

超高齢化社会に向けたデジタルツイン・エージェントの提案

小林透¹ 深江一輝¹ 今井哲郎² 荒井研一¹

概要: 本研究では、高齢者の日常の行動をデジタルトランスフォーメーション (DX) し、高齢者のデジタルツインを構成する機能を有するデジタルツインエージェントを提案する。具体的には、スマートウォッチ上のアバタ (デジタルツインエージェント) が、デジタルツインエージェントを介して行われる高齢者の社会活動をモニタして高齢者のデジタルツインを構成する。また、高齢者宅に設置されたセンサとアバタが連携することで、宅内での生活行動のモニタ結果を高齢者のデジタルツインに統合する。長崎市内での評価実験により、デジタルツインエージェントがワンストップで複数の高齢者支援機能を提供できること、支援機能を通してデジタルツインの構成ができること、構成されたデジタルツインにより、高齢者の心の健康支援機能が提供できることを確認した。

キーワード: DX, デジタルツイン, エージェント, コミュニケーションロボット, RDF

Digital Twin Agent for Elderly

TORU KOBAYASHI^{†1} KAZUKI FUKAE^{†1} TETSUO IMAI^{†2}
KENICHI ARAI^{†1}

Abstract: We propose the digital twin agent that constructs elderly digital twins by digitally transforming daily life of elderly. We developed the digital twin agent as an avatar on a smart watch. The digital twin agent constructs elderly digital twins by monitoring elderly social activity. The digital twin agent can monitor indoor daily life activities based on distributed small sensors at home. It also takes monitoring results of indoor daily life activity in the digital twin. We confirmed that the digital twin agent can provide one-stop support functions for elderly, construct the digital twin, and offer mental health support functions based on the constructed digital twin through evaluation experiments in Nagasaki City.

Keywords: Digital Transformation, Digital Twin, Agent, Communication Robot, RDF

1. はじめに

高齢化社会の進展に伴い、65 歳以上の高齢者人口に占める一人暮らしの割合は、年々増加傾向にあり、2015 年では男性が 13.3%、女性が 21.1%を占めている[1]。このように一人暮らしの高齢者の急増は、さまざまな問題を引き起こす。例えば、孤独死といった最悪のケースに至らなくても、一人暮らしの高齢者は、社会との接点が少なく引きこもりがちであるため、知らず知らずのうちに認知症が進行してしまうリスクがある。佐渡らの研究によると、認知症の人の医療や介護で社会全体が負担しているコストは 2014 年に 14 兆 5 千億円に上り、2060 年には 24 兆 3 千億円に達するといわれている[2]。一方で、最近では、薬により認知症の進行を遅らせることができ、認知症の初期の段階で早く使い始めると健康な時間を長くすることができるといわれている。つまり、一人暮らしのお年寄りの認知症の発症をいち早く検知し予防することができれば、高齢者の“心の健康寿命”を延ばすことに繋がり、それがひいては、社会全体的大幅な負担軽減をもたらす。

一方、IoT の普及は、工場等の生産現場でのデジタルト

ランスフォーメーション (DX) を加速し、工場自体をデジタルツインとすることを可能としている。これは、生産性向上に大きく貢献している[3]。このような DX とデジタルツインの流れは、生産現場に限らず、さまざまな分野に応用されている。特にヘルスケアの分野では患者自身をレプリカとしてデジタルツイン化することが注目されている[4]~[7]。

そこで、本研究では、高齢者の心の健康支援を目的として、高齢者のレプリカとしてのデジタルツインを構成する機能を有するデジタルツインエージェントを提案する。具体的には、スマートウォッチ上のアバタ (デジタルツインエージェント) が、デジタルツインエージェントを介して行われる高齢者への支援活動をモニタして、高齢者のデジタルツインを構成する。また、高齢者宅に設置されたセンサとデジタルツインエージェントが連携することで、宅内での生活行動をモニタし、その結果をデジタルツインに統合する。セマンティック Web 技術を応用することで、柔軟なデータの追加や意味検索が可能な RDF 構造によりデジタルツインを構成することが特徴である。

本研究では、著者らがこれまで、設置型コミュニケーション

¹ 長崎大学
Nagasaki University
² 広島市立大学
Hiroshima City University

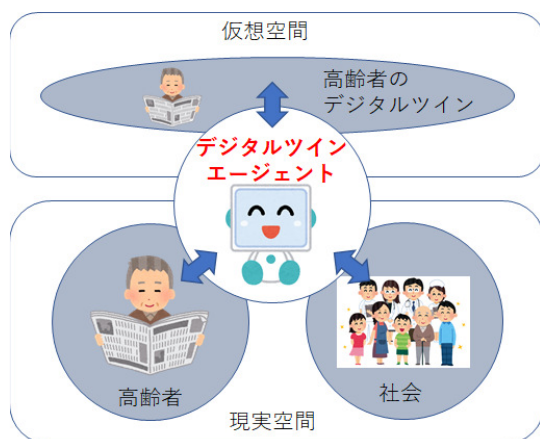


図1 デジタルツインエージェントの位置づけ
 Figure 1 Definition of Digital Twin Agent.

ョンロボットである NEC 社製 PaPeRo i を活用して開発してきた高齢者支援機能を、すべてスマートウォッチ上のデジタルツインエージェントとして実装した。これにより、デジタルツインエージェントが高齢者の宅内外での社会活動を支援する過程で、デジタルツインを構成することを可能とした。長崎市内での評価実験により、デジタルツインエージェントにより PaPeRo i と同等の高齢者支援機能が提供できること、その結果としてデジタルツインが構成できること、さらに構成されたデジタルツインを活用することで、高齢者の心の健康支援機能が提供できることを確認した。

2. 関連研究

ヘルスケアの分野で、患者のレプリカとしてデジタルツインを構成することで、医療活動に活用しようという関連研究は多くある。例えば、患者のデジタルツインによりどの薬がその患者に効くのか、どの治療法がその患者に最適なのかを事前に評価できると述べている研究がある[4][5]。また、心臓病や肺がんなどの具体的な病気の治療に患者のレプリカとしてデジタルツインを活用するという研究がある[6][7]。これらの研究は、実際の患者への薬の投与や治療を行う前に、その患者のレプリカであるデジタルツインに対してシミュレーションを行うことで、効果的でパーソナルな医療提供を実現することを目的としている。本研究では、高齢者に寄り添うバーチャルエージェントが様々な支援機能を提供する過程で、高齢者のデジタルツインを構成する。そして、そのデジタルツインにより、高齢者の心の健康を向上させることを目的としており、アプローチや目的がこれらの研究と異なる。

Ying Liu らは、デジタルツインによる高齢者医療向けクラウド型フレームワークを提案している[8]。高齢者の様々な情報をクラウド上のプラットフォームに管理することで、緊急時の対応やリアルタイムの状態監視、医療リソースの

スケジューリングや最適化を行うことが特徴である。デジタルツインという考え方を高齢者の健康支援に応用しようとする取り組みは、本研究と同じである。しかし、Ying Liu らは、高齢者の健康支援に関わる情報を、データウェアハウスのクラウド上のプラットフォームに一元管理することに主眼を置いている。一方、本研究では、一人ひとりの高齢者に寄り添ったバーチャルエージェントが、その高齢者への支援活動を通して、高齢者一人ひとりのデジタルツインを RDF (Resource Description Framework) の形で構成することを提案している。そして、構成されたデジタルツインを基に、高齢者の心の健康支援に応用しようとしている点が Ying Liu らのアプローチと異なる。

3. デジタルツインエージェント

3.1 位置づけと定義

提案するデジタルツインエージェントは、現実空間における高齢者とその高齢者を取り巻く社会、及び仮想空間における高齢者のデジタルツインの間に位置づける(図1)。そして、以下に示す3つの役割を持つものとして定義する。

(1) 社会との仲介機能の提供とその履歴のデジタルツイン化

高齢者の現実空間における他者とのリモートコミュニケーションを仲介することにより、IT リテラシの問題を補う。これにより社会からの孤立を防ぐとともに、そのコミュニケーション履歴を仮想空間に DX することで、デジタルツインを構成する。

(2) 宅内外行動のモニタリングとデジタルツイン化

高齢者の宅内外での行動を選択的にモニタリングすることで、プライバシーに配慮した上で、高齢者の日常行動をデジタルツイン化する。

(3) デジタルツインに基づく健康支援機能の提供

構成したデジタルツインに基づき、対象者の心の健康支援につながる具体的な機能を提供する。

3.2 PaPeRo i を活用したこれまでの高齢者支援機能

著者らは、NEC 社製の人型コミュニケーションロボット PaPeRo i を活用して以下のような高齢者支援機能を開発してきた。

(1) ソーシャルメディア仲介ロボット

高齢者でも既存のソーシャルメディアサービスを活用して若年者と双方向のコミュニケーションを可能とするソーシャルメディア仲介ロボット(図2)を研究開発した[9]。特徴は、高齢者が、あたかも人と会話するように音声と簡単な指先の動きだけで、ロボットを操作することで適切な若年者とコミュニケーションができることである。具体的には、高精度な顔認証や音声認識が可能な高機能ロボット(PaPeRo i)(図3)を活用し、高齢者は、ロボットに話しかけるだけで、LINE による双方向コミュニケーションを可能とした。

また、高齢者が発信したメッセージの内容からそのメッセージの宛先を高精度（90%以上）に推定する自然言語解析技術を活用した宛先推定方式を確立した。これにより、高齢者がメッセージの宛先を明示的に示さなくても正しい相手にメッセージの送信が可能となった。本方式では、高齢者が発信したメッセージに最初にレスポンスを返した若年者をそのメッセージの正解データとして逐次学習させている。そのため、メッセージ交換を繰り返す度に宛先推定の精度が向上するという特徴がある[9]。

本ロボットは、クラウド上のメインシステムが外部システムや PaPeRo i をサービスとして活用する SOA (Service Oriented Architecture) として実装されている (図 4)。外部システムとしては、メッセージ交換のための LINE Message API、音声認識のための Google Cloud Speech API、メッセージクラスタリングのための IBM Watson Natural Language Classifier、顔認証のための NEC NeoFace API を利用している。

(2) 買い物難民支援ロボット

近年、スマートフォンのアプリを活用して、日用品の宅配を依頼することが可能となっている。しかし、高齢者にとっては、スマートフォンを使いこなす必要があり、ハードルが高い。そこで、著者らは、自宅であたかもお店の人に注文するように、自然な会話で日用品の宅配注文が可能な“買い物難民支援ロボット” (図 5) を開発した[10]。宅配弁当店を対象にしたユースケースを以下に示す。

- ① 宅配弁当店は、スマートフォンやノート PC を使って、その日のメニューを登録
- ② ロボットは、高齢者にメニューを提示し、高齢者は会話により注文を実施
- ③ 注文内容は、LINE により宅配弁当店に通知され、受注確認を実施
- ④ 指定された時間に弁当を宅配

本システムは、ソーシャルメディア仲介ロボットに買い物難民支援機能を追加することによって実装した。

(3) 認知機能障害検知ロボット

これまで、高齢者の認知症診断を行うためには、専門的知識を持った医師が高齢者もしくは近親者や介護者にヒアリングする必要があった。そのため、高齢者には、医師のところへ出向いたり、テストというプレッシャーを受けたりといった物理的、精神的な負担がかかっていた。また、一般的な認知症診断テストは、特定の形式であるため、万民共通であり高齢者個別に特化した質問をすることは難しい。

そこで、高齢者宅や老人ホーム等に設置したコミュニケーションロボットが高齢者の日常生活のイベントをトリガとして高齢者に「日常生活に関する質問」を問いかけ、その応答を認識、記憶する。高齢者の日常生活の様々なイベントをトリガとし、動作に合った質問をコミュニケーションロボットが行うことで、自然な質問を行うことができる

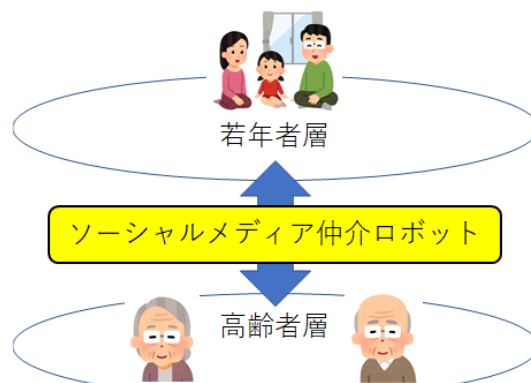


図 2 ソーシャルメディア仲介ロボット
Figure 2 Social Media Agency Robot



図 3 PaPeRo i
Figure 3 PaPeRo i

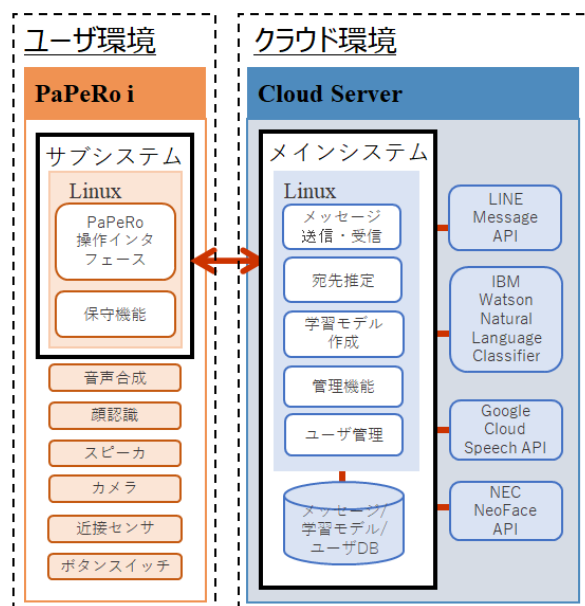


図 4 ソーシャルメディア仲介ロボットシステム構成
Figure 4 Social Media Agency Robot Configuration

ため、高齢者に違和感を持たれずに認知症の予兆検知を行うことができる。

日常生活の中でも「孫の誕生日」に焦点をあてて、時間をトリガとした高齢者に対する音声でのプレゼント質問機能、反面調査を行うための、LINE を用いた孫に対するプレゼント質問機能を実装した[11]。高齢者や孫からの応答結果は、柔軟なデータ拡張が可能なグラフ型データベースで

ある neo4j[12]を用いた。また格納されたデータを活用して、高齢者が孫にあげたプレゼントを正しく記憶していたかを判定し、認知機能をスコアリングする機能を実装した。本システムは、ソーシャルメディア仲介ロボットに上述した機能を追加することで実装した。

(4) 生活行動把握型認知症検知ロボット

認知症診断においては、認知機能障害だけでなく、生活機能障害の有無の把握が重要である。従来、これらの評価はスクリーニング検査(DASC-21[13]等)を用いて専門的知識を持った医師が、高齢者や高齢者の同居家族に問診することにより行われていた。そのため、問診のための医療機関、患者双方の負担が課題となっている。また、そもそも、一人暮らしの高齢者の場合、家族から生活行動を問診できないという問題もある。

そこで、「認知機能障害」と「生活機能障害」の双方を検知するために必要な情報を、医師に代わって収集して、問診に頼ることなく認知症の予兆を検知するシステムを開発した。長崎大学医学部脳神経内科の医師の協力の下、DASC-21を参考に、被験者の行動をモニタリングすることで認知機能と生活機能の障害を評価することができる項目(認知症予兆検知項目)を新たに定義した(表1)。そして、ソーシャルメディア仲介ロボットと超小型センサを被験者宅に設置し、スマートフォンやウェアラブルデバイスを被験者に装着してもらうことで認知症予兆検知項目を収集できるシステムを開発した(図6)。超小型センサとは、1円玉大の大きさで加速度センサと通信機能を持つセンサを指す。スマートフォンには、独自に開発した会話量収集アプリを稼働させ、他者との会話頻度や会話量を収集した。ウェアラブルデバイスは、Tシャツ型ウェアラブルデバイス hitoe を活用し、加速度センサから歩数等の運動量を収集した。収集されたデータは、(3)と同じ neo4j に格納される。

3.3 デジタルツインエージェントによる高齢者支援機能の実装

3.2節で説明した PaPeRo i による高齢者支援機能をスマートウォッチ(Android スマートフォン)上のアプリとして統合することでデジタルツインエージェントを実装した。本デジタルエージェントは、支援機能履歴をグラフ型データベースである Neo4j と MySQL を活用してデジタルツインを構成する。

これにより、スマートウォッチを装着し、画面上のボタンと会話することで、LINE を介したメッセージ交換機能、宅配弁当店への注文機能、イベントをトリガとした認知機能障害検知、生活行動型認知症検知機能が利用できる。

3.4 デジタルツインに基づく支援機能の提供

提案するデジタルツインエージェントにより構成されたデジタルツインの有効性を評価するためには、3.3に示した高齢者支援の履歴からデジタルツインを構成するだけでなく、センサと連携することで、高齢者の見守りにつな

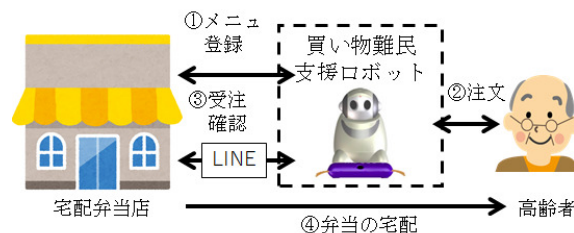


図5 買い物難民支援ロボット

Figure 5 Shopping Refugee Robot

表1 認知症予兆検知項目

Table 1 Dementia Evaluation Items

分類	評価項目
手段的 ADL	服薬できたかどうか
	食事の後片付けができたかどうか
	言われた通り正確な場所へ行けるか
	部屋を出て行く回数と時間
	ゴミ箱にゴミを捨てた回数と時間
	テレビをON・OFFした回数と時間
	カーテンの開閉の回数と時間
基本的 ADL	トイレに行った回数と時間
	入浴したかどうか
近時記憶	食べた食事のメニューは?
	(その他近時記憶に関する質問)
活動量	ベッドにとどまっている時間とベッドから出た回数
	ソファに座った回数と時間
	歩数、歩行速度、一歩の長さ、活動範囲、転倒、つまずきの回数
	会話時間・回数、声の音量

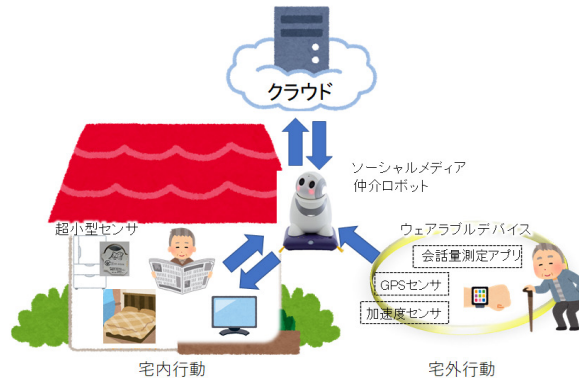


図6 生活行動把握型認知症検知ロボット

Figure 6 Dementia Detection Robot based on Daily Life

る宅内での生活行動のモニタを可能とした。また、スマートウォッチ上のオリジナル機能である歩数計から歩数を、独自に開発した会話量収集アプリから会話量のモニタを可能とした。これらのモニタされた情報は、対象高齢者のデジタルツインとして統合される。

このように高齢者の生活行動のさまざまな側面において収集された情報を統合したデジタルツインから新たな高齢者支援機能(デジタルツイン健康支援機能)を提供できる。具体的には、構成したデジタルツインを基に高齢者とその家族のコミュニケーション促進と認知症予兆検知に関わるデジタルツイン健康支援機能を実装した。詳細は、4.2

節に示す。

4. プロトタイプシステム

4.1 デジタルツインエージェント

システム構成図を図 7 に示す。ユーザ環境のデジタルツインエージェントは、スマートウォッチ（LEMFO LEMT Android 7.1.1）上の Android ネイティブアプリとして実装した。デジタルツインエージェントは、クラウド環境のクラウドサーバと連携することで、デジタルツイン構成のための情報収集とデジタルツインに基づく健康支援機能を対象者に提供する。デジタルツインエージェントが連携するセンサとしては、加速度センサと通信機能を持つ市販の Estimote Stickers とシングルボードコンピュータとその拡張ボードにより TV リモコンの赤外線を検知する装置（Raspberry Pi & RPZ-IR-Sensor）を自作により用意した。歩数等の運動量については、LEMFO が独自に持つ加速度センサを利用した。

4.2 デジタルツイン健康支援機能

デジタルツインエージェントは、高齢者の生活行動をモニタできるため、それを活用して離れて暮らす家族とのコミュニケーションを促進する機能を開発した。例えば、高齢者が冷蔵庫の扉を開けたことを検知後、スマートウォッチ上のデジタルツインエージェントが「昨日、何食べたの？」と高齢者に話しかける（図 8）。その答えを、LINE を通して、離れて暮らす家族に通知する（図 9）。これにより、離れて暮らす家族とのコミュニケーションのきっかけを与えることができる。

これまでは、PaPeRo i を使って、認知機能障害と生活機能障害の有無の検知を行ってきたが、これをデジタルツインエージェントにより行えるようにした。PaPeRo i の場合は、据え置き型のため、宅内での利用が前提であったが、デジタルツインエージェントは、スマートウォッチ上に実装したため、宅内外での高齢者の行動を把握し、そこから認知機能障害や生活機能障害の有無の検出が可能となった。

5. 評価実験

デジタルツインエージェントの評価のため、PaPeRo i による実験結果との比較を行った。PaPeRo i による長崎大学病院での実験 A とデジタルエージェントによる実験 B の詳細を表 2 に示す。今回は、デジタルツインエージェントの機能的評価が目的であったため、被験者は高齢者を対象とせず、より正確な正解データの収集が可能な成年を対象とした。本評価実験における評価項目は以下の通りである。

- PaPeRo i と同等の支援機能の提供
- デジタルツインの構成
- デジタルツイン健康支援機能

実験の結果、PaPeRo i で提供していたすべての機能を、デジタルツインエージェントで提供できることを確認した。

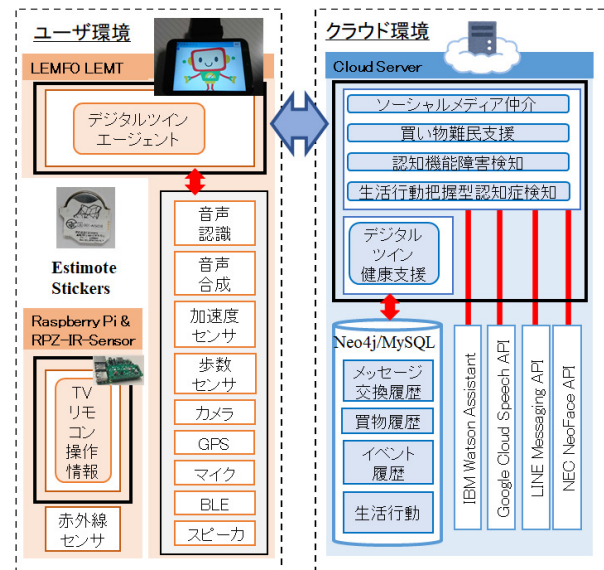


図 7 デジタルツインエージェントシステム構成
Figure 7 System Configuration of Digital Twin Agent

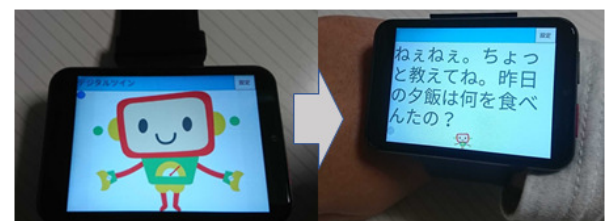


図 8 デジタルツインエージェント UI イメージ
Figure 8 Digital Twin Agent UI Image

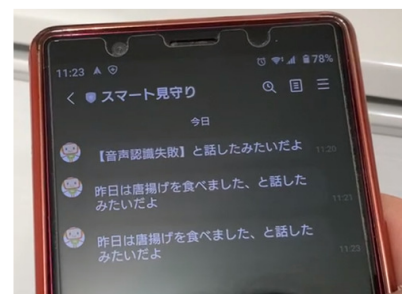


図 9 LINE による通知イメージ
Figure 9 LINE Notification Image

表 2 実験概要

Table 2 Experiment Outline

実験	期間	場所	被験者	ロボット (エージェント)	スマートフォンの	Estimote Stickers	ウェアラブルデバイス	チェック項目
A	R2.3.26 ~ 27	長崎大学病院	60代男性	PaPeRo i	Android ZenFone4 Android 7.1.1	15個設置	hitoe	28
B	R3.2.2 ~ 3	長崎市内一般宅	20代男性	LEMFO LEMT Android 7.1.1	不要	11個設置	LEMFO LEMT Android 7.1.1	24

デジタルツインの構成に関しては、メッセージ交換履歴や

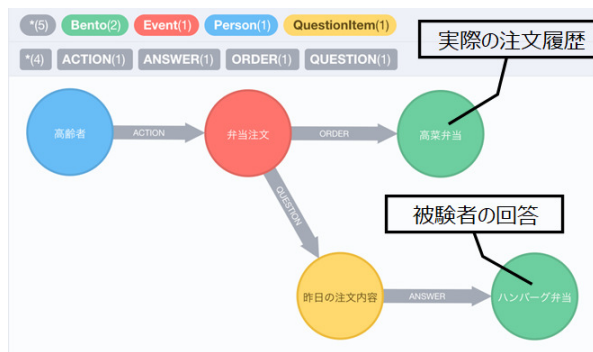


図 10 neo4j によるデジタルツイン構成例

Figure 10 Digital Twin Example by neo4j

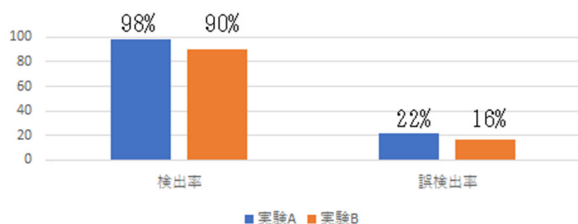


図 11 評価結果

Figure 11 Evaluation Results

注文履歴などの非定型の履歴は、グラフ型データベースである neo4j に、センサ情報等の定型的な履歴は、MySQL により管理することで、高齢者のデジタルツインを動的に構成できることを確認した。図 10 に宅配弁当の注文履歴と翌日デジタルツインエージェントが被験者に前日の注文内容を問いかけた際の回答が neo4j により正しく管理されていることを示す。

冷蔵庫の開け閉めとの連動など、複数の連動パターンにより、デジタルツインエージェントが高齢者の行動とリンクした質問を行えることを確認した。また、設置したセンサと連動により、「認知機能障害」と「生活機能障害」の双方を検知するために必要な情報をデジタルツインとして構成できるかどうかの実験を行った。具体的には、検出率と誤検出率により評価した。

- ・検出率: センサで検出できた行動回数/行動回数
- ・誤検出率: 被験者が行動していない時刻にセンサが動作した回数/センサ動作回数

PaPeRo i を用いた実験結果 (実験 A) との比較を図 11 に示す。検出率は 90%、誤検出率は、16%であり、PaPeRo i による結果と比較して、検出率は 8%、誤検出率は 6%低下したことが分かった。検出率が低下した要因としては、被験者宅が 2 階建ての 1 戸建てであったため、センサの設置場所によっては、信号ロスが発生してしまっていたことがわかった。また、誤検出の要因としては、意図せずセンサに触れてしまうことがわかった。今後、より精度を高めたデジタルツインを構成するためには、センサの設置場所の選定をどのように行うかを考える必要がある。

6. まとめ

本研究では、高齢者の心の健康支援を目的として、高齢者のレプリカとしてのデジタルツインを構成する機能を有するデジタルツインエージェントを提案した。筆者らがこれまで PaPeRo i を用いて開発してきた高齢者向け支援機能をスマートウォッチ上のデジタルツインエージェントとして実装した。これにより、デジタルツインエージェントが高齢者の社会活動を支援する過程で、デジタルツインを構成することを可能とした。

長崎市内で実証実験を行い、デジタルツインエージェントによりデジタルツインが構成できること、構成されたデジタルツインを活用することで、認知症予兆検知に活用できることを示した。今後は、より多くの被験者による実証実験を通して、高齢者デジタルツインのビッグデータ化の検討を行う。

謝辞 本研究の一部は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- [1] “内閣府: 令和 3 年版高齢社会白書”, https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/zenbun/03pdf_index.html, (参照 2021-07-13).
- [2] “厚生労働科学研究成果データベース: わが国における認知症の経済的影響に関する研究”, <https://mhlw-grants.niph.go.jp/project/24159/1>, (参照 2021-07-13).
- [3] S. M. Jeon, S. Schuesslbauer, Digital Twin Application for Production Optimization, 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2020.
- [4] Lindsay James, Digital twins will revolutionise healthcare, Engineering & Technology, Vol.16, Issue 2, pp.50-53, 2021.
- [5] Tolga Erol, Arif Furkan Mendi, Dilara Dogan, The Digital Twin Revolution in Healthcare, 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 2020.
- [6] Haya Elayan, Moayad Aloqaily, Mohsen Guizani, Digital Twin for Intelligent Context-Aware IoT Healthcare Systems, IEEE Internet of Things Journal, pp.1-1, 2021.
- [7] Jun Zhang, Lin Li, Guanjin Lin, Da Fang, Yonghang Tai, Jiechun Huang, Cyber Resilience in Healthcare Digital Twin on Lung Cancer, IEEE Access, Vol.8, pp. 201900-201913, 2020.
- [8] Ying Liu, Lin Zhang, Yuan Yang, Longfei Zhou, Lei Ren, Fei Wang, Rong Liu, Zhibo Pang, M. Jamal Deen, Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin, IEEE Access, Vol.7, pp.49088-49101, 2019.
- [9] Toru Kobayashi, Taishi Miyazaki, Rinsuke Uchida, Hiroe Tanaka, Kenichi Arai, Social Media Agency Robot for Elderly People, Journal of Information Processing Vol.26, pp.736-746, 2018.
- [10] Toru Kobayashi, Takahiro Honda, Kenichi Arai, Tetsuo Imai, Shopping Refugees Support Robot with SNS Agency Function. The 12th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, 2019.
- [11] Toru Kobayashi, Yuta Kishimoto, Tetsuo Imai, Kenichi Arai, Dementia Evaluation System Using a Daily Life Event, The 39th IEEE International Conference in Consumer Electronics, 2021.
- [12] “neo4j”, <https://neo4j.com/>, (参照 2021-07-21).
- [13] “What is DASC-21”, <https://dasc.jp/en/about>, (参照 2021-07-21).