

高齢者ケア施設向けリビングラボのためのデジタルツイン基盤構築に関する現場実験と課題*

山内 雅明^{†a)} 麻生 由博^{††} 下西 英之^{†††} 村田 正幸[†]

Developing a Digital Twin Platform for Living Labs in Elderly Care Homes: Field Experiments and Future Challenges*

Masaaki YAMAUCHI^{†a)}, Yoshihiro ASO^{††}, Hideyuki SHIMONISHI^{†††}, and Masayuki MURATA[†]

あらまし センシング及び通信技術の発展に伴い、リビングラボとも呼ばれる、居住者が生活するような実生活の環境においてデータを取得や分析を通じて研究を行うアプローチが注目されている。ただし、実生活環境におけるセンシングには、居住者に考慮し、生活環境を変えないことや、プライバシーに考慮しデータを取得することが重要である。そのため、通信やセンシング方法、データの取り扱いに関して多くの制限が発生する。我々の協働研究所では、研究成果の社会実装の一環として、リビングラボアプローチに基づき、サービス付き高齢者向け住宅においてデジタルツインの構築を行った。本論文では、高齢者施設でのリビングラボ環境の構築に置いて、物理的及び倫理的に配慮すべき事項や、居住者に配慮したセンシング及び取得したデータを運搬するネットワークの構築について得られた知見をまとめる。特に通信、センサデータの取得と分析、デジタルツイン環境の運用に関する実践結果及び課題について述べる。

キーワード デジタルツイン、センサネットワーク、高齢者施設、マルチモーダルセンシング

1. ま え が き

認知症患者の数は世界的に増加を続けている。世界保健機関の報告によると、2021年時点で約7,500万人が認知症を患っており、毎年1,000万人のペースで増加しているとされている[1]。認知症患者の増加に伴い、介護への負荷は年々増大している。

そんな中、介護環境の改善に向けた取り組みが様々に行われている。特に、認知症患者の行動・心理症候群（BPSD: Behavioral and Psychological Symptoms of Dementia）の検出にフォーカスした研究は数多く報告

されており、センサの種類や数も年々増加している。文献[2]では、様々なウェアラブルセンサを用いた研究についてまとめている。特に、アクチグラフや心拍などの情報を用いる方法が多く用いられている。また文献[3]では、複数のセンサの情報をマルチモーダルに用いる手法を紹介している。また、文献[4]では、家庭内での認知症患者のウェアラブルセンサのデータ及び環境データ、介護者の入力データから不穏行動の予測や検知を行っている。更に、山口氏は、複数の環境及び生体センサや介護者のモバイルデバイスの情報を活用し、BPSDの予測及びケア手法の最適化に取り組んでいる[5]。

大阪大学 NEC Beyond 5G 協働研究所では、被介護者の「こころの状態」に着目し、あたたかなケアの実現を目指すための複数の研究に取り組んできた。本研究では、被介護者が安心して日々を過ごせる環境の構築を最終的な目標としている。このような人間中心の介護環境の実現に向けて、デジタルツインと、居住者が実際に生活する空間で参与観察やデータを収集を行うリビングラボの手法を組み合わせた社会実装を進

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科, 吹田市

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Osaka, 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871 Japan

^{††} NEC 次世代ネットワーク・DX 戦略統括部, 東京都

Advanced Network and DX Strategy Dept, NEC Corporation, 5-7-1 Shiba, Minato-ku, Tokyo, 108-8001 Japan

^{†††} 大阪大学 D3 センター, 豊中市

D3 Center, The University of Osaka, 1-32 Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, 560-0043 Japan

a) E-mail: m-yamauchi@ist.osaka-u.ac.jp

* 本論文は、システム開発・ソフトウェア開発論文である。

DOI:10.14923/transcomj.2025SIP0005

めている。具体的には、BPSDの兆候把握及び行動予測に焦点を当てている。参与観察により、BPSDの予兆として、発症前に不安を感じる様子が見られることに着目し、認知症患者の不安度合いを推定する指標であるCADATY (Caregiver Assesses Dementia's Anxiety designed by Tsuji and Yamauchi) indexを提唱した[6]。これは、被介護者と長く接した介護士が感覚的に感じ取ることができることに基づき、認知症患者の表情、行動、発言から不安を読み解くための指標である。また、実際の高齢者施設にて取得した映像や音声から抽出した認知症患者の表情、行動、発言といったマルチモーダルな情報からベイズ推定によってCADATY indexの値を推定することで、BPSDの予兆を検出する研究に取り組んできた[7]。

これらの調査研究を実施するにあたり、様々なセンサの情報を取り扱うことから、各センサ情報の集約と可視化を行う必要があった。特に、過去の類似研究で用いられた環境センサやバイタルセンサ以外にも、RGBカメラを活用して表情や行動、発言といった情報を抽出していることから、扱うデータの量と取得頻度、個人情報の有無といった性質があり、より高度なネットワークとデータ統合基盤が求められることとなった。そこで、センサの情報集約や可視化、介護者らへの情報提供を行うプラットフォームとして、高齢者ケア施設のデジタルツインを構築した。

このようなリビングラボにおいてセンシング環境を整備し、デジタルツイン基盤を構築する際、実生活環境ゆえに多くの制約がある。例えば、居住空間の景観を損なわず、プライバシーを侵害しない設置方法が求められる。特に認知症高齢者に対しては、環境の変化がBPSDの悪化につながることもあり、慎重な配慮が必要である。更にネットワーク設備についても、例えばPrivate 5G基地局といった大規模な通信基盤の導入が困難なため、Wi-Fiなどの比較的導入しやすい通信手段を選定する必要がある。また、プライバシー保護も重要な課題である。顔画像や会話内容、個室での行動に関するデータを取得することに対しては、心理的な抵抗を示す人も多く、特に外部ネットワークを介したデータ転送には慎重さが求められる。センシングと通信の設計には、こうした人間の感覚的な受容性への配慮が不可欠である。

本論文では、高齢者ケア施設において、実生活環境で実験を行うリビングラボアプローチを支えるために、プライバシーや通信制約を含む様々な制約に配慮して

構築したデジタルツイン基盤の紹介と評価、通信ネットワーク及びセンシングにおける課題やデジタルツインの運用における課題についてまとめる。

本論文の構成は以下のようにになっている。2.では、高齢者施設でリビングラボアプローチを実施する際の様々な制約条件について述べる。3.では、制約を踏まえて構築したデジタルツイン基盤のシステム構成とその実装方法について説明する。4.では、構築したシステムを用いた実証実験の結果と、介護士や施設スタッフへのヒアリングに基づく評価を示す。5.では、実証実験を通して得られた知見をもとに、今後の高齢者施設におけるデジタルツイン構築の課題と展望について議論する。最後に、6.では本研究の総括を行い、将来的な応用可能性や展開について述べる。

2. 高齢者施設リビングラボにおける制約

本研究では、高齢者が生活する施設を舞台にリビングラボ実験を実施しており、その性質上、デジタルツインの構築には多くの制約が伴う。本章では、実験が行われた施設の概要を紹介した上で、物理的な制約、及び倫理・プライバシー面での配慮事項について詳述する(注1)。

2.1 実験環境の概要

実験が実施されたリビングラボは、大阪府に所在する高齢者施設である。施設にはおよそ10名の高齢者と、10数名の介護職員が入居・勤務している。入居者は70歳代から100歳代の男女で、認知症を有していない方や軽度～中等度の認知症をもつ方が入居している。施設の建物は木造二階建てで、共有のリビングスペースに加えて、入居者一人ひとりに個室が割り当てられている。このように、実験対象が生活を送る空間そのものであるという特性が、実験設計に対する大きな制約条件となっている。

2.2 物理的な制約

リビングラボ実験では、実際の生活空間に計測機器等を導入する必要があるが、以下のような物理的な制約が存在する：

- 設置機器の大きさや外観に配慮が求められ、景観を著しく損なうような装置の導入は認められていない。

(注1)：高齢者施設における本取り組みは、大阪大学大学院情報科学研究科研究倫理委員会による実施許可(許可番号:202305)、及び大阪大学大学院工学研究科研究倫理委員会による実施承認(承認番号:4-7-1)を得、被験者若しくは被験者の後見人の同意を得たうえで実施している。

・ 入居者の生活様式を大幅に変更する機器の設置や環境改変は避ける。例えばウェアラブルセンサの24時間着用は困難である。

・ 機器を高所に設置する際は落下リスクを考慮する。壁や天井へのボルト固定は技術的には可能だが、木造施設の原状回復の観点からできる限り回避する。

・ 配管や景観上の理由から、LAN ケーブルを建物の二階廊下まで引き回すことは困難である。

・ 施設周辺は住宅街であり、特に 2.4GHz 帯の干渉が激しく、通信の安定性に課題がある。

2.3 倫理、プライバシー、認知症高齢者への配慮における制約

高齢者、とりわけ認知症を有する入居者を対象とする研究では、倫理的・心理的な側面へ配慮する必要がある。特に以下の点が重要な制約条件となる：

・ 入居者に違和感を与えるような設置は厳禁である。例えば、カメラ端末を入居者の視界に入る範囲に複数台設置するといった方法は、入居者に不安感を与え、BPSD の誘発につながる可能性がある。

・ 映像や音声の取得は、原則として共有リビングや廊下といった共用スペースに限定されている。

・ 個室においては、映像取得は行わず、環境センサやサーマルカメラによる計測に留める。

・ プライバシー保護の観点から、映像や音声など個人情報にあたるデータは、外部のネットワークを経由せずにローカルで収集・管理される必要がある。

3. デジタルツイン構成と実装

3.1 全体像

本研究グループが目指すデジタルツイン像について図1に示す。各種センサから得られた入居者や周囲の環境情報は、デジタル空間のデータベースに保存され

る。また、取得したデータに基づき各種推定アルゴリズムが心理状態や転倒などを推定する。推定された結果は、ロボットの制御や介護士への通知に用いられ、介護士やロボットが入居者へケア等の対応を行うことで、フィードバックループが形成される。

本研究のデジタルツインは、確率的デジタルツイン (Probabilistic Digital Twin) [8] の設計指向に基づき構築されており、不確実な観測情報を確率分布として保持・更新し、その確信度に応じて推論及び制御を行う枠組みを導入している。具体的には、認知症高齢者の不穏状態を対象として、CADATY index をベイズ推定により確率的に算出し、その確信度に応じて通知レベルや介入手段を動的に切り替えることが可能な構成としている。例えば、軽度の不穏兆候が低い確信度で検出された場合には、カメラやマイクを搭載した移動可能な愛玩ロボット (例：LOVOT [9]) が接近し、対象者への介入を行いつつ追加情報を取得し確信度の向上を図るといったユースケースが考えられる。逆に、高い確信度で重度の不穏兆候が予測された場合には、通知により介護士に人的介入を促す設計とすることで、通知過多による介護士の通知疲労の軽減策の一つになると考えられる。これらの構成は、実際の介護施設での観察やデータ収集を通じて得られた知見に基づいており、現場の課題感を反映した応用設計となっている。

既存の高齢者ケア向けデジタルツインとして、クラウド型の高齢者の健康見守りに関するデジタルツイン [10] が提案されているが、確率的な情報の取り扱いが検討されていない。また、確率的状態推定モデルに基づくアルツハイマー病の早期発見のためのデジタルツイン [11] も存在するが、確率分布の活用は状態推定にとどまり、推定結果の確信度に応じて通知や介入を動的に制御する設計までは導入されていない。我々の取り組みでは、確率的状態推定とその確信度の利活用を通じた通知・介入制御までを包含した、従来研究とは異なる新たな枠組みを提案している。

ただし現時点では本構成に基づく通知及び制御の実装は一部の機能にとどまっており、実装及び評価が今後の課題であるが、本論文では設計段階における有効性と実装可能性に焦点を当てて記述している。

このようなモデルの構築に向けたデジタルツインの実装を、ネットワーク、データセンシング、データ分析方法、介護者への情報提供とフィードバックの構成で説明する。

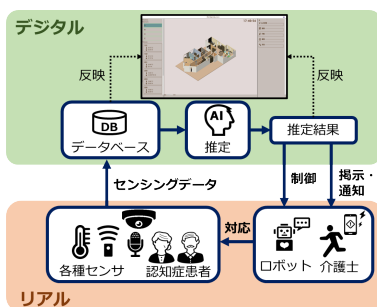


図1 本研究グループが目指すデジタルツイン像
Fig. 1 Envisioned digital twin model of our research group.

表 1 IoT 向け通信方式の比較
Table 1 Comparison of communication methods for IoT.

通信方式	通信範囲	通信経路	通信頻度	通信速度	設置サイズ	構築費用	安定性	ローカル処理
Wi-Fi	数十 m	AP 経由	高頻度	数十～数百 Mbps	中～小	中程度	中	可
Mesh Wi-Fi	数十～百 m	AP 中継・経由	高頻度	数十～数百 Mbps	中	少し高	中	可
LTE	広域	基地局経由	中～高	数十～数百 Mbps	中～大	高	高	不可
5G	広域	基地局経由	高頻度	数百 Mbps～Gbps	中～大	高	高	不可
Private 5G	建屋規模	Private 5G 基地局	高頻度	数百 Mbps～Gbps	中～大	非常に高	高	可
Bluetooth	数 m	ペアリング直結	中頻度	数百 kbps～数 Mbps	非常に小	安価	中	可
LoRaWAN	数 km	ゲートウェイ経由	低頻度	数百 bps～数 kbps	小型	中程度	高	可
NB-IoT	広域	基地局経由	低頻度	数十 kbps	小型	安価	高	不可
Zigbee	数十 m	メッシュ型	中頻度	最大 250kbps	非常に小	安価	高	可

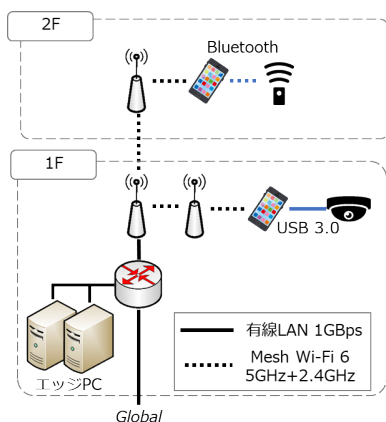


図 2 ネットワーク構成
Fig. 2 Network configuration.

3.2 ネットワーク

ネットワークの構築時には、通信範囲、通信経路、通信頻度、通信速度、通信端末のサイズ、構築費用について考慮する必要がある。表 1 のように IoT 向け通信方式を整理した。

映像及び音声进行分析するため、少なくとも数十 Mbps の通信を処理できる必要がある。また、映像及び音声の生データを取り扱うため、ローカル環境で映像音声処理が行えることも必要であった。一方で、Private 5G 基地局の構築などの方法はコストが非常に大きく、またアンテナ設備も巨大であることから困難である。そのため表 1 に基づき、メッシュ Wi-Fi と Bluetooth で実装を行った。

構築したネットワークの構成図を図 2 に示す。ただし実際には複数台の Android 端末とセンサを設置しているが図では省略した。各種センサやカメラ等のデータは、Bluetooth 通信（機器によって通信規格は異なる）及び USB を介して、一度 Android 端末に集約される。通信を集約する機器は、UI 等を含めたアプリ開

発が容易な Android 端末を選択した。収集されたデータは、メッシュ Wi-Fi を介して Amazon Web Service (AWS) 上のデータサーバに保存される。ただし、個人情報を含む音声や映像については、エッジ PC 内で情報抽出処理を行ってから AWS に送信される。

3.3 データセンシング

本研究では、センサとして環境センサ、ウェアラブルセンサ、インソールセンサを導入した。環境センサでは、気温・湿度・照度・紫外線量・気圧・不快指数・熱中症危険度・騒音量等を取得した。ウェアラブルセンサでは、心拍・皮膚温度・酸素濃度・運動量・皮膚電気活動・血液量・運動量・歩数・加速度・睡眠時間・活動内容といった情報を取得した。インソールセンサでは、歩行時の加速度・地磁気の情報取得した。特にウェアラブルセンサは入居者に違和感を与えかねないため、実験実施者が在室する数時間の間に限って着用を依頼した。

また映像及び音声として、RGB カメラやサーマルカメラを設置した。これらは設置場所が重要である。特に RGB カメラは入居者の表情や仕草といった情報を取得する必要がある。例えば施設内の監視カメラのように部屋の天井付近に設置する方法では、画角から表情を適切に捉えることは難しい。そのため、入居者と同じ目線の高さに、つまり入居者の視界に入る位置に設置する必要があるが、生活スペースに複数のカメラが設置されていることは入居者に違和感を与える可能性が高い。また、サーマルセンサは個室内で、部屋全体が見渡せる位置に設置する必要がある。

このような違和感を与えないセンサの設置方法として、文献 [12] では、高齢者に違和感を与えないように煙検知器に似せたケースをセンサに被せ、接着剤で固定する方法を用いている。ただし、天井からでは表情を捉えることができないことと、天井から落下するリスクが残る。

そこで本研究では、入居者の違和感軽減の工夫として、3Dプリンターでカメラを内蔵可能なオブジェ(図3)を製作し、設置した。また、入居者とのトラブルを回避するため、カメラを内蔵しない同型の置物を数週間設置し、入居者の反応を観察し問題がないことを確認した上で、カメラを内蔵した置物を設置しデータ収集を開始した。

また、サーマルセンサについては、落下するリスクが低い方法として、図4のように、ライティングレールに設置するスポットライトを外枠としてサーマルカメラを設置した。ライティングレールに設置することで、電源も確保可能であった。

なお、このようなカモフラージュ型のカメラ等の端末設置方法は、実験参加前に「カメラやマイクは不快感を与えないようカモフラージュして設置する」と文書で説明し、被験者本人若しくは代理人の自由意思に基づく同意を得たうえで実施している。また、同意の撤回及び同意内容の変更はいつでも可能であることも説明しており、倫理的配慮に基づいて運用している。これらの運用は全て、実施許可を得た倫理審査内容に基づき実施されている。

音声マイクは介護者らへの精神的負荷を考慮し、実験実施者が在室する時間帯のみ、カメラの裏側付近に設置した。

3.4 データ分析方法

個人情報を含む映像や音声の情報は、エッジPCにて個人情報を含まないような処理を行い、AWS に送信



図3 制作した入居者配慮型カメラ内蔵置物
Fig. 3 Camera-equipped figurine designed for resident comfort.



図4 制作した入居者配慮型ライティングレール対応サーマルカメラ
Fig. 4 Thermal camera for lighting rails designed for resident comfort.

する。また、サーマルカメラの映像も必要な情報のみをAWSに送信する。具体的には、映像からは被験者の表情ラベルと行動ラベル、音声からは特定のフレーズの有無、サーマルカメラからは転倒やずり落ちの有無が送信される。特に、CADATY indexの枠組みにおいて、行動に関してはテレビを見るや足を組むといった外観からすぐ分かりうる仕草から、視線を下げるや特定の指を曲げるなどの細かな仕草まで含まれているため、これらの情報を取得する必要がある。表情については、眉の動きや笑顔、口の動きといった情報が必要であった。

表情ラベルの抽出には、Facial Action Coding System (FACS) 理論に基づく市販の表情分析ツールを用いた。行動ラベルの抽出には、kinetics-700の行動モデルデータに基づく推論手法を用いた。音声から特定フレーズの抽出には、市販の文字起こしツールを用いた。また、サーマルカメラの情報抽出は我々の研究グループで提案した、CNN特徴量と体幹特徴量を組み合わせた転倒検出手法[13]を用いた。

3.5 介護者への情報提供とフィードバック

高齢者施設内に設置したタブレット上に、図5のようなページを作成した。構成は、中央に施設の3Dモデルと人の位置や推定された心理状態の情報、左上に通知欄、左下は部屋及び人ごとの情報を選択可能なボタン、右側は選択された部屋及び人に関する各センサの情報を提示する。また、介護士へ通知を行う方法として、スマートウォッチを活用して図6のような画面が表示されるアプリを構築した。画面をタップすることで、対応状況を更新可能である。尚、腕に着用すると介護業務の妨げになる可能性があったため、スト

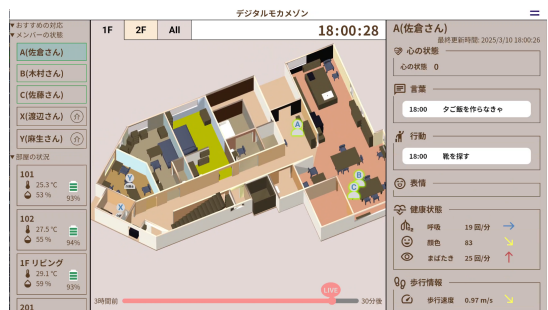


図5 高齢者施設のデジタルツイン(通称:デジタルモカメゾン)のUI
Fig. 5 Interface of the digital twin ("Digital Mocamaison") for the elderly care facility.



図6 通知用スマートウォッチのUI
Fig. 6 Smartwatch interface for notifications.

ラップ型のアタッチメントを装着した状態で使用した。なお、重要度レベルに基づく通知の動的変更については、現時点では実装に含まれていない。

4. デジタルツインの評価検証

実装したデジタルツインに関して、実装及び運用結果と介護士らへのインタビューに基づく評価を行った。尚、APIの対応の有無などの都合により、環境センサデータ及び映像と音声の分析ツールを実装対象としている。

4.1 ネットワークに関する検証

まず、ネットワークの到達範囲について検証を行った。尚、通信範囲は、取得する環境センサのデータを80%以上AWSにアップロード可能な範囲とした。図7はメッシュWi-Fiを使わずにアクセスポイント1台での通信範囲である。木造の建物で電波減衰が発生しにくい環境ではあるが、周囲に住宅が多く2.4GHz帯は干渉が多く発生していることから、1階でもフロアの半分程度の通信範囲であった。また、上階への通信範囲はより限定的であった。本実装では1階に2台、2階に1台のメッシュWi-Fiのアクセスポイントを設置し、1階の全部屋と2階の共用部が通信可能な範囲となった。

図8に、建物内に設置したAndroid端末の一部と、Bluetoothセンサの通信可能範囲を示した。1台のAndroid中継端末で周囲2から4部屋ほどをカバー可能であったため、Android端末は1階に2台と2階に3台を設置することで各部屋の環境センサのデータは収集可能であった。ただし、壁や障害物の影響を受けやすく、通信の死角となる場所も何か所か存在したため、センサデータの収集率を定期的に確認し、設置位置を調整する必要があった。

上記のように、施設内に複数のアクセスポイントと通信中継用のAndroid端末が必要であった。また通信の死角など、定期的にセンサデータの収集可否を確認

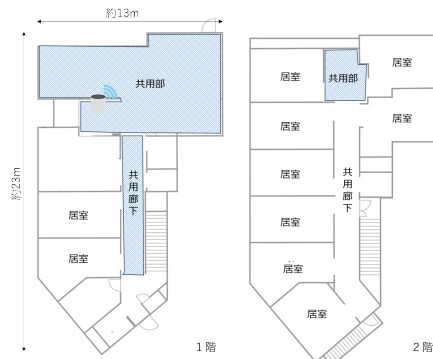


図7 Wi-Fi API 台の通信可能範囲
Fig. 7 Coverage of one Wi-Fi access point.

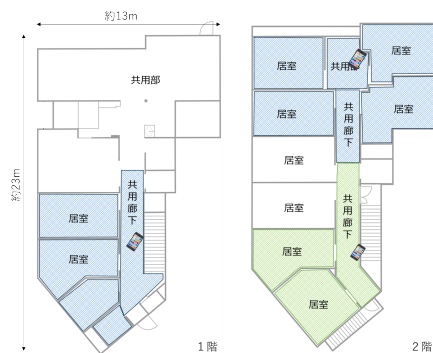


図8 Android 端末の Bluetooth 通信可能範囲
Fig. 8 Bluetooth coverage of each Android device.

し環境センサ位置を調整する必要があり、運用上のコストが大きかった。現状この規模であれば機器の保守管理は可能だが、中規模や大規模な施設への同通信方式の適用は、管理負荷が大きく困難だと考えられる。

通信頻度としては、環境センサの通信に関しては、10から60秒間隔でのデータ取得と、1分ごとのデータ送信を行った。通信の観点では、BluetoothとWi-Fiでの通信で十分なデータが得られた。ただしセンサ機器を新たに設置しセンサ数が増加すると、欠損データが2,3割程度増加したため、中継用Android端末の増設が必要な状況になった。ただし、Android端末の管理の観点から、これ以上の端末数の増加は困難であったため、5Gなどの別の通信方式でのデータ転送が好ましいと考えられる。

映像伝送ではRTSPプロトコルによるストリーミングと、差分画像の情報を圧縮し画像情報として転送する独自のプロトコルによる方法を用いた。どちらもフルHD解像度の映像を用いて、5~10Mbps程度の通信

量であった。実装では2台のカメラを設置したため、少ない台数であれば現状の通信方式でも安定して通信することが可能であった。しかし、後述の検証結果のとおり、今後カメラの増設や高画質化が必要となるため、今回の通信方式では難しくなる可能性が高い。

また、サーマルカメラ映像の取得において2階の個室にAndroid端末を設置した際、2階のメッシュWi-Fiのアクセスポイントに接続すると安定するが、1階のアクセスポイントに接続すると不安定と、通信可能な距離に複数のアクセスポイントがあることで、頻繁に切り替わりが発生し、通信が安定しないことがあった。メッシュWi-Fiでの対応が困難で、別途個室に有線LANケーブルを敷設することとなった。このようなメッシュWi-Fiの設置位置との兼ね合いで通信の不安定さが発生する可能性もある。

4.2 データセンシングに関する検証

実験環境において、各種データがどの程度取得可能であったかを検証した。本節及び次節では、センサの取得性能及び分析手法の適用可能性を明らかにすることを目的として、取得した1時間分のデータを用いて、データ取得率及び特徴量抽出手法に関する定量的な検証を行った。これらの結果は、手動でのラベリング結果と比較した。なお、抽出された特徴量に基づくCADATY indexの推定結果は別稿にて投稿予定である。

環境センサは、10秒から60秒間隔でデータを取得し、97%のデータがデジタルツイン上に収集された。これは構築した通信ネットワークが安定的に稼働していることを意味している。データ取得頻度としては、温度や湿度は急激な変化がなく十分な間隔であったが、騒音は取得頻度が低く、大きな物音や声といったBPSDにつながる情報を確認できる粒度ではなかった。複数種類のセンサを設置し、センシング項目によって、取得周期を変えることで、より得たい情報を適切に得られるよう設計する必要がある。また、環境センサとして小型のものを入居者が気になりにくいような見えにくい位置に設置したが、入居者が盗聴器と勘違いしてしまうケースが見られた。温度と湿度が表示されるような、一目でみてセンサであると分かりやすいセンサに置き換えることで同様のトラブルが起きず、ベッド横などの温度や湿度が適切に得られやすい場所に設置することができた。

バイタルセンサは様々な文献で述べられているように、入居者が着用している理由を忘れてしまい、継続

的な着用在が困難であった。特に検証期間では、入居者本人が着用を拒否したため、データは収集されなかった。一方で、インソールセンサは違和感を感じさせることなくデータを取得可能であった[14]ため、有効な選択肢の一つであると考えられる。

RGBカメラについては、特に日常的に同じ場所で過ごす入居者については、正面から表情を捉えることができた。検証期間では、個室で過ごした時間を除き88%の顔表情を手動でラベル付け可能であった。取得できなかった期間は入居者の移動中及び立ち話中であった。また図3の置物について、入居者が違和感を訴えることはなかった。また介護士からは撮影の有無をカメラ搭載の有無から容易に判断可能であり心理負荷が少なかったとの意見があった。

音声マイクについても、入居者がルーティン的に頻繁に過ごす場所では発話の音声を確認できたが、介護士とすれ違ったタイミングの会話など、取得できなかった発話も多く存在した。具体的には、カメラ等で目視確認可能な会話タイミング43回中29回は話し声を確認可能であり、18回は手動での文字起こしが可能であった。文字起こしが困難であったケースは、騒音により聞き取れなかったケースや独り言などの小声での発話が挙げられる。一つの対応策は、入居者及び介護士にマイクを着用してもらうことであるが、入居者はバイタルセンサと同様に途中で着用をやめてしまう可能性があることと、介護士らの全ての会話が録音されてしまうと精神的な負荷が大きすぎることから、困難である。そのため現実的な解決策としては、複数個所に音声マイクを設置し、それらの情報を統合する処理を行うような方法が考えられる。

サーマルカメラについては安定してデータを取得可能であった。具体的には、計19日間データを収集し、車椅子からのずり落ちが5回発生したと手動で確認可能であった。また、ずり落ち時の様子も手動で分析可能であった[13]。また介護士らから、入居者が室内で動いているかどうかを確認でき、自力で活動する様子が確認できたことで、今後のケア計画やケアに対するモチベーションに良い影響が見られたと、意図せず良いフィードバックがあった。

4.3 データ分析方法に関する検証

行動の様子を分析することは困難であった。テーブルの小物を触る、飲み物を飲む、右後方を見る、耳に手を当てるといった四つの行動についての検出結果を表2にまとめた。具体的な分析方法は、手動のラベル

表2 映像分析 AI による行動の検出結果
Table 2 Behavior detection results by a video analysis AI.

行動内容	手動ラベル数	AI 検出数	AI 誤検出数
テーブルの小物を触る	2	2	17
飲み物を飲む	3	1	6
右後方を見る	15	0	0
耳に手を当てる	5	0	0
(合計)	25	3	23

表3 表情分析 AI による表情の検出結果
Table 3 Facial expression detection results by an analysis AI.

表情	手動ラベル数	AI 検出数	AI 誤検出数
無表情	16	11	8
目尻に横じわ	2	1	0
眉と目が八の字型	3	1	7
眉が逆八の字型	1	0	0
唇を隠す	1	0	2
眉間に縦じわ	1	0	0
(合計)	24	13	17

と kinetics-700 のカテゴリーとの対応表を作成し、映像の各フレームに対する予測結果から、1分ごとの各行動の出現割合を算出し、しきい値（今回の最適値は10%）以上出現した場合に当該行動があったと判定している。全体としては行動ラベルを適切に予測できた割合は12%にとどまった。具体的には、テーブルの小物を触る行動と飲み物を飲む行動は誤検出が非常に多く、右後方を見る行動と耳に手を当てる行動は検出されなかった。カメラの画角の条件により、テーブルの前に座っていると上半身の映像しか取得できないケースや、横からの映像では体の正面の行動内容までは分からないように、一部の情報が欠損することで予測精度が低下したと考えられる。解決策としては、飲み物を飲む行動は飲食物が体の近くにあるという情報を利用して一部検出可能であったことから、付随する情報を利用することが挙げられる。また、疑似データとして作成した映像においては、骨格推定時の骨格点の位置関係でのマッチングが有効であった。右後方を見るという行動の骨格情報を手動で取得し、角度や画角を変更した4個の動画に対して検出を行ったところ、3個は当該行動を検出可能であった。このように個人に合わせてフィッティングは、骨格推定時の骨格点の位置関係から定義可能であったため、データ収集の労力は必要となるが一つの解決策となりうる。

表情は「目尻に横じわ」などの一部の表情は確認可能であった。表3に検出結果をまとめた。手動ラベル付け担当者が各表情に相当する Action Unit（顔の部分ごとの動作に関する特徴量）を指定し、それらの値

表4 文字起こし AI による発言の検出結果
Table 4 Phrase detection results by a transcription AI.

発言内容	手動ラベル数	AI 検出数	AI 誤検出数
ありがとう	8	4	8
アホ	4	0	0
ごめんな	2	0	1
静かにせえ	2	0	0
ほんま	1	0	0
うるさい	1	0	0
(合計)	18	4	9

がしきい値以上となった場合に当該表情が発現したもとのとしている。1分間に多く表れた表情についてラベリング結果と AI 手法による結果を比較している。その結果、「目尻に横じわ」という笑顔に近い表情の一部は誤検出せず検出可能であった。しかし、他の表情では検出漏れや誤検出が多く発生した。全体としては、54%のラベルが手動ラベルと一致しており、過半数の表情は検出可能となっている。正面からデータを取得することは難しかったことや、撮影位置と画質の関係で顔が小さく映ってしまったことで、ノイズが大きく、参与観察時のようにきめ細やかな表情を抽出することは難しかった。またこれらの結果は、ラベラーの主観に基づきアクションユニットを選択しており、機械学習等を用いた対応付け等は行っていない。そのため、これらの対応関係等を個人ごとに適したモデルを構築することで、今後の改善が見込まれる可能性がある。

音声は、声量と騒音及び方言による影響で検出が困難であった。検出結果は表4にまとめた。声量や周囲の騒音により、手動でも文字起こしができない音声も多く、22%の検出率で、誤検出率が69%であった。今回の環境では AI による文字起こしは困難であった。また他のデータでは、関西弁は語尾やイントネーションの違いから、正しく抽出できないこともあった。方言に対応したモデルによってこの点は改善される可能性がある。

サーマルカメラの映像分析は、転倒及び車椅子からのずり落ちが観測された回数が少なく、データ不足により困難であった。また文献[13]で構築した疑似データから学習したモデルで、実環境でのサーマルカメラ映像データのずり落ち検出を行ったが、5回とも検出が困難であった。これは独自データセットとの画角等の違いと、金属製のベッドに体が隠れたことが原因である。これらは今後の課題であり、映像角度を変換する技術等により改善される可能性がある。

4.4 介護者への情報提供とフィードバックに関する検証

介護士のフィードバックとして、デジタルモカメゾンの UI については、直感的な操作で分かりやすいとの評価であった。一方で、一括して温度や湿度の情報を確認する場合など、次にすべきことは何かが直感的に分かりにくいとの指摘もあったため、通知機能の活用や、各部屋の情報を 3D モデルに掲示するなどの改善が必要であった。

また、スマートウォッチの通知については、ボタンが少なく文字も大きいため、直感的な操作で分かりやすかったとの評価があった。通知方法として、入居者の耳が遠いことが多く、通知音を大きくすることで、入居者は気づかないが、介護士は気づくことができる通知の方法になるとの指摘があった。また、センサ疲労の観点から、通知の重要性に応じて、スマートウォッチへの通知と、デジタルモカメゾンの UI に小さく表示する方法など、通知の方法を使い分けるのが良いとの指摘もあった。

5. 高齢者施設のリビングラボデジタルツイン構築における課題と今後の展望

本検証は入居者が 10 人程度の小規模な施設であり、また、認知症ではない高齢者や軽度から中程度の認知症が入居する高齢者施設での実証実験であった。今後の高齢者人口の増加に伴い、より大きい規模の高齢者施設や、重度の認知症患者を含む施設での展開が考えられる。本章では、今回得られた知見をもとに、将来的なデジタルツイン構築における課題を述べる。

5.1 ネットワークにおける課題と今後の展望

検証において、カメラ端末やマイク端末など、端末数はより多く必要となることが分かった。カメラ端末及びマイク端末、サーマルカメラ、インソールセンサを入居者の人数分、用意した場合、合計で 54 個のセンサ端末が設置されることとなる。また、平均的な高齢者住宅の居室数は 35.9 室から 56.2 室で、100 居室を超える大規模な施設も 5.7% 存在する [15]。これらの中規模から大規模の施設に本システムを展開する場合、階数が 5 倍～10 倍と想定すると、300m²あたり 270～540 台のセンサが設置される。6G では 1,000 万台/km² の規模の端末数が想定されている [16] が、300m²あたりの端末数に変換すると、4G, 5G, 6G ではそれぞれ 30, 300, 3,000 台となる。1km²あたりの端末数の算出には高さの概念が含まれていないため単

純な比較は難しいが、少なくとも 5G や、6G 規模の通信インフラが必要となる端末数となると考えられる。

本検証ではカメラ 1 台当たりの通信容量は 5～10Mbps であったが、映像分析の精度向上のためには、より高画質な映像を複数の角度で収集する必要がある。Wi-Fi 通信において、10 台のカメラで 4K 映像を配信する場合、高圧縮な方法で 25Mbps 程度の通信帯域を 10 台分用意することは理論上は可能であるが、実運用上は不安定となる可能性がある。少なくとも代替の通信手段が必要になると考えられる。

一方で、映像や音声は、外部ネットワークを經由せずに取得する方法が好ましい。例えば Private 5G を用いることで、外部のネットワーク網に映像トラフィックを流さず、エッジで処理することが可能となる。しかし、設置コスト等の観点から、各高齢者施設に設置することは困難である。暗号化や仮想スライスによる通信の分離により安全な通信が実現されていることを入居者が納得できるような環境を整備することも必要な課題の一つである。

5.2 データ取得と分析に関する課題と今後の展望

心理状態を正確に推定するためには、手の細かな動きや視線の情報といった繊細な身体的特徴を捉える必要がある。しかし、画角や顔の向きの影響により、単一のカメラによって日常的な映像を取得することは容易ではなかった。少なくとも本研究のように、入居者の生活パターンを事前に観察・把握し、それに基づいて最適なカメラ配置を行う必要がある。また、複数のカメラを組み合わせるとともに、高画質な映像を用いる必要がある。また、入居者に違和感を与えない愛玩型ロボットなどの移動型ロボットを用いてカメラ映像を取得する方法も有効であると考えられる。

本研究では、行動認識のために Kinetics-700 を学習データとする推論モデルを採用したが、CADATY index に基づく心理状態の推定には十分に適していなかった。今後は、心理状態推定に特化した、より詳細なデータセットの構築が必要である。

また、心理状態の推定においては、人と人との位置関係も重要な指標となる。これを実現するには、室内において 10 数センチメートル単位での高精度な位置推定が求められる。しかし、複数のカメラを施設内に設置することには限界がある。ミリ波レーダや LiDAR を用いた位置推定手法についても検討を行ったが、いずれも死角が多く、複数台の設置が必要であり、既存機器のサイズが大きく、目立たないように設置するこ

とが困難である。このため、センサの小型化や、複数の簡易センサを組み合わせた方法、死角に対応可能な手法の開発が求められる。

更に、近年では非接触型センサも登場しつつあるが、それらは長時間にわたり対象者の顔を向けさせる必要があるなど、生活環境に自然に溶け込ませるには課題が多いのが現状である。一方で、我々は介護士との密な連携により、バイタルセンサの数時間装着を入居者に受け入れてもらうことに成功した事例をもつ。このように、施設側の理解と協力を得ることで、例えば体温測定機能を備えたカメラとしての設置や、「笑顔度」を定期的に測定する習慣を導入するなど、センサを生活の一部として自然に取り入れる工夫も今後の有望な手法と考えられる。

5.3 実運用上の課題と今後の展望

本研究では、実証段階において Wi-Fi など比較的簡易な通信手段を用いてシステムの構築・評価を行った。初期検証には有効であったものの、規模の拡大及び長期的な運用を前提とした場合、こうした構成では安定性や保守性の観点から継続的な管理が困難であることが明らかとなった。

特に大きな課題の一つとして、センサ機器の電源確保が挙げられる。バッテリー駆動によるセンサは、長時間のデータ取得を行うには限界があり、設置場所は電力供給が可能な場所に限定される。また、電池交換は大きな手間を伴い、入居者が就寝中のタイミングでは作業が難しくなるなど、運用面での負荷も無視できない。太陽光発電パネル付きセンサの導入も試みたが、設置場所に大きな制約があり、特に部屋を常時明るく保たない高齢者の生活環境では、安定した電力供給を行うことが困難であった。今後、無線による電力伝送技術が発展し、複数の部屋に対して安定的かつ高頻度で電力供給が可能となれば、こうした制約を大きく緩和できると期待される。

また、本研究ではバイタルデータの取得はシステムの対象外としたが、その理由の一つとして、データ取得後にクラウドへ送信する際の API 対応の有無が挙げられる。特定のセンサやウェアラブルデバイスが API 連携に対応していない場合、他システムとの統合が困難となるため、今後の実運用を見据えた場合には、センサ機器の選定においても API の対応状況が重要な評価基準となる。

6. む す び

高齢者施設でリビングラボアプローチを通じて介護現場での課題を発見し、これらを解決するためのデジタルツイン基盤を構築した。ただし、高齢者施設における様々な制約を考慮する必要があり、ネットワーク通信には Wi-Fi 及び Bluetooth などの近距離通信プロトコルを用いたが、データ量や通信頻度、今後の中規模から大規模な高齢者施設での実装等を考慮すると、大規模な移動体通信によるデータ転送が求められることを確認した。また人に関するデータ分析においても、設置できる機器の制約等から十分な情報を得ることは難しく、より現実的なシナリオを考慮した、少ない情報を用いて解決可能なマルチモーダルな分析手法の必要性を確認した。

今後、他的高齢者施設や、小学校など高齢者施設以外でのリビングラボ・デジタルツインを検討している。今回の検証を踏まえ、5G などの移動体通信を用いたセンサ環境や、対象者が子どもの場合の制約などを考慮し、より制約条件等に汎用的なデジタルツイン基盤を構築する。

謝辞 本研究は、大阪大学 NEC Beyond 5G 協働研究所における成果です。実験にご協力頂いた一般社団法人日本モンテッソーリケア協会・サービス付き高齢者向け住宅「柴原モカメゾン」の皆様には感謝いたします。

文 献

- [1] World Health Organization, "Dementia," <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dementia>, March 2025. (Accessed: 2025-4-16).
- [2] S.S. Khan, B. Ye, B. Taati, and A. Mihailidis, "Detecting agitation and aggression in people with dementia using sensors—a systematic review," *Alzheimers Dementia*, vol.14, no.6, pp.824–832, June 2018.
- [3] S.S. Khan, P.K. Mishra, B. Ye, S. Patel, K. Newman, A. Mihailidis, and A. Iaboni, "A novel multi-modal sensor dataset and benchmark to detect agitation in people living with dementia in a residential care setting," *ACM Trans. Computing for Healthcare*, March 2025. (Accessed: 2025-4-16).
- [4] A.O. Bankole, W. Ji, T.B. Barbour, A.J. Lozano, and A.L. Hanlon, "Behavioral and environmental sensing and intervention for dementia caregiver empowerment (besi): A pilot study," *J. American Medical Directors Association*, vol.25, no.8, p.105055, Aug. 2024.
- [5] 山上徹也, 山口晴保, "情報通信技術を活用した BPSD 予防・予測システム開発の現状と課題," *認知症ケア研究誌*, vol.5, pp.8–15, March 2021.
- [6] H. Tsuji, M. Yamauchi, M. Sugita, and M. Kita, "Appearance transcription (CADATY index) and memory book (life-history survey); consideration for a psychological state estimation index for

- people with dementia,” 29th International Montessori Congress - Thailand, Exhibition Showcase, Aug. 2023.
- [7] N. Shigekiyo, M. Yamauchi, H. Tsuji, H. Shimonishi, M. Murata, M. Sugita, and M. Kita, “Estimating anxiety intensity of dementia patients using phrases, facial expressions, and behaviors,” Proc. 2024 IEEE International Symposium on Consumer Technology (ISCT), pp.213–219, Aug. 2024.
- [8] H. Shimonishi, D. Kominami, Y. Ohsita, H. Yoshida, K. Nogami, D. Kanetomo, and M. Murata, “Probabilistic representation and its application of digital-twin of spatio-temporal real-world toward trustable cyber-physical interactions,” IEEE Network, vol.38, no.6, pp.130–137, Aug. 2024.
- [9] GROOVE X, “LOVOT[らぼっと],” <https://lovot.life> (Accessed: 2025-8-26).
- [10] Y. Liu, L. Zhang, Y. Yang, L. Zhou, L. Ren, F. Wang, R. Liu, Z. Pang, and M.J. Deen, “A novel cloud-based framework for the elderly healthcare services using digital twin,” IEEE Access, vol.7, pp.49088–49101, April 2019.
- [11] L.G. Amato, M. Lassi, A.A. Vergani, J. Carpaneto, S. Mazzeo, V. Moschini, R. Burali, G. Salvestrini, C. Fabbiani, G. Giacomucci, G. Galdo, C. Morinelli, F. Emiliani, M. Scarpino, S. Padiglioni, B. Nacmias, S. Sorbi, A. Grippo, V. Bessi, and A. Mazzone, “Digital twins and non-invasive recordings enable early diagnosis of Alzheimer’s disease,” Alzheimer’s Research & Therapy, vol.17, no.1, p.125, May 2025.
- [12] M. Garcia-Constantino, C. Orr, J. Synnott, C. Shewell, A. Ennis, I. Cleland, C. Nugent, J. Rafferty, G. Morrison, L. Larkham, S. McIlroy, and A. Selby, “Design and implementation of a smart home in a box to monitor the wellbeing of residents with dementia in care homes,” Front Digit Health, vol.3, no.798889, pp.1–13, Dec. 2021.
- [13] S. Nakamura, M. Yamauchi, M. Sugita, Y. Aso, Y. Ohsita, and H. Shimonishi, “Detecting falls and slips of wheelchair users using low-resolution thermal image analysis,” IEEE Access, vol.13, pp.136881–136893, July 2025.
- [14] M. Yamauchi, H. Tsuji, and Y. Aso, “Detection of agitation signs in persons with dementia using smart insole sensors,” Proc. 2025 IEEE International Symposium on Consumer Technology (ISCT), pp.1–7, Sept. 2025. (to appear).
- [15] PwC コンサルティング合同会社, “「高齢者向け住まいにおける運営形態の多様化に関する実態調査研究事業」報告書,” https://www.yurokyo.or.jp/upload/item/5830_1.pdf, March 2025. (Accessed: 2025-4-16).
- [16] NTT DOCOMO, “5G evolution and 6G white paper (version 5.0),” https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_v5.0.pdf, Jan. 2023. (Accessed: 2025-4-16).

(2025年4月16日受付, 8月27日再受付,
10月15日早期公開)



山内 雅明 (正員)

2022 大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程了。2022 同研究科特任助教。スマートホーム IoT の研究に従事。IEEE 会員。



麻生 由博

1999 日本電気システム建設(株)。2003 日本ユニシス(株)。2016~2018 総務省出向。2021 日本電気(株)。セキュリティ、クラウド、無線通信/5G, IoT 等の研究・事業開発に従事。現在は、産学官共創活動推進を担当。第一級陸上特殊無線技士。



下西 英之 (正員:フェロー)

2002 大阪大学工学研究科博士後期課程了。2002 日本電気(株)入社。2022 大阪大学 D3 センター教授。トラヒック制御, Software-Defined Networking, Network Functions Virtualization, デジタルツイン, 移動体通信システムの研究に従事。IEEE 会員。



村田 正幸 (正員)

1988 大阪大学工学部博士後期課程了。1984 日本 IBM 主任研究員。1987 大阪大学大型計算機センター助手。1999 大阪大学基礎工学研究科教授。2004 同大学院情報科学研究科教授。2025 同研究科特任教授。情報ネットワークアーキテクチャの研究に従事。IEEE 会員。ACM 会員。