

セマンティック通信を見据えたマルチスケールセンシングと学習の融合によるデジタルツイン基盤

Digital Twin Infrastructure via the Fusion of Multi-Scale Sensing and Learning
toward Semantic Communications

石田 繁巳¹
Shigemi Ishida

公立はこだて未来大学¹
Future University Hakodate¹

1 はじめに

近年、サイバー（仮想）空間とフィジカル（物理）空間を高度に融合させるサイバーフィジカルシステム（CPS）の重要性が急速に高まっている。特に、物理世界のリアルタイムな状態をサイバー空間上に忠実に再現する「デジタルツイン」の実現は、社会インフラの最適化から高度な人間行動支援にまで、次世代の社会基盤を支える中核技術として期待されている。

このようなデジタルツインや CPS を効果的に機能させるためには、物理世界に存在する人間や環境の情報を、特別な意識をさせることなく「常に」かつ「自然に」捉え続けるセンシングインフラの構築が不可欠である。静的な環境情報のみならず、時々刻々と変化する人間のジェスチャや行動、周囲の物理環境の変動をシームレスにサイバー空間へと同期し続けることが、高精度な予測や分析の起点となる。現実世界の動的な変化を正確にデジタル空間へと写像し続けるセンシングの役割は極めて大きい。

しかしながら、従来のセンシング手法においては、人間や環境を「常に」「自然に」捉え続けることが困難である。その主な要因として、専用のセンサデバイスを空間に大量に設置する際のコストや、デバイスのバッテリー寿命の問題が挙げられる。デバイスを電源で駆動する場合には電源配線のコストが問題となり、デバイスをバッテリーで駆動する場合には、デバイス稼働時間を確保するためのバッテリーによりデバイスサイズが肥大化し、人間への装着性や環境への親和性が損なわれる。多数のセンサから生成される膨大なデータをクラウドへ常時伝送する際の通信帯域の逼迫も、持続可能なシステム運用の大きな障壁となる。

人間や環境を「常に」「自然に」センシングするため、筆者らは複数のレイヤにまたがるアプローチで研究を進めてきた。具体的には、既存の通信信号をセンサとして流用する「センシングと通信の融合」、ノイズを含む信号から少ないデータ量でロバストに意味情報を抽出する「データからの効率的な特徴抽出（表現学習）」、そしてデバイス側の物理的な制約を極限まで排除する「超低電力な設計」の3軸である。本稿では、これらに関する筆者らのこれまでの取り組みを紹介するとともに、これらを協調させることで実現するデジタルツインの未来像について展望する。

本稿の構成は以下の通りである。まず2節において、Bluetooth Low Energy（BLE）や Wi-Fi、音響信号等の既存信号を用いたデバイスフリーな環境・人間センシング技術について述べる。3節では、センシング信号からロバストに対象の状態を識別するための、深層学習や表現学習を用いた特徴抽出アプローチについて述べる。4節では、超低電力なボディスケールのセンシングとして、筆者らが取り組んでいる JST CRONOS プロジェクトのビジョンと、それを具現化する超低電力な指輪型無線デバイス等の最適設計について紹介する。最後に5節において、これらが融合したセマンティック通信を含む次世代デジタルツインの展望を述べ、まとめとする。

2 既存信号インフラを活用した環境・人間センシング

物理世界の情報を網羅的に収集する際、専用のセンサデバイスを空間に大量に配備する従来の手法は、設置コストやメンテナンスの面から実用上の限界がある。これに対し筆者らは、専用センサをあらかじめ「バラまく」のではなく、環境中にすでに存在する電波や音響などの信号インフラを巧みに再利用するセンシング手法を提案してきた。具体的には、BLE や Wi-Fi といった通信電波、さらには日常生活や都市環境の音響信号などを対象とし、それらが物理世界の動的な変化によって受ける影響を解析することで、追加のハードウェア投資を最小限に抑えた持続可能なセンシングの実現を目指している。

本来、通信電波や音響信号は情報の伝送や物理的な活動に伴って副次的に発生するものであり、センシングを目的として設計されたものではない。しかし、これらの信号が物理空間を伝搬する際に空間内に存在する人間や物体の移動、あるいは遮蔽といった物理的な干渉を受けると、信号の振幅、位相、周波数特性、あるいは時間的な減衰パターンに対して微小な歪みが生じる。筆者らは、伝搬経路におけるこのような物理的な変化を捉えることで、受信側で得られる本来の信号から環境の変化に起因する特徴成分を分離・抽出し、センシングを実現している。これにより、非センシング用インフラを、空間全体の変化を捉える巨大な「仮想センサ」として利用することができる。

近距離無線通信規格である BLE を用いたセンシングの取り組みとして、筆者らは、多種多様な高次コンテキスト認識の基盤となる位置推定技術を提案した。BLE はスマートフォンや各種 IoT デバイスに標準搭載されてお

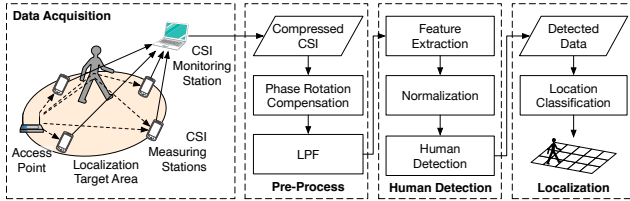


図1 屋外 CSI センシングの例。少ない反射波や回折波をとらえてセンシングを行うため、複数台のデバイスで観測したCSIを統合する。[5]より転載（CC BY 4.0 ライセンスに基づく）。

り、社会インフラとしての普及率が高いという利点を持つ。筆者らは、環境内に点在する BLE デバイスから放射される電波の受信信号強度（RSSI）の空間分布特性がチャンネル毎に異なることに着目して精度向上を図ったフィンガープリント測位手法を提案した [1, 2]。これにより、専用の測位インフラを新規に導入することなく、既存の BLE 環境をそのまま流用して位置推定が可能であることを示した。

電波を用いた、より高度なセンシング技術として、Wi-Fi の通信信号から得られる通信伝搬路情報（CSI: Channel State Information）を用いたデバイスフリー位置推定手法を提案した。従来の RSSI を用いた電波測位とは異なり、CSI はマルチパス環境における電波の位相や振幅の微小な変動をサブキャリアごとに細粒度に捉えることができるため、対象者が無線通信デバイスを持たない「デバイスフリー」の状態であっても、その空間内の存在や移動を検知できる。CSI によるセンシングには多くの関連研究が存在するが、筆者らは、カメラの設置が難しい環境でのセンシング手法などを提案した [3]。CSI を用いたセンシングでは反射波や回折波の存在が重要となるが、これらが潜在的に少ない屋外環境でのセンシング手法を提案した（図1）[4-7]。

通信電波以外のアプローチとして、対象の物理的な動作音を直接捉える音響信号を用いたセンシング技術の研究にも取り組んできた。具体的な例として、都市部など、複数の車線が存在する道路を対象として、走行車両を個別に検出・識別する手法を提案した [8-12]。本手法では、道路横の歩道に設置したステレオマイクで収集した車両走行音から、車両の移動に伴う到来方向の変化を解析することで、車両の通過検知、走行車線の特定、さらには、抽出した音を分析することで車両識別推定を実現した。

3 機械学習・表現学習を用いたロバストな状態認識

前節で述べた既存の信号インフラを活用する手法は、追加のハードウェアを必要としない点で極めて有効である。しかしながら、これらのアプローチは実環境特有のノイズ、すなわち、通信ではマルチパスフェージング、音響センシングでは環境音などの影響によってセンシング性能が大きく劣化する可能性がある。前節のアプローチは受信側で取得した信号の物理的な変動をヒューリスティックに、あるいは数理モデルに基づいて直接分析し、目的のセンシング情報を抽出しており、ノイズを含むデータから観測したい変動を取り出すことが困難とな

る。空間のレイアウト変更や人の出入りといった動的な環境変化に対する頑健性も低く、特定の環境で最適化したパラメータが別の環境では機能しないという実用上の制約も存在する。

これに対し、筆者らは、ノイズの多いデータから深層学習（Deep Learning）や教師なし学習（Unsupervised Learning）の力を借りて、センシングに本質的に必要となる情報を分離・抽出する仕組みの構築を目指した。このアプローチでは、ノイズやドメインに依存する環境依存成分をアルゴリズム側で効果的にフィルタリングまたは吸収し、対象の真の状態変化をロバストに捉えるセンシングを実現する。

Wi-Fi CSI を用いた頭部動作・ジェスチャ認識システム Wi-Nod では、電波信号の環境依存性を克服する表現学習（Representation Learning）を試みた [13]。本手法では、取得した CSI の時系列データを短時間フーリエ変換（STFT: Short Time Fourier Transform）によって時間-周波数領域の 2 次元表現へと変換した後、Inception モジュールを組み込んだ深層ニューラルネットワーク（DNN）へ入力する。これにより、設置環境に左右されない、ジェスチャそのものに特化したロバストな特徴抽出（表現学習）を可能とした。

また、実環境において学習の教師ラベルとなる高品質な正解データを大量に収集することは極めて困難であるという課題に対し、筆者らは、ラベルなしデータを用いてデバイスを部屋ごとに自動でグループ化するアノテーションフリーなアプローチを提案した [14, 15]。本研究では、オフィスや住宅といった実空間に点在する複数の IoT デバイス群から得られる通信ログや電波変動パターンに着目し、教師なし学習アルゴリズムを適用した。これにより、事前のラベル付けや空間の事前知識が一切ない状態からでも、デバイスが「どの部屋に配置されているか」を電波の相関関係から自動的に推測し、クラスタリングできることを示した。適用課題は限られるが、実運用環境におけるデータ収集及びアノテーションコストの課題を抜本的に解決する成果の 1 つと言える。

さらに、センシングデバイス側のリソース負荷やデータ伝送の効率化を追求した取り組みとして、行動認識システム「C-HAR」を提案し、圧縮センシング（Compressive Sensing）技術の導入を図った [16]。従来のシステムでは高精度な認識のために高いサンプリングレートでのデータ収集が求められ、これがデバイスの消費電力や通信帯域を圧迫していたが、C-HAR では Nyquist レートを下回る極めて低いサンプリングレートでのデータ取得を実現している。本手法の最大の特長は、生データを一度高サンプリングで取ってから圧縮するのではなく、物理層においてあらかじめ「圧縮された形」でデータを取得する点にある。圧縮表現のまま効率的に行動（Activity）の学習・認識モデルへと直結させることで、デバイスでの計算資源を節約しつつ、高い認識精度を維持することに成功した。

4 超低電力マイクロセンシングプラットフォーム

前節までに示したセンシングは空間全体のマクロな動態を捉えるものであるが、デジタルツインが目指す「物理世界の完全な写像」の実現に向けては、個々の人間に密着したマイクロなパーソナルセンシングも不可欠である。人間個人の詳細な生理状態や微小な身体運動、あるいは個別のコンテキストを正確にデジタル空間へ同期させることで、マクロな環境情報とマイクロな個人情報が高度に融合した、真に高精度なデジタルツイン空間の構築が可能となる。

パーソナルセンシングの代表例としては、現在でもスマートウォッチやスマートバンドに代表されるウェアラブルデバイスを用いた計測が広く普及し、一定の成果を収めている。しかしながら、これらは手首という極めて限定的な身体部位の情報しか取得できず、日常の多様な作業における手指の細微な動きや、全身の複雑な挙動、さらには分散的な生体信号といった高度な情報を網羅的に取得するには限界がある。これらを補完するために、身体各所の情報を手首からの情報で推定する研究も行われているが、必ずしも全ての情報を高精度に推定できるとは限らない。デジタルツインにおいて、より高次元でコンテキスト豊かな人間行動・状態を復元・予測するためには、特定の部位に依存せず、身体全体あるいは複数の部位を対象とするフルボディセンシングが欠かせない。

こうした課題背景のもと、筆者らはJST CRONOS 横田課題「生体データ通信インフラの無線フルボディ化」(研究代表者:横田知之, JPMJCS25N4) に参画し、次世代のパーソナルセンシングを支える基盤技術の研究開発プロジェクトを推進している。本プロジェクトでは、従来の3次元的な通信を体表に沿って2次元化することで通信・電力伝送における従来の制約を打破し、人間の身体や衣服に違和感なく調和する「柔軟・軽量・超低電力なセンシングプラットフォーム」の実現を目指している。これにより、24時間365日、日常に溶け込んで生体状態をモニタリングした予防医療など、物理世界における人間の生体・行動データを極限まで自然な形でサイバー空間へと送り出すためのエコシステムを実現できる。

本プロジェクトにおける超低電力な設計の具体的なマイルストーンとして、筆者らは回路・アンテナ・通信プロトコルまでを一貫してクロスレイヤで協調設計した、指輪型の超小型無線センシングデバイス picoRing mouse を実現している(図2) [17,18]。従来のウェアラブル機器では、各コンポーネントが個別に最適化されていたため、システム全体としてのフットプリントや消費電力の削減に限界があった。これに対し本デバイスでは、リング型という極小のフォームファクタの内部で、アンテナの放射効率、送受信回路のインピーダンス整合、そして間欠駆動を最適化した軽量な通信プロトコルを三位一体で設計することにより、超低電力駆動を実現した。

超低電力設計のコア技術として、センシングデバイスへの無線給電とデータ通信を完全に同期・融合させて同時に実現する仕組みを導入している。これにより、デバイス側でのバッテリーが必要なくなる、あるいは極小化



図2 picoRing mouse の概要。30-500 μ W 級の超低電力で動作する超小型のリング型マウスであり、指先での入力に最適である。[17] より転載 (CC BY 4.0 ライセンスに基づく)。

することが可能となり、パーソナルセンシングの普及における最大のボトルネックであった「電力の壁」と「デバイスの大きさ・重量の壁」を抜本的に突破することができる。給電機能と通信機能の融合は、センシングデバイス側のバッテリーからの解放という、物理的な制約を最小限に抑えた次世代のデバイスデザインを可能にする。

このような極小電力、あるいは無給電に近い環境でのセンシングの実現は、2節でCPS及びデジタルツインの要件として掲げた、人間や環境の情報を「常に」かつ「自然に」捉え続けるという究極のゴールを現実のものとすると考えている。ユーザはバッテリー切れの心配や充電の煩わしさ、さらにはデバイスの重さによる肉体的・精神的ストレスから完全に解放され、日常生活のあらゆるシーンにおいて意識することなくセンシングの恩恵を享受できるようになる。超低電力マイクロセンシングプラットフォームは、通信・センシング・学習が高度に融合したデジタルツイン時代の入力端として高い有効性があると考えている。

5 まとめと今後の展望

本稿では、デジタルツインの実現に向け、筆者らがこれまでに推進してきた既存信号インフラを用いたデバイスフリーセンシング、表現学習や教師なし学習によるロバストな状態認識、そして超低電力デバイスの一体的な最適設計について概説した。これらは一見すると異なるレイヤの技術であるが、デジタルツインの具現化においては、空間全体のコンテキストを捉えるマクロセンシング(2節・3節)と、個人の細微な動態を捉えるマイクロセンシング(4節)として、極めて密接な相補関係にある。すなわち、これらインフラ側とデバイス側が独立して動作するのではなく、相互に情報を補完し合う「マルチスケールな協調センシングアーキテクチャ」を確立することこそが、物理世界をサイバー空間へと正確に写像するための大前提となる。

この協調システムを持続可能にする鍵が、表現学習と超低電力最適設計の融合による「セマンティック通信」の具現化である。4節で示したような極小電力デバイスは、ハードウェアの制約上、送信できるデータ量が極めて限定される。ここに3節で述べたC-HARのような圧縮計測や特徴抽出技術の知見を適用することで、エッジデバイス側で生データから意味情報(セマンティック)、あるいはそれに準ずる情報のみを抽出して送信し、通信量を劇的に削減することが可能となる。意味情報そのものでなくとも、中間的な情報を取り出して伝送することは極小電力でのセンシングに向けては有用である。受信側

となるクラウドのデジタルツイン側では、不足するデータを空間の文脈や過去の学習モデルから AI が予測するなどして補完する。ハードウェアの最適設計と高度な学習モデルがクロスレイヤで融合することで、次世代の効率的な通信・センシング統合プラットフォームを実現できると考えている。

このような、通信・センシング・学習が真に融合した世界では、人間は社会インフラやスマートウェアの存在を意識することなく、あらゆる生活空間で自然にデジタルツインの恩恵を享受できるようになる。個人の行動予測に基づく高度なパーソナルアシスト、工場やオフィス空間の自律的な最適化、さらにはヘルスケアの常時スクリーニングなどが、プライバシーの懸念や通信帯域の逼迫、バッテリー切れのストレスなしに実現される。筆者らがこれまで取り組んできた各レイヤの技術は、この調和されたサイバーフィジカルシステム (CPS) を底辺から支え、現実世界とデジタル世界を違和感なく融和させるための強固な技術的基盤となるものであると考えている。

謝辞

本稿で示した研究の一部は、JST CRONOS (JP-MJCS25N4) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] S. Ishida, Y. Takashima, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Proposal of separate channel fingerprinting using Bluetooth Low Energy," Proc. IIAI-AAI, pp.230–233, Kumamoto, Japan, July 2016.
- [2] T. Yamamoto, S. Ishida, R. Kimoto, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Design of BLE 2-step separate channel fingerprinting," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), pp.1–6, Antwerp, Belgium, May 2020.
- [3] Z. Zhang, S. Ishida, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Danger-pose detection system using commodity Wi-Fi for bathroom monitoring," Sensors, vol.19, no.4, p.884, Jan. 2019.
- [4] M. Miyazaki, S. Ishida, A. Fukuda, T. Murakami, and S. Otsuki, "Initial attempt on outdoor human detection using IEEE 802.11ac WLAN signal," Proc. IEEE SAS, pp.1–6, March 2019.
- [5] S. Ishida, R. Takahashi, T. Murakami, and S. Otsuki, "IEEE 802.11ac-based outdoor device-free human localization," Sensors and Materials, vol.33, no.1, p.53, Jan. 2021.
- [6] R. Takahashi, S. Ishida, A. Fukuda, T. Murakami, and S. Otsuki, "DNN-based outdoor NLOS human detection using IEEE 802.11ac WLAN signal," Proc. IEEE SENSORS, pp.1–4, Montréal, QC, Canada, Oct. 2019.
- [7] 折原 凌, 石田繁巳, 荒川 豊, 福田 晃, "Wi-Fi 信号を用いた自動車・自転車検出手法の設計と評価," 情報処理学会研究報告, ITS 研究会, pp.1–8, March 2020.
- [8] 石田繁巳, 三村晃平, 劉 嵩, 田頭茂明, 福田 晃, "路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム," 情報処理学会論文誌, vol.58, no.1, pp.89–98, Jan. 2017.
- [9] S. Ishida, J. Kajimura, M. Uchino, S. Tagashira, and A. Fukuda, "SAVeD: Acoustic vehicle detector with speed estimation capable of sequential vehicle detection," Proc. IEEE ITSC, pp.906–912, Maui, HI, Nov. 2018.
- [10] S. Ishida, M. Uchino, C. Li, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Design of acoustic vehicle detector with steady-noise suppression," Proc. IEEE ITSC, pp.2848–2853, Auckland, New Zealand, Oct. 2019.
- [11] M. Uchino, B. Dawton, Y. Hori, S. Ishida, S. Tagashira, Y. Arakawa, and A. Fukuda, "Initial design of two-stage acoustic vehicle detection system for high traffic roads," Proc. IEEE PerVehicle, pp.590–595, Austin, TX, March 2020.
- [12] B. Dawton, S. Ishida, Y. Hori, M. Uchino, Y. Arakawa, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Initial evaluation of vehicle type identification using roadside stereo microphones," Proc. IEEE SAS, pp.1–6, Kuala Lumpur, Malaysia, March 2020.
- [13] M. Bastwes, R. M., K. Kai, H. Choi, S. Ishida, and Y. Arakawa, "Wi-Nod: Head nodding recognition by Wi-Fi CSI toward communicative support for quadriplegics," Proc. IEEE WCNC, pp.1–6, Glasgow, Scotland, UK, March 2023.
- [14] S. Ishida, T. Murakami, and S. Otsuki, "Room-by-room device grouping for Put-and-Play IoT system," Proc. IEEE GLOBECOM, pp.4293–4298, Rio de Janeiro, Brazil (hybrid), Dec. 2022.
- [15] S. Ishida, T. Murakami, and S. Otsuki, "CSI sampling for room-by-room device grouping in practical environments," Proc. IEEE CCNC, pp.1–6, Jan. 2025.
- [16] B. Dawton, S. Ishida, and Y. Arakawa, "C-HAR: Compressive measurement-based human activity recognition," Proc. WristSense, in Conjunction with IEEE PerCom, pp.1–7, Atlanta, GA, March 2023.
- [17] Y. Li, M. Fukumoto, M. Kari, S. Ishida, A. Noda, T. Yokota, T. Someya, Y. Kawahara, and R. Takahashi, "Ultra-low-power ring-based wireless tiny-mouse," Proc. ACM UIST, pp.1–12, Busan, Korea, Sept. 2025.
- [18] 高橋 亮, Y. Li, 福本雅朗, K. Mohamed, 山本英昂, 野田聡人, 石田繁巳, 横田知之, 染谷隆夫, 川原圭博, "超低電力な指輪型無線マウス," 情報処理学会研究報告, UBI 研究会, pp.1–8, Sept. 2025.