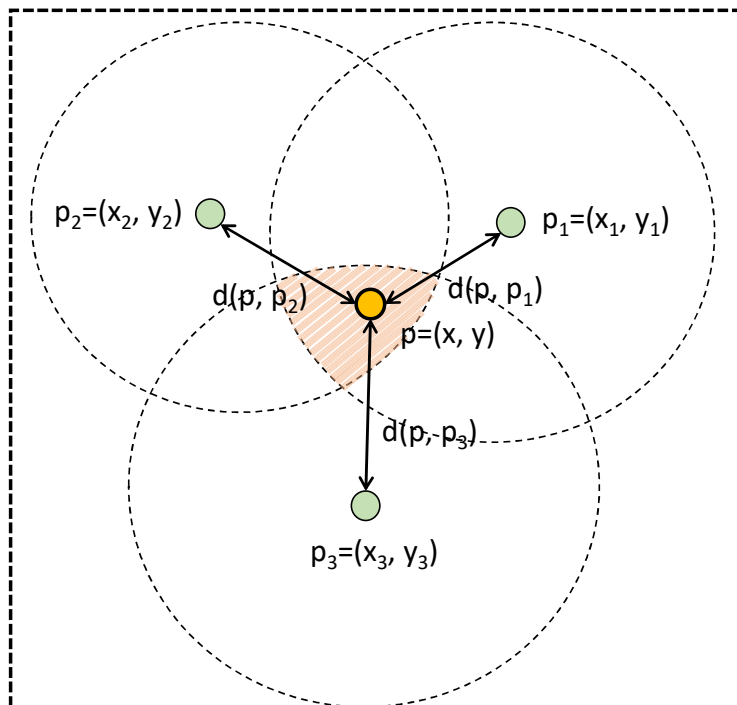


図 2.7: 3 つの信号源を有する場合の平面位置推定問題 (z 座標は既知と仮定)

図 2.7 に平面位置推定を考えた場合の信号源と位置推定対象の座標との関係を示す。ここで、図 2.7 では、平面位置推定を考えるため、 z 座標は既知(または一定)と仮定している。2 次元の位置推定では、少なくとも 3 つの固定局が必要となる。図 2.7 に示すように、各固定局と位置推定対象との距離関係に基づいて、位置推定問題は幾何学的関係として定式化される。これを数式で表すと、式(1)および式(2)のように距離と RSS の関係式として記述される。これらの式は未知変数に対して平方根および対数を含むため、位置推定問題は非線形連立方程式として定式化される。一方で、距離式を展開し、 $x^2 + y^2$ を新たな変数として導入することで、未知変数に対して線形な形式へと変形することが可能となる。このような変換により、線形最小二乗法を適用可能な形に変換することができる[28]。

具体的には、式(1)~(3)を変形し整理することで、位置推定問題は以下の行列形式で表される。

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{b}(\alpha) \quad (4)$$

与えられる。ここで、式変形の過程で導入した変数を $\psi = \frac{2}{\{10\alpha\}}$ とする場合、 \mathbf{A} 、 $\boldsymbol{\theta}$ 、 $\mathbf{b}(\alpha)$ はそれぞれ以下のように与えられる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_N & -2y_N & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ x^2 + y^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}(\alpha) = \begin{bmatrix} 10^{\frac{2}{10\alpha}}(\bar{z}_0 - \bar{z}(p, p_1)) - \{x_1^2 + y_1^2 + (z - z_1)^2\} \\ 10^{\frac{2}{10\alpha}}(\bar{z}_0 - \bar{z}(p, p_2)) - \{x_2^2 + y_2^2 + (z - z_2)^2\} \\ \vdots \\ 10^{\frac{2}{10\alpha}}(\bar{z}_0 - \bar{z}(p, p_N)) - \{x_N^2 + y_N^2 + (z - z_N)^2\} \end{bmatrix}$$

ここで、行列 \mathbf{A} がフルランクとする。観測した受信電力値には誤差 ω を含むため、推定結果($\boldsymbol{\theta}$)には位置座標の不確定性を生じる。そこで、以下の誤差関数を最小とする解($\hat{\boldsymbol{\theta}}$)を求める。誤差関数 J を以下で定義する。

$$J = \|\mathbf{A}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{b}\|_2^2 \quad (5)$$

上式を最小にする $\boldsymbol{\theta}$ は以下の式で与えられる[xx]。

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (6)$$

ここで、行列 \mathbf{A} が列フルランクである場合(本問題では $\text{rank}(\mathbf{A})=3$ の場合)、 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ が存在し、一意な解が得られる。この一意性の条件はアンカーポイントの配置に依存しており、幾何配置が不適切な場合には行列 \mathbf{A} がランク落ちし、一意解が得られない場合がある。したがって、アンカーポイントの配置を適切に設計することが重要である。なお、上述の最小二乗法は、観測誤差がガウス分布に従う場合には最尤推定と一致することが知られている。ただし、上記の問題では RSS から距離に非線形の変換を施すため、厳密には元の RSS 観測モデルに対する最尤推定とは一致しない。さらに、本手法は低演算量で解を求めることができる利点を有する一方で、元の非線形最小二乗問題を直接解くものではないため、観測誤差を含む場合には得られる解は厳密な最適解とは一般に一致しない。RSS はマルチパスの影響等により大きく変動するため、特に屋内等の反射物の多い環境では RSS と距離との関係は大きなばらつきを持つ。上述の通り、推定精度は固定局の配置や観測条件に依存し、その性能限界はクラメル・ラオ下界などにより評価される[29]。

位置推定手法としては、受信信号強度 (RSS) のほかに、到達時間 (TOA: Time of Arrival) [29] や到達時間差 (TDOA: Time Difference of Arrival) に基づく手法がある。これらはいずれも距離または距離差を推定し、幾何学的関係に基づく連立方程式として位置を求める点で RSS を用いる方式と共通している。したがって、観測モデル (RSS モデルや時間測定モデル) の違い、具体的には、TDOA では距離差、AoA では到来方向を観測量とするため観測方程式およびその線形化の方法はそれぞれ異なることを除けば、本節で示した推定手法と同様の考え方を適用できる。

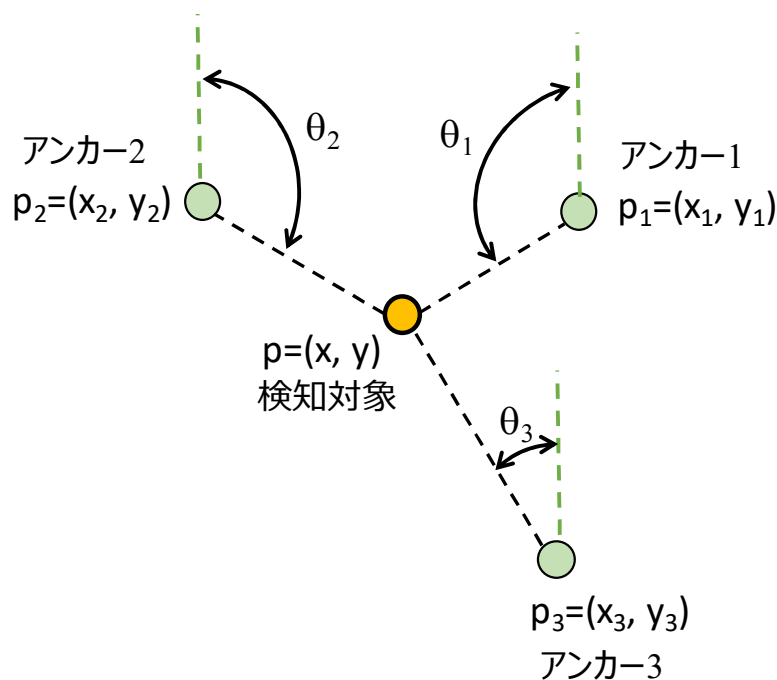


図 2.8: AoA(到来角)に基づく平面位置推定の考え方

到来角 (AoA) に基づく手法も知られており、観測データから対象位置を推定する点は共通しているが、距離ではなく到来方向を用いるため推定の考え方が異なる。図 2.8 に、AoA(到来角)に基づく平面位置推定の概念図を示す。各アンカーポイントにおいて、到来する信号の角度 (AoA) が観測されると、対象位置は各アンカーポイントから観測方向に延びる直線上に存在することになる。したがって、複数のアンカーポイントで得られる到来方向の交点として対象位置を推定することができる。図 2.8 では、3 つのアンカーポイントから観測された到来角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 に基づき、それぞれの方向に対応する直線を引き、その交点として位置 (x, y) が求められる様子を示している。ただし、実際には観測誤差の影響により各直線は一点で交わらない場合が多く、その場合には最小二乗法などを用いて複数の直線との誤差を最小とする位置を推定する。

以上のように、RSS に基づく位置推定は、受信信号強度と距離の関係を利用し、幾何学的関係に基づいて位置を推定する手法である。本手法は比較的簡便に実装可能であるものの、アンカーノードの配置や周辺の反射波の有無、測定誤差等の影響を受けやすい。また、本節で示した推定の枠組みは、観測モデルの違いを除けば、TOA や TDOA 等を用いる位置推定手法にも同様の考え方を適用できる。ただし、これらの手法では観測量や観測方程式が異なるため、具体的な定式化や線形化の方法はそれぞれ異なる。ここでは、RSS を用いた方式を例として取り上げ、位置推定問題に共通する基本的な枠組みとその考

え方を示した。

2.5 まとめ

本章では、IoT センシングの基盤となる技術として、センサ技術、無線通信技術、およびデータ処理技術の概要を整理するとともに、特に無線信号を利用したセンシング技術(無線センシング)について、その基本原理および代表的手法を概説した。また、通信とセンシングを統合する ISAC 技術の動向や標準化の状況についても整理した。さらに、無線センシングの分類として、検知対象が無線デバイスを有しないデバイスフリー型と、デバイスを有するデバイスベース型に分類し、後者の例として RSS に基づく位置推定手法の基礎と特徴を示した。IoT センシングは、無線通信インフラを活用したセンシングへの拡張が進んでおり、通信とセンシングの統合(ISAC)が重要な技術キーワードとなっている。本章では IoT センシングの技術的側面に焦点を当てたが、具体的なユースケースと無線方式の適用事例については第 3 章において詳述する。

第3章 IoT センシングとユースケース

本章では、IoT センシング技術の応用分野として、スマート交通、スマートファクトリー、およびスマート医療を例にとり、その概要や事例を紹介する。これらはいずれも無線通信および無線センシング技術を活用した応用が進んでいる分野であり、目的や要求条件に応じて適切な無線方式が採用されている。例えば、スマート交通では広域かつリアルタイムなモニタリング、スマートファクトリーでは主に屋内環境におけるモニタリングや生産設備の状態把握、スマート医療では高精度・非接触なバイタルセンシング等が代表的なユースケースとして取り扱われている。第 2.3 節で述べたように、3GPP においても交通、工場、自宅でのセンシングや、人流推定、UAV の検出・追跡等、多数の無線センシングに関するユースケースが規定されている。これらのユースケースに加えて、無線センシング技術は多様な分野への応用が期待できる。例えば、WiFi の CSI を用いてドローンを検出する手法等も検討されており[18]、機械学習を活用することでドローンの検出や他の飛行物との識別が可能であることが報告されている。商用基地局の電波を用いた人流推定結果も報告されている[20]。

以下では、スマート交通、スマートファクトリー、およびスマート医療を例として、ユースケース毎の無線センシングの一部の事例とそれらの技術内容について整理する。なお、本章で取り上げた以外にも応用事例は多数存在するため、詳細については関連文献を参照されたい。

3.1 スマート交通

(1) 目的

スマート交通は、IoT センシング技術を活用して車両や人の位置・動き・交通流を把握し、交通効率の向上や安全性の確保、インフラ管理の高度化を図ることを目的とする。近年では、都市部における交通渋滞の緩和や事故防止、老朽化したインフラの維持管理といった課題に対応するため、リアルタイムな交通モニタリング技術の重要性が高まっている。さらに、自動運転や協調型交通システム(C-ITS)の進展に伴い、高精度な位置推定および環境認識を実現するセンシング技術も重要と考えられる。

(2) 要求条件

スマート交通におけるセンシングには、例えば、広域にわたる対象を観測するためのカバレッジと、交通状況を即時に把握するためのリアルタイム性等が求められる。また、都市環境では多数の車両や人が存在するため、高密度環境においても安定したセンシングが可能であることが重要である。加えて、交通アプリケーションでは、位置推定精度、遅延、可用性、信頼性(Integrity)といった性能指標が重要視されており、安全関連用途ではサブメートル級の精度や低遅延(ミリ秒オーダー)が求められる場合もある。このため、単一の無線方式ではなく、用途に応じた適切な技術選定が必要となる。

(3) 無線通信方式

上述の要求条件を満たすために、スマート交通では用途に応じて複数の無線通信方式が利用される。Wi-Fi や Bluetooth Low Energy (BLE) は、既存インフラや低コストデバイスを活用可能であり、受信信号強度 (RSS) やチャネル状態情報 (CSI) を用いた近距離センシングや人流推定に適している。一方、LPWAN (LoRa 等) は低消費電力かつ長距離通信が可能であり、都市スケールでの広域モニタリングに適する。

セルラー通信 (LTE/5G) は、広域かつ高信頼な通信基盤を提供するだけでなく、測位参照信号 (PRS) を用いた到達時間差 (TDoA) 測位や、マルチアンテナを用いた到来角 (AoA) 推定により、位置推定への応用も検討されている。また、V2X (Vehicle-to-Everything) 通信を活用することで、車車間および路車間で情報共有を行い、協調的に周辺環境を認識することが可能となる。

さらに、UWB やミリ波 (mmWave) を用いた高精度測位や、GNSS による絶対位置測位も重要な要素技術である。スマート交通では、低コストな近距離センシング (Wi-Fi 等)、広域カバレッジ (LPWAN、セルラー)、高精度測位 (UWB、GNSS)、および協調認識 (V2X) といった役割に応じて無線方式が使い分けられる。近年では、これらを単独で用いるのではなく、複数の無線方式を統合したマルチモーダルなセンシング手法も重要となっている。交通分野における無線センシングの概要図を図 3.1 に示す。

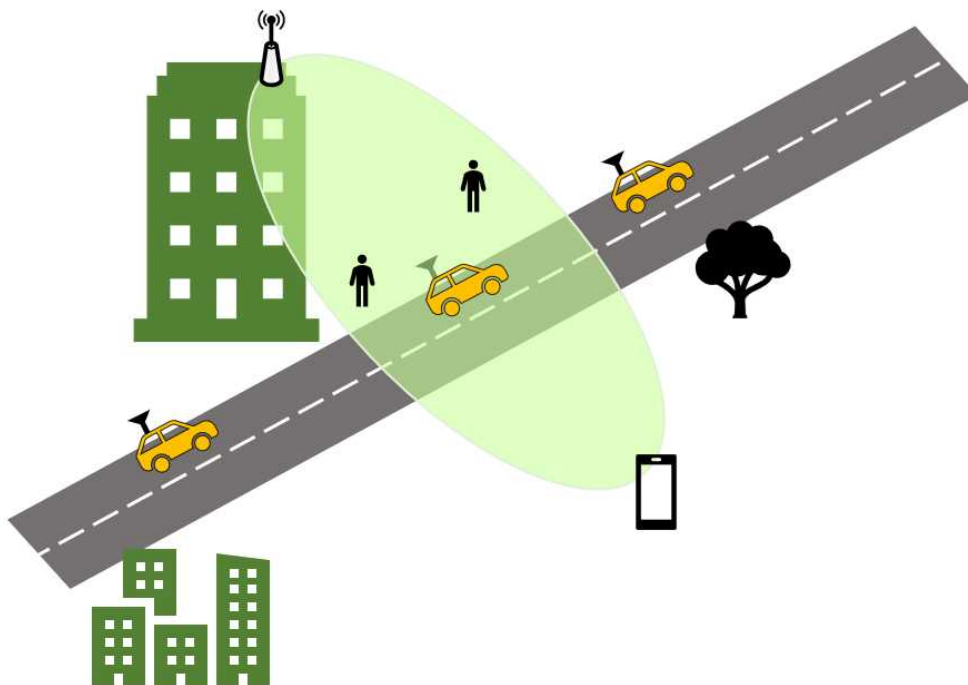


図 3.1 交通分野における無線センシングの概要図

(4) 交通分野における技術適用例

交通分野における無線センシングの適用事例として、いくつかの文献における取り組みを紹介することで、ユースケース毎の無線センシング技術の適用例を示す。具体的には、受信信号強度 (RSS) の時間変動を利用して車両の通過や存在を検知する手法、Wi-Fi 端末 (スマートフォン等) から送信されるプローブ要求信号を受信・解析することで歩行者や車両の流動、移動速度、混雑状況を推定する手法、RSS/CSI 等の時系列データを畳み込みニューラルネットワーク (CNN) などに入力することで人・車両の識別精度を向上させる手法等である。これらの技術は、通信とセンシングを統合する ISAC の枠組みにおける応用としても期待されている。各文献の詳細を以下に示す。

- 文献[30]では、Wi-Fi (無線 LAN) を用いた受信信号強度 (RSS) ベースのデバイスフリー車両検知・分類方式が提案されている。この方式は、車両通過に伴う遮蔽やマルチパス変化によって生じる RSS の時間変動を利用するものであり、ピーク検出によるイベント抽出および特徴量抽出を行った上で、k 近傍法 (kNN)、ランダムフォレスト、Matrix Profile などの機械学習手法により車両の有無や種類を分類する。このような Wi-Fi を用いた低コストなセンシングに対し、より高周波数帯および広帯域を利用する無線方式として、文献[23]では 5G NR のミリ波帯 Massive MIMO 信号を用いた ISAC に基づく車両検知および位置推定の実験検証結果が報告されている。文献[23]の手法は高周波数帯および多アンテナ構成を活かした高精度なセンシングと考えられ、目的や要求条件に応じて適切に使い分けることが重要である。
- 文献[31]では、ITS (Intelligent Transportation Systems) に向けた技術として、無線信号の受信電力強度情報 (RSS) を利用したデバイスフリーの車両および人の検出手法が提案されている。2.4 GHz 帯の Wi-Fi 信号および sub-GHz 帯 (433 MHz および 915 MHz) の LoRa トランシーバを用いた信号を対象とし、RSS の時間変動に基づいて機械学習により識別・検出を行うものである。具体的には、人体や車両の存在に伴うマルチパス変化や遮蔽、ドップラー効果によって生じる RSS 時系列の変動を取得し、ノイズ除去等の処理を行った上で、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) により特徴抽出および分類を行う。さらに、433 MHz、915 MHz、2.4 GHz といった周波数帯やアンテナ設置高さが認識性能に与える影響が評価されており、周波数帯および設置条件の違いがセンシング性能に大きな影響を与えることが示されている。
- 文献[32]では、交通インフラの状態監視 (モニタリング) を実現するための IoT センシングシステムが提案されている。この論文では、通信信号を用いたセンシングではなく、各種のセンサを用いてひずみ、加速度、温度、圧力等の物理量を取得し、BLE、IEEE 802.15.4、LoRa、Wi-Fi 等の無線通信によりデータをゲートウェイに集約する。さらに、ゲートウェイからは 4G LTE や 5G 等の広域通信を用い

てクラウドへデータを送信し、蓄積・管理される構成となっている。このように、スマート交通におけるインフラ監視においては、適切なセンサと無線方式を組み合わせることにより、IoT センシングシステムの構築を行ったこと等の事例が報告されている。

- 文献[33]では、都市交通における人流・車流推定の具体例として、Wi-Fi プローブ要求信号を用いたパッシブセンシング手法とその実験結果が報告されている。具体的には、スマートフォン等の Wi-Fi 対応端末から送信されるプローブ要求信号を受信することで、歩行者、車両、バス等の流動や速度、混雑状況を推定するものである。検知対象が Wi-Fi 端末を所持することを前提としているため、デバイスベースの手法に分類されるが、スマートフォン等の既存端末を利用できることから、専用センサを新たに設置する必要が少なく、低コストで都市交通のモニタリングを実現する点が特徴と考えられる。一方で、Wi-Fi プローブなどの通信情報を利用する場合にはプライバシー保護への配慮が必要となる。このような手法は、デバイスベースであるものの、通信信号の受信強度や時間変動を利用する無線センシングの一例であり、前述のセンサベースの IoT センシング[32]とは異なるアプローチである。
- 文献[34]は、車両向け無線測位 (Wireless Positioning) 技術に関する包括的なサーベイであり、GNSS、セルラー通信 (5G/6G)、Wi-Fi、UWB、Bluetooth、V2X による協調測位等の技術動向がまとめられている。具体的には、5G セルラー通信における測位参照信号 (PRS)、TDoA、AoA を用いた測位技術や、V2X 通信による協調測位、さらにカメラや LiDAR とのセンサ融合に関するアプローチが示されている。また、GNSS は成熟した技術である一方で、セルラー通信等の通信信号を用いた測位技術は発展途上であり、単一技術で要求を満たすことは困難であるため、センサ融合を前提とした統合的な設計が不可欠であることが指摘されている。また、セルラー測位では基地局配置やマルチパス環境の影響、GNSS では都市峡谷問題など、各方式固有の制約が存在するため、環境に応じた適応的な手法設計が求められる。

さらに、未解決の課題として、

- セキュリティおよび信頼性 (例えば、GNSS のなりすまし攻撃やセンサデータの改ざんへの対処)
 - 大規模かつマルチモーダルな公開データセットの不足
 - 都市部における非見通し (NLoS) 環境での高精度測位
 - 異種センサ間の高精度な時空間同期の確保
 - 車両、位置サーバ、クラウド間の役割分担を含むシステム設計
- 等が重要な検討課題としてあげられている。

上記の文献に示される課題に加えて、スマート交通における無線センシングには以下のような課題も存

在する。天候や遮蔽物、電波干渉といった環境変動により観測信号が大きく変動するため、安定した推定も課題となる。また、正解データ(Ground Truth)の取得コストが高く、実環境における評価やモデルの汎化が難しい点も課題である。

第2章で述べた無線センシング技術と各ユースケースの関係を表3.1に整理する。

表 3.1 交通分野の各文献におけるセンシング技術

文献	観測量	無線方式	デバイスフリー/ベース	応用
[21]	RSSI/CSI	商用基地局(LTE 等)	デバイスフリー (ISAC)	人流推定
[23]	CSI/AoA 等	5G NR (ミリ波, Massive MIMO)	デバイスフリー (ISAC)	車両検知・位置推定
[30]	RSS	Wi-Fi	デバイスフリー	車両検知・分類
[31]	RSS	Wi-Fi / Sub-GHz	デバイスフリー	人・車両認識
[32]	ひずみ・加速度等の物理量	BLE / LoRa / LTE 等	センサベース (通信信号ベースではない)	インフラ監視
[33]	プローブ要求信号 (RSS)	Wi-Fi	デバイスベース	人流・車流推定

3.2 スマートファクトリー

スマートファクトリーは、IoT センシングおよび無線通信技術を活用して、工場内の設備、ロボット、作業者の状態を統合的に把握し、生産性の向上および安全性の確保を実現する応用分野である。近年では、Industry 4.0 の進展に伴い、サイバーフィジカル生産システム(CPPS)、デジタルツイン、協働ロボットなどを含む高度な製造システムの構築等が進められている[36]。

(1) 目的

スマートファクトリーでは、設備の予知保全、安全管理、プロセス制御、および作業者の状態把握等を目的としたシステム設計がなされている。例えば、予知保全を目的として、振動や温度などのセンサデータを継続的に監視し、機械学習を用いて故障の予兆を検知する手法が提案されている。安全管理では、作業員や機械の位置・動作を把握し、危険な接近を検知するシステム等の導入も検討されている。さらに、プロセス制御では、IoT センサとデータ解析を統合したデータ駆動型の制御により、生産効率および品質の向上が図られる。

(2) 要求条件

スマートファクトリーにおける IoT センシングおよび無線通信には、用途に応じて多様な要求条件が存在する。特に、協働ロボットやリアルタイム制御ではミリ秒オーダーの低遅延および高信頼性が求められる一方、設備監視や予知保全では低消費電力および広域カバレッジが重要となる。また、多数のセンサおよび機器が接続されるため、高いスケールビリティが必要である。さらに、工場環境では電波干渉や遮蔽の影響が大きいため、安定した通信品質の確保も重要である。

(3) 無線通信方式

スマートファクトリーでは複数の無線方式が用途に応じて使い分けられる。例えば、Wi-Fi は高データレート通信が可能であり、映像監視やデータ集約に適している。一方、Bluetooth Low Energy (BLE) や IEEE 802.15.4 系 (Zigbee 等) は低消費電力であり、無線センサネットワーク (WSN) に広く利用される。さらに、UWB は cm 級の高精度測位が可能であり、ロボットや自動搬送車の位置推定に適している。RFID を用いた位置推定手法も提案されており、無人搬送車の誘導や資材管理に利用されている[41]。また、

LPWAN やセルラー通信 (LTE/5G) は広域接続および大規模デバイス接続用途に適する。

(4) スマートファクトリー分野における技術適用例

具体的な技術例として、無線センサネットワークを用いた設備監視や予知保全が挙げられる。例えば、4G-LTE 信号を用いた自律搬送ロボットの動作監視のためのデバイスフリー無線センシング技術[8]や、振動センサと IoT ノードを用いた低コストの予知保全システムが提案されており、機械学習により異常検知や劣化予測が行われる[40]。また、RFID を用いた位置推定システムにより、AGV の自動誘導や資材追跡が実現されている[41]。各文献の詳細を以下に示す。

- 文献[36]では、スマートファクトリーにおける無線通信および IoT 技術の動向を整理し、課題や今後の研究の方向性についてまとめている。。具体的には、Bluetooth、IEEE 802.15.4、Wi-Fi、LPWAN、5G といった無線方式の特徴と適用領域を比較するとともに、以下の課題が指摘されている。
 - デジタルツインや協調ロボット、予知保全などのユースケースに対して、低遅延・高信頼・多数接続といった要求条件を満たす必要がある。
 - 産業用途において要求される低遅延・高信頼通信の実現に向けては、既存の無線方式では限界があり、5G の URLLC 等の新たな技術の活用が必要とされている。
 - 異種システム間の相互運用性や標準化も課題である。

これらの課題に対応するためには、IoT に求められる要件を満たす通信基盤として、有線イーサネット向けに提案された標準群である Time Sensitive Networking (TSN) を無線通信へ拡張する試みが進められており、Wi-Fi や 5G への適用が検討されていることが述べられている。加えて、無線ネットワークの融合といったシステム設計上の課題も重要であり、スマートファクトリーの実現には通信・センシング・計算を統合した包括的なアーキテクチャ設計が不可欠であることが示されている。

- 文献[37]は、スマートファクトリーにおける IoT および機械学習 (ML) を活用したデータ処理技術とその応用について整理したサーベイ論文である。本論文では、IoT により取得されるセンサデータを活用し、予知保全、プロセス制御、作業安全管理、アディティブ製造等の分野において機械学習を適用することで、製造プロセスの効率化および高度化を実現するアプローチが示されている。具体的には、回帰分析、決定木、ランダムフォレスト、SVM、k 近傍法 (kNN) などの従来型機械学習手法に加え、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) や再帰型ニューラルネットワーク (RNN) といった深

層学習手法の有効性について議論されている。さらに、以下のようなシステム設計および運用に関して、以下の指摘がなされている。

- IoT センサから取得されるデータをクラウドやエッジ環境において統合・処理し、生産管理システム等と連携するアーキテクチャの導入が重要となること
- デジタルツインを活用することで、工場における実環境と仮想環境を連携させたシミュレーションおよび最適化が可能となること
- リアルタイムな制御および予知保全の高度化が実現されること
- 大量の IoT データを用いる場合、データセキュリティおよびプライバシー保護が重要となること

等も指摘されている。[36]では無線通信方式の適用領域について議論されていたのに対し、本論文では IoT センシングにより取得されたデータをいかに統合・解析し、意思決定および制御に活用するかという観点から、スマートファクトリーにおける重要な技術要素が整理されている。スマートファクトリーの実現には、他の IoT センシングユースケースと同様に、通信基盤とデータ駆動型の解析・制御技術を統合的に扱うアプローチが不可欠と考えられる。

- 文献[38]は、IoT を基盤とした産業プロセス制御システムの構成およびその応用に関するものであり、センサにより取得されたデータをクラウドやエッジ環境で統合・処理することで、生産プロセスの最適化やリアルタイム監視・制御が可能となる構成やアプローチが示されている。また、文献[39]では、産業用センサの種類とその応用について整理されており、温度、圧力、振動等の多様な物理量をセンサにより計測することで、設備状態の高精度な把握や異常検知が可能であることが報告されている。文献[36]および[37]がそれぞれ無線通信方式と得られたデータ活用を中心としたものであったのに対して、これらの文献では、IoT を基盤とした産業プロセス制御システムや産業用センサの種類および応用が整理されている。
- 文献[8]では、スマートファクトリーにおける自律搬送ロボット(AMR)の動作監視を目的として、LTE 信号を用いたデバイスフリーの無線センシング手法が提案されている。この手法では、商用セルラーシステムにおける参照信号から取得される CSI を利用し、AMR の移動に伴う電波伝搬の変動を検出することで、AMR の通過や往復動作を推定するものである。具体的には、CSI の位相情報に含まれる周波数同期誤差や受信タイミング誤差に起因する位相オフセットを、時間的に近接したリソース要素間の位相差を用いて除去し、その時間変動を特徴量として抽出する。さらに、移動平均処理およびフーリエ変換を適用することで、AMR の移動周期や通過頻度を推定している。受信信号強度 (RSS) に基づく手法と比較して、高い検出精度を有することが実験的に示されている。セルラー通信信号を活用したデバイスフリーセンシングにより、専用センサを用いることなくロボットの動作監視が可能で

あることを示したものであり、スマートファクトリーにおける低コストかつ広域なセンシング手法として活用が期待できる。

- 文献[40]では、スマートファクトリーにおける代表的な適用例として、振動センサとIoTノードを用いた予知保全システムが提案されている。具体的には、設備に関するデータを無線通信(Wi-Fi)を用いて収集し、機械学習を用いた異常検知により設備状態を監視することで、保守の最適化およびダウンタイムの低減を図るものである。実験結果において、IoTデバイスとエッジ処理を組み合わせることで、低コストかつ軽量のシステムであっても一定の精度で異常検知が可能であることが示されている。また、振動センサに加えて音響センサの併用により検出性能の向上が期待されることも報告されている。この文献では無線LAN(Wi-Fi)を用いた無線通信によりデータ収集およびエッジ処理との連携が考えられており、無線通信をベースとしたIoTセンシングの適用例とみなせる。文献[8]のような通信信号を利用した無線センシングとは異なり、センサを用いたIoTベースのセンシング手法に分類される。このことから、スマートファクトリーにおけるセンシング技術は、通信信号を利用する手法と物理センサを用いる手法のいずれも有効であり、それぞれの特性に応じた使い分けが求められることがわかる。
- 文献[41]では、スマートファクトリーにおける自動搬送車の高精度な位置推定を実現するために、工場内に配置されたRFIDタグを利用した位置推定手法が提案されている。具体的には、AGV底部に設置した円形アンテナと床面に配置されたRFIDタグとの相互作用により形成される磁界分布に基づく信号強度の変化を利用することで、自動搬送車の位置を推定するものである。シミュレーションおよび実験により、本手法が従来手法に比べて少ないタグ数で同等の測位精度を達成可能であることが報告されており、スマートファクトリーにおける柔軟な物流制御の実現に有効であることが確認されている。本手法はRFIDを用いた近距離無線通信に基づくセンシング手法の一例であり、このような手法により、スマートファクトリーにおける無人搬送車の高精度な位置管理や物流制御の高度化が期待される。

以上のように、スマートファクトリーでは予知保全、位置推定、設備監視といった多様なユースケースに対して無線センシング技術が適用されている。

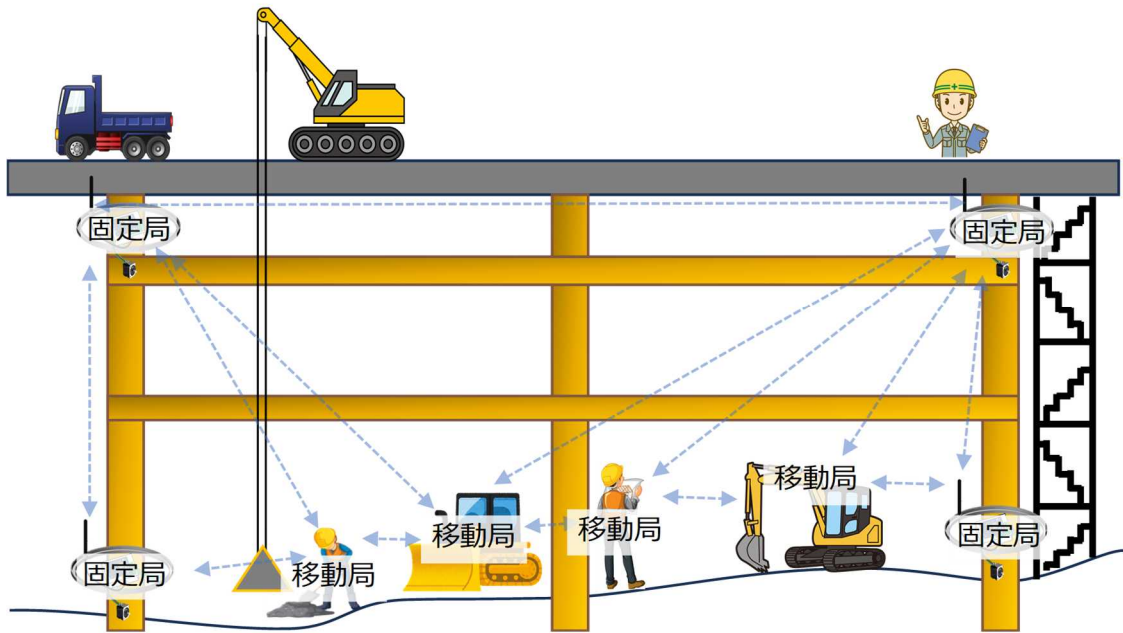
さらに、近年ではIoTおよび無線通信技術を活用した安全管理の高度化が進められており、国土交通省を中心に「Safety 2.0(協調安全)」という概念が提唱されている[42]。Safety 2.0は、人の注意や機械の安全機構に依存する従来の安全対策に加え、センサ、通信、情報処理を統合し、環境や作業状況を含めたシステム全体で安全性を確保する枠組みである。具体的には、作業員や機械、無人搬送車などの位置情報や状態情報をリアルタイムに取得し、危険な接近や異常状態を検知して警告を行うシステムが検討されている。例えば、文献[43]では、建設現場等における協調安全実現のため位置推定技術として、

LPWA(LoRa)における受信信号強度(RSS)を用いた位置推定およびその精度向上に関する技術が提案されている。図 3.2 に建設現場における IoT センシング技術の適用イメージを示す[44]。このように、工事現場や工場等における作業者の安全管理が求められる環境等への無線センシングの適用は有望な方向性の一つである。

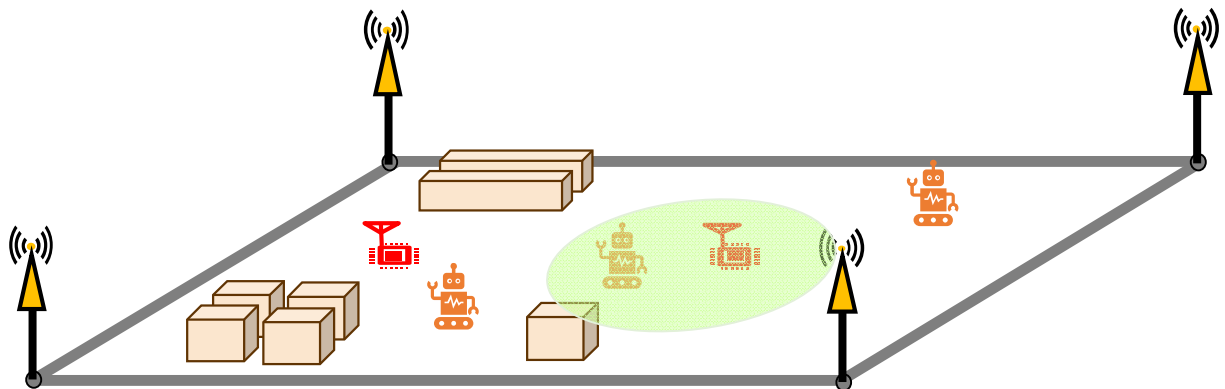
スマートファクトリーや建設現場等を対象として、第 2 章で述べた無線センシング技術と各ユースケースの関係を整理したものを表 3.2 に示す。以上のように、スマートファクトリーおよび関連分野における IoT センシングは、無線通信技術と多様なセンシング手法を組み合わせることで実現されており、目的や用途に応じて適切に設計することが重要となる。

表 3.2 スマートファクトリー分野の各文献におけるセンシング技術

文献	観測量	無線方式	デバイスフリー/ベース	応用
[8]	CSI	LTE(4G)	デバイスフリー	自動搬送車の動作監視・通過検知
[40]	振動(加速度)/音響	無線 LAN(Wi-Fi)	デバイスベース	設備の予知保全
[41]	RFID 信号強度(磁界結合)	RFID(近距離 RF)	デバイスベース	自動搬送車の位置推定
[42]	RSS(受信電力)	LPWA(LoRa)	デバイスベース	建設現場における位置推定



(a) 建設現場への適用イメージ [44]



(b) 物流施設や工場等への適用イメージ

図 3.2 建設現場や工場等の環境における IoT センシング技術の概要図

3.3 スマート医療

(1) 目的

スマート医療は、IoT センシングおよび無線通信技術を活用して患者の状態を継続的に把握し、医療・介護の質の向上および負担軽減を図ること等を目的とする。特に高齢化社会の進展に伴い、転倒事

故の防止、呼吸・心拍などのバイタルサインの常時監視、在宅医療および遠隔診療の高度化といったニーズが高まっている。このような背景のもと、IoT を基盤としたスマートヘルスケアシステム等も必要とされており、ウェアラブルセンサや環境センサを用いたリアルタイムモニタリング、クラウドおよび AI を活用したデータ解析により、個別化医療および早期診断が可能となること等も報告されている。また、非接触センシング技術を活用した見守りや健康管理を行うことで、患者の負担を軽減しつつ継続的な状態把握を実現する医療形態として期待されている。

(2) 要求条件

スマート医療における IoT センシングには、医療用途特有の要求条件が存在する。まず、誤検知や見逃しが重大な影響を及ぼすため、高精度・高信頼性が不可欠である。さらに、診断支援への応用を考慮すると、AI モデルの説明可能性および再現性も重要となる。また、患者への負担を低減するため、非接触・低侵襲であることが望ましく、ウェアラブルセンサや無線センシング技術が広く検討されている。加えて、在宅医療や高齢者ケアでは、低コスト性・既存インフラの活用・長時間連続動作(低消費電力)が求められる。さらに、多数のセンサデータを扱う IoT 医療システムでは、リアルタイム処理、データ融合、スケーラビリティが重要であり、個人差や環境変動に対してロバストなセンシング性能が必要となる。

(3) 無線通信方式

上述の要求条件を満たすために、スマート医療では用途に応じて複数の無線方式が組み合わせて利用されている。まず、Wi-Fi (IEEE 802.11) は既存インフラを活用可能であり、受信信号強度 (RSS) やチャネル状態情報 (CSI) を用いた非接触センシングに適している。これにより、呼吸や心拍などのバイタル情報(呼吸等)を非侵襲的に推定できること等が報告されている[47]–[49]。一方、BLE (Bluetooth Low Energy) や IEEE 802.15.4 (Zigbee 等) は、ウェアラブルセンサやボディアエリアネットワーク (WBAN) における低消費電力通信に適しており、心拍や加速度などの生体情報の収集に利用される[51]。さらに、在宅医療や遠隔診療では、取得したデータをクラウドへ送信するための広域通信が必要となる。このため、Wi-Fi に加えてセルラー通信 (LTE/5G) をバックホールとして利用する構成が採用される場合があり、WBAN や IoT ネットワークと連携した通信構成が検討されている。このように、スマート医療では一般的に、センサ(ウェアラブル・RF)、WBAN (BLE 等)、IoT ネットワーク (Wi-Fi/セルラー)、クラウド・AI 解析等を統合したシステムとして構成される。したがって、通信・センシング・データ解析を一体的に設計することが必要となり、第 2 章で述べた無線センシング技術とも密接に関連する。

(4) 医療分野における技術適用例

具体的な技術例として、IoT センシングおよび無線通信を組み合わせたスマート医療技術に関して、いくつかの文献の検討事例を紹介する。各文献の詳細を以下に示す。

- 文献[45]では、高齢者の転倒予防を目的とした IoT および AI を活用したスマートヘルスケア技術に関するサーベイ論文である。本論文では、転倒リスクの要因として健康状態、行動、姿勢、感情といった複数の要素が関与することが指摘されており、これらを継続的にモニタリングするためのウェアラブルセンサや環境センサを用いた IoT センシング技術が整理されている。技術的には、加速度センサやジャイロセンサによる動作計測、心拍・血圧等のバイタル情報の取得、さらにはカメラや RF センシングによる非接触モニタリングが用いられ、これらのデータを無線通信を介して収集し、クラウドやエッジ環境において機械学習および深層学習により解析することで、転倒の予兆検知やリスク予測が可能であることが示されている。
- 文献[47]では、IoMT (Internet of Medical Things) 環境における非接触バイタルセンシングを目的として、無線センシングを用いた呼吸状態推定手法が提案されている。具体的には、人体の呼吸に伴う胸部の微小な動きによって生じる無線チャネル特性の変動を観測し、これを時系列データとして取得することで、呼吸パターンの解析を行う手法である。取得された信号に対してノイズ除去やサブキャリア選択等の前処理を施した後、リカレントニューラルネットワークや LSTM 等の深層学習モデルを用いて分類を行い、正常呼吸、徐呼吸、頻呼吸、睡眠時無呼吸といった複数の呼吸状態を識別している。技術的にはデバイスフリーに分類され、センサー機器を対象者に装着する必要がないため、患者の負担を軽減しつつ継続的な健康モニタリングを可能とすることから、医療分野における活用が期待されている。一方で、他のデバイスフリー型の手法と同様に、環境変動や外乱の影響、設置条件への依存性等が課題と考えられる。また、複数対象への拡張という観点では、文献[48]において、CSI を用いた無線センシングにより複数人の呼吸を識別する手法が報告されており、周波数領域における CSI の解析により複数人の呼吸成分を分離できること等が示されている。
- 文献[49]では、Wi-Fi の CSI を用いた非接触型の心拍センシング手法が提案されている。具体的には、人体の心拍に伴う胸部の微小な変位によって生じる無線チャネルの変動を観測し、これを時系列データとして取得することで心拍情報を推定する手法である。主成分分析によるノイズ除去や、心拍の周期成分を強調する前処理を施した後、心拍信号の抽出を行っている。技術的にはデバイスフリー型の無線センシングに分類され、ウェアラブル機器を必要としない非侵襲的なバイタルセンシング手法といえる。一方で、評価結果は心拍検出の評価方法等にも依存すると考えられ、信頼性の向上等は課題と考えられる[19]。
- 文献[50]では、IoT センシングを用いた健康モニタリングシステムが提案されている。具体的には、心

拍数、血中酸素飽和度、体温といったバイタル情報を各種センサにより取得し、無線通信 (Wi-Fi) によりクラウドへ送信し、モバイルアプリ等で可視化・管理するものである。本手法はウェアラブルセンサを用いたデバイスベース型の IoT センシングに分類される。

- 文献[51]は、IoT を基盤とした医療システムに関するサーベイ論文である。具体的には、ウェアラブルセンサや無線センシングによる生体情報取得、Wireless Body Area Network (WBAN) を用いたデータ収集・伝送、クラウドを用いたデータ集約および処理、さらに機械学習による診断支援など、スマート医療を構成する要素技術が整理されている。また、これらの技術を統合したシステムアーキテクチャや、リアルタイム性、信頼性、セキュリティといった医療用途特有の要求条件および課題についても議論されている。

上記の文献に示される課題に加えて、スマート医療分野における無線センシングにはいくつかの課題が存在する。個人差 (体格や姿勢) や環境要因によりセンシング精度が大きく変動することや、呼吸や体動、心拍など複数の要因が混在することによる信号分離の難しさも考えられる。さらに、医療用途では高品質な評価データの取得が困難であり、モデルの汎化性能の確保が困難と想定される。また、医療分野では単に高精度であるだけでなく、説明可能性および信頼性が強く求められるため、アルゴリズムの透明性や検証方法の確立も重要となる。さらに、個人情報扱うことから、セキュリティおよびプライバシー保護の確保も不可欠である。

スマート医療分野において、第 2 章で述べた無線センシング技術と各ユースケースの関係を整理した結果を表 3.3 に示す。以上のように、スマート医療における IoT センシングは、無線センシング技術と物理センサを用いた手法が相補的に活用されていることが示されている。

表 3.3 スマート医療分野の各文献におけるセンシング技術

文献	観測量	無線方式	デバイスフリー/ベース	応用
[47]	CSI	無線 LAN(Wi-Fi)	デバイスフリー	呼吸状態推定
[48]	CSI	無線 LAN(Wi-Fi)	デバイスフリー	複数人呼吸識別
[49]	CSI	無線 LAN(Wi-Fi)	デバイスフリー	心拍推定
[50]	心拍数・血中酸素飽和度・体温	無線 LAN(Wi-Fi)	デバイスベース	健康モニタリング

3.4 まとめ

本章では、スマート交通、スマートファクトリー、スマート医療における IoT センシングの応用について述べた。分野毎の目的や要求条件に応じて適切な無線通信方式やセンシング方式が求められる。スマート交通では、広域カバレッジおよび低遅延性等が求められ、例えば、セルラー通信、V2X などが活用されている。一方、スマートファクトリーでは、低遅延・高信頼通信および高精度測位が必要であり、Wi-Fi、5G、UWB、RFID などが用途に応じて利用される。さらに、スマート医療では、高精度・非接触センシングおよび低消費電力が求められ、無線 LAN(Wi-Fi)、RF センシング、BLE などの活用例が報告されている。各分野において、単一の無線方式やセンサで要求条件を満たすことは困難であり、複数の無線技術やセンサを統合したマルチモーダルなアプローチも重要となる。これらの技術を統合した IoT センシング基盤の高度化に加え、環境変動やプライバシー、信頼性等が課題と考えられる。

第4章 調査報告のまとめ

本報告書では、IoT センシング技術の動向について、無線通信方式、センシング手法、およびユースケースの観点から体系的に整理した。

第2章では、IoT センシングの構成要素として、センサ技術、無線通信技術、およびデータ処理技術の関係を整理するとともに、無線信号の伝搬特性を利用した無線センシング技術について概説した。無線センシングは、既存の通信インフラを活用して対象の状態推定を可能とする点に特徴があり、専用センサを追加することなくセンシング機能を実現できる可能性がある。また、通信とセンシングを統合した ISAC (Integrated Sensing and Communication) は、Beyond 5G/6G に向けた重要技術として位置づけられる。

第3章では、スマート交通、スマートファクトリー、スマート医療といったユースケースにおける IoT センシングの適用事例について整理した。各ユースケースでは、要求される通信距離、遅延、精度、消費電力などの条件が大きく異なり、それに応じて適切な無線通信方式およびセンシング技術の選択が求められる。スマート交通では広域カバレッジおよびリアルタイム性が重視され、セルラー通信、V2X など検討されている。一方、スマートファクトリーでは低遅延・高信頼通信および高精度測位が求められ、Wi-Fi、5G、UWB、RFID などが利用される。さらに、スマート医療では高精度・非接触センシングおよび低消費電力が求められ、Wi-Fi や RF センシング、BLE などが検討されている。

本報告で述べた通り、無線信号を利用したデバイスフリー型センシングと、物理センサを用いたデバイススペース型センシングが、用途や要求条件に応じて使い分けられている。IoT センシングにおいては単一の無線方式やセンシング手法で全ての要求条件を満たすことは困難であり、複数の無線通信技術およびセンサを統合したマルチモーダルなアプローチが不可欠になると考えられる。したがって、ユースケース毎の要求条件を踏まえて、適切な技術を選択・組み合わせることが IoT センシングシステム設計において求められる。一方で、無線センシングおよび ISAC の実現に向けては、環境の影響(マルチパスや遮蔽の影響)、高品質な学習データの収集、プライバシー・セキュリティへの対応等の課題が存在する。また、通信遅延や同期精度、センシング精度と通信性能のトレードオフといった設計上の課題も存在する。

通信とセンシングの統合設計、AI を用いた高度な信号解析、さらにはユースケースに応じた最適なシステム設計等は今後も課題となる。また、ISAC に関しては 3GPP 等における標準化の進展とともに、実用化に向けた技術開発が加速すると考えられる。IoT センシング技術は、今後、社会インフラや産業分野における高度な状況認識を支える基盤技術として、さらに発展していくことが期待される。

参考文献

1. S. H. Abdulhussain, B. M. Mahmmod, A. Alwhelat, D. Shehada, Z. I. Shihab, H. J. Mohammed, T. H. Abdulameer, M. Alsabah, M. H. Fadel, S. K. Ali, G. H. Abbood, Z. A. Asker, and A. Hussain, "A Comprehensive Review of Sensor Technologies in IoT: Technical Aspects, Challenges, and Future Directions," *Computers*, 14(8), 342. 2025.
2. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Fourthquarter 2015.
3. I. Ficili, M. Giacobbe, G. Tricomi, A. Puliafito, "From Sensors to Data Intelligence: Leveraging IoT, Cloud, and Edge Computing with AI, " *Sensors.*, March 2025.
4. D. Bouchabou, S. M. Nguyen, C. Lohr, B. LeDuc, and I. Kanellos, "A survey of human activity recognition in smart homes based on IoT sensors algorithms: Taxonomies, challenges, and opportunities with deep learning," *Sensors*, vol. 21, Art. no. 6037, 2021.
5. NTT DOCOMO Inc., "White Paper 5G Evolution and 6G," Jan. 2023,
6. XG Mobile Promotion Forum (XGMF), "Beyond 5G White Paper: Sensing Technologies," Available: <https://xgmf.jp/pdf/6g-pj/Beyond-5G-White-Paper-Sensingv1.pdf>, accessed Apr. 2026.
7. H. Otani, T. Murakami, K. Ohara, S. Otsuki, Y. Takatori, and T. Ogawa, "An Open-Source SDR-Based Device-Free Sensing Platform for Integrated Sensing and Communication (ISAC)," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 9982-9990, 2025.
8. H. Otani, T. Murakami, K. Ohara, Y. Takatori, and T. Ogawa, "Device-Free AMR Crossing Detection Using LTE Signals for Smart Factory Applications," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 96083-96091, 2025.
9. S. P. Chepuri, N. Shlezinger, F. Liu, G. C. Alexandropoulos, S. Buzzi and Y. C. Eldar, "Integrated Sensing and Communications With Reconfigurable Intelligent Surfaces: From signal modeling to processing," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 6, pp. 41-62, Sept. 2023.
10. F. Meneghello, C. Chen, C. Cordeiro and F. Restuccia, "Toward Integrated Sensing and Communications in IEEE 802.11bf Wi-Fi Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 7, pp. 128-133, July 2023.

11. 中山, “よくわかる IoT データ転送技術,” 森北出版, 2024.
12. 高橋, 垣内, “LPWA(Low Power Wide Area) の規格と技術動向,” 電気情報通信学会誌, Vol.100, No 9, pp.982-986, 2017.
13. M. Alijani, C. De Cock, W. Joseph and D. Plets, “Device-Free Visible Light Sensing: A Survey,” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 28, pp. 3791-3829, 2026.
14. T. Murakami, M. Miyazaki, M. Ishida, and A. Fukuda, “Wireless LAN-Based CSI Monitoring System for Object Detection,” MDPI Electronics, Nov. 2018.
15. O. Muta, K. Takata, K. Noguchi, T. Murakami, and S. Otsuki, “Device-Free WLAN Based Indoor Localization Scheme with Spatially Concatenated CSI and Distributed Antennas,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no.1, pp. 852-865, Jan. 2023.
16. O. Muta, K. Noguchi, J. Izumi, S. Shimizu, T. Murakami, and S. Ohtsuki, “Devicefree Indoor WLAN Localization with Distributed Antenna Placement Optimization and Spatially Localized Regression,” IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 23, Issue 8, pp.9869 - 9883, August 2024.
17. O. Muta, J. Izumi, S. Shimizu, T. Murakami, and S. Otsuki, “Experimental Evaluation of Device-free Indoor Localization Using Channel State Information in WLAN Systems with Distributed Antennas,” IEICE Trans. Commun., Vol.E107-B, No.12, pp.890-898, Dec. 2024.
18. Q. Chen, C. Yu, L. Xiao, J. Li, Y. Zhu, L. Ye, “WiFi CSI Based Energy-Efficient Drone Detection,” IEEE GLOBECOM2025, Dec. 2025.
19. 本間, 中山, 飯塚, 村田, “Wi-Fi 機器を用いたヒトセンシング,” 電子情報通信学会誌, Vol.109, No.4, pp.276-283, 2026.
20. 村上, 尾原, 小川, “商用基地局からの電波を活用した ISAC 実験システム,” MWE 2025 (Microwave Workshops and Exhibition), FR4B-2, 2025.
21. 尾原, 村上, 樋下田, 小川, “ISAC×人流推定 -商用電波で挑むセンシングの実践と展望-,” 電子情報通信学会誌, Vol.109, No.4, pp.296-301, 2026.
22. 林, “ISAC に向けた遅延ドップラー領域波形設計のチャレンジと課題,” 電子情報通信学会誌, Vol.109, No.4, pp.271-275, 2026.
23. 矢吹, 池田, “Beyond Connectivity に向けて - 6G ISAC×AI-RAN の融合-,” 電子情報通信学会

- 誌, Vol.109, No.4, pp.290–295, 2026.
24. 内山, Heetae, 大下, 小此木, 板原, 鈴木, “ISAC におけるエッジモバイルコア統合型制御方式の研究開発,” 電子情報通信学会誌, Vol.109, No.4, pp.284–289, 2026.
 25. 齋藤, “3GPP 標準化における Integrated Sensing and Communications (ISAC)の技術動向,” MWE 2025 (Microwave Workshops and Exhibition), FR4B-1, 2025.
 26. 小川, “WLAN センシング –IEEE802.11bf の標準化動向–” 電子情報通信学会誌, vol.105, no.12, pp.1466–1471, 2022.
 27. A. Sesyuk, S. Ioannou and M. Raspopoulos, “3D Millimeter–Wave Sensing vs Ultra–Wideband Positioning,” Proc. 2024 14th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–6, 2024.
 28. Ka–Ho Lam, Chi–Chung Cheung, Wah–Ching Lee, “RSSI–Based LoRa Localization Systems for Large–Scale Indoor and Outdoor Environments,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.68, no.12, pp.11778–11791, Dec. 2019.
 29. 原, “位置推定における統計的推定理論,” IEICE Fundamentals Review, Vol.4, No.1, 2010.
 30. R. Kanschat, S. Gupta and A. Degbelo, “Wireless–Signal–Based Vehicle Counting and Classification in Different Road Environments,” in IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 3, pp. 236–250, 2022.
 31. L. Lou, M. Song, X. Chen, X. Zhao and S. Zhang, “Optimized Wireless Sensing and Deep Learning for Enhanced Human–Vehicle Recognition,” in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 7, pp. 7508–7521, July 2024.
 32. S. F. Husain et al., “Towards a wireless sensing infrastructure for smart mobility,” Transp. Geotech., vol. 40, 2023.
 33. M. Bertolusso et al., “A passive Wi-Fi based monitoring system for urban flows detection,” in Proc. IEEE Int. Conf. Ind. 4.0, Artif. Intell., Commun. Technol. (IAICT), Bali, Indonesia, 2022.
 34. S. Saleh, S. Dwivedi, R. Whiton, “Vehicular Wireless Positioning - A Survey,” arXiv:2601.20547v1, Jan. 2026.
 35. M. Noor–A–Rahim, J. John, F. Firyaguna, H. H. R. Sherazi, S. Kushch, A. Vijayan, E. O’Connell, Dirk Pesch, B. O’Flynn, W. O’Brien, M. Hayes and E. Armstrong, “Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond,” Sensors, 23(1), 73, 2023.

36. M. Noor-A-Rahim, J. John, F. Firyaguna, H. H. R. Sherazi, S. Kushch, A. Vijayan, E. O'Connell, Dirk Pesch, B. O'Flynn, W. O'Brien, M. Hayes and E. Armstrong, "Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond," *Sensors*, 23(1), 73, 2023.
37. P. Visconti, G. Rausa, C. Del-Valle-Soto, R. Velázquez, D. Cafagna, and R. D. Fazio, "Machine learning and IoT-based solutions in industrial applications for smart manufacturing: A critical review," *Future Internet*, vol. 16, no. 11, Art. no. 394, 2024.
38. T. Kalsoom, N. Ramzan, S. Ahmed, and M. Ur-Rehman, "Advances in sensor technologies in the era of smart factory and Industry 4.0," *Sensors*, vol. 20, no. 23, Art. no. 6783, 2020.
39. H. M. Fahmy, H. I. Helmy, F. E. Ali, N. E. Motei, and M. S. Fathy, "Industrial applications of sensors," in *Handbook of Nanosensors: Materials and Technological Applications*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 1-34, 2023.
40. P. Kolok, M. Hodoň, P. Ševčík, L. Hotz, and N. Remy, "Low-cost IoT-based predictive maintenance using vibration," *Sensors*, 2025.
41. S. Lu, C. Xu, R. Y. Zhong, and L. Wang, "A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories," *J. Manuf. Syst.*, vol. 44, pt. 1, 2017.
42. 向殿, "新しい時代の安全:協調安全(Safety2.0)とウェルビーイング, 標準化と品質管理," Vol.75, 冬号, pp.16-20, 日本規格協会、2024-12.
43. 諸隈, 李, 牟田, 池田, 北之馬, "省電力広域無線と可動型アンテナを用いた屋内測位方式の検討," 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会, 2026-03
44. 国土交通省 2025 年度 SBIR 制度「建設工事における協調安全(Safety2.0)を実現する広域無線測位技術の研究開発」, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001895320.pdf>, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000001.000133492.html>
45. D. Mohan, D. Z. Al-Hamid, P. H. J. Chong, K. L. K. Sudheera, J. Gutierrez, and H. C. B. Chan, "Artificial intelligence and IoT in elderly fall prevention: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, pp. 4181-4198, 2024.
46. A. H. Anwer et al., "Recent advances in touch sensors for flexible wearable devices," *Sensors*, vol.

- 22, Art. no. 4460, 2022.
47. N. AbuAli et al., "Software defined radio frequency sensing framework for Internet of Medical Things," *Inf. Fusion*, vol. 103, 2024.
 48. M. Rehman et al., "Enhancing system performance through objective feature scoring of multiple persons' breathing using non-contact RF approach," *Sensors*, vol. 23, no. 3, Art. no. 1251, 2023.
 49. Y. Zhang, Z. Liu, C. Wu, J. Li, and S. Tang, "WiCG: Heartbeat sensing using COTS WiFi devices with common antenna," *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 21, no. 5, Art. no. 50, Sep. 2025.
 50. H. J. Mohammed, "IoT-based low-cost smart health monitoring system using Raspberry Pi Pico W and Blynk application," *J. Eng.*, vol. 30, pp. 90-108, 2024.
 51. H. Habibzadeh, K. Dinesh, O. R. Shishvan, A. Boggio-Dandry, G. Sharma, and T. Soyata, "A Survey of Healthcare Internet-of-Things (HIoT): A Clinical Perspective," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 7, No. 1, pp.53-71, Jan. 2020.
 52. M. Alsbah, M. A. Naser, A. S. Albahri, O. S. Albahri, A. H. Alamoodi, S. H. Abdulhussain, and Laith Alzubaidi, "A comprehensive review on key technologies toward smart healthcare systems based IoT: technical aspects, challenges and future directions," *Artificial Intelligence Review*, Vol. 58, No. 343, 2025.