

ISSN 2758-075X

東京国際工科専門職大学紀要

第2巻 第1号

**Bulletin of International Professional University of
Technology in Tokyo**

2023年 3月

東京国際工科専門職大学

目 次

論文

- ゲームエンジンと三幕構成を用いたノベルゲーム制作ワークショップの実施検証
小野 憲史…………… 1

研究ノート

- 能面師とのコラボレーションによる映像制作の試み
鈴木 雅実…………… 21

- CO₂ モニタリングに基づく感染リスク認識支援システムの構築と運用
爰川 知宏・武本 充治…………… 25

- IoT サービスのためのデータストリーム指向サービスプラットフォームと
IoT サービスの思考実験
武本 充治…………… 35

- 「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を目指して
辻野 雅之・水上 憲明・山口 直彦・根岸 豊・二村 忍…………… 44

- シビックプライド醸成に繋がる住民価値の掘り起こしと貢献度の検証に関する研究
～ uncovering potential resident value ～
山本 裕・高田 晃希・黒羽 晟・橋本 沙也加・
橋本 尚子・岡田 ゆかり…………… 56

調査報告

- 射影変換深層学習による物体認識の調査
大関 和夫・上條 浩一…………… 76

- 実習関係の著述に対する頭辞
上條 浩一…………… 93

- LinearSVC による機械音異常検知
大柴 義永・富山 哲男・西田 健次・宮崎 淳…………… 94

デジタルツインを用いた騒音問題の解決についての一考察 島村 涼平・森 慧・高垣 颯介・諸井 聖隼・波多江 茂樹……………	101
デジタルツインを用いた飲食店の混雑についての一考察 國江 貴之・和田 輝・湯浅 翔太・中澤 一馬・園田 もえ・ 波多江 茂樹……………	110
デジタルツインを用いた選挙の投票率を上げるための試みについての一考察 伊藤 雄飛・菊池 遼太・種村 理音・千木良 瞬・青木 悠馬・ 波多江 茂樹……………	118
編集後記 大関 和夫……………	128
『東京国際工科専門職大学紀要』規定……………	129
『東京国際工科専門職大学紀要』執筆要項……………	131

Contents

Articles

- An evaluation of the implementation of a workshop for the production of novel games using game engine and three-act structure
 ----- Kenji Ono --- 1

Research Notes

- Trial of video production in collaboration with a Noh mask artist
 ----- Masami Suzuki --- 21

- Building and Operation of Risk Awareness Support System based on CO₂ Monitoring
 ----- Tomohiro Kokogawa and Michiharu Takemoto --- 25

Data Stream

- Oriented Service Platform for IoT Services and a Thought Experiment on IoT Services -
 ----- Michiharu Takemoto --- 35

- Towards “Smart Mobility Society based on Human-Object Coordination”
 ----- Masayuki Tsujino, Noriaki Mizukami, Naohiko Yamaguchi,
 Yutaka Negishi and Shinobu Nimura --- 44

- Research on uncovering resident values that lead to the fostering of civic pride and the verification of their contribution
 ----- Hiroshi Yamamoto, Koki Takada, Jo Kuroha, Sayaka Hashimoto,
 Shoko Hashimoto and Yukari Okada --- 56

Research Reports

- Research of Recognizing Objects with Projective Transform Deep-Learning
 ----- Kazuo Ohzeki and Koichi Kamijo --- 76

- Acronym for Practice Work Related Publications
 ----- Koichi Kamijo --- 93

- Abnormal machine noise detection with LinearSVC
 ----- Yoshito Oshiba, Tetsuo Tomiyama, Kenji Nishida and Jun Miyazaki --- 94

A Study on Solving Noise Problems Using Digital Twin

----- Ryouhei Shimamura, Kei Mori, Sousuke Takagaki, Akito Moroi and Shigeki Hatae ---101

A study of restaurant crowding using the digital twin

----- Takayuki Kunie, Akira Wada, Syota Yuasa, Kazuma Nakazawa, Moe Sonoda
and Shigeki Hatae ---110

A study of attempts to increase election turnout using the digital twin

----- Yuhi Itoh, Ryota Kikuchi, Rion Tanemura, Syun Chigira, Yuma Aoki
and Shigeki Hatae---118

【論文】

ゲームエンジンと三幕構成を用いた ノベルゲーム制作ワークショップの実施検証

小野憲史

An evaluation of the implementation of a workshop for the production of novel games using game engine and three-act structure

Kenji Ono

Abstract : One of the challenges of novel game production is to organically link branching story creation and programming to generate a specific narrative. In this study, we conducted an exercise combining the three-act structure of a movie script and a visual programming engine and verified its effectiveness. As a result, we demonstrated that even beginners could develop a novel game in a short time.

Keywords : Novel Game, game design, game education, narrative design

1. 研究の背景と目的

1.1 米英のナラティブゲーム教育

ビデオゲームでストーリーはユニークな地位を占めている。ピンポンゲームの『Pong』に代表されるように、ビデオゲームで物語は必須の要素ではない。しかし、実際には黎明期から物語性を有する作品が登場し、現在まで人気を博している。最初期のタイトルに洞窟探検をモチーフとした『Colossal Cave Adventure』があり、「アドベンチャーゲーム（以下 ADV）」というジャンル名の由来にもなっている。Juul（2005）もまた、ビデオゲームを『Pong』のようにプレイヤーの操作で複雑な展開を見せる「創発のゲーム」と、ADVのように一定の手続きによって進む（つまりストーリーテリングを主なゲーム体験とする）「進行のゲーム」に分類している。

もっとも、創発性と進行性の両方を併せ持つビデオゲームは多い。ロールプレイングゲーム（以下 RPG）は好例で、近年では心理学や物語論におけるナラティブに関する知見を踏まえて、ナラティブゲームというジャンルに統合されることもある。2013年には世界最大級のゲーム開発者会議、Game Developers Conference でナラティブゲームの専門部会、ナラティブサミットが誕生した。ビデオゲーム開発で物語体験を統括するナラティブデザイナーという職能も欧米のゲーム開発シーンで定着しつつある。

こうしたトレンドを受けて、ゲーム教育現場でナラティブゲームの制作や批評について教えるコースが増加している。米英の大学におけるゲーム教育コースのシラバス集『Teaching the Game』(Ferdig, Baumgartner & Gandolfi, 2021)でも、全49コースのうち5コースがナラティブゲーム教育を扱っている。中でも選択肢によって分岐するストーリーを楽しむノベルゲーム(i)は、開発のしやすさからナラティブゲームについて学ぶ初学者向けの演習教材に活用される例が多い。同書に収録された5コースのうち、4コースでノベルゲームの制作実習が行われていることから、このことがわかる[表1]。

表1:『Teaching the Game』収録のナラティブゲーム学習に関するシラバス
(上段はコース名, 教員名, 大学名, 対象学生, 下段は研究者による内容の要約)

Storytelling in Video Games, Anne Winchell, 米テキサス州立大学, 学部生対象
RPG『Fable III』を教材に、ビデオゲームのナラティブを伝統的な物語構造との比較を通して学習し、論文やエッセイにまとめるとともに、ナラティブゲームの企画をPowerPointで作成する
Game Narrative and Interactive Storytelling, Tof Eklund, 米オークランド工科大学, 大学院生対象
ビデオゲームのナラティブについて学びつつ、TwineかInkScriptでオリジナルのノベルゲームを制作する。また、ゲームに関する仕様書とエッセイを作成する
Theory & Practice of Interactive Storytelling, Anastasia Salter, 米セントラルフロリダ大学, 大学院生対象
コミック・書籍・ハイパーテキスト文学など、さまざまな作品の批評を通してナラティブを学習し、Twine、Inform7、Ren'Pyでオリジナルのノベルゲームを作成する
Narratology for Games, Nia Wearn and Ian Sturrock, 英スタフォードシャー大学, 学部生対象
アナログゲームやテーブルトークRPGなどをプレイしつつ、ビデオゲームのナラティブについて学習し、Twineでオリジナルのノベルゲームを作成する
Games Narrative, Ian Sturrock and Nia Wern, 英ティーズサイド大学&英スタフォードシャー大学, 学部生対象
ゲームデザイン・世界観設定・脚本制作などについて学びつつ、世界観設定ツールのMicroscopeやTwineを使用し、オリジナルのノベルゲーム、カットシーンの脚本、企画書などを作成する

上記のようにノベルゲームの制作演習ではデジタルゲームブック制作支援ツールの「Twine」が使用される例が多い。これはTwineがオープンソースで開発され、無償で使用できること、プログラミング不要でコンテンツを制作できること、ネット上で多くの作品が公開されており、開発者コミュニティが活発であること、などの理由による。そのためナラティブゲームの制作エッセンスを短時間で学習するのに向いている。ただし具体的な活用事例はシラバス集に記載がなく、先行研究も乏しいのが実情である。

1.2 研究のねらい

また、ナラティブゲーム教育ではビデオゲームが有する「創発性」と「進行性」の両方をふまえた、複合的な教育が求められる。前述のシラバス集においても、ゲームデザインの基礎理論に加えて、Propp (1928)、Campbell (1949)らに代表される物語の構造論や、映画脚本家のFieldによって1979年に提唱された三幕構成をふまえつつ、最終的にナラティブゲームのデザインについて学習していく過程が読み取れる。他に既存ビデオゲー

ムの分析や、アナログゲームやテーブルトーク RPG のプレイが盛り込まれる場合もある。そのため内容が包括的・体系的ではあるが、制作実習に限られる傾向にある。各シラバスからは明示的な実習時間が読み取れなかったが、学生が自宅学習などを通して主体的に実習時間を捻出していることが想定される。そのため著者は、これらのシラバスに即した実践的な教育教材やメソッドがあれば、ナラティブゲーム教育に資すると考える。

こうした中、小野（2022）もまたナラティブゲームにおけるノベルゲームの特性と現状について整理しつつ、Twine を用いたデジタルゲームブック制作教育の実践報告を行っている。ここでは物語のメインプロットだけでなく、選択肢とサブプロットの作成でも、三幕構成をもとにしたモデル化を行うという、より具体的な報告が行われている。もっとも、この報告ではモデルの有効性に関する検証が行われていないという問題がある。

一方で本報告の内容は、プログラミング工程を含む、より高度なノベルゲーム制作演習に発展させられる可能性がある。こうした制作演習のメソッドが確立されれば、学生がポートフォリオに掲載できる高品質な作品を、より短時間で制作可能になる。従来のナラティブゲーム教育における補完的教材としての役割や、集中講座的な活用も想定できる。

そこで本研究では小野（2022）の実践報告をもとに、短期間（3日間／18時間）でノベルゲームを制作する演習ワークショップを行い、その有効性を検証した。なお、演習ワークショップは当初 80 名前後の参加者が想定されていたが、コロナ禍でオンライン開催に移行したことで、10 名に留まった。そのため本研究の位置づけも本調査に先駆けて実施する予備調査とした。

2. 本研究で採用したモデル

「1. 研究の背景と目的」で述べたように、ノベルゲームにおけるストーリーと選択肢はプレイヤーに適切なナラティブを提供する目的で相互補完的にデザインされる。もっともノベルゲーム初学者の多くは過去にオリジナルのストーリーを考案した経験がない。また、選択肢の設定方法は属人性が高く、先行研究でも基準が示されていない。そこで小野（2022）は三幕構成を援用しつつ、ストーリーを先に考案し、そのうえで選択肢を追加する手法を提唱している。具体的な手順を以下に示す。

- ① 学習者に三幕構成にもとづいて昔話をリメイクさせる。
- ② リメイクされた昔話のプロットに対し、三幕構成にもとづいて選択肢を追加する。
- ③ それぞれの選択肢に対してサブプロットを追加する。

三幕構成は多くのハリウッド映画に共通する物語構造で、Field（1979）によると「設定」「対立」「解決」の三幕で構成され、最終的に七つの要素に分解される。また、各項目を構成するプロットは、主人公視点で記述される。この時、設定から対立（ターニングポイント 1）、対立の前半と後半（ミッドポイント）、対立から後半（ターニングポイント 2）で 3 回、主人公は主体的な決断を行う。他にストーリーを通して主人公または他の登場人物の精神的な成長（キャラクターアーク）が表現される（ii）。

これに対してノベルゲームはプレイヤーが主人公になりかわり、さまざまな選択をとり

ながら、決められたストーリーを追体験していく。そのため、選択肢の数だけ体験の自由度が高まる。また、選択肢が増えるほど、必要なシナリオの文量が増加する。一方で選択肢の数は有限であり、プレイヤーに完全な自由度を提供することはできない。そこで、三幕構成で主人公が行う3回の決断に即して選択肢を設定すれば、初学者でも効率的にノベルゲームの制作が可能になると考えられる。

本研究ではこのモデルの有効性を検証するために、太宰治の小説『走れメロス』をもとに、ゲームエンジンのティラノビルダーを用いて、ノベルゲームのサンプルシナリオを作成した [図1]。『走れメロス』を採用したのは、本作の構成が典型的な三幕構成に基づいているからである [表2]。また、メロスのキャラクターアーク（ポジティブなアーク）がわかりやすく表現されている点も特徴である。

図1と表2を比べればわかるように、分岐02がターニングポイント1、分岐04がミッドポイント、分岐06がターニングポイント2に相当する。また、王との約束を果たすために走ったメロスが、ラストシーンで王を無視して親友に懺悔するシーンが、メロスのキャラクターアークを象徴的に示していると考え、分岐08を設定している (iii)。

このように、本研究ではこのシナリオ構造をモデルとしたうえで、オリジナルのノベルゲームを制作する演習ワークショップを実施し、有効性を検討した [表3]。

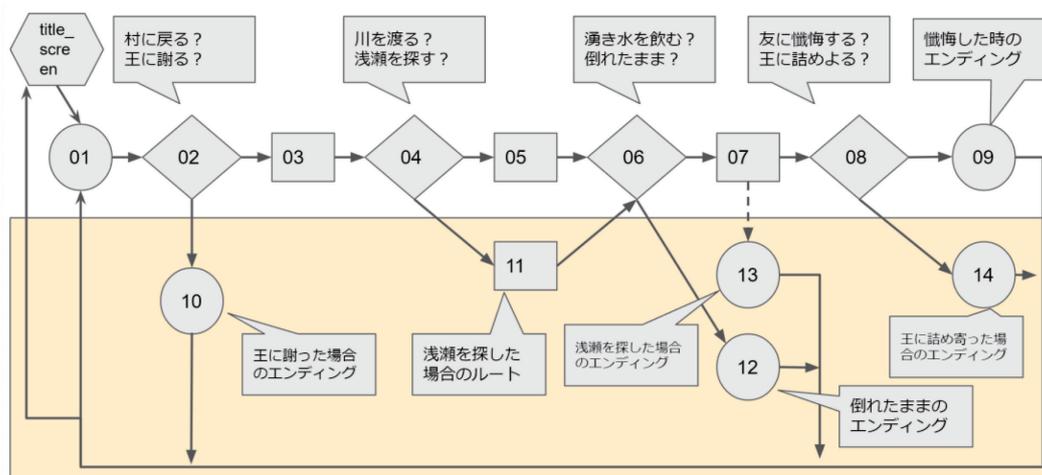


図1：『走れメロス』サンプルゲームのシナリオ構造

表 2：『走れメロス』の三幕構成と七要素

三幕構成	七要素	内容
設定	設定	シラクサの街で王の凶行に憤ったメロスは王宮に乗り込む
	ターニングポイント 1	王に三日以内の帰還を約束したメロスは、親友のセリヌンティウスを身代わりにして村に戻る
対立	対立 1	村で妹に結婚式をあげさせたメロスは、街に向かって出発する
	ミッドポイント	大雨で橋が流されていることを知ったメロスは、川に飛び込み濁流を泳ぎ切る
	対立 2	山賊の襲撃と強い日差しで疲労痕倍したメロスは、地面に倒れこみ、眠ってしまう
解決	ターニングポイント 2	眠りから覚め、湧き水を飲んだメロスは再び走り始める
	解決	メロスは約束を果たし、セリヌンティウスが解放され、王が改心する
キャラクターアーク		ポジティブなアーク

表 3 ワークショップのベースとなるカリキュラム

1	『走れメロス』を通して三幕構成について学ぶ
2	昔話のストーリーを三幕構成で要素分解する
3	分解したストーリーの世界観や固有名詞を一般的な内容に置き換え、ストーリーエッセンスを抽出する
4	ストーリーエッセンスに別の世界観や固有名詞を設定し、オリジナルの三幕構成を作る
5	オリジナルの三幕構成を七要素に拡張し、メインプロットを作成する
6	オリジナルのメインプロットに対して、『走れメロス』サンプルシナリオにもとづき選択肢を追加する
7	追加した選択肢にもとづいてサブプロットを作成する
8	完成した全体プロットをもとに、ゲームエンジン上で『走れメロス』サンプルシナリオを改造しながら、オリジナルのノベルゲームを完成させる

3. 演習ワークショップの概要

本研究は情報通信交流館 e- とびあ・かがわの協力のもと、同館が主催する体験講座「e-とびあ・かがわ 春の文化祭 2022 / ノベルゲームワークショップ」にあわせて実施した。演習ワークショップは 2022 年 3 月 20 日、26 日、27 日の 3 日間で実施され、演習ワークショップの前後で Web アンケートに回答してもらった形で調査を進めた。Web アンケートの記入時には事前に同意書を読み上げるなどして、内容の理解に努めた。

4. 演習ワークショップの実施形態

演習ワークショップは座学と実習を組み合わせつつ、表 2 のカリキュラムをもとに午前

10時から午後5時まで、1時間の昼休憩を挟みつつ、合計3日間（18時間）で進行した。オンライン講義ツールにはWeb会議システムのZoomを使用し、グループワークでは少人数に分かれてグループミーティングが開催できる、Zoomのブレイアウトセッション機能を活用した。ゲームエンジンにはサンプルシナリオ制作と同じくティラノビルダーを使用した。制作するノベルゲームの形式は「アドベンチャー（ADV）形式」ではなく、「サウンドノベル形式」とした（iv）。他に専門学校でシナリオについて学ぶ学生を1名、研究者の自己資金でティーチングアシスタントとして雇用し、受講者をサポートした。

4.1 演習ワークショップのカリキュラム

3月20日（第1日目）の演習ワークショップ内容

1：ノベルゲームの講義

30分間のアイスブレイクの後、演習ワークショップの概要説明を兼ねて、ノベルゲームの歴史と現状、および可能性に関する60分間の講義を行った。

2：メインプロットの作成

『走れメロス』サンプルゲームをプレイしてもらい、受講者に成果物のイメージを提示した。その後、下記の手順で演習ワークショップを進めた。なお、以下の①～④は3～4名ずつのグループワークで進め、受講者間での学び合い・教えあいを促進させた。⑤は個人ワークとした。

- ① 「三幕構成」について解説し、物語が「設定」「対立」「解決」の三パートから構成されること。また、各パートが全体で七要素に分解できることを示した。
- ② 『走れメロス』のストーリー構造と三幕構成について解説した。
- ③ 任意の物語を分解し、固有名詞を一般名詞化するなどして抽出したストーリーエッセンスに対して、別の固有名詞や設定などを加えることで、オリジナルのストーリーが作られることを示した（v）。
- ④ 任意の昔話を三幕構成で分解し、ストーリーエッセンスを抽出させた。その後、不足している七要素を追加させて、リメイク版の昔話のプロット作成を行った。
- ⑤ これまでの学びをふまえて、任意の昔話をもとにオリジナルのメインプロットを作成させた。時間内に完成しなかった場合は、次回までの宿題とした。

3月26日（第2日目）の演習ワークショップ内容

1：サブプロットの作成

受講者が作成したメインプロットをもとに、選択肢による分岐とサブプロットの制作を行った。なお、これ以降は個人ワーク中心で行い、要所でグループを編成して、受講者間での進捗報告や学び合い・教えあいを促した。

- ① はじめに Lebowitz and Klug（2011）の解説に従い、サブプロットが大分岐・中分岐・小分岐に分類できることを示した。次に『走れメロス』サンプルゲームのシ

ナリオ構造を紹介した（図1）。

- ② 『走れメロス』のラストシーンで、王との約束を果たすために走ったメロスが刑場に到着後、王を無視して親友のセリヌンティウスに懺悔したシーンをもとに、もしメロスが王に自分を殺すように迫ったら、どのような結末になったか考えさせた。
- ③ 刑場における王を無視した行為が、メロスのポジティブなアークを象徴していることと、これが間接的に王の改心につながった点について説明した。そのうえでキャラクターアークを表現する上で、第4の選択肢を追加した点について示した。
- ④ 前回作成したオリジナルプロットの構成を見直させつつ、大分岐・中分岐・小分岐・キャラクターアークに相当する選択肢と、それに連なるサブプロットを作成させた。

2：ティラノビルダーでの実装

はじめにティラノビルダーの基本的な操作方法を説明した。その後『走れメロス』サンプルシナリオを改造する形で、受講者それぞれが作成したオリジナルストーリーのメインプロットとサブプロットを実装させた。

3：タイトル作成

Windowsに付属のペイントツールとフリー画像の素材を用いて、オリジナルのタイトル画面を作成する方法について説明し、作成させた。

3月27日（第3日目）の演習ワークショップ内容

1：演出の追加

ゲームをより魅力的に見せるための演出法について、ティラノスクリプト（vi）の解説をふまえつつ、以下の手法を紹介した。その後、時間までゲームの作り込みを行うように指示した。

- ① 文頭を一マスあける
- ② 文中で一行あける
- ③ BGMと効果音の追加
- ④ 選択肢の追加
- ⑤ 変数を用いたフラグ管理

2：最終プレゼンテーション

受講者が各自で制作したノベルゲームのプレゼンテーションを行った。

4.2 作品の公開

各々の作品は演習ワークショップ終了後、ストーリーの書き込みや細部の修正などを経て、ネット上に公開された（vii）。受講者10名のうち9作品が公開され、そのうちサブプロットも含めて、ストーリー上の完成を見たのは7作品だった。中にはサンプルプログラ

ムを使用せず、ADV形式で実装しなおした受講者もいた。他に昔話ではなくオリジナルのプロットを作成した受講者もいた [表4] [図2,3]

表4：演習ワークショップで制作された作品リスト

	タイトル	元の物語	完成	備考
1	シンセカイ Another world	浦島太郎	○	
2	リス太郎	桃太郎	○	
3	ボーイミーツガール流離譚	かぐや姫	○	
4	竜宮城オブ・ザ・デッド	浦島太郎	○	ADV形式
5	華よ散れ	オリジナル	×	
6	未来版かぐやひめ	かぐや姫	○	
7	新世紀人魚姫	人魚姫	○	
8	タイトル未定	オリジナル	○	
9	暁	かぐや姫	×	
10	未提出			

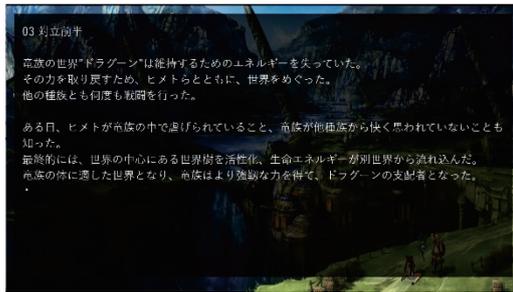


図2：シンセカイ Another world



図3：竜宮城オブ・ザ・デッド

5. 事前アンケート結果

受講者の属性を把握するために、演習ワークショップ申込み時に以下のアンケートを匿名で行った。

5.1 受講者属性

男女比が6：4、年齢が19歳から52歳、1週間の平均読書日数とビデオゲームの平均利用日数が0日から7日と、ワークショップの受講者は多岐にわたった。読書とビデオゲームの消費傾向では、1週間の平均読書分数に比べてビデオゲームの平均プレイ分数が約3倍多く、読書に比べてビデオゲームの消費傾向が高かった [表5]。受講者の居住地は茨城県・富山県から熊本県まで地理的な広がりが見られた。当初想定されていた対面形式での開催では参加できなかった層であり、オンライン開催ならではのメリットが見られた。

表 5：受講者属性

No	性別	年齢	1週間の平均 読書日数	1日の平均読 書時間(分)	1週間のビデオゲー ムの平均利用日数	1週間のビデオゲー ムの平均プレイ分数
1	男性	23	3	40	7	60
2	男性	19	1	10	7	180
3	男性	34	5	30	7	120
4	女性	52	6	60	0	0
5	女性	24	3	90	7	500
6	女性	19	0	10	0	0
7	男性	51	7	30	0	0
8	男性	31	0	0	7	180
9	女性	23	3	30	5	90
10	男性	35	3	180	7	420
平均		31.1	3.1	48.0	4.7	155.0
最小値		19	0	0	0	0
最大値		51	7	180	7	500

5.2 好きな小説とゲームのジャンル

好きな小説のジャンルではファンタジー、SF、推理小説が上位を占めた [図 4]。好きなビデオゲームのジャンルではアドベンチャーゲーム（以下 ADV）、恋愛シミュレーションゲーム（以下恋愛 SLG）、ロールプレイングゲーム（以下 RPG）が上位を占めた [図 5]。一方で対戦格闘をあげた受講者は皆無だった。このことから受講者はストーリー性のあるゲームを好む傾向にあることがわかった (viii)。

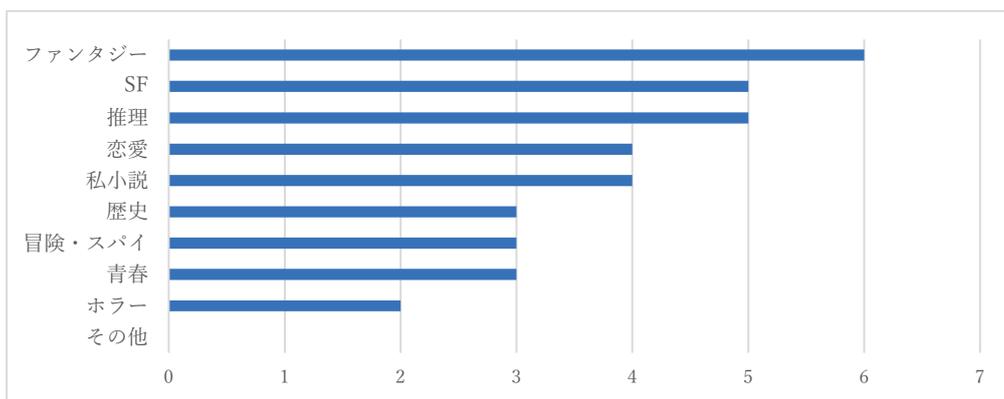


図 4：好きな小説のジャンル（複数回答可）

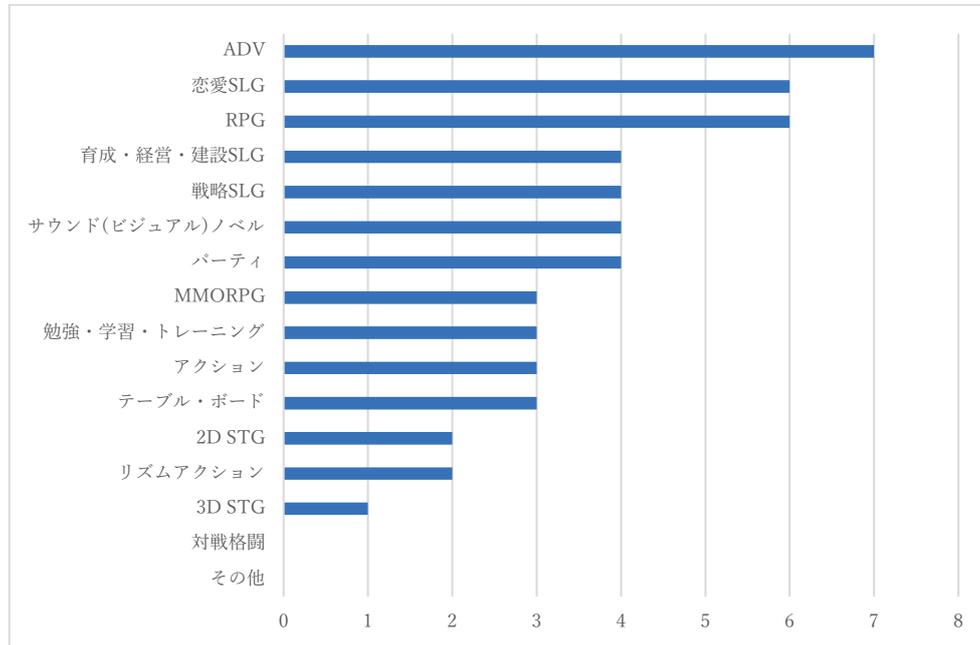


図5：好きなビデオゲームのジャンル（複数回答可）

5.3 創作活動の経験

受講者の5割が小説を書いた経験があり、サウンド（ビジュアル）ノベルの制作経験がある者も3割にのぼった。PCの操作に得意意識を持つ受講者が多く、プログラミング言語の学習経験がある者が8割、ゲームエンジンの利用経験者も6割にのぼった。このように、総じて創作活動やITリテラシーが高い受講者が多いことがわかった [表6]。なお、プログラミング言語ではC、C++、C#が多く、はじめてプログラミング言語を学んだ時期は大学・専門学校が多かった [図6,7,8]。

表6：創作活動経験の有無

	小説を書いた経験	サウンド(ビジュアル)ノベルの開発経験	PCの操作習熟	プログラミング言語の学習経験	ゲームエンジンの利用経験
1	ある	ある	やや得意	ある	ある
2	ない	ない	やや得意	ある	ない
3	ない	ある	どちらともいえない	ある	ある
4	ない	ない	どちらともいえない	ある	ない
5	ある	ない	得意	ある	ある
6	ある	ない	やや得意	ない	ある
7	ない	ない	やや苦手	ある	ある
8	ない	ある	やや得意	ある	ある
9	ある	ない	やや得意	ない	ない
0	ある	ない	得意	ある	ある

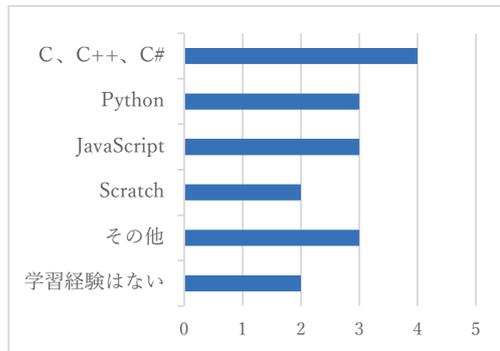


図 6：学習経験のあるプログラミング言語

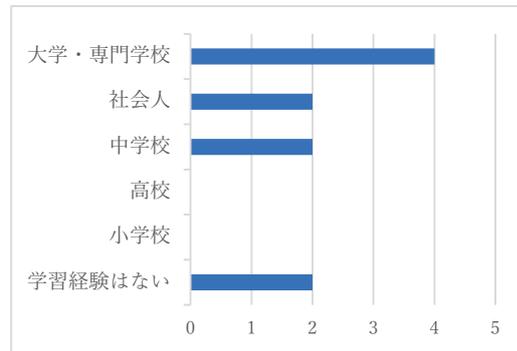
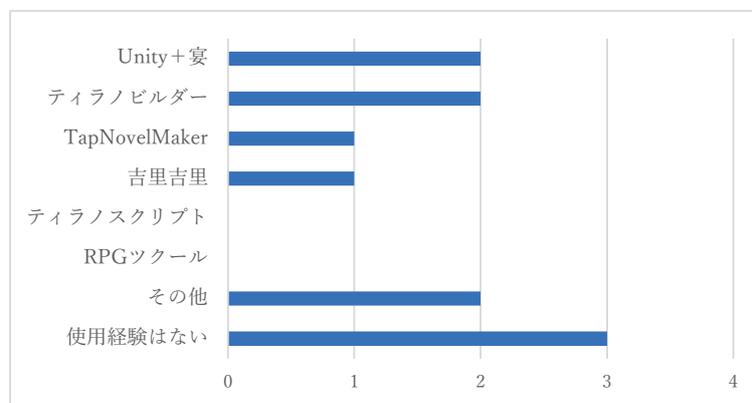
図 7：はじめてプログラミングを学んだ時期
(複数回答可)

図 8：ゲームエンジンの利用経験（複数回答可）

5.4 事前アンケートのまとめ

前述の通り、本イベントはオンライン開催に変更されたのに伴い、受講者が全国に拡大した一方で、香川県からの参加者は1名に留まった。また受講者の年齢層も19歳以上と、当初想定されていた高校生より高かった。受講理由については「ノベルゲーム作りについて学ぶため」「趣味の活動に活かすため」「ストーリー作りについて学ぶため」などが聞かれた。このことからノベルゲーム愛好者の年齢層が比較的高めなこと、ノベルゲーム制作学習に対する潜在的なニーズが全国に存在することが推察された。

6. 事後アンケート結果

事後アンケートは各日の演習ワークショップ終了後に匿名かつ任意で回答してもらった。

6.1 演習ワークショップの各段階における総合的な評価について

演習ワークショップの各段階で「想定通りだったか?」「わかりやすかったか?」「ためになったか?」の3項目でリッカート尺度による5段階評価を行った。その後、各項目の回答数に1～5の定数を乗算し、指数化した(表7,8,9)。

表7：講義と演習ワークショップの内容は事前に想像していた通りだったか?

	想定外だった	やや、想定外だった	どちらともいえない	やや、想定通りだった	想定通りだった	指数
ノベルゲーム講義	1	2	1	0	4	28
メインプロット作成	1	0	2	1	4	31
サブプロット作成	1	1	2	2	2	27
ティラノビルダー操作	0	2	0	3	4	36

表8：講義と演習ワークショップの内容はわかりやすかったか?

	わかりにくかった	やや、わかりにくかった	どちらともいえない	やや、わかりやすかった	わかりやすかった	指数
ノベルゲーム講義	0	1	0	3	5	39
メインプロット作成	0	0	1	2	5	36
サブプロット作成	1	0	1	4	2	30
タイトル作成	0	0	1	0	7	38
ティラノビルダー操作	0	0	0	1	7	39

表9：講義と演習ワークショップの内容はためになったか?

	ためにならなかった	やや、ためにならなかった	どちらともいえない	やや、ためになった	ためになった	指数
ノベルゲーム講義	0	0	0	3	6	42
メインプロット作成	0	0	2	1	5	35
サブプロット作成	1	0	1	1	5	33
タイトル作成	0	0	1	0	8	43
ティラノビルダー操作	0	0	0	0	8	40

6.2 演習ワークショップの各段階の理解度と達成度について

演習ワークショップ初日のメインプロット作成における理解度と達成度、および演習ワークショップの各段階別の難易度について五段階評価を行い、各項目に定数1～5を乗算して指数化した[表10,11,12]。その後、指数の変化についてグラフ化した[図10]。また、追加演出の実装度についても回答を得た[図11]。

表 10：メインプロット作成における各段階の理解度

	理解できなかった	やや、理解できなかった	どちらともいえない	やや、理解できた	理解できた	指数
三幕構成の概念理解	0	0	0	3	5	32
七要素の概念理解	0	1	1	2	4	31
キャラクターアークの概念理解	0	0	0	4	4	28

表 11：メインプロット作成の達成度

	かなり宿題が残った	やや、宿題が残った	時間内で、ほぼ終了した	やや、時間が余った	かなり時間が余った	指数
メインプロット作成は時間内に終了したか？	2	3	0	3	0	15

表 12：演習ワークショップの各段階での難易度

	難しかった	やや、難しかった	どちらともいえない	やや、簡単だった	簡単だった	指数
三幕構成でメインプロットを作る	1	4	1	2	0	18
三幕構成から七要素に展開する	4	1	1	2	0	15
キャラクターアークを設定する	1	4	1	2	0	19
サブプロットを作成する	2	3	1	1	1	21
ティラノビルダーでプロットを実装する	1	3	2	2	0	19
オリジナルのタイトルを作る	0	1	4	0	3	33

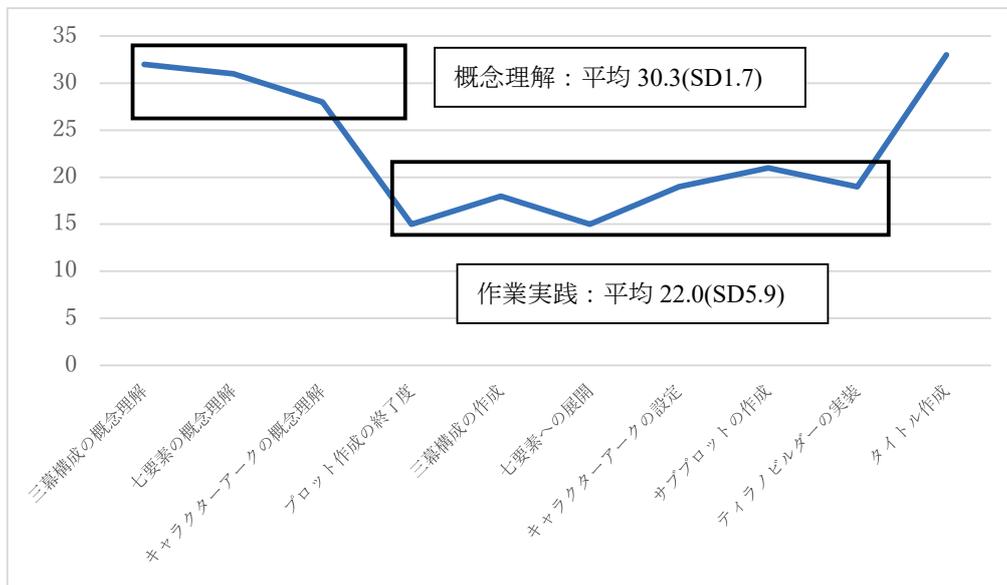


図 10: 演習ワークショップの回答結果指数の変化

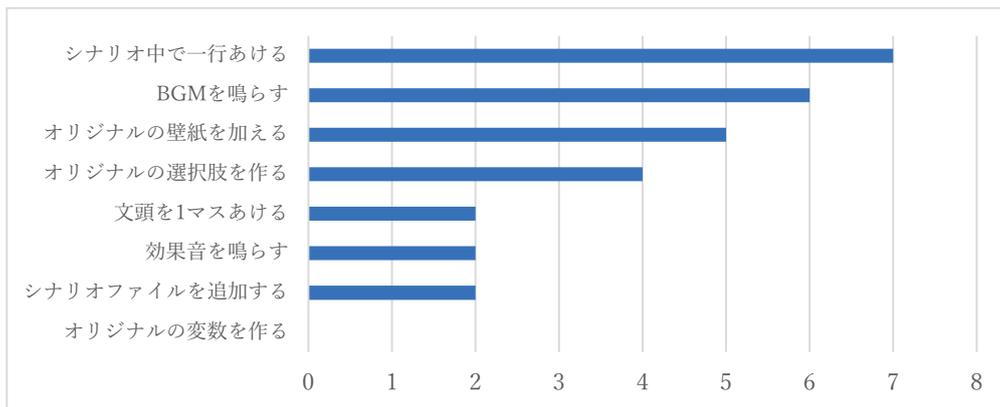


図 11: ティラノビルダーで行った追加演出 (複数回答可)

6.3 演習ワークショップ終了後の評価

演習ワークショップ終了後、「演習ワークショップを終えて、より深く学びたい点」「3日間の演習ワークショップで簡単だった順」「今後、ティラノビルダーで何か新しい作品を作りたいか」「本演習ワークショップの総合評価」で回答を得た [図 12] [表 13,14,15]。

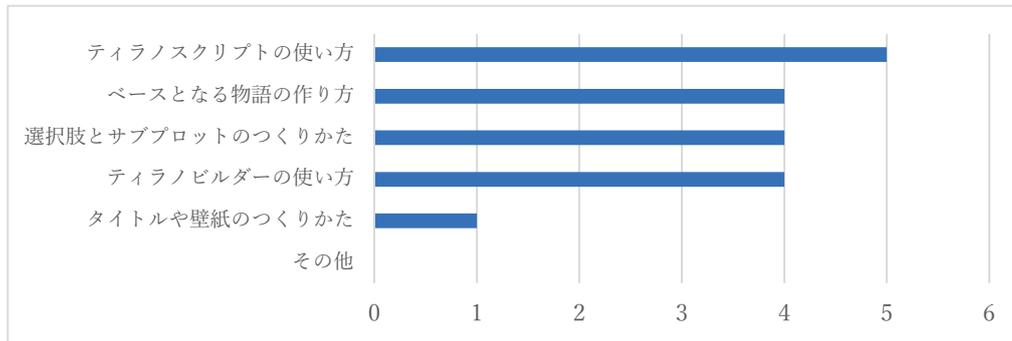


図 12：演習ワークショップを終えて、より深く学びたい点（複数回答可）

表 13：3日間のワークショップで簡単だった順

順序	人数
1日目→2日目→3日目	2
2日目→1日目→3日目	0
2日目→3日目→1日目	2
1日目→3日目→2日目	1
どれも同じくらい簡単だった	2
どれも同じくらい難しかった	2

表 14：今後、ティラノビルダーで何か新しい作品を作りたいか？

回答	人数
思う	8
思わない	0
わからない・未定	1

表 15：本演習ワークショップの総合評価（5段階）

評価	人数
1	
2	
3	
4	1
5	8
平均	4.89

6.4 アンケートの自由記述

演習ワークショップでは各日ごとにアンケート形式で感想・コメント・質問などを募集した。最終アンケートでは全体を通しての感想・コメント・改善案などを募集した。最終アンケートでは総じて高い評価を示すコメントが得られた。以下はその一部である。

- ・ 大変楽しく行うことができました。感謝しかありません。課題は昔話でしたが、全員で同じお話を作ってもいいかもしれませんね。
- ・ とっても沢山勉強になった上に、これからの創作のモチベーションと自信がつけました。本当にありがとうございました。プログラミング等の経験が全く無く、ティラノスクリプトの使用が不安でしたが、丁寧に説明していただけだったので理解できました。これからもっと勉強して活用できるようになりたいです。
- ・ 3日間、ありがとうございました。私は実はノベルゲームはしたことがありませんでした。プログラミングソフト（ティラノビルダー）への興味が先にあり、申し込みをさせていただきました。先生のお話の中のゲームの例を見たり、他の受講生の方々の作品を見たりして、なるほど〜と思いました。面白かったです。自分でお話を作るのは、本当に難しかったです。結末を好きにしていることで、自分を試されている感じでした。充実した3日間でした。先生、どうもありがとうございました。今後のご活躍もお祈りしています。
- ・ 全国にいらっしゃる素敵な才能・視点を持った方々とお会い、そして一緒に学べたことはとても私にとって有意義な時間でした。また、私は熊本県に住んでいるので対面のみでの開催だと参加できませんでした。オンラインで参加できたことにとても感謝しております。他の活動やこの活動の第二弾のようなイベントがあればぜひとも参加させていただきたいです。素晴らしいイベントありがとうございました。また、このような大変な時期の中イベントの開催に尽力してくださった職員の皆様お疲れさまでした。

7. 結果

「4.2 作品」の発表の項目で示したように、本演習ワークショップでは10名の受講者が18時間で7作品を完成させ、Web上に公開した。一方で受講者のアンケート結果から下記の内容が示唆された。

- 受講者は演習ワークショップ内容について、総じて「わかりやすく」「ためになった」[表7,8]と回答した。ただし、いずれもサブプロット作成の指数がもっとも低く、苦手意識を感じたことが分かった。なお、「ティラノビルダーの操作」に関するワークショップに比べて、他の講義やワークショップが事前の想定と異なっていた、と回答する傾向が高かった[表9]。
- ノベルゲーム制作に必要な概念理解と作業実践の間では、回答に8.3ポイントの違いが見られた[図10]。ここから受講者の「頭では理解できるが、実際に手を動かして

みると難しい」という体験がよみとれた。中でも「メインプロット作成の達成度」と「三幕構成から七要素に展開する」の設問で指数が共に最低の15を記録しており、受講者はノベルゲームの制作よりも、メインプロットの創作に対して、より苦手意識を感じたことが明らかになった。

- 受講者の大半は「3日間の演習ワークショップは、どれも同じくらい簡単だった（難しかった）」と感じていた [表 12]。また、「演習ワークショップを終えて、より深く学びたい点」でも、「タイトルや壁紙の作り方」を除けば (ix)、大きな違いは見られなかった [図 12]。
- 受講者の総合評価は5段階評価で平均4.89を記録し [表 14]、継続意欲についても9人中8人が好意的だった [表 15]。

8. 結論

以上のように本研究では、ノベルゲーム制作の学習理解のために、三幕構成を援用したノベルゲームのモデルを設定した。その上で、本モデルの有効性を検証するために、本モデルを用いた演習ワークショップを行った。その結果、受講者に適切な難易度の課題を提供できたことがわかった。これにより、本モデルの有効性が示された。ただし、本調査のサンプル数は10名であり、有効性の証明には限界がある。今後は本研究を予備調査として、本調査を行うことが求められる。

9. 考察と展望

本研究ではモデルとなるサンプルシナリオの有効性検証を目的としたため、受講者個人の読書経験・ビデオゲーム経験と、演習ワークショップの各段階におけるアンケートとの紐付けは行わなかった。一方で日常的に小説を読む習慣に乏しい受講者から、メインプロットの作成に困難を感じたという声も聞かれた。今後は受講者個人の読書経験・ビデオゲーム経験とワークショップの有効性を関連付けた検証が課題となる。

また、ICTリテラシーが低く、創作経験に乏しい受講者でも、本モデルが有効に機能するか検証が必要である。

最後に本演習を通して得た新たな気づきについて補足する。小野 (2022) は「学習者がベースとなるストーリーをもとに、分岐型ストーリーへと再構築していく」演習が、日本におけるゲーム・リテラシー教育の補完につながると論じている。もっとも、そのためにはベースとなるストーリーを読み込み、内容を構造的に理解する必要がある。これは学習者に「深い読み」を促すことを意味している。

一方で国語教育における「読む力」の学習に関連して齋田・町 (2022) は「叙述を基に内容を捉えた上で、中心人物の変容とその因果関係を示す一文で物語を表して主題を捉え、その主題を基に物語に対する考えを持つ」学習モデルを提唱している。ここで示される主題の捉え方は、Weiland (2016) が提唱する「キャラクターアークから物語を創造する」手法と対をなしている。Weilandは脚本家の立場から、齋田・町は教育者の立場から、中心人物の変容とその因果関係の整理に着目しているのである。

またサブプロットの作成は学習者の「多様な読み」を促す効果があると考えられる。例として本演習で用いた『走れメロス』では、メロスだけでなく、メロスと約束をした王もまた、ラストで精神的な成長を遂げている。そこで受講者に王を主人公としたアナザーストーリーを創作させ、そこからノベルゲームに発展させていくことも可能だろう。

このように本研究を通して、ノベルゲーム制作にゲーム・リテラシー教育の補完に留まらず、国語教育の補完にもつながる可能性をも示唆している。本分野におけるさらなる可能性について考察を深めていきたい。

謝辞

ワークショップ開催の機会提示と調査研究の実施にご快諾いただいたうえ、演習ワークショップ運営に多大なご協力を頂いた e- とぴあかがわの馬場道浩氏に深く御礼を申し上げます。

注釈

- (i) ノベルゲームにはサウンドノベル、ビジュアルノベルなど、さまざまな呼称がある。本稿ではノベルゲームに統一した。
- (ii) Weiland (2016) はキャラクターアークを「ポジティブ」「フラット」「ネガティブ」の三種類に分類している。これによると、『走れメロス』におけるメロスの精神的な成長はポジティブなアークに分類される。王との約束を守って走り、処刑されることで、王に信実の存在を示すという利己的・具体的な動機から、親友との約束を守るために走るという他己的・抽象的な動機に、物語中で昇華されているからである。
- (iii) サンプルゲームの URL を下記に記す。 <https://takamatsu-ws-sample-0326-2.netlify.app/>
- (iv) ティラノビルダーではノベルゲームを制作する際、「アドベンチャー形式」と「サウンドノベル形式」を選択できる。両者の違いはゲーム画面のデザインで、前者は背景・キャラクター・メッセージウインドウが重ね合わせて表示される。後者は背景にシナリオが小説風に表示される。本稿ではツールのメニュー表記に従った。
- (v) 同様の手順で制作された作品に TV アニメ『宇宙戦艦ヤマト』がある。豊田 (2017) によると本作のストーリーは、中国の古典小説『西遊記』をベースとしている。
- (vi) ティラノビルダーはノベルゲーム開発エンジンで、ティラノスクリプトはティラノビルダーの中核部分である。ティラノビルダー上でティラノスクリプトを記述することで、より高度で複雑な表現ができる。
- (vii) 演習ワークショップで公開された作品の URL を下記に記す。
 1. <https://01-kuro-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 2. <https://04-morikage-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 3. <https://07-alan-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 4. <https://08-osabe-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 5. <https://09-nomiyama-takamatsu-ws-2022mar-2.netlify.app/>
 6. <https://13-sugiyama-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 7. <https://14-ie-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 8. <https://15-lyn-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>
 9. <https://06-konata-takamatsu-ws-2022mar.netlify.app/>

- (viii) 小説のジャンルは Wikipedia の「小説」項目などを参考に 10 ジャンル、ビデオゲームのジャンルは『2022 CESA ゲーム白書』をもとに研究者で 16 ジャンルに絞り込んだ。
- (ix) 「タイトルや壁紙の作り方」の関心度が低かった理由として、ストーリー制作やプログラミングに関心を示す受講者が多かったことが上げられる。
- (x) 本研究では量的研究を試みたが、サンプル数が 10 件に留まった。次回も受講者数が同程度であれば、インタビューを中心とした質的研究も検討したい。

参考文献

- [1] Pong, ATARI, 1972 (業務用).
- [2] Colossal Cave Adventure, William Crowther, Don Woods, 1976-1977 (PDP-10).
- [3] Jesper Juul, “Half-Real: Video Games Between Real Rules and Fictional Worlds”, MIT Press, 2005. (イェスパー・ユール, 『ハーフリアル—虚実の間のビデオゲーム—』, 松永伸司 (翻訳), ニューゲームオーダーズ, 2016).
- [4] Richard E. Ferdig, Emily Baumgartner, Enrico Gandolfi (editor), “Teaching the Game, Vols. 1&2”, ETC Press, 2021.
- [5] 『Twine』, The Interactive Fiction Technology Foundation (PC) < <https://twinery.org/> > (参照 2022-12-29).
- [6] 小野憲史, 「デジタルツールと三幕構成を用いたデジタルゲームブックの執筆演習に関する実践報告」, 『東京国際工科専門職大学 紀要』, Vol.1, No.1, pp.86-99, 2022 年 3 月 .
- [7] Vladimir IAKovlevich Propp, “Morphology of the Folktale”, 1928 (ウラジミール・ヤ . プロップ, 北岡誠司, 福田美智代 (翻訳), 『昔話の形態学』, 白馬書房, 1983).
- [8] Joseph Campbell, “The Hero with a Thousand Faces”, Pantheon Books, 1949. (ジョーゼフ・キャンベル (著者), 倉田真木, 斎藤静代, 関根光宏 (翻訳) 『新訳版 千の顔を持つ英雄』, 早川書房, 2015).
- [9] Syd Field, “Screenplay: The Foundations of Screenwriting”, Dell Publishing Company, 1979. (安藤紘平, 加藤正人, 小林美也子 (翻訳) ほか, 『映画を書くためにあなたがしなくてはならないこと シド・フィールドの脚本術』, フィルムアート社, 2009).
- [10] 『ティラノビルダー』, STRIKEWORKS, 2015. (PC) < <https://b.tyrano.jp/> > (参照 2022-12-29).
- [11] e- とびあ・かがわ 春の文化祭 2022, < https://www.e-topia-kagawa.jp/lecture/spring_online_fes_2022/ > (参照 2022-11-12).
- [12] Josiah Lebowitz, Chris Klug, “Interactive Storytelling for Video Games: A Player-Centered Approach to Creating Memorable Characters and Stories”, Routledge, 2011. (塩川洋介 (監修), 佐藤理絵子 (翻訳), 『おもしろいゲームシナリオの作り方 41 の人気ゲームに学ぶ企画構成テクニック』, オライリー・ジャパン, 2014).
- [13] 齋田裕子・町岳, 「物語を著した一文から主題を捉えて考えを持つ学習モデルの効果—小学校国語科の文学的文章の読みを深めるために—」, 『日本教育工学会 2022 年秋季大会 講演論文集』, pp.171-172, 2022 年 9 月 .
- [14] K.M. Weiland, “Creating Character Arcs: The Masterful Author's Guide to Uniting Story Structure”, PenForASword; Annotated edition, 2016. (K.M. ワイランド (著者), シカ・マッケンジー (翻訳), 『キャラクターからつくる物語創作再入門「キャラクターアーク」で読者の心をつかむ』, フィルムアート社, 2019).
- [15] 豊田有恒, 『「宇宙戦艦ヤマト」の真実』, 祥伝社新書, 2017.
- [16] 「小説」, Wikipedia, < <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E8%AA%AC> > (参照 2022-12-29)

[17] 社団法人コンピュータエンターテインメント協会（編）, 『2022 CESA ゲーム白書』, 2011

小野憲史 東京国際工科専門職大学 工科学部 デジタルエンターテインメント学科 講師

【研究ノート】

能面師とのコラボレーション による映像制作の試み

鈴木雅実

Trial of video production in collaboration with a Noh mask artist

Masami Suzuki

Abstract : The author has long been interested in liberal arts education at universities, and has recently been conducting preliminary research to explore the possibilities in creating expressions that stimulate the human imagination, with a particular interest in the relationship between AI and media art. To this end, the project emphasizes interdisciplinary exploration through opportunities to interact with outside experts, especially those involved in the arts. As a part of this research, we collaborated with a Noh mask artist to create a prototype video work that expresses the appeal of Noh masks in a different way than before.

Keywords : artificial intelligence, liberal-arts education, Noh-mask

1. まえがき

筆者は予てより大学におけるリベラルアーツ教育に関心を持ち続けており、最近ではAIとメディアアートの関係にも興味を抱きつつ、人間の想像力を刺激するような表現を創作することにおいても可能性を追求するための予備調査を行っている [1]。このため、外部の有識者、特に芸術関係者と交流する機会を通じた学際的な探求を重視するものである。その一環として、今回は日本の伝統芸能である能楽に使用される能面の制作者（能面師）と協働して、能面の魅力を従来とは異なる形で表現する映像作品の試作を行ったので、その経緯を記すとともに今後の展望を考察することとする。

2. 能面師とのコラボレーション

本学で2021年度後期よりスタートしたIPUTゼミナールでは、授業外で学生の知的好奇心を増大させるような取り組みが有志の教員により実施されており、情報工学科の教員である筆者は英語担当の専任教員とともに「リベラルアーツ研究会」を主宰し、学科不問の希望学生を募って活動を継続している。この研究会では外部の様々な異分野の専門家／有識者との交流も行っており、その一環でシナリオライターを本職としながら5年ほど前

から能面制作に携わる麻生りり子氏と知遇を得たことから、自作の能面を持参して来校頂き、能面の特徴や関連事項などを紹介頂く機会を設けた。そのようなゼミ学生との懇談を通じて、麻生氏より次章で述べる映像制作の依頼を頂くに至った。それは、2022年11月15日から1週間の日程で東京都内の美術画廊にて開催の「中村光江と四人の弟子」展[2]で、出展者の一人である麻生氏の展示コーナーで能面とともに iPad 端末に表示する短い映像の作成である。そのコンセプトはおよそ以下の通りで、時間経過のベクトルという「エントロピーの増大」と、能楽という日本の伝統文化の数百年に渡る歴史を経て能面が内包するに至った「諸行無常」に焦点を当てた、一種のメディアアートと位置づけられる。

映像表現を全体の一部とする一種の能面インスタレーションとして

(0) 中心に据えられるのは若い女性の能面である。そこから3方向に矢印線が伸び、中心の若い女の面との各々の関係性を示す能面2点と映像表現1点が配置される。矢印は時間の経過のベクトル、即ちエントロピーの増大を表す。

(1) 第1の矢印線の先には、中心の若い女が年老いた「老女」の面が提示される。

(2) 第2の矢印線の先に提示されるのは中心の若い女面と同一の種類に傷がついたり染みが生じた加工を施した、即ち一つの面が時間の経過とともに経年劣化した様を表した能面である。

(3) 第3の矢印線の先に配置されるのが、今回のコラボレーションを通じて制作協力した iPad 端末上に表示するイメージとして構築された能面の映像である（意図は次章に記述）。

これらの関係を総合した展示概要を図1に掲げる。

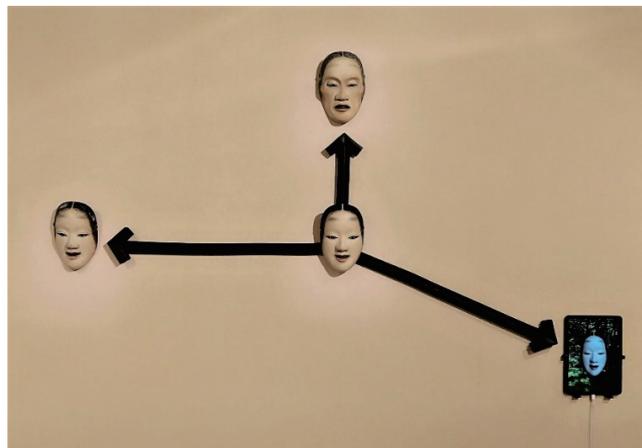


図1 能面展におけるインスタレーションの構成

3. 能面展における公開のための映像制作

前節で述べたようなゼミ学生との意見交換を経て、能面師の麻生りり子氏から依頼を受けた映像表現に求められたコンセプトは、「テクノロジーの進化によってイメージとして構築された能面」の表現と「人類のテクノロジーにより不変を手に入れるためのエントロピーの増大への挑戦と諸行無常の諸相」であった。それに対して映像制作側（著者と協力

学生)からの提案をすり合わせる形で試行を重ねることにより次に示すような内容が盛り込まれた最終版の作成を目指した。

- 能面そのもの(物質)の経年劣化
- 能面で表現される人物像の時間変化による老化(若い女から老女へ)
これらは、実際に展示される能面によっても提示される。
- 映像による時間推移の表現
これについては、若い女面と老女面の静止画像からのモーフィングとして実現時間の経過を背景映像の四季(春夏秋冬)の移ろいで表現
- 輪廻再生とテクノロジーの進化による時間を超越した永遠性の表現(前半)
四季の移ろいととも若い女から老女に変化(モーフィング)する能面について、再び若い女に回帰させることを意図した。背景映像としては著作権フリーの映像素材を利用する(春:桜の開花/夏:緑濃い林/秋:散り行く紅葉/冬:雪景色)。さらに、映像に合わせて春~夏ではせせらぎの音、秋~冬では強い風の効果音を採用している。また、自然の四季の歩みに合わせて冬から春に変化させる案も検討したが、この映像では冬の雪景色が静止した後に、時間逆行的に冬/秋/夏/春と戻り行く表現としている。これはデジタル技術により時間の進行を操作できることの例示でもある。秋から冬の背景で老女の姿になった能面は再び若い女として蘇る輪廻再生をも含意した。
- デジタル空間におけるイメージとなった能面の時空を超越した永遠性の表現(後半)
モーフィングにより若い女~老女~若い女への回帰を表現した前半に対し、後半は一転して星雲が全面に広がる宇宙的な背景に遠くから若い女の能面画像が接近して来る映像から開始する。その若い女の面はゆっくりと360度回転した後に前半と同様にモーフィングにより老女へと変化する。この間のBGMとしてモーリス・ラヴェル作曲の「亡き王女のためのパヴァーヌ」を挿入することとした。次に、老女となった能面は一瞬のうちに粉碎し、細かく飛び散った破片が宇宙空間に漂うが、その後徐々に集結して再び能面画像が形成される。その時は若い女の容貌となって出現する。この後半では、イメージとして構築された能面がデジタル技術により言わば時空間を超越する存在として立ち現れる可能性を示唆するものである。前半と後半を合わせた経過時間は3分弱である。
- デジタル表現としてのエンディング
今回の制作内容は上記のような四季の変化編および宇宙編の2つの部分から成るメディアアートの映像表現で、あたかも永遠を手に入れたかのようなようであるが、突然画面全体がハレーションを起こし一転暗黒の世界というエンディングを迎える。これは、人類、地球、あるいは宇宙が存続しなければイメージの能面も存続しえず、永続性そのものが担保されない、つまりは、すべてがエントロピーの増大の法則の中にあり、諸行無常の刹那の出来事に過ぎない、という表現で帰結する。実際の映像ではその後再び四季を背景とする前半最初の場面に立ち戻り、無限にループするようなインスタレーション展示

の部分構成する。

4. まとめ

能を主題とする芸術作品は古今様々な事例が存在するが、能面を用いた現代アート作品の試みはおそらく未だ類を見ないと思われる。伝統文化の流れを汲みつつ能面を制作する能面師としての立脚点に加えて、情報技術を組み合わせることにより、これまで文化論として語られて来た「諸行無常」の概念に、一つの新しい形を与える意思を今回のコラボレーションを通じて感じ取ることができた。その期待に情報技術を活用した映像制作で何処まで応えることが可能となったかについての評価は困難であるが、異分野の交流を通じて新しい価値の創造を目指す知的な営みを継続することに意義があるものと考え。なお、本稿の制作映像を含むインスタレーションを最初に発表した能面展[2]での提示に近い形で、情報学分野における学術集会の場（インタラクシオン 2023）でポスター発表として再現するとともに考察を加え、来場者の関心を集めることができ有意義な機会となった[3]。

謝辞

本稿で紹介したコラボレーションの機会を提供頂き、能面師としての力量とともに優れた感性と情報技術全般への理解と洞察を示された麻生りり子様に厚くお礼申し上げます。また、今回の映像制作においては実際の作業を実行可能なスキルを持つ学生の協力が不可欠であり、その期待に応えてくれた本学情報工学科の柳谷諒太君に謝意を表します。

参考文献

- [1] 鈴木雅実：「オンライン授業の課題設定事例 ―比較文化論の場合―」，東京国際工科専門職大学紀要 Vol.1, 2022.05.
- [2] 麻生りり子：「一能面師という道を選んだ者たち― 能面展『中村光江と四人の弟子展』開催。」，note 2022.10.23, https://note.com/lilico_aso/n/n554c2a04df4b
- [3] 鈴木雅実・麻生りり子：「能面の魅力を新たな形で提示するメディアアートの試み」，インタラクシオン 2023, 情報処理学会, 2023.03.

鈴木雅実 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授

【研究ノート】

CO2 モニタリングに基づく 感染リスク認識支援システムの 構築と運用

爰川知宏・武本充治

Building and Operation of Risk Awareness Support System based on CO2 Monitoring

Tomohiro Kokogawa and Michiharu Takemoto

Abstract : As part of efforts to realize a "Resilient Campus" where the professional university can flexibly respond to various threats, a system for situation awareness of COVID-19 infection risk has been established. CO2 sensors have been installed in major classrooms at the university to create a centralized monitoring environment for the entire university, and the system is now in operation. This paper reports on the series of activities.

Keywords : resilience, situation awareness, risk awareness, co2

1. はじめに

COVID-19 の蔓延は長期化し、社会活動に様々な影響を与えている。学校教育においては、オンライン教育、ハイブリッド教育に関する知見・ノウハウの蓄積により、多様な学習形態への適応という効果も生み出されたものの、対面授業においては相変わらず感染リスクとの隣り合わせで制約の多い状況が続いている。

本学が属する専門職大学を対象とし、専門職大学自身が様々な脅威に対してもしなやかに対応できる環境（ICT システムおよびマネジメント）を構築し、それに基づく授業スケジュールリングや緊急時対応を行うことで、サステイナブルかつ効果的な人材教育をめざした概念を Resilient Campus と名付け、全体の状況認識を行える ICT プラットフォーム（Resilient Campus Platform）を構築する試みを進めてきた [1]。その取り組みの一つとして、COVID-19 感染リスクの状況認識を目指して主要な教室、会議室に二酸化炭素（CO2）センサを取り付け、全学的に集中モニタリングできる環境を構築し、運用を進めている。本稿ではその一連の活動について報告する。

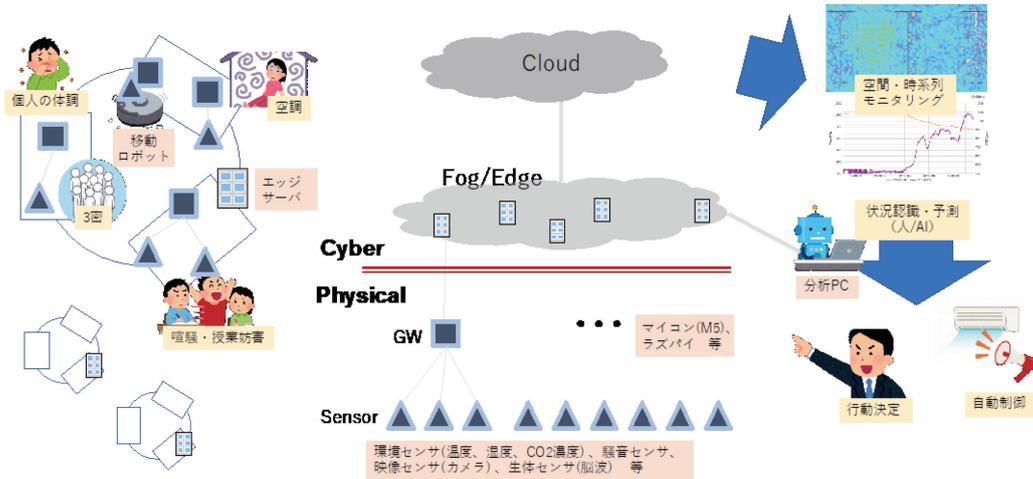


図1 Resilience Campus Platform の構想概要 ([1]より引用)

2. 課題設定

これまでではCO₂濃度と換気の関係性を明らかにするとともに、CO₂測定ノードの試作およびイベント(試験等)での活用、簡易な可視化方法について検討してきた[1]。その上で、実際のイベント(入学試験、定期試験)にCO₂測定ノードを持ち込んで感染リスクの可視化効果を確認した[2][3]。こうした仕組みを全学的に展開し、常設のサービスとして運用することを検討する上での課題として以下が挙げられる。

(1) キャンパスが高層複合ビル内にあること

本学キャンパスは50階建ての高層ビル内にあり、かつ同じビル内に複数の教育機関(専門学校、大学)が混在している。ビル内の監視や空調管理は防災センターが一元的に行っており、状態確認や設定変更は入居する各教育機関が個別に調整する必要がある。そのため、個々の授業においては、担当教員がその場で状況を確認できることはもちろんのこと、防災センターとの調整は、教員がバラバラに連絡を入れるのではなく、機関(大学)として総合的に行える必要があり、そのためには他の教室も含めた全体状況を容易に把握できる必要がある。

(2) 小規模な教室が数多くあること

専門職大学の特性として、1クラス40人以下での授業が基本となっている。そのため、人数規模に対して多くの教室を使用する必要性が生じている。本学は1学年あたりの学生数が200名程度の小規模な大学ではあるが、40人単位の授業が基本となっていることもあり、主たる教室だけでも大小合わせて20箇所以上にわたる。さらにはそれらが複数のフロアに分散している。監視対象が多くなることで、センサノード等の設置コストや、それらを常設運用する際の運用・メンテナンスに関する稼働・コストの増大が懸念される。

上記課題を踏まえて、本検討においては以下を目指してシステム構築と運用を行うこととした。

(1) 使用する教室のほぼ全てにセンサノードを安価かつ低メンテナンスコストで設置する

(2) 個々の教室での状況確認と全体俯瞰を両立させる

3. センサノード

制御用ノードは M5StickC Plus を用いた。これはマイコンチップに ESP32 を用いた安価な開発用ボードであり、小型の液晶画面（LCD）と Wi-Fi 通信機能を持つ。LCD を介して教室にいる教員や学生がその場で現在状況を確認できるとともに、Wi-Fi を介して外部のサーバにデータを送信することができる。また、複数のボタンが備えられており、簡易なセルフメンテナンスの機能を持たせることができる。

センサデバイスは比較的容易に入手でき、開発ライブラリが充実したものを比較検討した結果、SCD30 を採用した。同じ NDIR（非分散型赤外線）方式を採用し、より安価な MH-Z19C も候補であったが、校正機能が使いづらいことと、電源条件が厳しく動作が不安定になりがちであったため、採用を見送った。

なお、運用開始後に SCD30 よりも安価な SCD40 が流通し始めた。SCD40 は NDIR ではなく、光音響センシング方式を採用しているが、教室内の測定レベルでは精度的には問題はなく、運用性も SCD30 と同等であることが確認できたため、今後のノード追加に際しては SCD40 に順次切り替える予定である。

表 1 CO2 センサデバイスの比較

	SCD30	SCD40	MH-Z19C
製造元	Sensirion	Sensirion	Winsen
実売価格	9,000 円程度	7,000 円程度	2,500 円程度
方式	NDIR	光音響センシング	NDIR
測定範囲	400 - 10,000ppm	400 - 2,000ppm	400 - 5,000ppm
測定対象	CO2/ 温度 / 湿度	CO2/ 温度 / 湿度	CO2/ 内部温度
通信方式	I2C	I2C	UART
動作電圧	2.4-5.5V	2.4-5.5V	5V ± 0.1V
手動校正	任意設定可	任意設定可	400ppm のみ

センサの設置場所については、視認性が高く、電源確保が容易な場所として、教室入口のドア付近を基本とした（図 2 左）。高層ビル内の教室であり、廊下も含めて閉鎖的な空間であることから、ドアの開閉による CO2 濃度の増減はあまり大きくないと考えられる。

データの測定は 5 秒おきに行い、その結果を M5StickC の LCD に数値で表示することとした。SCD30（および SCD40）は温度、湿度も同時に測定できることから、その値も合わせて表示している。また、値に応じて文字色を変えることで視認性を上げている。

初期の研究 [1] でも示した通り、換気の可視化という観点では、CO2 濃度の現在値よりも増減の方が重要な情報である。そのため、CO2 濃度の増減をグラフとして表示することとした。具体的には、LCD ライブラリのスプライト機能を活用し、測定した CO2 濃度

をグラフの縦軸に変換して右端にプロットし、次の更新周期に1ドット左に画面をシフトさせることでグラフ描画を実現している。M5StickC PlusのLCDは135×240ドットであり、横向きにして半分の幅(120ドット分)をグラフ用スプライトとして確保することで、更新周期を30秒で計1時間分の増減をLCD上にグラフ表示できる。

また、センサノードの個体識別のために、制御ノードのチップ(ESP32)が内蔵するWi-FiモジュールのMACアドレスから下位2バイト(16進数4桁)を取り出して個体識別番号とし、画面上部に常時表示することとした。この表示はWi-Fiの接続状況の確認も兼ねており、Wi-Fi接続時は白文字、Wi-Fiが切れている時は赤文字で表示されている。全体の表示画面を図2右に示す。



図2 センサノードの外観

4. データ収集

無料もしくは安価なデータ収集環境を目指し、IoTクラウドサービスである Ambient[4]を利用する。このサービスはAPIが充実しており、センサからのデータを送信するだけで簡単に時系列グラフ化などができる特徴があるが、1契約あたりのチャンネル数(8個)、1チャンネルあたりのデータ項目(8個)、1日当たりの送信数(3,000回)、送信インターバル(5秒以上)と制約が大きく、スケーラブルな運用は困難である。一方で学内LAN環境にオンプレミスに収集サーバを構築するとこれらの制約はなくなるものの、セキュリティ的な制約から、(学外やスマホ等からの)インターネットを介した状況確認はできなくなる。学内収集サーバはまだ実験段階で運用の中断や仕様変更の可能性が大きい一方で、継続的な運用による学内モニタリングを行う観点から、現段階においては一方に集約することはせず、センサノードから Ambient と学内収集サーバの双方へ独立にデータを送信する仕様とした。

4.1 学内収集サーバへの送信

学内に構築した収集サーバに対して、MQTT で測定データの全てを 30 秒間隔で送信する仕様とした。最低限の要件は、CO2 データが送信できることと、送信元センサノードの個体識別ができることであるが、送信データの種類の柔軟性を持たせるために JSON 形式でデータを送信することとした。データ形式の例を以下に示す。

```
{'sensor': 'ABCD', 'temperature': 20.5, 'humidity': 35.4, 'co2': 567, 'loudness': 1230, 'move': false }
```

上記において、sensor はセンサノードの個体識別番号を示している。temperature、humidity、co2 はそれぞれ CO2 センサ (SCD30) から取得した温度、湿度、CO2 濃度を示している。loudness、move は制御ノード (M5StickC Plus) の内蔵センサから取得したデータであり、loudness は内蔵マイクで拾った音量、move は加速度センサが検知した動きの有無を、CO2 センサからのデータと合わせて送信している。このように CO2 濃度以外の情報も送信データに任意に追加することができるため、センサノード毎に異なる種類のデータを送信させたり、収集サーバ側でも必要な種類のデータを取捨選択して処理を行ったり、といった柔軟な機能追加や運用が可能となる。

4.2 Ambient への送信

クラウドサービス (Ambient) の制約条件の下で多ノードの運用を行うため、以下の方針で対応した。

- (1) CO2 濃度の処理に特化し、他のデータ (温度、湿度など) の収集は行わない
- (2) 1つのチャンネルにできるだけ多くのセンサノードを収容する
- (3) 増減把握の観点から、送信間隔をなるべく短くする

1チャンネルあたりのデータ項目数が8個なので、最大で8台のセンサノードを収容可能である。一方で送信データ数が1日あたり3,000回という制約がある。授業や業務を行っていない夜間は測定の必要性が低いことから、夜間のデータ送信を停止してその分を昼間のデータ送信に回すことで送信間隔を短くした。運用上のバランスから最終的には

- ・データ送信時間を朝7時から夜23時まで(16時間)に限定する
- ・1チャンネルあたりの収容数を6ノードとする

ことで、各ノード2分間隔でデータ送信できるようにした。本稿執筆時点ではチャンネルを3個使用し、計18ノードを運用している。

各センサノードからのデータは独立に Ambient に送信されるが、同じチャンネル内でのデータ送信間隔は5秒以上空ける必要がある。同じチャンネルに収容されたノード同士でデータ送信時刻の近接を避けるために、送信タイミングを意図的にずらすこととした。具体的には、制御ノード (M5StickC Plus) に内蔵された RTC (リアルタイムクロック) を活用して全てのノードを NTP により時刻同期を行った上で、RTC 上の指定された時刻 (例えば偶数分の毎0秒) ごとにデータを送信するようにした。6ノードが各2分間隔でデータ送信することから、ノード間の送信指定時刻を20秒ずつずらして指定した。

4.3 学内収集サーバ

4.1 の通り、センサノードからは独立に MQTT でデータが送信されるので、学内収集サーバには MQTT ブローカおよびデータを格納するデータベースが必要となる。

MQTT ブローカには Mosquitto を使い、センサノードから MQTT 送信されたデータを受け付ける。データを格納するデータベースとしては、断続的に送付されてくるデータを時系列で高速に蓄積・処理する必要性から、通常のリレーショナルデータベースではなく、時系列データベースとして代表的な InfluxDB を用いることとした。Mosquitto で受信したデータを InfluxDB に格納する処理は Telegraf をプラグインとして用いた。さらには、InfluxDB に格納されたデータの可視化プログラムとして Grafana を導入することとした。以上の環境を docker 上に構築し、Ubuntu Linux をインストールした小型 PC 上に構築した。学内収集サーバのアーキテクチャを図 3 に示す。

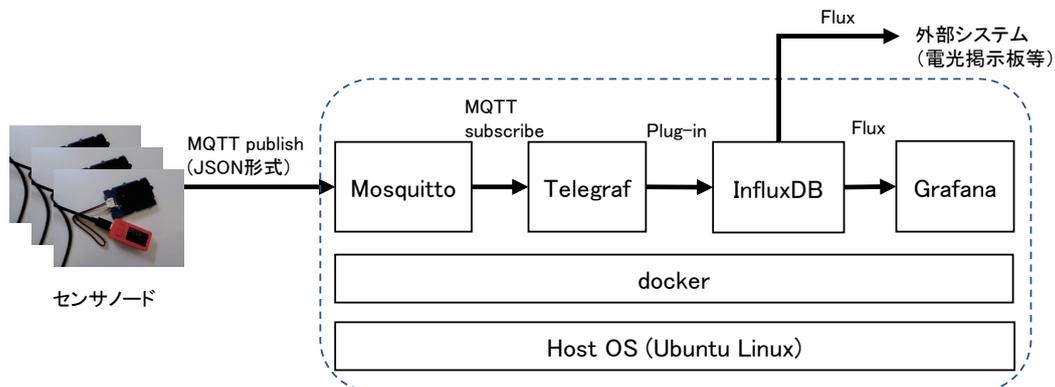


図 3 学内収集サーバのアーキテクチャ

5. 可視化環境

5.1 Ambient による可視化

グラフ表示は折れ線グラフではなく棒グラフとした。Ambient のグラフ機能では縦軸のスケールを動的に変更することができないため、CO₂ 濃度がグラフの上限を超えた場合には折れ線グラフでは表示が切れてしまい、濃度が高いのかデータ受信に失敗したのかが判別しづらくなる。表示を棒グラフにすることで、その時刻でのデータの有無が一目で視認できるとともに、実際の CO₂ 濃度がわからないまでも、グラフの最大値を超える高い濃度、すなわち何らかのアクションが必要な状態であることは即座に把握できる (図 4)。

Ambient のグラフは公開設定にすることで、URL を知るすべての教員・学生が、学内・学外環境問わずインターネット接続できる環境にいれば閲覧できる。但し、1 つの画面に表示可能なデータ数の制約のため、運用中の全てのノード (18 ノード) を把握するには 3 つの画面 (URL) を開く必要がある。

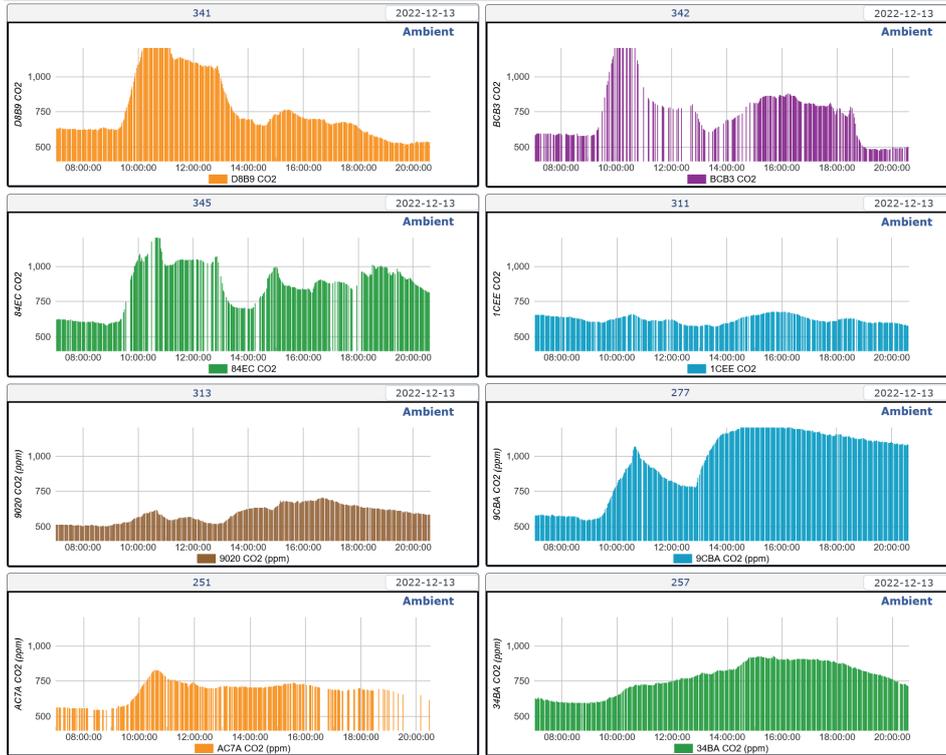


図4 Ambient による可視化

5.2 Grafana による可視化

校内収集サーバに関しては Grafana の機能を使うことで、Ambient よりも柔軟な画面表示が可能である。例えば縦軸のスケールを測定値に応じて動的に変更することもできる。視認性を高めるために、フロア範囲ごとに束ねた形で全てのノードのデータを1つの画面に収まるように設定した。さらに CO2 濃度の範囲ごとに背景色を変更することで、各グラフの縦軸のスケールが異なった場合でも相互に状況比較が行いやすくなる (図5)。



図5 Grafana による可視化

Grafana で作成したグラフについても、匿名での閲覧を許可する設定にしておくことで、公開設定の Ambient 同様に URL を知る教員・学生は閲覧することができる。但しアクセスできるのは同一 LAN 内に端末を接続している時に限られる。

5.3 電光掲示板による可視化

より能動的な情報発信のため、測定データを表示するための電光掲示板を設置した。表示部は汎用品の LED MATRIX パネル（1枚あたり 32 × 64 ドット）を、制御部は Raspberry Pi4 を用いて構築し、処理は以下の通りとした。

- ① 収集サーバ上の InfluxDB から直近 30 秒以内のデータを取得
- ② センサの個体識別番号を設置先の教室名に置き換え
- ③ 教室名と CO2 濃度測定結果をペアにした表示用画像データを生成
- ④ 上記画像データを教室数分横につなげ、ファイルとして保存
- ⑤ 保存した画像ファイルを読み込み、LED MATRIX 上で横スクロール表示
- ⑥ 2分おきに表示を停止し、①に戻る

制御ノード同様に、CO2 濃度に応じて表示文字色を変更するとともに、前回（2分前に）取得したデータと比較して一定量以上の増減があった場合は、CO2 濃度の後ろに上下矢印も追加表示することで、換気の状態を把握しやすくしている（図 6）。



図 6 LED MATRIX 電光掲示板による表示

6. 運用を通じて見えてきた課題

以上の環境を構築し、9ヶ月程度に渡って学内運用を行ってきた。その過程で運用上の課題やノウハウが幾つか見えてきたので、その内容を示す。

6.1 CO2 センサの校正

単一の部屋での CO2 濃度の増減をみるだけであればそれほど重要ではないが、複数の

部屋の状況を俯瞰的に把握するためには、校正（キャリブレーション）によりある程度値を揃えておく必要がある。購入直後の CO2 センサは状態にばらつきがあるため、最初に校正を行う必要がある。屋外の新鮮な空気の環境に長時間設置し、その時の値を基準値（通常は 400ppm）として設定するのが一般的な方法であるが、都市部（新宿駅前）にある高層ビル内のキャンパスにおいて、そうした環境を用意すること自体困難である。

また、CO2 センサの多くは、1 日の間で最も濃度が低くなった時の値を基準値に校正する自動校正機能を有する。しかしこの機能は、夜間など人がいない時間帯に十分に換気されて CO2 濃度が外気レベルまで下がる環境を前提としており、複数の組織が雑居する高層複合ビル内ではそうした運用は保証されない。

加えて、電源の ON/OFF やノイズに起因して校正状態が保持できない場合があり、電源を入れ直ただけで測定値が 100ppm 以上ずれるケースも生じた。そのため、導入前のみならず、必要なタイミングで強制的に校正を行える仕組みが必要になる。

以上を踏まえて、校正は以下の方針で対応することとした。

- ・ 自動校正機能は OFF にする。
- ・ 連休等でビル内の CO2 濃度が最も低くなった際の値を基準値と考える。但し 400ppm ではなく、450ppm に設定する。この値は新宿区の路上での平均 CO2 濃度に相当する。
- ・ 校正が上方にずれた場合は、本体のボタン操作により、即時校正コマンドが実行されるようにする。実際には操作者の呼吸等が影響することを考慮し、ボタン操作後 30 分経過してから実行されるようにしている。夜間帰宅前の操作を想定している。
- ・ 上記強制的な校正操作により校正が下方にずれた場合は、基準値（450ppm）以下の測定値が一定期間（実際の設定は 30 分）継続すれば校正コマンドを自動実施する。これにより、ある程度の期間の運用によりビル内の CO2 濃度が最低レベルに下がる機会に遭遇することで、本来の基準値に近い状態に自然と収斂していく。

6.2 Ambient 送信時の時刻合わせ

Ambient の制約（5 秒以上の送信間隔をあける必要）を回避するために、NTP と RTC を用いた送信タイミングの制御を行っているが、RTC の精度があまり高くないのと、ノイズ等に起因して時刻が突然大きくずれることもあり、思った通りのタイミングでデータが送信されないケースが度々発生した。

当初は Wi-Fi 接続時のみに NTP で時刻合わせをしていたが、NTP での時刻合わせの 1 日 1 回に増やし、さらにボタン操作による手動時刻合わせの機能も追加した。

6.3 Wi-Fi 混雑による通信途絶

一部のフロアでは授業が集中する時間帯に通信が度々途絶し、2 時間以上もデータが届かないケースも発生した。Wi-Fi を使用する学生が多く通信が混雑したためと考えられる。再接続処理の頻度を上げる対策を行っているが、再接続処理中はセンサデータの取得が中断するため処理時間をあまり割けないことと、PC に比べてアンテナサイズ的にも電波感度が弱い問題もあって、あまり効果は出ていないのが現状である。

6.4 InfluxDB の処理負荷

学内収集サーバの運用においては、InfluxDB の負荷が非常に大きいことがわかった。最初はサーバを Raspberry Pi4 を用いて構築したが、処理負荷が耐えられなくなったため、ミニ PC (CPU : Celeron J4125、RAM : 12GB、SSD : 240GB) で構築し直した。9 ヶ月程度運用した状況で、SSD に保存されたデータサイズが 1GB 程度、RAM 使用量が 6GB 程度、CPU 負荷も 20-50% 程度で推移している。SSD のストレージサイズ的には大きな問題はないものの、オンメモリでの処理負荷が非常に大きいことから、一定期間経った古いデータを退避 (あるいはエクスポート) ・削除するような運用が必要と思われる。

7. おわりに

本稿では、不確実な脅威に対して持続可能な教育環境の提供する ICT プラットフォーム「Resilience Campus Platform」の実現形態の一つとして、CO2 濃度のモニタリングに基づいた COVID-19 感染リスクに関する状況認識支援システムを学内に構築し、運用を行ってきた。その結果、センサデバイスや制御ノード等の技術情報だけでは見えない運用上の課題がいくつか明らかになった。今後システムをさらに拡張するうえでこうした課題、ノウハウを整理していくとともに、測定したデータのより効果的な活用方法についても検討していく。

参考文献

- [1] 爰川知宏ほか、持続可能な教育環境の構築に向けて～ Resilient Campus Platform ～、東京国際工科専門職大学紀要、Vol. 1、2022.
- [2] 爰川知宏、CO2 濃度の可視化に基づく安心・安全な対面学習／試験環境提供の試み、情報処理学会研究報告、Vol. 2021-GN-114、No.6、May、2021.
- [3] T. Kokogawa, Trial of Building a Resilient Face-to-Face Classroom based on CO2-based Risk Awareness, The 6th IFIP WG5.15 Conference ITDRR 2021, Morioka, Iwate, Japan, October, 2021. IFIP AIST, vol 638. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04170-9_7
- [4] <https://ambidata.io/>

爰川知宏 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授
武本充治 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授

【研究ノート】

IoTサービスのためのデータストリーム 指向サービスプラットフォームと IoTサービスの思考実験

武本充治

Data Stream-Oriented Service Platform for IoT Services and a Thought Experiment on IoT Services -

Michiharu Takemoto

Abstract: To provide IoT services, a novel service platform based on IoT data's feature should be established. We focus on that IoT data are naturally streams. We have already proposed Data Stream-Oriented service Platform (DSOP) for IoT services. This technical report describes DSOP and its services. This technical report also describes the experimental environment of DSOP at International Professional University of Technology in Tokyo.

Keywords: IoT, Service Platform, Data Stream, Thought Experiment

1. はじめに

様々な分野でのデータの電子化が進み、新サービスによる社会の変革(デジタル・トランスフォーメーション(DX))が始まりつつある。現在の日本企業においてはDXに取り組む目的は生産性向上が約75%であり、海外企業が注目しているデータ分析・活用より多い[1]。今後はデータ分析・活用にも注目されていくと期待できる。

また、日本国内において様々なデバイスが無線・有線で収容するIoT向けのネットワークが構築されつつあり、IoTデバイスからのデータ(IoTデータ)を分析・活用するサービス(IoTサービス)の提供が始まっている。しかし、それらは個別のサービス提供にとどまり、複数のサービスが連携し、社会を変革する兆しはまだ見えない。

これは既存のITサービスにおけるITデータとIoTサービスにおけるIoTデータの違いを考慮していないことに起因していると考えられる。ハードウェア製造からサービスの提供まで1企業が行う形態から、多種多様な企業が連携してサービスを実現する形態へ移行するためにはサービスプラットフォームが必要である[2]が、IoTデータの特徴に注目したサービスプラットフォームは実現されていない。

我々は、IoTサービスにおけるデータの特徴に注目したサービスプラットフォームであるデータストリーム指向サービスプラットフォーム(Data Stream-Oriented service Platform

(DSOP)の研究を進めている。本稿では、この DSOP と DSOP が想定しているアプリケーション・サービス、及び、研究環境と研究計画について報告する。第2節では DSOP のアーキテクチャとサービス記述について述べる。第3節では DSOP が想定するアプリケーションとサービスについて述べる。第4節で東京国際工科専門職大学内にて構築しつつある研究環境について述べる。第5節で今後の研究の進め方について述べる。

2. Data Stream-Oriented service Platform (DSOP)

本節は IoT データの特徴について述べた後、その特徴を考慮したサービスプラットフォームについて述べる。

2.1 IoT データの特徴 (1: 利用判断)

IoT サービスに分類される特定空間のデータを活用したサービスは農場や工場などにおいては既に提供されている。農場においては温度・湿度などの環境データを、工場においては工作機械の状態などのデータも取得されている。データ取得後、蓄積・解析され、農場・工場の運営者や工作機械の管理者により管理され、様々な形態で利用されている。さらにはデータ取得後に新規のサービスが提案されることもある。データ取得後の利用にデータ取得者にとって制限のないデータを活用するサービスは実現されつつある。

しかし、利用するデータが「人間」に関する場合、本人によるデータの利用目的の承諾が必要とされている。「人間」に関するデータの多くは、撮影画像（個人特定）や健康状態（機微な情報）のように、その蓄積場所や解析場所、アクセス管理、そして利用方法などへの配慮が求められるデータである。このような配慮が必要なデータについての管理機構は、個別のサービスごとに実装するとデータの再活用が困難になるなどの問題が起きるため、サービスプラットフォームにて実現することが望ましい。

現状の IoT サービスプラットフォームは、1. センサでのデータ取得、2. データ通信、3. クラウド上でのデータ処理に分けられる [3]。つまり、現状では、利用目的によるデータ取得の可否判断はサービスプラットフォームの担当範囲外とされている。しかし、IoT サービスとして「人間」に関するデータを利用する場合は、被測定者（データ提供者）の意向によるセンサ制御を行う機構がサービスプラットフォームに必要である。

2.2 IoT データの特徴 (2: ストリーム)

IoT サービスを構成するシステムにおいてはデータが生成され続けることに注目しなければならない。現在、実現され普及している IT サービスにおいては、基本的に、データは蓄積後に活用されている。蓄積されたデータにビジネス価値があり、蓄積されたデータの活用技術が発展している。顧客データから次の販売すべき商品を予測し、過去の気象データから明日の天気予報を作成している。

しかし、IoT サービス内ではデータは常に生成され、活用方法によっては蓄積に大きな意味を持たないものも存在する。例えば、友人の位置情報把握サービス（サービスが終了した Zenly など）の利用顧客にとっては、明日友人がどこにいそうかではなく、今友人がどこにいてどこへ向かっているかが重要である。位置情報は更新、つまり、新しく生成さ

れ、要求に応じて最新のものを提供する。このように、IoT データはストリームであるという考えに立脚したサービスモデルを考える必要がある。

2.3 DSOP の概要

ここまで述べたように IoT サービスの実現には、1. データ提供者の意向によりセンサの制御が行える機構が必要である。そして、2. データはストリームであることを考慮したサービスプラットフォームが必要である。我々は IoT サービス向けのサービスプラットフォームとして Data Stream-Oriented service Platform (DSOP) を提案している [4]。

図 1 に DSOP の概要を示す。ストリームを基本とするサービス実現のモデルとして、ストリームを処理するサービスコンポーネントを連結する。図 1 では水源からダム・浄水場を経由して、水道の蛇口というサービス利用者に近いところで水が利用されるメタファを使用している。水源は IoT データの源であるセンサであり、ダムはデータ一時蓄積をする機能であり、浄水場はデータに付加価値を与える機能であり、蛇口は実際にサービス利用者へサービス提供を行う機能である。それぞれの機能の間の水のパイプラインはプラットフォームの一部である。温度データの場合は、それぞれ、温度センサ、一時蓄積用データベース、付加価値を与えるためのアルゴリズム、アクチュエータや可視化機能にあたる。

データ提供者はサービス利用者との間で、データアクセスに関する契約（データアクセスロジック）を共有しており、その契約に従って、データ提供者がデータの送出や停止を行う。

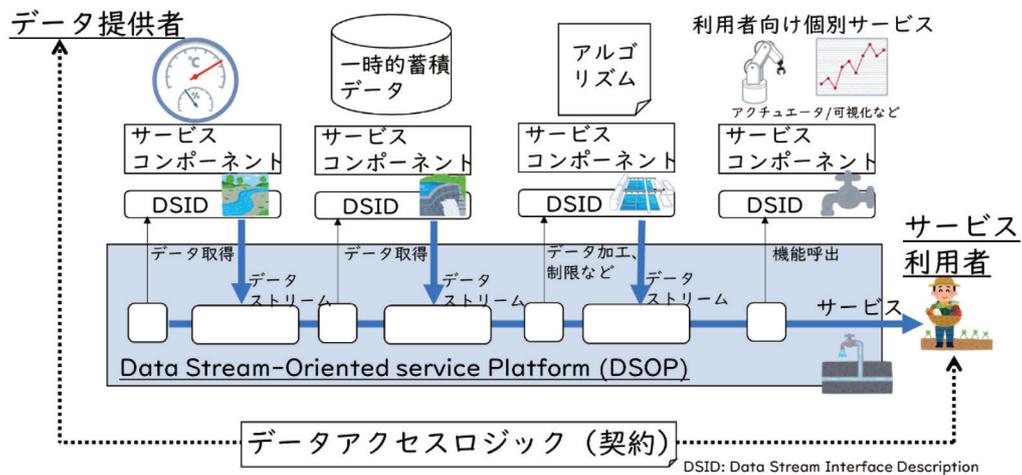


図 1: Data Stream-Oriented service Platform (DSOP) の概要

DSOP のサービス実現モデルは、各サービスコンポーネントが提供する機能を連結することでサービスを実現するサービス実現モデルと異なる。この例としては SOA (Service Oriented Architecture) がある。サービスを実現する各サービスコンポーネントはそのインタフェースや存在場所・アクセス手段が記述 (Web Services Description Language (WSDL)[5] などにより) され、その連結順序はビジネスロジック (Business Process Execution Language (BPEL)) として記述される。BPEL によりサービスコンポーネントから取得されたデータ

は BPEL を実行する主体の意図に従って取り扱われる。また、そのようなデータは基本的にはストリームではない。

2.4 DSOP におけるデータ取得・利用プログラム

DSOP 上で動作するサービスコンポーネントの記述方法 [6] を Python により示す (図 2(b))。比較のため、既存のデータ取得後には、データ取得者の判断のみでデータを利用するプログラム片 (図 2(a)) も合わせて示す。

図 2(a) の 70 行目から 72 行目で、利用者の状況を示すリスト env1 に有効な契約 (contract) が存在する状況で、温度センサ DHT11 からの値を含むリスト values を取得している。76 行目において、そのリスト values に含まれる 3 要素目の値を取り出し value として活用する過程においてはデータ提供者の意図は参照されない。これが既存のデータ取得・利用である。

一方、図 2(b) に示す DSOP でのデータ取得・利用においては、85 行目から 87 行目で有効な基本契約 (basic_contract) が存在する状況で、温度センサ DHT11 からの値にアクセスするオブジェクトの入ったリスト values を取得している。89 行目から 92 行目で実際に利用する状況 env2 を記述し、その状況も踏まえて、3 要素目の値を取得し value に代入する。その後、value の値を利用している。なお、本コード片では記述していないが、89 行目、93 行目でリストや値の取得ができなかった場合は例外が発生する。

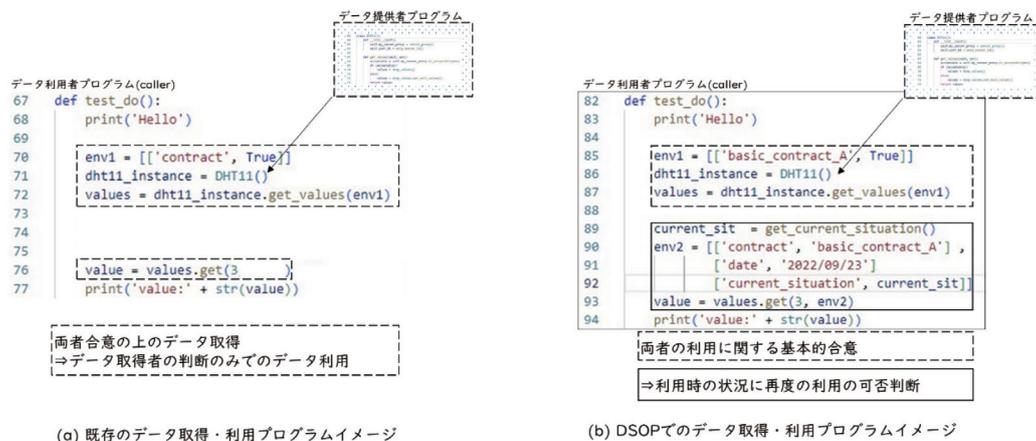


図 2: 既存のデータ取得・利用と DSOP 上のデータ取得・利用の比較

3. DSOP が想定するアプリケーションとサービス (想定シナリオ)

DSOP は IoT データ、つまり、主にセンサからのデータがストリームとなっているものを想定している。本節では想定しているアプリケーションとサービス (想定シナリオ) について述べる。

現在の IoT サービスは、センサ設置者がデータを取得し、データを利用しているものが多い。例えば、農場におけるハウス内の温度・湿度データ (環境データ) の可視化や散水制御である。

しかし、測定対象が人になった場合、センサ設置者、被測定者、データ利用者が異なる場合があり得る。例えば、学校の中にある「教室」にCO2センサを設置し、刻々と変化するCO2濃度を「職員室」で可視化するアプリケーションとそれにより実現されるサービスを考える（図3）。

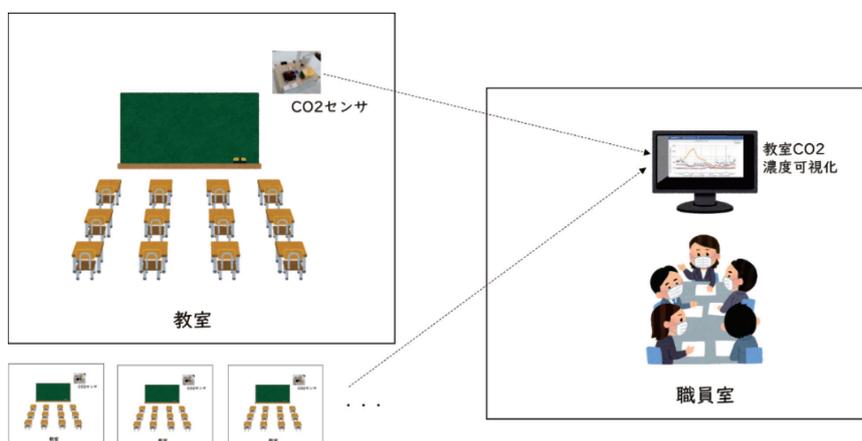


図3: 教室CO2濃度可視化アプリケーション

3.1 パターン1（授業中）

パターン1として、授業中に教室CO2濃度可視化アプリケーションを実行することを考える。

- ・センサ設置者：学校
- ・被測定者：教室にいる児童・生徒
- ・測定データ：CO2濃度
- ・データ利用者：職員室にいる教員
- ・アプリケーション：CO2濃度の可視化
- ・サービス：児童・生徒の授業中の態度把握

このパターンの場合、被測定者（の保護者）に授業推進のために、児童・生徒からのCO2データを取得するという合意があればサービス提供可能である。

3.2 パターン2（教室を授業以外に使う場合1）

しかし、同じセンサ、同じアプリケーションで、異なるサービスが実現され得る。例えば、パターン2として、教室で教員が児童・生徒と保護者で三者面談を行っていることを考える。

- ・センサ設置者：学校
- ・被測定者：教室にいる児童・生徒、保護者、担任教員
- ・測定データ：CO2濃度
- ・データ利用者：職員室にいる教員
- ・アプリケーション：CO2濃度の可視化

- ・サービス：面談を実施している教員のスキルチェック

つまり、全く同じ設備で被測定者が変更になっただけで異なるサービスとなっている。この場合、学校を代表して担任教員が保護者に、面談の向上のために CO2 データを取得するという合意を取ることになる。

3.3 パターン 3（教室を授業以外に使う場合 2）

パターン 1 とパターン 2 は教室に教員がいる場合としているが、教員がいない場合を考える。例えば、放課後、教室で保護者のみによる保護者会を実施している状況をパターン 3 とする。

- ・センサ設置者：学校
- ・被測定者：保護者
- ・測定データ：CO2 濃度
- ・データ利用者：職員室にいる教員???
- ・アプリケーション：CO2 濃度の可視化
- ・サービス：???

このパターンでは、職員室で教室の（保護者の）CO2 濃度を可視化してもサービスにはならない（サービス未定義）。このようなサービスが未定義となる場合は、当然、データ取得の合意も取れない。現実的にはアプリケーション(システム)を停止する必要がある。

3.4 パターン 4（関係者がいない場合）

さらにパターン 4 として、被測定者に学校関係者、児童・生徒、保護者のいずれもいない場合も考えられる。

- ・センサ設置者：学校
- ・被測定者：学校関係者以外（=>結果的に不審者？）
- ・測定データ：CO2 濃度
- ・データ利用者：職員室にいる教員
- ・アプリケーション：CO2 濃度の可視化
- ・サービス：防犯（利用していない教室に人がいないことの確認）

この場合は、データ取得の合意を取る必要はないが、防犯上の有効なサービスとなる。被測定者はデータ測定に関しての合意の有無以前に、不審者として認識され、取り扱われる。

3.5 各パターンの違い

これらのパターンの違いは被測定者の違いであり、その結果、異なるサービスとなり、そのために被測定者の合意の必要性が異なる。この単純な思考実験のみからでも、何を(誰を)測定しようとしているのか、また、どのようにその情報を活用するのかでサービス提供の可否が異なってくる。

この点を解決するため、データ提供者（パターン 1～4 では被測定者）とサービス利用者との間の合意を確認する機構が必要であり、DSOP では機構をプラットフォームに持たせるとしている。

なお、このモデルの前提となっているのは、データ提供者（被測定者）は限定されることとなる。限定されるからこそ、個別のデータの活用となる。多くの人が対象となる環境での測定とは異なる。

4. 研究計画環境

4.1 全体構成

本節では、DSOP アーキテクチャと DSOP サービスコンポーネントの記述方法を検討するためのサンプルアプリケーション・サービスを構築する環境について述べる。

DSOP のデータ提供者にあたるセンサノードと、サービス利用者にあたるノードの他に、一時的にデータを蓄積する機能を持つノードの3種類を東京国際工科専門職大学内の研究用 LAN により接続している（図4）。センサノードは Raspberry Pi にセンサなどのデバイスを接続したものである。一時的にデータを蓄積する機能を持つノードは計算資源をあまり持たないものを想定し、コンパクト PC にて実現している。また、サービス利用者にあたる場所は可視化サービスを実行するノート PC を用いている。さらに、DSOP 内で測定、流通するデータを外部のクラウドにて管理・可視化するサービスとして Ambient.io[7] を活用している。

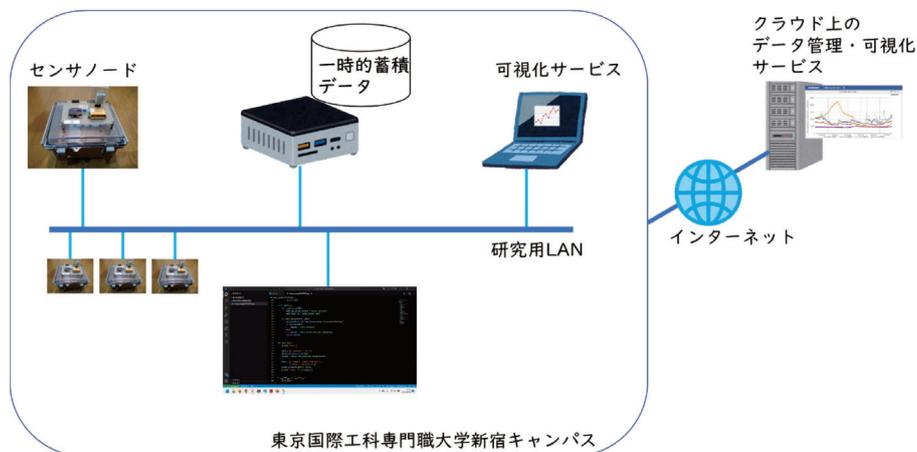


図4: 構築中のIoTサービスコンピューティング研究環境

4.2 センサノード

DSOP のセンサノードは、サービス利用者の状況に応じてデータの送付の可否判断を行う必要がある。現在用意している研究環境では Raspberry Pi4B を用いている。各 Raspberry Pi4B に温度湿度センサ (DHT22) と CO2 センサ (MH-19C) を接続している。ノードの状況を確認するために小型有機 ELD(SSD1306) もノードに装着している。

図5左は現在実装中のセンサノードである。Raspberry Piなどを箱の中に収納し、上蓋の上に DHT22、MH-19C、SSD1306 を搭載している。また、図5右は箱に収容していない状態でのセンサノードの状況を表示している。センサからのデータの他、ノードの識別子、

IP アドレスなども表示する。

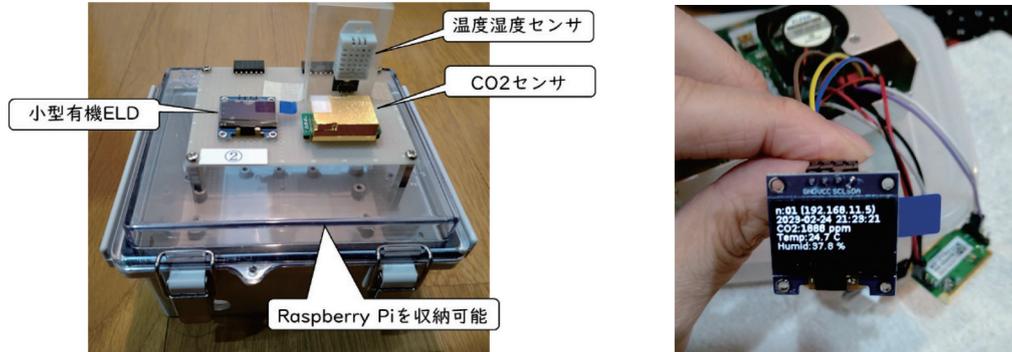


図 5: センサノード (左) とセンサ動作状況 (右)

5. 今後の研究計画

DSOP を中心とした IoT 向けのサービス提供技術の研究として、プラットフォームの実装や記述言語によるモデル表現を行うためには、想定利用者と密に連携をしていくことが必要である。また、DSOP はデータの取り扱いに注目したプラットフォームであるため、まず、データが閉じた空間で取得・利用される空間から検討を始める。そして、当初は利用者が特定小人数である環境からの検討とする。このために教育機関を最初の適用先として選定した。現在は、実現されるサービスが測定されたデータの可視化であるが、他のタイプのサービスを要望された場合は、そのサービスの分析を行う。

また、教育機関外での適用も検討しており、同様のデータの取り扱いが可能なオフィスでのノードの実現法の検討 [8] も既に開始している。

6. まとめ

本稿では、IoT データの本質がストリームであることに着目した、Data Stream-Oriented service Platform (DOSP) と DSOP 上のサービスコンポーネントの記述方法の研究環境と研究計画について報告した。

今後は、IoT サービスを検討している DSOP の想定適用先からの要望を分析しつつ、サービスモデル、プラットフォームのアーキテクチャ、サービスコンポーネント記述言語の検討を行う。その過程で、経験の浅い実装者への教育コストも評価することで、専門職大学の実現に貢献する予定である。

謝辞

本研究の一部は東京国際工科専門職大学学内共同研究費「IoT センサノードの教育環境への設置とデータ測定・可視化・解析方法の検討～「IoT 技術の初等教育環境での活用」(将来課題)への第一歩」(2021 年度)による。

参考文献

- [1] 総務省, "情報通信白書(令和4年度版)," <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>
- [2] Marin Jovanovica et al., "Co-evolution of Platform Architecture, Platform Services, and Platform Governance: Expanding the Platform Value of Industrial Digital Platforms," *Technovation*, Jan. 2020
- [3] Monideepa Roy et al., "Interoperability in IoT for Smart Systems," CRC Press, Dec. 2020
- [4] 武本充治, "IoTサービスのためのデータストリーム指向サービスプラットフォームの検討," 情報処理学会全国大会, Mar. 2022
- [5] W3C Recommendation, "Web Services Description Language (WSDL) Version 2.0 Part 1: Core Language", June 26, 2007 (<https://www.w3.org/TR/wsdl20/>)
- [6] 武本充治, "IoTサービスのためのデータストリーム指向サービスプラットフォームにおけるデータストリームインタフェースの記述方法," 情報処理学会全国大会, Mar. 2023
- [7] IoT データー可視化サービス Ambient, <https://ambidata.io/> (2023年2月26日アクセス)
- [8] 檜田雄斗ほか, "オフィス業務把握のための音声データ取得・行動分析システム SLeSAS のプロトタイプの実装と予備評価," *インタラクション 2023*, Mar. 2023

武本 充治 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授

【研究ノート】

「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」 を目指して

辻野雅之・水上憲明・山口直彦・根岸豊・二村忍

Towards “Smart Mobility Society based on Human-Object Coordination”

Masayuki Tsujino, Noriaki Mizukami, Naohiko Yamaguchi,
Yutaka Negishi and Shinobu Nimura

Abstract: The smart society to be realized in Society 5.0 aims to solve various economic and social problems by collecting data from devices and equipment to be managed and utilizing the collected data to improve the efficiency of resource use. We are interested in realizing a “ smart mobility society based on human-object coordination ” in which humans and autonomously moving devices and equipment are appropriately coordinated to meet the mobility and transportation needs of society, considering the evolution of a smart society. Against this background, we are working on formulating specific research plans and extracting elemental technologies for the realization of this society in the near future. In this paper, we describe the main efforts we are currently making as part of this research project.

Keywords: smart mobility society, human-object coordination, cloud-edge computing, numerical simulation

1 はじめに

Society5.0 [1] が目指すスマート社会は、人工知能・IoT・クラウドなどの最新 IT 技術を活用することで、経済成長と、QoL (Quality of Life) の充実とを両立することを期待している。これは、管理対象の機器・装置に組み込んだセンサからデータを収集し、収集したデータの蓄積 (、共有)、分析、制御による一連のデータ活用のサイクル (本稿では、“IoT データ活用サイクル”) での処理により、スループット向上・資源効率化等の観点で社会全体を最適化することにより実現する。

将来的には、このスマート社会では、自動運転車・自律飛行 Drone 等の自律的に移動する機器・装置 (本稿では、“AMO: Autonomous Mobile Object”) が重要な役割を果たす。また、最近の IoT 技術の進展・5G の広域展開等により、クラウド・エッジなどに置かれた計算資源を用いて様々な機器・装置をリアルタイムに制御する環境が整いつつある。

我々は、この環境を用いて、都市・工場などの広域エリアで AMO を管理し、自律動作する AMO に対して様々なタイムスパンでの制御命令を発し、AMO が連携して与えられ

たジョブの実施をシステム全体で最適化することに関心がある。

この AMO 連携により最適化された「スマートモビリティ社会」のシステムは、当初は現在のヒトが操作する機器・装置（本稿では、“HDO：Human-Driven Object”）からなるモビリティ社会システムとは個別に形成される。しかし、スマートモビリティ社会の進展とともに、これら AMO 連携の社会システムに、徐々に HDO が加わることで「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」に段階的に移行すると考える。そこでは、AMO と HDO との連携による、さらなる広範な社会システムでの最適化を図ることが課題になる。そこで、我々は、この課題を念頭に置き、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」の実現に向けて構想の具現化・概念の有効性検証・要素技術の抽出等を進め、並行して直近での具体的な研究目標の設定を進めている。

本稿では、この「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を目指した「研究企画」での検討状況について説明する。

2 構想の全体像

2.1 ユースケース

「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」のシステムにおける要求条件を明確にするため、提供するサービスのユースケースを検討している。

技術的特異点 [2] に向かっているとも言われる現在の社会が、今後どのように変革するかを的確に予見することは難しくなっている。そのため、現在の視点での実用性・有用性に固執せず、将来への発展や今後の環境変化を見越して幅広く可能性がありそうなユースケースを抽出している。

我々が、検討しているユースケースの例を表 1 に示す。ここでは、都市・工場等の特定のエリアに属する AMO・HDO を管理対象とする。これら AMO・HDO に装着したセンサから取得したデータを 5G による低遅延の無線アクセス環境を通じて収集し、与えられたジョブをそれぞれの目的（表 1 に記載の「評価尺度（例）」に基づく効率性の実現等）に応じて最適化するシステムを考える。

表 1. ユースケース

No.	対象エリア	AMO	HDO	ジョブ	評価尺度（例）
ケース1	都市	自動運転車	自動車 （人が運転）	都市において人・物を運ぶ	移動時間 燃料代
ケース2	物流拠点・倉庫	自律搬送機器	搬送機器 （人が操作） 人	人／出庫時のスペース内での棚入れ／出し	棚入れ／出し時間 所定時間からの乖離
ケース3	工場・オフィス・家	ロボット 掃除機	掃除機 （人が操作）	エリア・フロア・部屋全体の清掃 （全体を走査・清掃）	清掃時間 時間当たり清掃面積

2.2 システム

本構想で想定するスマートモビリティ社会のシステムイメージを図1に示す。

都市・工場等の管理対象エリアで、与えられたジョブを効率的に遂行するように、複数のAMO・HDOを連携して制御する汎用的な基盤の構築を目指す。このため、エリア内で収集したデータを蓄積（・共有）・分析し、機器・装置の制御に反映させる、機器・装置の管理・制御を行なう情報基盤をクラウド・エッジ連携システム [3] で構築する。

エッジは管理対象エリアの直近に配置し、管理対象のAMO から得られた（局所的な）データを用いて秒未満の時間オーダー（理想的には、5G が想定するリアルタイム）で制御する汎用的な機能を有する「リアルタイム都市/工場/家OS」の機能を実装する。図1では、このリアルタイムOSを介したAMOに対する制御の流れを、“Object Real-Time Control”と呼ぶIoTデータ活用サイクルで示す。

この局所データに基づくリアルタイムでの制御に加えて、分以上のより長い時間オーダーでシステム全体を最適化に導く、“Object/Human Engineering”と呼ぶIoTデータ活用サイクルによる機器・装置の制御も実施する。“Object/Human Engineering”では、システム全体で取得したデータを活用するため、クラウドで実装する「都市/工場/家管理システム」の機能で、高速な最適化アルゴリズムを用いてシステム全体の最適解を求める。

“Object/Human Engineering”は、“Object Real-Time Control”によるリアルタイム制御を、より長期の時間オーダーでのシステム全体からの情報に基づく制御で覆うようにしてシステム全体の最適化へ導くことを狙いとしている。

このうち、“Object Engineering”は、AMO に対してリアルタイム制御を誘導するような長期スパンでの制御を施す。また、“Human Engineering”は、HDO を動作させるヒトに対する指示、または、行動変容をもたらす情報提供を通じて、HDO の動作を制御すること

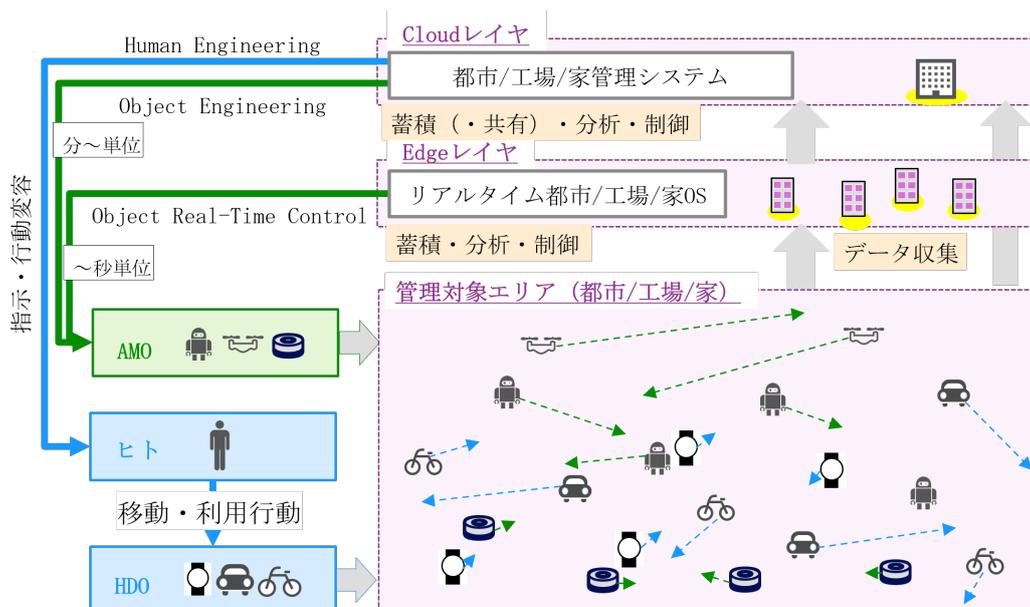


図1. システムイメージ

を狙いとする。ヒトを目的に叶うよう行動変容を促す方法は、中長期的な研究課題として取り組むことを考えている（現在の文献調査の状況について4章で言及する）。

これら2つのIoTデータ活用サイクルを担う機能であるリアルタイム都市/工場/家OS、及び、都市/工場/家管理システムは、スマートモビリティ社会の中核の機能と捉え、そのユースケースを踏まえつつ汎用性を保つために必要な共通機能の抽出を図っていく必要がある。

このようにして、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を管理/制御するシステムを構築することを考える。

3 有効性検証

本研究で構想した概念の有効性を検証するため、シミュレーションによる数値評価と実機による動作評価の研究環境の準備を進めている。この2つの有効性検証の検討状況を簡単に説明する。

3.1 トイモデルシミュレーションシステム

走行レーン上を複数のAMOが動作してジョブを実行するトイモデルでのシミュレーションの数値評価について示す。

まず、図2にてシミュレーションで評価する動作について説明する。図2(a)で示すように、シミュレーションでは、4つのAMOが、単位時間当たり単位距離の等速度で長さ400の線分上の走行レーンを動作する。走行レーン上の位置は、左端からの距離(0~400)による座標で表す。この走行レーン上に4つの指定された地点に「マーカ」と呼ぶAMOの到達目標が出現する(図2(b)参照)。マーカが出現する地点は、一様乱数により走行レーン上にランダムに決まる。マーカは、配車したAMOが到達すると消滅し、この消滅と同時に新たなマーカが出現する(図2(c,d)参照)。この出現の時点で、マーカはいずれかのAMOに配車される(図2(e,f)参照)。結果、常に、配車された4つのマーカが、システム上に存在する。また、AMOが配車したマーカに到達した時、得点(1点)を獲得する。

シミュレーション動作の詳細事項を以下で補足する。

- 4つのAMOは、それぞれ50, 150, 250, 350の線分上の座標位置からシミュレーションを開始する(図2(a)参照)。
- シミュレーション開始時に4つのマーカが出現する。各マーカに配車するAMOはその項番順で決定する(図2(b)参照)。
- マーカに到達したが、配車されたマーカを持たないAMOは、新たにマーカが配車されるまで到達した地点で停止し、待ち状態になる(図2(f)参照)。
- AMOは、配車されたマーカに向かう走行途中や配車されたマーカを持つ状況では停止しない。
- AMOは、配車されたマーカを予約し、予約順序でマーカを巡回する。マーカの巡回順序はこの予約順序から変更できない(図2(f)参照)。

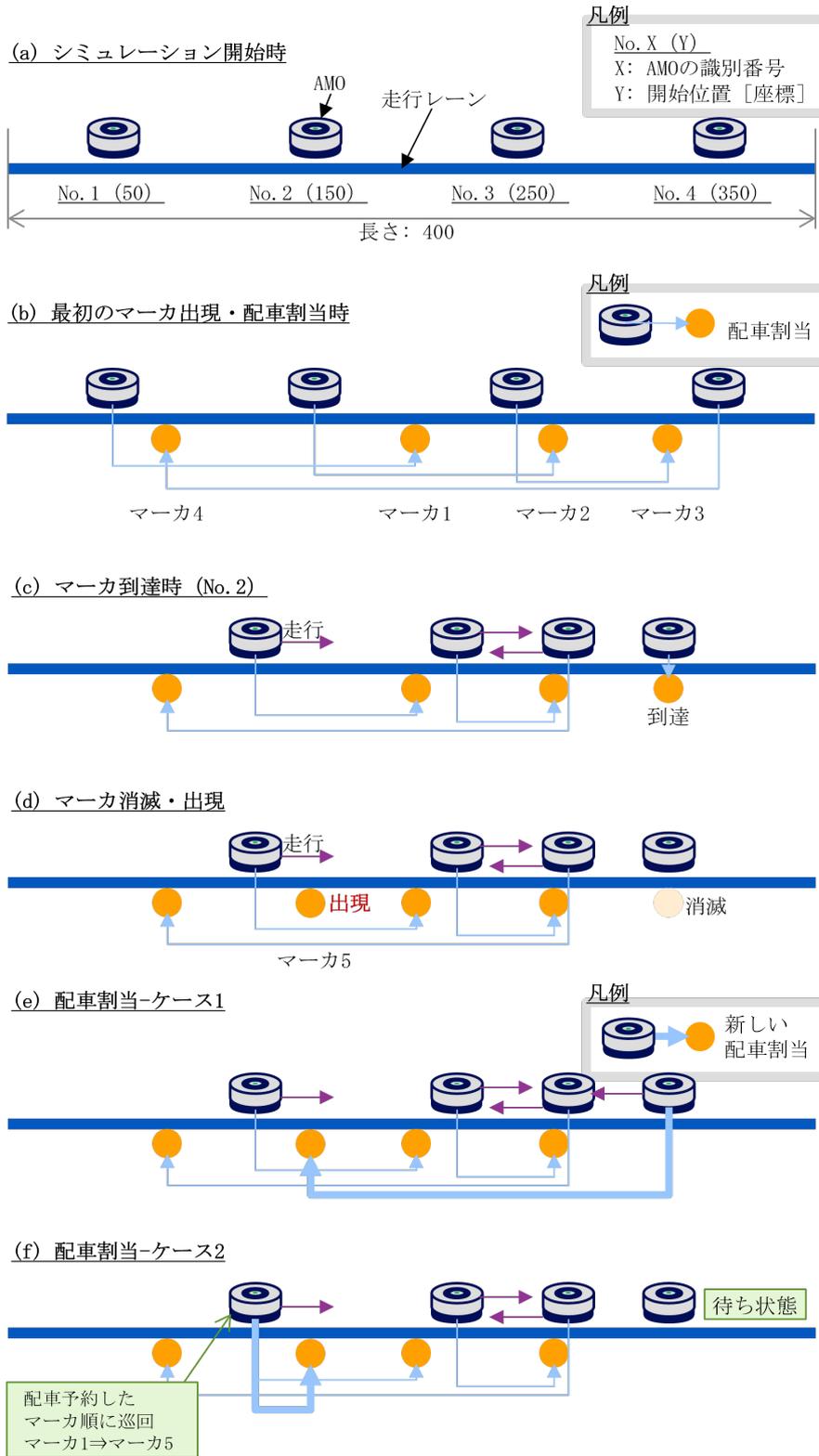


図 2. シミュレーション動作

このシステムでは、マーカ出現時における配車する AMO 決定のみが制御対象である。また、このジョブの目的は、シミュレーション期間中に 4 つの AMO で出来るだけ多くの得点を獲得することである。この 4 つの AMO で獲得した得点の合計（総得点）で配車する AMO の決定の方法（配車法）を評価する。

本シミュレーションでは、以下の 3 つの配車法を評価対象とする。

順次配車（SEQ） マーカに到達した AMO を、そのマーカ消滅に伴い出現するマーカに配車する。（IoT データ活用サイクルに依らず、）AMO の自律動作のみによる制御のケースである。

固定配車（FIX） 各 AMO が担当する区域を（0～100）、（100～200）、（200～300）、（300～400）と定める、マーカが発生した地点の区域を担当する AMO に配車する。AMO に局所的に定めた区域とマーカが発生地点のみによる単純な仕組みで制御する“Object Real-Time Control”のケースである。

最短到着配車（OPT） マーカが出現した時点で、各 AMO がそのマーカに到達する時間を評価する（既にマーカへの配車が予約されている場合は、予約されたマーカ経由での到達時間を評価）。4 つの AMO のうち、この到達時間が最も短い AMO に配車する。システム全体の動作状況を分析し制御する、“Object Engineering”のケースである。

これら配車法を離散事象型シミュレーションによる数値実験で評価した。図3は、シミュレーション期間を 1,000 とした場合の AMO の動作を示す。異なる色で表示するグラフの各データ系列は AMO に対応し、各 AMO の時系列での座標位置を示す。なお、3 つの配車法の評価では、出現するマーカの地点は同じ乱数列で決定している（各 AMO で最初に配車されるマーカが同じであるため、シミュレーション開始から最初のマーカ到達までの動作は 3 つの評価で同じになる）。図に示す AMO の動作から、各配車法の特徴が確認できる（SEQ はマーカが出現した地点に応じて AMO が大きく移動する、FIX では AMO は同じ区域での動作に留まっている等）。

次に、表2で、シミュレーション時間を 10,000 とした場合のシミュレーション動作の結果を示す。やはり、マーカが出現する地点は全ての評価で同じ乱数列で決定している。なお、表中の「平均走行距離」は、1 回のマーカ到達に要する走行距離の平均値を示す（合計欄は、全 AMO における平均値）。まず、総得点は、OPT(776 点)、FIX(656 点)、SEQ(287 点)の順に高いことが分かる。SEQ は、マーカに到達し得点を獲得した AMO が、それに伴い出現するマーカへ配車するという、走行効率を考慮しない配車法であるため、AMO の平均走行距離が長くなる（138.9）。この結果、到達できるマーカの数が少なくなる。これに対し、OPT・FIX は、それぞれの方法で走行距離を短くするように配車する AMO を決めるため、SEQ と比べて平均走行距離が劇的に短縮（OPT：35.1、FIX：35.3）され、結果、SEQ より総得点を大幅に増やすことができた。

OPT と FIX の総得点の違いは、AMO の待ち時間の長さに基づくことが評価から確認できる。FIX では、担当区域にマーカが出現するまで AMO が待ち状態になる（逆に、担当区域にマーカが多く出現した AMO は、多数のマーカからの配車が予約される）。他方、

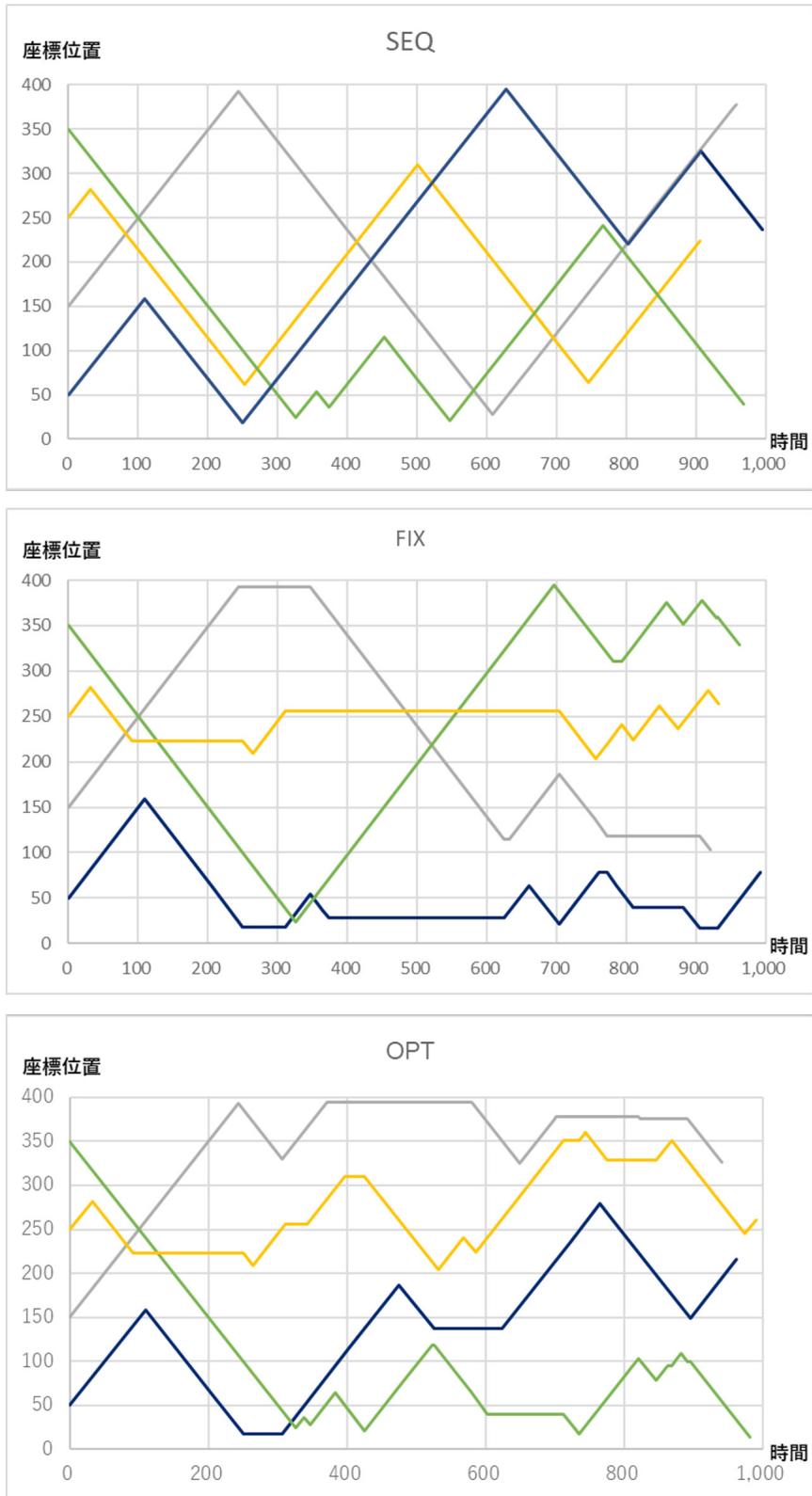


図 3. AMO 動作例

OPT では到達が最短時間となる AMO に配車するため、配車されていない AMO（待ち状態の地点から直接マーカに移動できる）が選ばれる傾向にある。このように、システム全体での AMO の状況に応じた制御を行うことで、ジョブの達成度が向上していることが分かる。

非常に限られた数値評価ではあるが、これら 3 つの手法の比較より、“Object Real-Time Control” や “Object Engineering” の IoT データ活用サイクルにより、ジョブを改善する可能性のあること、システム全体の最適化を狙う “Object Engineering” は、“Object Real-Time Control” より、さらにジョブを効率化する可能性があることが示せた。

表 2. 評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	69	9,992	144.8	0
1	76	9,929	130.6	0
2	65	9,946	153.0	0
3	77	9,998	129.8	0
合計	287	39,865	138.9	0

SEQの評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	167	5,786	34.6	4,214
1	175	5,869	33.5	3,943
2	152	5,690	37.4	4,104
3	162	5,798	35.8	4,188
合計	656	23,143	35.3	16,449

FIXの評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	210	7,747	36.9	2,223
1	181	6,026	33.3	3,597
2	205	7,269	35.5	2,673
3	180	6,205	34.5	3,772
合計	776	27,247	35.1	12,265

OPTの評価結果

3.2 実機によるシステム構築

本研究での構想の動作評価のため、実機による小規模な実験システムの構築を目指している。クラウド・エッジによる制御・管理システムに先駆け、まずは、ロボット掃除機を活用した管理対象のデバイスの製作を進めている。具体的には、以下に示す機能を製作した（図 4 参照）。

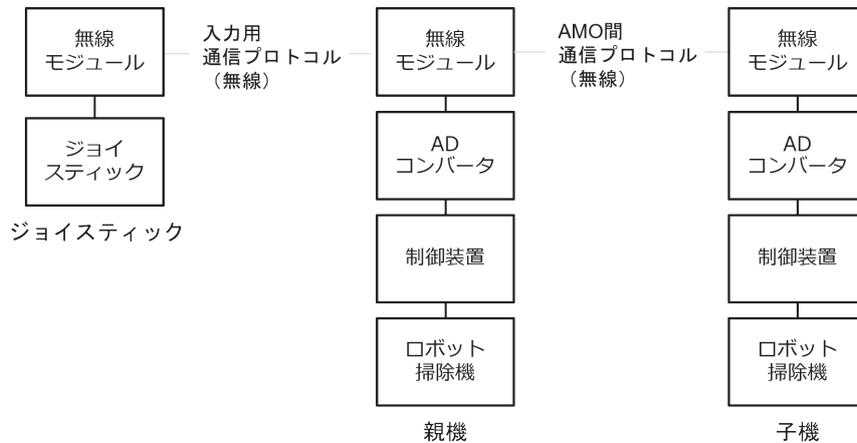


図 4. 実験システムの機能構成

ロボット掃除機制御 マイコンによる制御装置上のプログラムより、API を介してロボット掃除機の動作制御を行う。

通信システム ロボット掃除機に備え付けの無線モジュールを用いて遠隔の装置との通信を行う。本実験で使用する無線モジュールは、アナログ電圧を送受信する仕様となっている。送信側の無線モジュールはジョイスティックが生成したアナログ電圧信号を受け取って送信する。受信側の無線モジュールは受け取った信号を PWM で再現するため、これを AD コンバータを介して制御装置に取り込み、デジタル処理を行う。

通信プロトコル AMO 間の連携のための AMO 間通信プロトコル、及び、ヒトが HDO を操作するための操作装置との入力用通信プロトコルを定め、それに基づき装置間で通信する。

実験システム構築において使用した主なハードウェアは、表 3 に示す通りである。

表 3. 実験システムで使用したハードウェア

装置	ハードウェア名
ロボット掃除機	ルンバ (iRobot Create 2 Programmable Robot)
制御装置	raspberry pi 3
無線モジュール	TWELITE DIP
AD コンバータ	MCP3208
入力装置 (ジョイスティック)	KKHMF 製ジョイスティックモジュール

この機能を用いて、以下の AMO 間連携、ヒトによる HDO 操作の基本動作が行えることを確認した。

ロボット掃除機の連携動作親機・子機のロボット掃除機間での通信により、親機の動作を子機が追従するような制御プログラミングを実装し、親機のタッチセンサ接触に伴う方向転換を子機が追従することを確認した (図 5 参照)。

ロボット掃除機のヒトによる遠隔操作ジョイスティックを操作装置とし、レバーの傾き

によりロボット掃除機の走行速度・回転速度をヒトが遠隔より操作できることを確認した。
なお、この際に実施した無線通信確認の実験の様子を図6で示す。

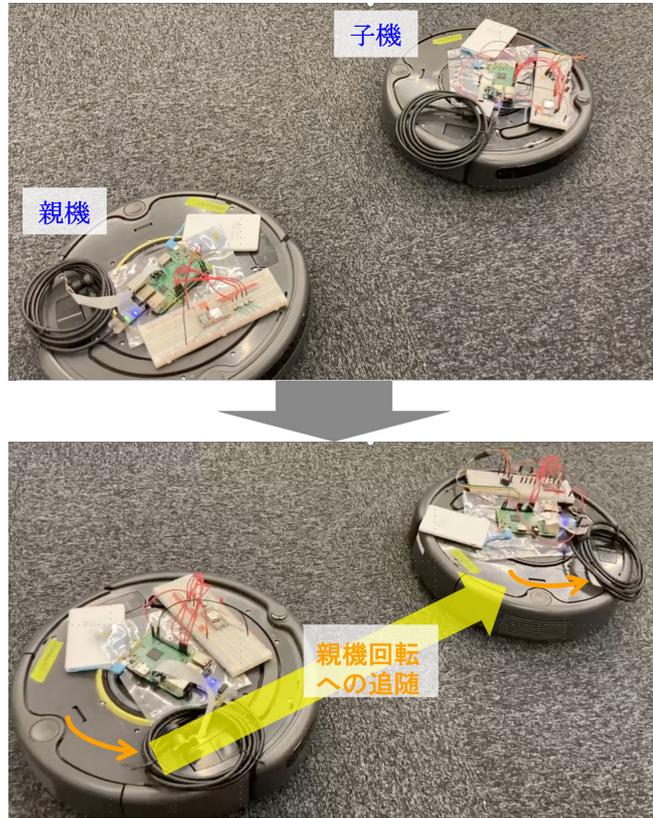


図 5. ロボット掃除機の連携動作

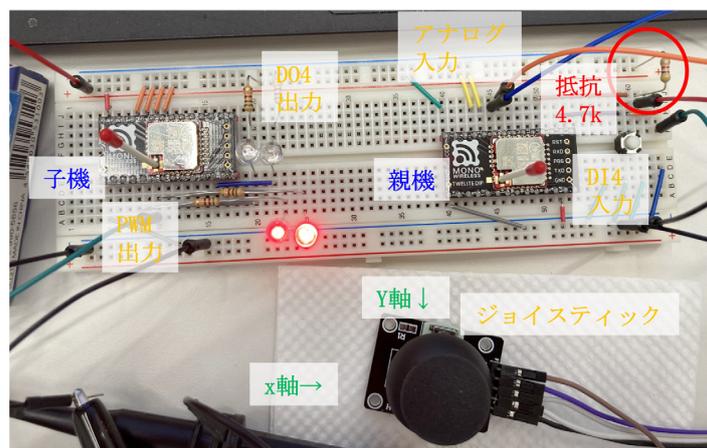


図 6. 遠隔操作回路の実験

3.3 他課題への対応状況

中長期的な研究課題として取り組む必要があると考える「ヒトへの行動変容を実現する手段」について、可能性があると思われるトピックについて文献調査を開始した(表4参照)。

表4. 中長期課題に対する文献調査

項目	内容	関連文献
インセンティブ設計	報酬や罰則等のヒトに与えるインセンティブを設計し、インセンティブを受けたヒトが自分に有利になるよう選択する行動が、社会全体での最適化に繋がるように導く。	[4]
動的価格調整	時間や需給状況に応じて商品・サービスの価格を変更させる戦略である。この仕組みをヒトの行動変容に繋げるインセンティブの価値設定に活用する。	[5]
ゲーミフィケーション	ゲーム技術を活用して、ビジネスや教育などの業務や学習をより効率的かつ楽しいものにすることを目的としている。ゲーミフィケーションを通じて、楽しみをヒトに提供しながらヒトの行動変容を図ることで、ヒトとモノとがさらに高いレベルで効率性に繋がるよう協調する可能性を考える。	[6]
行動変容デザイン	行動経済学による知見を活用し、ヒトの行動を変えるようなプロダクトのデザイン手法を考える。	[7]

4 おわりに

本稿では、ヒトと自律的に移動するモノが協調し、社会全体での効率化を図る「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を構想し、それに向けた研究の企画状況として、有効性検証のための、トイモデルシミュレーションでの検討状況・実機による実験システムの構築状況等について説明した。本格的に研究を進めるために、まだ、多くの課題を解決する必要があるが、今後とも随時の数値シミュレーションによる定量的検証、実験システムによる動作確認・概念検証を重ね、骨太の研究に結実したいと考える。

参考文献

- [1] 内閣府, Society 5.0
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2023年2月24日閲覧)
- [2] R. Kurzweil, The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, The Viking Press, 2005.
- [3] X. Wang, L. T. Yang, X. Xie, J. Jin, M. J. Deen, A Cloud-Edge Computing Framework for Cyber-Physical-Social Services, IEEE Communications Magazine, Vol. 55, Issue: 11, pp.80-85, 2017.
- [4] 石田潤一郎, 玉田康成, 情報とインセンティブの経済学, 有斐閣, 2020.
- [5] S. Saharan, S. Bawa, N. Kumar, Dynamic Pricing Techniques for Intelligent Transportation System in Smart Cities: A Systematic Review, Computer Communications, Vol. 150, pp.603-625, 2020.
- [6] S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, L. Nacke, From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification," MindTrek '11, pp. 9-15, 2011.

- [7] S. Wendel, 行動を変えるデザイン—心理学と行動経済学をプロダクトデザインに活用する, オライリージャパン, 2020.

辻野雅之	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	教授
水上憲明	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	講師
山口直彦	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	助手
根岸 豊	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	教授
二村 忍	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	教授

【研究ノート】

シビックプライド醸成に繋がる住民価値の 掘り起こしと貢献度の検証に関する研究

～ uncovering potential resident value ～

山本裕・高田晃希・黒羽晟

橋本沙也加^{*1}・橋本尚子^{*1}・岡田ゆかり^{*1}

Research on uncovering resident values that lead to the fostering of civic pride and the verification of their contribution

Hiroshi Yamamoto, Koki Takada, Jo Kuroha,
Sayaka Hashimoto^{*1}, Shoko Hashimoto^{*1} and Yukari Okada^{*1}

Abstract: In this research, we use the case of a local government to address the issue of fostering civic pride. From the results of resident questionnaires of existing local governments, we will use multivariate analysis and machine learning to uncover potential "new resident value" that will lead to the cultivation of civic pride. We will evaluate the contribution of "new resident value" to fostering civic pride, and derive the current living environment conditions to raise awareness of "new resident value".

Keywords: principal component analysis, analysis of qualification type II, cramer's coefficient of association, machine learning

1. はじめに

近年、日本は少子高齢化に伴って東京一極集中が進み、地方の過疎化・高齢化が進行している。地方公共団体には、こうした地方の衰退を抑制する課題がある。そこで、本課題解決のアプローチとして、住民が一丸となって自治行政を推進することで社会増減などに歯止めをかけ、持続可能なまちづくりを推進するために、住民の地域への参加意識、愛着度などを高める活動がある(シビックプライドの醸成)。住民意識のモニタリング方法として、住民アンケートが一般的であり、多変量解析やテキストマイニングなどによりアンケート回答を分析し、シビックプライドの醸成に繋がる「住民が感じる地域の潜在的価値」を導出・評価する研究が広がっている。研究の多くは潜在的な住民価値を模索したデータ解析であるが、既存のアンケートから導出した潜在的な住民価値とアンケート項目とを関

*1 株式会社百代

連付けて、自治体施策を模索する研究事例は少ない。

本研究では、ある自治体殿を1事例としたシビックプライド醸成という課題に対して、既存の自治体住民アンケート結果から、多変量解析や機械学習を用いてシビックプライドの醸成につながる潜在的な「新住民価値」を掘り起こし、「新住民価値」のシビックプライド醸成への貢献度の評価と、「新住民価値」に関する住民意識を高めるための現状の居住環境条件の導出を行う。本研究は今回の事例以外の多くの自治体での訴求も目的とする。

2. 自治体住民の新価値の創出

2.1 本研究で取り組む課題

既存の住民アンケートから、新住民価値を掘り起こし、住民意識を高める居住環境条件を導出するために本研究で取り組む課題は以下である。

- (a) 住民アンケートから潜在的な「新住民価値」を掘り起こす（潜在的テーマの発掘）
- (b) 「新住民価値」が住民意識を高める変数になっていることの評価
（潜在的テーマの評価）
- (c) 「新住民価値」の変数の住民意識を高めるために寄与する居住環境条件の導出
（潜在的テーマからの施策導出）

2.2 主な研究アプローチ

本研究の目的は、自治体住民のシビックプライド醸成のために、自治体施策や居住環境が住民の新しい価値となるような潜在的なテーマを発掘し、当該テーマに関して住民意識を高めるような自治体の具体的施策を導出することである。進め方としては、ある自治体殿で運用している住民アンケートから、多変量解析や機械学習を活用して住民意識を向上するために寄与する潜在的な「新住民価値」となるテーマを発掘し、発掘テーマに関する住民意識を向上させる環境条件を発見するプロセスとする。具体的には、ある自治体殿にて2018年以降に実施された住民アンケートを対象にして、上記2.1に示した課題に対応し、(a) 潜在的テーマの発掘、(b) 潜在的テーマの評価、(c) 潜在的テーマに対して住民意識を高める居住環境条件の明確化に対応した事例研究を進める。本事例研究全体の概念図を図1に示す。

今回の研究報告は、上記(a)および(b)の評価準備の範囲とし、本範囲において以下の方針を進める。

- (1) 解析対象のデータは、自治体が従来から運用中の住民アンケートを適用する。
- (2) アンケート項目回答と自由記述回答の両方を総合的に解析する手法として、多変量解析（数量化Ⅱ類、相関分析）、テキストマイニング及び機械学習のモデルを適用する。
- (3) 新住民価値を導出する方法として主成分分析を活用する。合成変数（主成分）の意味付けを行い寄与度の評価を行う。

アンケートデータから導くシビックプライド醸成のための新住民価値は、シビックプライド醸成に寄与する特徴量全体を要約できるような軸であることが求められるため、主成分分析を用いて新住民価値を導く。主成分分析はある多変量データの情報を最大限

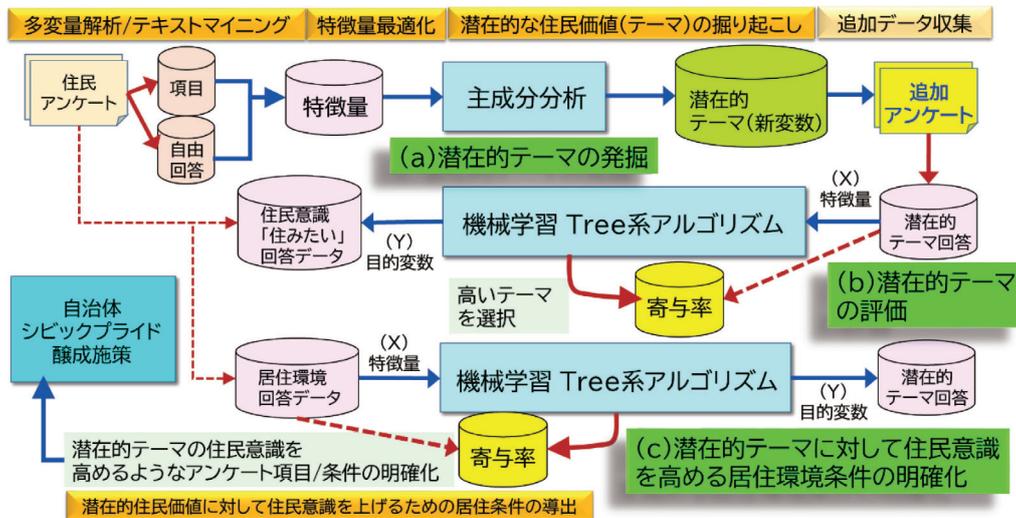


図 1. 全体概念図

保持するように、軸いわゆるベクトルをうまく選ぶ手法である。主成分分析によって導出される軸は主成分といい、主成分は射影されたデータの分散を最大化するように選ぶ。(4) 新住民価値はシビックプライド醸成に寄与するベクトルであることが望ましい。従って、新住民価値を主成分分析の手法を用いて導出する際、入力する説明変数(特徴量)は、「住み心地」回答に影響度・重要度が高いアンケート項目および自由記述回答を選択する。以下のプロセスにより主成分分析を行うための特徴量を選択する。

(4-1) 「住み心地」回答に影響度が高いアンケート項目を選択するために、数量化Ⅱ類を適用しカテゴリウェイトを評価する。また特徴量の相関分析を行い多重共線性を排除する。

(4-2) 「住み心地」回答に影響度が高い自由回答を選択するために、テキストマイニングを適用し、TF-IDF 値を指標とする

(4-3) 「住み心地」回答を目的変数、(4-1) 及び (4-2) で選択した特徴量をマージしたものを説明変数として、機械学習モデルを適用し説明変数の重要度を評価する。重要度が高い説明変数を選択し、主成分分析に入力する説明変数とする。

上記の方針に従い以下のプロセスで研究及び具体的検証を進める。

2.3 研究プロセスの概要

今回対象とする (a) 潜在的テーマの発掘 (b) 潜在的テーマの評価準備のプロセス概要を示す。

(a) 潜在的テーマの発掘

住民アンケート回答から、居留意識向上に繋がる潜在的な新住民価値を導出する。導出する方法としては、アンケート結果から主成分分析を行い主成分の意味付けを行う。(a-2 新住民価値の概念の掘り起こしと検証)

また、主成分分析における主成分導出の精度を高めるため、事前に「住み心地」に関するアンケート項目回答に重要度が高い特徴量を選択しておく。選択する方法としては、

tree系の機械学習モデルの説明変数の重要度を測る手法を適用する。つまり、主成分分析を行う前処理として、シビックプライド醸成に重要度が低い特徴量を排除する。手法としては、「住み心地（住み心地良い=1,住み心地悪い=0）」を目的変数、「『住み心地』のアンケート項目回答に影響度が大きいアンケート項目及び自由回答内容」を説明変数とした機械学習モデルを適用して、重要度が高い説明変数を選択する。（a-1 新住民価値導出のための特徴量の選択）

機械学習の前処理として、「住み心地」のアンケート項目回答に影響度が高い「アンケート項目及び自由回答内容」を事前に選択しておく。選択手法として、「住み心地」回答に影響度が高いアンケート項目回答に関しては、数量化Ⅱ類を適用し特徴量のカテゴリウェイトのレンジ幅を評価する。また、「住み心地」回答に影響度が高いアンケート自由回答に関しては、テキストマイニングを適用し自由回答の各々に対する特徴語を選択する。選択基準として各回答のTF-IDF値を指標とする（a-1 新住民価値導出のための特徴量の選択）

(a-1) 新住民価値導出のための特徴量の選択

表1に「住み心地が良い」「住み続けたい」アンケート項目回答に影響度が高いアンケート項目（特徴量）を選択するプロセスの概要を示す。

表1.「住みたい」回答に貢献度が高い特徴量を選択するプロセス

目的/プロセス	手法	手法の概要
アンケート項目回答の解析 (特徴量選択)	数量化Ⅱ類	「住み心地」の群を最も分離するアンケート項目（特徴量）の重み付け、特徴量の重み（「住み心地」に対する寄与率）評価、寄与率ランキングでアンケート回答項目を選択（カテゴリウェイト/レンジが0.15以上）
(多重共線性排除)	相関分析	数量化Ⅱ類で選択した特徴量に対してクロス集計を行い、変数間のクラメール連関係数を評価
アンケート自由記述回答の解析 (特徴語選択)	テキストマイニング	形態素解析 [KH Coder] で、特徴語のTF-IDFを評価（コーパスごとに）、特徴語ごとのTF-IDF値ランキング50を選択。選択した特徴語を数量化（One-hot encoding）
主成分分析のための特徴量 選択	機械学習 (教師あり 分類)	数量化Ⅱ類で選択した特徴量とテキストマイニングで選択した特徴語をマージ。機械学習入力特徴量を生成。 [1次選択] 精度が高いアルゴリズムを評価選択（PyCalet）。 「住み心地」回答変数を目的変数、上記を説明変数とし機械学習モデルで学習/予測/精度評価。 特徴量の重要度を評価し50個の特徴量を選択 [2次選択]

本プロセスで特徴量を選択し、次プロセスの主成分分析の説明変数として入力する。

(a-2) 新住民価値の概念の掘り起こしと検証

表2に新住民価値の概念(変数)を掘り起こし、検証の準備をするプロセスを示す。

表2. 新住民価値の概念の掘り起こしのプロセス

目的 / プロセス	手法	手法の概要
新価値概念に相当する主成分の導出と意味付け	主成分分析	「住み心地」アンケート項目回答に対して重要度が高い特徴量から新住民価値の概念に相当する主成分を導出 機械学習の重要度評価で選択した特徴量を標準化。 sklearnのpca.fit_transform()で主成分算出。 主成分の意味付けと累積寄与率を評価。
新住民価値の概念の検証	住民アンケート項目追加	主成分分析で導出した新概念が住民意識向上に繋がるかどうかの検証。導出した主成分の意味付けから、その内容を検証する設問を2022年度定例住民アンケートに追加する。

選択した特徴量から主成分を導出して意味づけを行う。意味付けした主成分に関して、住民アンケートに追加設問を行い、アンケート回答から主成分の意味付けの妥当性を検証する。

(a) 潜在的テーマの発掘を行うプロセスの全体像を図2に示す。

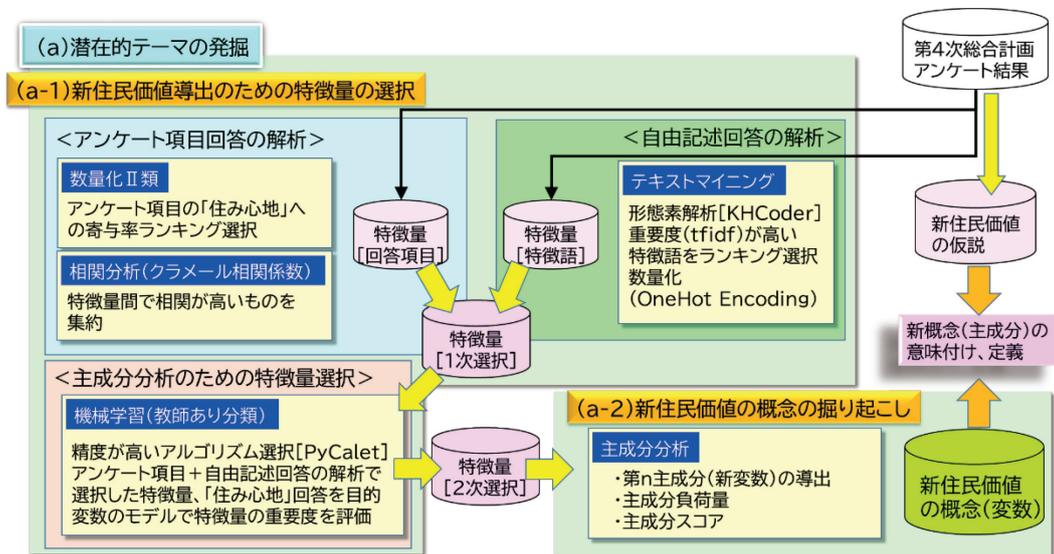


図2 潜在テーマの発掘を行うプロセスの全体像

(b) 潜在的テーマの評価準備

主成分分析で導出した主成分の意味付けの検証を行う。検証方法は、自治体の2022年度の住民アンケートに対して、主成分の意味付けに対応する設問を追加する。本追加アンケート結果を分析して、導出した主成分の意味付けが正しいかどうかを検証する。また、

追加したアンケート項目と「住み心地」との相関を測り（相関分析、機械学習）追加アンケート項目が住民意識の向上に寄与していることを検証する。

3. 新住民価値導出のための特徴量の選択

3.1 アンケート項目回答の解析（機械学習モデルの学習に向けた前処理）

新住民価値に相当する主成分を導出する主成分分析を行うために、機械学習のモデルを活用して、「住み心地」のアンケート項目（目的変数）に対して重要度が高い特徴量を選択するが、この機械学習の精度を高めるための前処理として「住み心地」アンケート項目の回答に寄与率が大きい特徴量を選択する。アンケート項目の中でシビックプライドの醸成、町への愛着度を高める上で必要条件となるのが住み心地であると考えた。住み心地が良ければ町への愛着度や住み続けたい意識が向上し、シビックプライドが醸成されることが期待できる。

本プロセスにおける特徴量選択の手法として数量化Ⅱ類および相関分析を適用する。

3.1.1 数量化Ⅱ類での解析

(1) 解析プロセスの内容

まず、質的データの判別分析である数量化Ⅱ類を用いて「住み心地が良い」「住み心地が悪い」回答の相関比を最大にするカテゴリウェイトを算出し、「住み心地」回答への寄与率が高い特徴量を選択する。次に、全ての説明変数の組み合わせでクロス集計表を作成し、クラメール連関係数を算出し、クラメール連関係数による相関分析により相関係数が高い特徴量（説明変数）を集約する。

数量化Ⅱ類は、ダミー変数を導入して質的データを数値化することにより、判別分析を行う手法である。判別分析と同様に、説明変数間の関係を加味しながら目的変数を予測するが、予測に対して重要な影響を及ぼす説明変数を明確化する。判別する内容に応じた群データで与えられる目的変数（今回は「住み心地」の良し悪し）と質的データで与えられる説明変数（アンケート項目）との関係をモデル式で表し、モデル式の説明変数の係数の重みにより説明変数の重要度を評価する。

$$\text{モデル式: } y = \sum_{j=1}^Q \sum_{k=1}^{c_j} a_{jk} x_{jk} + \varepsilon$$

各説明変数（アンケート項目）のカテゴリ（選択肢回答）に対応するダミー変数値を（ x_{jk} ）とした場合、モデル式の係数（ a_{jk} ）であるカテゴリウェイトの値により各アンケート項目の「住み心地」（ y ）の良し悪しに対する重要度を測る。

従って、説明変数（アンケート項目）の重要度を測るためにはカテゴリウェイト（ a_{jk} ）

y ：目的変数

Q ：説明変数の数

c_j ： j 番目の説明変数のカテゴリ数

a_{jk} ：説明変数 j の k 番目カテゴリのモデル式の係数（カテゴリウェイト）

x_{jk} ： j 番目説明変数 k 番目カテゴリのダミー変数

ε ：誤差

の値を評価することが必要となる。正確には、ある説明変数(アンケート項目)のカテゴリウェイトのうち最大値と最小値の差の絶対値の大きさ(レンジ)が、その説明変数の重要度に相当する。

以下に示す手法で、各アンケート項目のカテゴリウェイトのレンジを算出し重要度を評価する。

([5] 参照。算出式は省略)

ここで、各個体(各アンケート回答者)の合成変量 \hat{y} をサンプルスコアと呼び、モデル式を使って個体ごとに算出可能である。群の特性を表す理論値として使用される。

(a) 群分けされた資料において各カテゴリの関係を明確にするために、群ができるだけ離れるようにカテゴリウェイト a_{jk} を設定する。 a_{jk} はサンプルスコア \hat{y} と群との関係を示す相関比 η^2 (2群の離れ具合を示す指標)が最大になるように定められるため、相関比 η^2 を最大にするカテゴリウェイト a は η^2 を a で偏微分した微分方程式の解として求められる。

(b) s_b^2 (群間変動)および s_y^2 (全体変動)は、各々ダミー変数データの全体変動行列 T とカテゴリウェイトの行ベクトル a' および列ベクトル a の積、群間変動行列 B とカテゴリウェイトの行ベクトル a' および列ベクトル a の積で求められる。

(c) (b)を(a)の偏微分方程式に代入して、カテゴリウェイト a を固有ベクトル、相関比 η^2 を固有値とした行列 $T'B$ の以下の固有方程式を得る。

$$\text{固有方程式: } T^{-1} B a = \lambda a$$

(d) アンケート回答のダミー変数データ x_{jk} から行列 $T'B$ を求めて(c)の固有方程式に代入。固有値 λ (=相関比 η^2)と固有ベクトル(=カテゴリウェイト a)を求める。事前処理として以下を行う。

- ・相関比 η^2 は偏差(ダミー変数データと全体平均および群別平均との偏差)から構成されており、サンプルスコアの値は「差」の相対的な意味を表せばよい。従って今回は、各説明変数の末尾のカテゴリウェイトを0に固定する。つまりモデル式から末尾カテゴリを除外する。

- ・相関比最大の条件からは、サンプルスコアの各項の値であるカテゴリウェイトの比しか求まらない(カテゴリウェイト値の大きさに任意性がある)ため、サンプルスコアの値を標準化する(サンプルスコア \hat{y} の分散を1とする)

(e) (d)の固有値および固有ベクトルを算出する手法としてプログラミング言語であるPythonのnumpyライブラリのlinalg.eig関数を使用する。また、求めた固有値および固有ベクトルよりカテゴリウェイト a を決定し、レンジを算出し見える化を行う。使用する機能としてnumpyライブラリと併せてmatplotlibライブラリを使用する。

(f) (e)で求めたカテゴリウェイト a のレンジ値により、説明変数(アンケート項目)

の重要度を評価する

(2) 対象となるアンケート回答データと解析結果

分析対象のアンケート回答のデータ情報は有効回答者数(レコード数)1738人、アンケート項目(説明変数)62項目、項目選択数(カテゴリ数)424個、である。アンケートのデータ情報を以下表3に示す。表3には、以降記載している各分析結果で説明変数を選択した結果も載せている。ここで、アンケート項目を説明変数、アンケート回答項目の選択項目をカテゴリと定義する。

表3 分析対象のアンケート(選択式アンケート)回答結果の情報(分析前後)

	レコード数 (有効回答者数)	アンケート項目 (説明変数)	項目選択数 (カテゴリ数)
数量化Ⅱ類分析前	1738	62	424
数量化Ⅱ類分析後	1738	50	378
相関分析後	1738	41	313

本アンケート回答で、数量化2類で対象とする群は「住み心地が良い群」と「住み心地が悪い群」の2群である。下記図3に示すアンケート項目回答のうち、選択番号1,2を「住み心地が良い群」、選択番号3,4,5,6を「住み心地が悪い群」として群分けを行った。

<p>Q1 あなたは、xxx町の住み心地についてどう思いますか?</p> <p>1.とても住みよい 2.まあまあ住みよい 3.どちらとも言えない 4.やや住みにくい 5.とても住みにくい 6.未回答</p>

図3 自治体が実施した選択式アンケートのQ1(住み心地)

上記群分けに応じて、目的変数を「住み心地の良し悪し」(Q1の回答結果)とした。このとき、

「住み心地」に寄与するアンケート項目(特徴量)を選択するために、目的変数に対する説明変数の重要度である説明変数のレンジを評価した。数量化Ⅱ類におけるレンジとは、2群の相関比を最大にするようにカテゴリウェイト(説明変数の係数いわゆる重み)を算出し、アンケート項目のカテゴリウェイトの最大値から最小値を引いた値である。レンジの閾値を0.15として、値が閾値以下の説明変数を削除した(アンケート項目(説明変数)は12個、項目選択数(カテゴリ数)は46個削除)。その結果、アンケート回答のデータ情報は、アンケート項目(説明変数)は50個、項目選択数(カテゴリ数)は378個となった。(表3参照)

算出した各アンケート項目(特徴量)のレンジに関して、pythonのグラフ描写ライブラリであるmatplotlibでその値の大きさが上位21を図4のグラフに示す。

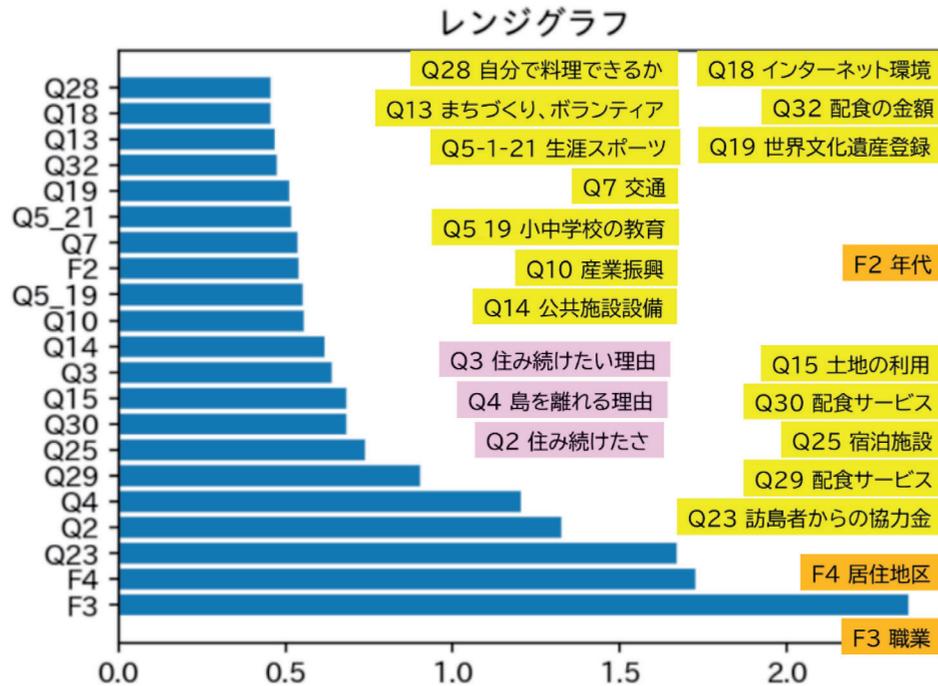


図4 カテゴリウェイトのレンジ値ランキング上位 21

本プロセスの解析結果および評価内容を以下に纏める。

図4の通り、レンジランキング1位は職業（F3）、2位は居住地区（F4）であり、住心地を左右する上で職業、居住地区が重要であることがわかる。職業に関して「農業」のカテゴリウェイトの値が絶対値（マイナス）で最大で「住み心地」に影響している。また、居住地区によって「全員が住み心地が良い」「10%が住み心地が悪い」など意識が異なる。3位は訪島者からの協力金（Q23）である。このポイントでアンケート回答の自由記述を眺めたところ、世界文化遺産に認定された環境を島としてどう利用するかが、住民の関心事の1部であることが認識できた。

特徴量選択の精度は最終的に主成分分析の累積寄与率にて評価できる。この寄与率に影響する要因として本プロセスでの特徴量選択結果があると考えられる。この特徴量選択結果の精度向上が課題である。課題のポイントを以下に示す。

(a) カテゴリウェイトが目的変数の「住み心地良い」に効いているカテゴリ検証

レンジにより目的変数に影響が高いアンケート項目は把握できたが、住み心地が良い／悪いのどちらに影響があるかは各々のカテゴリと目的変数のクロス分析が必要である。

(b) レンジの閾値のチューニングの試行錯誤が必要である。現状は正規分布の3σ外の比率を参考にして、これよりより低めに設定している。

3.1.2 相関分析（クラメール連関係数）

上記数値化Ⅱ類では目的変数の「住み心地」に対して重要度が高いアンケート項目（特

微量)を選択した。さらに特徴量の説明力を上げて、後述の機械学習モデルにおける予測精度を高めるため多重共線性の排除を目的として、相関分析を活用して、相関の高い説明変数を集約した。相関分析の方法は質的変数間の相関の指標であるクラメール連関係数を利用した。クラメール連関係数の一般的、経験的な基準として非常に強い関連性があるとされる0.5以上の説明変数を削除した。表4にクラメール連関係数の強弱基準を示す。

表4 クラメール連関係数の強弱基準

0.50 以上	非常に強い関連性がある
0.25 以上 0.50 未満	関連性がある
0.10 以上 0.25 未満	弱い関連性がある
0.10 未満	関連性がない

クラメール連関係数が0.5以上の64個の2つのカテゴリの組み合わせから、組み合わせの片方を無作為に削除する要領で、9個の説明変数を削除した。この削除により相関分析後は、説明変数が41個、カテゴリ数が313個になった。(表3参照)

相関係数が高かった主な説明変数のペアは「生涯学習」と「生涯スポーツ」(0.806)、「文化・コミュニティ活動」と「生涯スポーツ」(0.680)、「歴史・文化や自然景観など、町の資源活用」と「緑地や海岸など、自然景観の保全」(0.656)、「文化財や町並みの保全」と「文化コミュニティ活動」(0.656)などであった。どちらを削除するかは基準としては、他の説明変数との相関を基準としたが、目的変数との相関を条件とした説明変数の削除基準の確立が今後の課題である。

因みに「生涯学習」と「生涯スポーツ」に関して目的変数との関係を見ると、二つとも目的変数「住み心地」との間のクラメール連関係数は0.25未満で、住み心地との関連性は少ない。娯楽施設などを作るときは、学習とスポーツ両方取り組む人が多く、学習とスポーツ両方を兼ね備えた施設が望ましいと思われる。

3.2 アンケート自由記述回答の解析(テキストマイニング)

主成分分析における「新住民価値」掘り起こしのためのアンケート文字回答の特徴語選択を行う。選択した特徴語を特徴量として選択・数量化し、3.1で選択した重要度が高いアンケート項目からの特徴量とマージした両方の特徴量を選択する。アンケートから特徴量を抽出する上で、アンケート実施側が用意した尺度からだけでなく、アンケート自由記述回答のような回答者の視点による意見から特徴量を抽出することで、より回答者全体の意向を汲み取れると考える。そこで、主成分分析にかけるシビックプライド醸成に寄与する特徴量として、アンケート項目選択回答データと自由記述回答のデータの両方を用いる。その後「住み心地」を目的変数とした機械学習モデルに対して上記の両方の特徴量を入力し、機械学習を実行する。実行結果、最終的に主成分分析に入力する特徴量を最終選択する流れとなる。

以下に、テキストマイニングを適用したアンケート自由記述回答データからの特徴量抽

出の概要を示す。

アンケート自由記述回答データから抽出する特徴量は、回答者が記述した文書の単語で特徴的な語(特徴語)とする。特徴語の抽出方法としては、回答者一人あたり1文書とする自由記述回答データを形態素解析し単語数を集計し、形態素解析・単語数集計データからTF-IDF値を算出した後、TF-IDFの高いランキングで特徴語を選択して特徴量として数値化する。

記述データから特徴語を抜き出すにはTF-IDFという指標を利用する。

TF-IDF(Term Frequency - Inverse Document Frequency)とは文書群について、単語がどのくらい特徴的かを表す指標であり、TFとIDFの積である。TFすなわち単語の出現頻度はそれぞれの文書中にその単語が出てくる頻度であり、IDFすなわち逆文書頻度は全体の文書のうち、その単語を含む文書の程度の逆数であり、いわばレア度である。TF-IDFの計算対象単語を*t*とすると以下の式になる。

$$TF = \frac{\text{単語 } t \text{ の出現回数}}{\text{文書内の総単語数}}$$

$$IDF = -\log \frac{\text{単語 } t \text{ を含む文書の数}}{\text{総文書数}}$$

$$= \log \frac{\text{総文書数}}{\text{単語 } t \text{ を含む文書の数}}$$

TF-IDFを計算し特徴語を抽出する前に回答記述データを形態素解析し、形態素を抽出する必要がある。形態素解析にはKH coderという計量テキスト分析またはテキストマイニングのためのフリーソフトウェアを用いた。KH coderに全回答者の記述データを入力し、形態素解析した後、KH coderの機能で単語ごとに単語出現数を示した表を出力した。上記のTF-IDFの式に従い以下、KH coderで出力した表に対して図5のようにTF-IDFを計算した。

単語2のTF-IDFの算出例

回答者ID	文書内単語数	単語1	単語2	.....	単語2903	単語2904
1	10	0	2	.....	1	3
2	0	0	0	.....	0	0
3	32	1	3	.....	0	1
⋮	0	0	0	.....	0	0
1737	0	0	0	.....	0	0
1738	17	1	0	.....	1	0

$$TF = \frac{2}{10} = \frac{1}{5} \quad IDF = \log \frac{1738}{2} = 6.767343125265392$$

$$TF - IDF = TF \times IDF$$

$$= 1/5 \times 6.767343$$

$$= 1.353468$$

単語2を使用した回答者の数

図5 TF-IDFの計算例

回答者ごとの1文書に対して、形態素解析で抽出した単語ごとに TF-IDF の値を求める。例えば図5に示す回答者IDが1の回答者の回答中に出現する「単語2」に関して、TFは回答者1の回答文書内の「総単語数(10)」に対する「単語2の出現回数(2)」の割合となり、IDFは「総文書数(1738)」を「単語2の出現回数(2)」で割った値の対数値となる。

上記で算出した回答者ごと単語ごとの TF-IDF の値に関して、合計値と分散値を求め合計値のトップ50、分散値のトップ50の単語を重複排除して76個の単語(特徴語)を選択した。選択語の一覧を図6、選択方法を図7に示す。

ない.1 する 高血圧 回答 ない 円 タクシー 思う 糖尿 ある 塩 わかる 小児科 カロリー 減 なる ほしい.1
町 高齢 できる いる 行く 子供 小値賃 人 増加 もっと 子ども 多い 前 人口 参加 制限 観光
出来る 施設 町民 分かる 医療 行う 賃金 人材 進学 計画 減 保全 ナイ 流れ 中途半端
しかた DM 任せる なんとも 環境 特に 身体 食事 IT 悪化 すべて 転勤 企業 誘致 葬儀 予備 納税
ふるさと 船 用事 まかなう クラウドファンディング 住宅 血糖 整備 訪れる 抜 余裕

図6 選択語一覧

回答者ID	文書内単語数	単語1	単語2	.....	単語2903	単語2904
1	10	0	1.3534	.....	0.1317	0.0439
2	0	0	0	.....	0	0
3	32	0.8321	0.0201	.....	0	1.1203
⋮	0	0	0	.....	0	0
1737	0	0	0	.....	0	0
1738	17	0.6274	0	.....	0.2452	0

列ごとに合計、分散を算出し、降順に並べ替える。

合計と分散の大きさ上位50語を特徴語とする。

和top50 and 分散top50 : 24個

和top50 or 分散top50 : $26 \times 2 = 52$, $52 + 24 = 76$ 個

特徴語 : 76単語

図7 特徴語選択プロセス

数量化の手法としてダミー変数を適用する。つまり選択した76個の特徴語を説明変数(特徴語)として回答者ごとに、各特徴語のカラムに対して回答者の文書に各特徴語が出現する場合「1」、出現しない場合「0」を記録する。

選択した76個の特徴語の内容を見てみると、健康/医療に関する懸念や不安に関する語(回答)が多くみられた(「高血圧」「小児科」「糖尿」「カロリー」など)。また、交通や生活インフラに関する語(回答)も多かった(「タクシー」「施設」「環境」など)。生活するための交通手段や環境に関する意見や不満が散見される。特にタクシーが存在しないことへの言及回答が多かった。

特徴語選択の精度は最終的に主成分分析の累積寄与率にて評価できる。この寄与率に影響する要素として、特徴語の選択方法(基準、数、自治体を特徴付けない語の排除など)、数量化の方法などが想定できる。特に、今回の検証において主成分分析に入力する特徴語として、テキストマイニングで抽出した特徴語がほとんど選択されなかった、ダミー変数を活用したことで、特徴語の重みが低くなったことが考えられる。数量化の方法として、ダミー変数の代わりに TF-IDF 値を使うなどの方法の検討余地がある。

4. 機械学習モデルの適用と精度評価 (主成分分析のための特徴量選択)

主成分分析で導出する主成分に関して、「住み心地」を良くするための潜在的なテーマを導き出す目的であることから、主成分分析に入力する特徴量はアンケート項目「住み心地」の回答に対して強い影響度がある(重要度が大きい)変数になっていることが必要であると考えられる。重要度が大きい特徴量を選択するアプローチとして3.1 および 3.2 で選択した特徴量を入力、目的変数を「住み心地の良し悪し」(Q1 の回答結果)として、「住み心地」を予測する機械学習モデルを構築・実行・精度評価を行う。本モデルの精度を高めた後、決定木のアンサンブル手法で用いられる feature importance 機能 (scikit-learn ライブラリ) などを活用して、特徴量の重要度を評価し、主成分分析に入力する特徴量を選択 [2 次選択] する。以下に実施したプロセスの概要を示す。

(a) 学習および検証データの作成

3.1 および 3.2 で作成した、アンケート項目選択データと自由記述回答データを一つのデータに纏めて機械学習モデルに入力する特徴量 [1 次選択] とした。特徴量は 312 変数でありダミー変数にて数値化した。特徴量の例を図 8 に示す。目的変数はアンケート Q1 の回答結果から、「住み心地が良い」: 1、「住み心地が悪い」: 0 の 2 値の数値データとしている。つまり 2 値分類の予測モデルを構築した。学習・検証データは、ホールドアウト法を適用して生成した。

	Q1	F2_15歳~19歳	F2_20歳代~30歳代	F2_40歳代~50歳代	F2_60歳代	F2_70歳代	F2_80歳代	F2_90歳以上	F2_無記載	F4_中村脚	...	ふるさと	船	周車	まかなう	クラウドファンディング	自宅	血糖	扶	余福	減
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...
1733	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1734	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1735	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1736	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1737	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図 8 入力した特徴量の例

(b) モデルの選択と精度評価

「住み心地」回答の予測を行うモデルを構築し、学習・予測・精度評価およびモデル精度の向上を行った。PyCaret という自動機械学習ライブラリを用いて、自動で機械学習モデルの精度評価を行った。PyCaret は、python のオープンソースのローコード機械学習ライブラリであり、仮説から考察までのサイクルタイムを短縮することを目的とする。また、主要な学習モデルの精度を比較、精度が高い順に並べてくれる (ランキングは pycaret が自動で出力)。さらに、accuracy や f 値、適合率などの指標の % が大きい順に自動でソートしてくれる。今回説明変数から「Q1(住み心地)」を分類する上で、PyCaret が自動選択した最も精度が高いモデルはランダムフォレストであり、accuracy (正解率)、適合率、再現率、f 値、AUC 共に 80% を超える精度を確認できた。図 9 に PyCaret が出力したモデルのランキング例を示す。

	Model	Accuracy	AUC	Recall	Prec.	F1	Kappa	MCC	TT (Sec)
rf	Random Forest Classifier	0.8018	0.8628	0.9239	0.8056	0.8602	0.5247	0.5419	0.557
ada	Ada Boost Classifier	0.7961	0.8421	0.8814	0.8227	0.8502	0.5311	0.5377	0.224
et	Extra Trees Classifier	0.7952	0.8578	0.9027	0.8098	0.8532	0.5173	0.5281	0.562
lightgbm	Light Gradient Boosting Machine	0.7944	0.8544	0.8852	0.8184	0.8501	0.5239	0.5299	0.215
lr	Logistic Regression	0.7903	0.8290	0.8665	0.8247	0.8446	0.5220	0.5254	0.465
gbc	Gradient Boosting Classifier	0.7895	0.8451	0.8815	0.8147	0.8465	0.5128	0.5182	0.632
ridge	Ridge Classifier	0.7771	0.0000	0.8540	0.8164	0.8341	0.4938	0.4972	0.033
lda	Linear Discriminant Analysis	0.7688	0.8067	0.8465	0.8116	0.8277	0.4754	0.4794	0.143
svm	SVM - Linear Kernel	0.7624	0.0000	0.8364	0.8198	0.8206	0.4587	0.4782	0.064
knn	K Neighbors Classifier	0.7393	0.7669	0.8404	0.7822	0.8097	0.3972	0.4012	0.240
dt	Decision Tree Classifier	0.7196	0.6930	0.7769	0.7942	0.7850	0.3819	0.3831	0.048
dummy	Dummy Classifier	0.6595	0.5000	1.0000	0.6595	0.7948	0.0000	0.0000	0.022
nb	Naive Bayes	0.5535	0.7574	0.3916	0.8530	0.5346	0.2069	0.2678	0.030
qda	Quadratic Discriminant Analysis	0.3454	0.4914	0.0337	0.5848	0.0630	-0.0119	-0.0386	0.131

図9 PyCaret が出力したモデルのランキング例

(c) 特徴量の重要度評価と選択

ランダムフォレストの feature_importance 機能を使い、モデル学習・予測・精度評価後に (sklearn.ensemble.RandomForestClassifier における feature_importances_) 各特徴量の重要度を評価した。feature_importance は、決定木のアンサンブル手法において特徴量の重要度が数値で表され、特徴量選択などに用いられる。「どの特徴量がどれくらい重要か」を実数で表したものである。本機能を使用して出力した特徴量の重要度が 0.004 以上の 49 個を主成分分析へ入力する特徴量として選択した [2 次選択]。主な重要度ランキングを図 10 (数値 feature_importance の値) に示す。

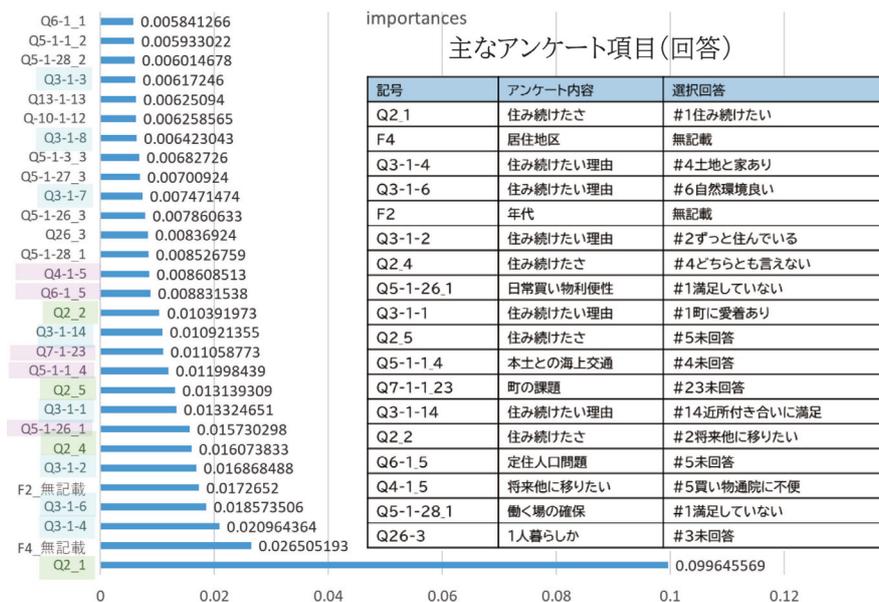


図 10 主な重要度ランキング (feature_importance)

機械学習のモデルに入力した特徴量は 389 個(数量化Ⅱ類+相関分析で選択した特徴量: 313 個、テキストマイニングで選択した特徴量: 76 個)であり、機械学習を実行し上記の重要度を評価した結果、主成分分析に入力する特徴量として 49 個のカテゴリ (アンケート項目回答) が含まれる説明変数 (アンケート項目) を選択した。

「Q1 住み心地」の予測に対して、重要度が高いアンケート項目回答は、居住地区、年代の他に、「Q2 住み続けたさ」「Q3 住み続けたい理由」が上位を占めるのは想定通りであるが、その他「Q5-1-26_1」(日常の買い物が不便)、「Q5-1-28_1」(働く場の確保が不満)、「Q4-1_5」(買い物通院に不便) が上位にランキングされており、生活基盤 (交通、経済的基盤) の充実が住民の住み心地に大きく影響していることが判る。また、アンケート回答無記載、未回答の項目の重要度が高い (F2 年代、F4 居住地区など) 結果に関して、回答者の年代と居住地区を軸にした「住み心地」の住民意識を深掘りする必要がある。また、各特徴量の予測値への影響を測る PDP(Partial Dependent Plot: Scikit-learn のライブラリ) を適用した影響度の深掘りも試す余地があると考ええる。

5. 新住民価値の掘り起こし (主成分分析)

(1) 主成分の算出

Python のライブラリである scikit-learn のクラス `sklearn.decomposition.PCA()` にて主成分分析を行った。第 1 ~ 10 主成分を算出した。

前述のように、主成分分析は軸にデータの分散を射影し、分散を最大化するように軸 (主成分) を決定する。この分散の最大化問題は、式を変形していき、ラグランジュ未定乗数法などを経て、分散共分散行列の固有値問題に帰着する。固有ベクトルが主成分である。

58 種類の特徴量 (機械学習の結果から一部年代に関する特徴量を追加)、1738 次元の標準化されたアンケートデータに対して、主成分分析を行った。第二主成分までの累積寄与度は 0.11560645 である。図 11 に算出した第 10 主成分までの累積寄与率を示す。

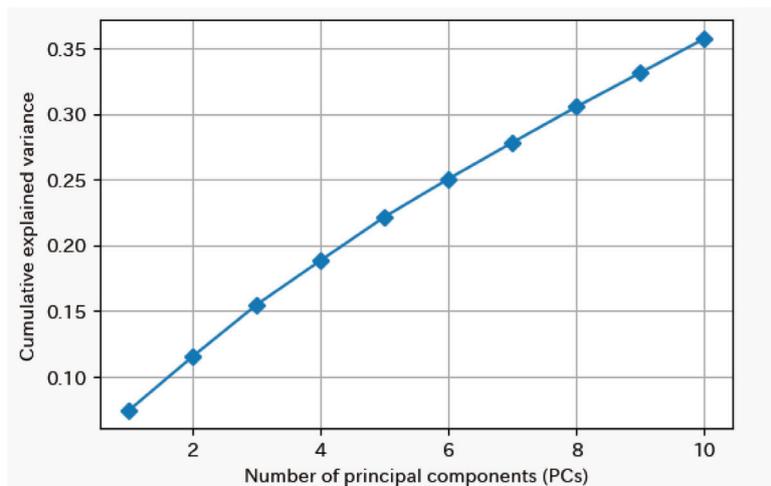


図 11 算出した第 1 ~ 10 主成分の累積寄与率

(2) 算出主成分の意味付け

今回第1、第2主成分の意味付けを行いその内容に応じて、本年度の自治体アンケートにアンケート項目を追加する。追加アンケート回答結果を確認した上で、今回の主成分分析により導出した潜在的な変数の意味付けの検証を実施する。

主成分の評価、意味づけの方法として、主成分負荷量と主成分得点に着目する。主成分負荷量は正負、絶対値の大きさによって主成分得点への影響度が異なる。上記分散共分散行列の固有ベクトルの値に相当する主成分負荷量を第1主成分 (pc1) および第2主成分 (pc2) の2次元座標にプロットした (図12)。さらに本グラフに pc1、pc2 の意味付けを併せて示す。意味付けの内容は後述する。主成分得点は図13のように PC1 と PC2 の2次元グラフにプロットし、その点が目的変数のどの値に属しているかを表示させることで、各回答者が主成分の軸上で、どこに位置しているかを把握することができる。

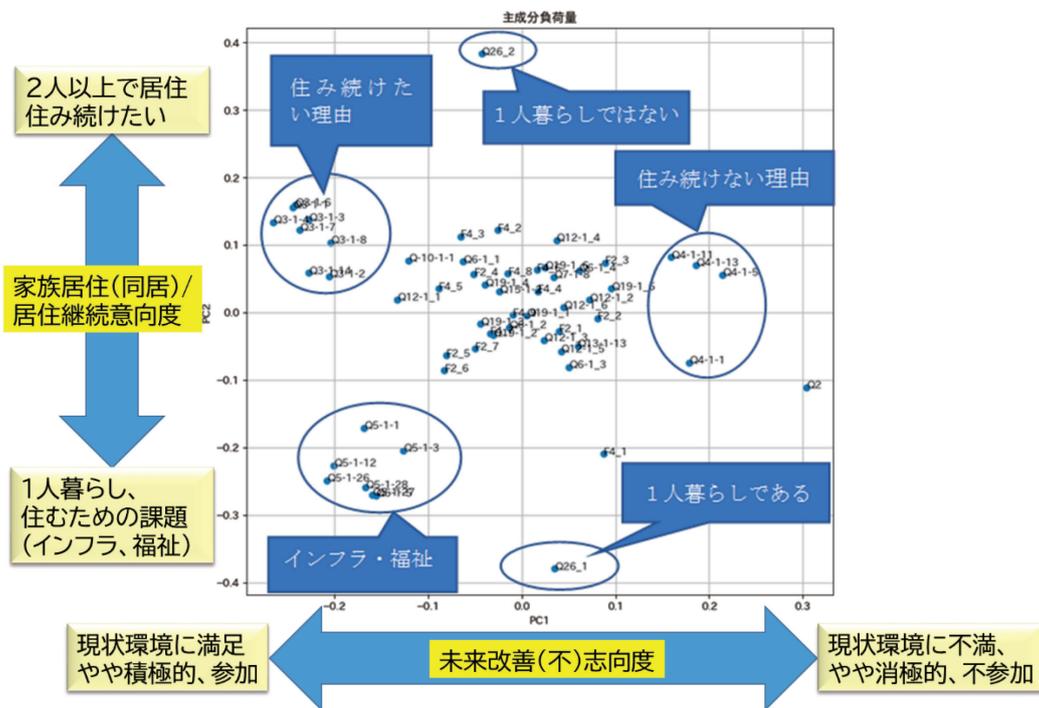


図12 主成分得点の分布

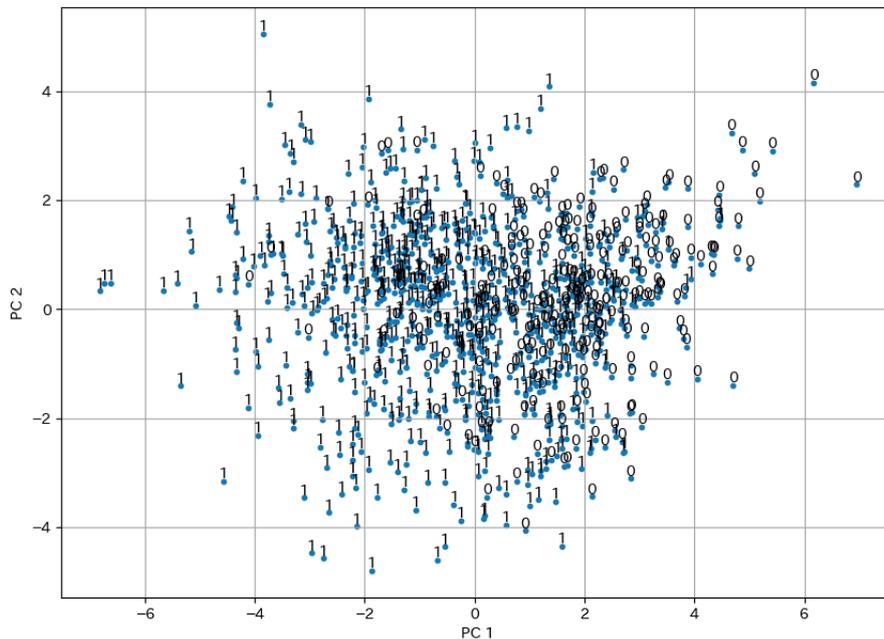


図 13 主成分得点をプロットした 2 次元グラフ

(a) 第 1 主成分についての意味付け

①主成分負荷量の傾向

正の方向に住み続けない理由の項目が集まっている。住み続けない理由は「島外への買い物や通院に不便だから」、「昔からの風習・慣習が負担だから」、「福祉・保険・医療などの生活支援サービスに不満があるから」などであるが、やむを得ず小値賀町を離れるような項目は存在しなかった。また、主成分負荷量が 6 番目に大きい(絶対値は相対的に小さい)項目で「世界文化遺産登録の利活用などに期待することはあるか?」というものに対して、「特に期待するものはない」の選択項目があった。

負の方向には住み続けたい理由の項目とインフラ・福祉に関する項目が集まっている。住み続けたい理由の項目はいずれも、やむを得ず住み続けるものではなく、何かしら住み続けたい因子があることが読み取れる。主成分得点を見ると、負の方向に住み心地が良いと答えた人が集まっていることがわかる。インフラ・福祉・イベント・行事なども負の方向に集まっていることから、「住み続けたい」かつ「住み心地が良い」と答えた人々がこれらに関心があることが分かる。

②意味付けのまとめ

第 1 主成分の意味： 未来改善(不)志向度

[主成分負荷量(正)の方向]

- ・現状の生活環境に不満(インフラ・福祉などに不満あり、住み心地も悪く住み続けたくない)
- ・まちづくり参加意欲が小さく、やや消極的(まちづくり(インフラ・福祉)には関心がない)

- ・人口・就業・文化遺産活用に一部課題提起あり
- ・年代（10～30代、40～50代が主）、地域特性あり

[主成分負荷量（負）の方向]

- ・現状の生活環境に満足（町に愛着もあり、人間関係も良好で、住み心地も良く住み続けたい）
- ・まちづくり参加意欲が大きく、積極的（まちづくり（インフラ・福祉・コミュニティ・未来の生活環境）に関心があり、改善の期待または満足の意向）
- ・年代（60～90代が主）、地域特性あり

③主成分の意味付けからの考察（自治体施策の提案ポイント）

若い世代の積極性を提起するイベントなどの企画により、ベテラン世代との世代交代を図るきっかけづくりが重要と思われる。また、生活環境に関しては、医療の充実や交通・生活物資供給インフラの充実が急務であると思われる。

(b) 第2主成分についての意味付け

①主成分負荷量の傾向

第2主成分はインフラ・福祉と一人暮らしである項目が負の方向に位置し、一人暮らしでない項目と住み続けたい項目が正の方向に位置している。

②意味付けのまとめ

第2主成分の意味： 家族と一緒に住み続けたい度

[主成分負荷量（正）の方向]

- ・一人暮らしでない
- ・住み続けたい意向
- ・年代（40～50代が主）、地域特性あり

[主成分負荷量（負）の方向]

- ・一人暮らし
- ・インフラ・福祉が重要

③主成分の意味付けからの考察（自治体施策の提案ポイント）

家族と一緒に生活する生活・経済的基盤の充実の優先度を上げることが必要と想定できる。また、1人暮らしの生活に困らない（自治体サービス、医療ネットワーク）インフラや潤いをもたらす環境（趣味・憩い・文化的活動などのコミュニティ）も重要であると考えられる。

(3) 分析精度向上のための対策

今回の主成分分析の課題として、第2主成分までの累積寄与率が低い（11.6%）ことが挙げられる。主成分の寄与率を向上させるには、特徴量の選択方法を改善する必要があると考える。以下に、特徴量の選択方式の改善案を纏める。

(a) 数量化Ⅱ類：

- ・カテゴリウエイトの目的変数への効き方を評価した選択（住み心地が良いサンプルスコアへの寄与の度合いが高い説明変数を選択する）
- ・説明変数を選択するためのレンジ閾値のチューニング
- ・別モデルを用いた検証との比較評価を行う。例えば回帰分析モデルの回帰係数で評価する。

(b) 相関分析：

相関分析では、相関が高い2変数を見無作為に片方削除する方法ではなく、目的変数とのクラメール連関係数が高い変数を削除する。

(c) テキストマイニング：

- ・特徴語のデータの数量化において、ダミー変数を使わず TF-IDF の値を使用する。
- ・特徴語の選択方法の見直し（基準、数、自治体を特徴付けない語の排除）

(d) 機械学習：

- ・検証データの分割法を交差検証法にする
- ・機械学習の不均衡データにより精度が低下する問題をランダムサンプリングなどの手法で改善する。
- ・重要度算定方法を変更する（PDP(Partial Dependent Plot) などの活用）

6. 新住民価値の検証

主成分分析で導出した主成分の意味付けの検証を行うにあたり、追加したアンケートの設問の概要を以下に示す。追加対象のアンケート設問は、自治体における 2022 年度の住民アンケートの一部として反映させて頂いた。本住民アンケート結果により導出主成分の妥当性検証を実施予定である。

(a) 主成分の意味付けからの設問

- ・まちづくりへの参加意欲・自治体のまちづくりイベントに積極的 / 消極的とその理由
- ・住民自身のまちづくりイベントに関して参加する / 参加しないとその理由
- ・今後小値賀町が発展（人口増加、生活インフラ充実、産業振興）するためのテーマの問い

(b) 主成分分析の時に明確になった寄与率が高いアンケート項目

買い物 / 交通の利便性改善、福祉対策、働く場の確保、まちづくりへの住民参加、定住人口問題、世界文化遺産の利活用、生活コミュニティ など

(c) 機械学習にて重要度が高いアンケート項目

日常での買い物の利便性、本土との海上交通、定住人口問題、働く場の確保 など

7. おわりに

今回、2018年度住民アンケート回答結果より、「住み心地」を良くするための特徴量（アンケート項目回答）を入力し主成分分析を行い潜在的な住民価値に繋がる主成分を導出・意味付けを行い、その検証のためのアンケート設問追加を実施した。

各主成分の寄与率は低い値であり、寄与率向上の対策、対策後の主成分の意味付けと検証がさらに必要であると認識する。但し、アンケート回答からの潜在的な住民意識の見える化のためのプロセスのパターン例を構築することができたと考える。

今後の研究として、上記主成分導出の精度向上の他に、発掘した潜在的な変数の「住み心地」が良いことに対する重要度の評価、そして重要度が高い潜在的な変数が「正」になることに対して重要なアンケート項目を明確にすることを計画する。重要なアンケート項目から住民意識を高める居住環境条件を明確にし、価値がある自治体施策に繋げていくことを目的とする。

参考文献

- [1] 読売広告都市生活研究局、「シビックプライド - 都市のコミュニケーションをデザインする」.
- [2] 井口達雄 講義, 数学解析第1・講義ノート5平成30年度5月: https://www.math.keio.ac.jp/~iguchi/Lectures/pdf/2019/Note_MA_5.pdf.
- [3] 時弘哲治、「微積分」、東京大学工学教程.
- [4] 菅 民郎, 藤越 康祝 (著): 質的データの判別分析 数量化2類.
- [5] 佐藤浩輔: 島根大学人間科学部 2019.07.13, 応用心理学研究 I , テキストマイニング講義資料, <https://www.slideshare.net/cos039840935/ss-155407947>.
- [6] 相澤彰子、「語と文書の共起に基づく特徴度の数量的表現について」、情報処理学会論文誌, Vol.41, No.12, pp.3332-3343.
- [7] Thomas M.Cover, Joy A.Thomas、「情報理論 - 基礎と広がり -」.
- [8] 涌井義之他、「初歩からしっかり学ぶ 実習多変量解析入門」、技術評論社(2011年12月).
- [9] 塚本邦尊他、「東京大学のデータサイエンティスト育成講座」、マイナビ出版(2019年3月).
- [10] 岡崎 直観: 機械学習帳, <https://chokkan.github.io/mlnote/unsupervised/04pca2.html#equation-eq-pca-lambdas>

山本 裕 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 准教授
高田晃希 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 2年生
黒羽 晟 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 2年生
橋本沙也加 株式会社百代 代表取締役
橋本尚子 株式会社百代
岡田ゆかり 株式会社百代

【調査報告】

射影変換深層学習による物体認識の調査

大関和夫・上條浩一

Research of Recognizing Objects with Projective Transform Deep-Learning

Kazuo Ohzeki and Koichi Kamijo

Abstract: An object with a fixed shape, such as a car (rigid body), looks different in shape because the camera looks in different directions. Therefore, even a rigid body undergoes a large change in shape. This is the effect of parallax distortion on object recognition. In vehicle recognition in autonomous driving, shape recognition (identification) of a vehicle is input from a vehicle on the road. In the existing research by the authors, we have examined deep learning by putting vehicle images with different shapes at the shooting position into the same learning data class. Consider a method that uses the same shape as learning data for the same object. Equivariant learning based on a single shape is currently being researched for 'only congruent transformations' of rotation and translation. We are studying the possibility of 'projective transformation learning' that extends this to 'cases with perspective distortion' caused by shape changes seen from different directions. In this research report, we analyze papers related to the above research and attempt to explore future directions.

Keywords: Shape Space, Rotation, Equivariant, CNN, Riemann

1. まえがき

深層学習では、複数の種類の物体の画像を多数集めて学習データとすれば、各物体を識別する認識器を生成できる。しかしその識別率を向上させる手法として、データ量を増やすことが重要とされており、畳み込み演算とプーリングという主たる演算の改良は進んでいない。本稿では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いる深層学習の改良を目指す調査を行う。自動運転における車両認識においては、車両の形状認識（識別）が通常道路上にある車両を入力とするため、一般的な物体が任意の3D空間内の位置にあるのに比べ、変形量が少ない点に着目する。

CNNを用いた深層学習の高性能化として、最近見られるのは、物体が回転したときの変形に対する研究がある。それらの中で、人間や動物のように骨格や羽根の動きで形状が大きく変化するものも、もともとは同一物体であり、人間には認識が可能な物である。これを定式化したものとして、Kendallの形状空間があり、物体の3D空間での移動や回転、動作による形状変化を統合して認識しようとしている。いずれも非線形な変形であるため線形な空間に投影するための個別的な処理が必要で、困難度は高い。

2. 射影歪を含む物体の認識

射影歪を含む物体認識として、本報告では、自動車のような剛体であって、カメラが見込む方向が異なるため、形状が異なって取得される場合を主に想定している。これに対し、筆者等の既存研究では、図1のような撮影状況で異なる形状の車両をまとめて学習データの1種のクラスとして深層学習するという検討を行ってきた。各クラス100枚、合計1000枚の画像で、精度約0.99程度を達成している。より高い精度を達成するためには、定点カメラ撮影を行いデータ数を増強することが考えられる。一方、混在する形状を増やすと曖昧な識別に繋がる可能性があるため、同一の物体に対し1種の形状を学習する方式がある。単一形状を基にした同変学習は、現在回転と平行移動という合同な変換のみに対応するものだが、これを視点の異なる方向から見た形状変化が発生した射影歪にまで拡張する射影変換学習への可能性を検討している。本調査報告は、上記のような研究に関する論文を分析し、今後の方向を探る試みを行っている。



図1 交差点でのカーブ状の道路での車両形状の変化
(東京都新宿区西新宿交差点) (同一車両を3つの位置で合成したもの)

CNNを用いた深層学習の論文は、米国IEEEのCVPR、ICCV、ECCVなどの国際会議、EUのSpringer、Elsevierなど論文誌が先端的である。本報告では、主にCVPRの採択論文を参照し、調査を行う。まず2022年の論文は、2000件以上あり[1]、国内でもwebページ「定

表1 IEEE CVFの発表に現れるキーワードのランキング[1]より

順位	キーワード	割合
1	Transformer	6%
2	Object Detection	5%
3	Self Supervis	4%
4	Adversarial	3%
5	Attention	3%
6	Few Shot	2%
7	Semi Supervised	2%
8	Weakly Supervised	2%
9	Contrastive Learning	2%
10	Point Cloud	2%

点観測」[1]や各種勉強会で検討が実施されている。2022年のキーワードで多いものは、表1に示すように、Transformer（転移学習）、Object Detection（物体検出）、Self Supervis（自己教師あり学習）等が上位にある。

2.1 Rotation があるもの

タイトルに Rotation がある文献について調べる。これは、物体認識で、位置が変化する場合に、平行移動、回転が形状変化に影響があると考えられるからである。深層学習の畳み込み演算とプーリングは、小さい平行移動や回転というアフィン変換された入力に対しニューラルネットワークの係数が追従する事ができる。しかし、平行移動量が大きい場合や、回転角の精度要求が高い場合は、追従できない。また、模様のある背景がある場合は物体だけが回転する場合と、背景ごと回転する場合があります、処理が変わる。

Bao ら [3] は、深層学習の外観ベースの視線推定で驚くべきパフォーマンスが達成されて来たが、ターゲット・ドメイン データの不足とターゲット・ラベルの欠如により、視線推定アルゴリズムを一般化することは依然として困難であることを述べている。この論文では、視線推定における回転一貫性プロパティを利用し、教師なしドメイン適応にて、12.2% から 30.5% のゲインを得ている。既知の視線の顔画像から回転させた複数画像を用意し、学習を行う。ここで、回転に対し一貫性があることを見出している。そこで、新規の入力顔画像を回転させたものとドメイン適合により得た視線の結果として出力する。

Bökman ら [4] は、2D 点群データの回転等分散性（同変性）に関し、任意の連続回転同変関数および順列不変関数を近似できる関数の特定のセットについて説明。この結果に基づいて、2D 点群を処理するための新しいニューラルネットワークアーキテクチャを提案しこれらの対称性を示す関数を近似するための普遍性を証明した。また、同様の等分散特性を維持しながら、2D-2D 対応のセットを indata として受け入れるようにアーキテクチャを拡張する方法も示している。

同変性の簡単な例として、夜空の北斗七星から、北極星への方向を決定するタスクにおいて入力は、ある 2D 座標フレーム内の北斗七星の位置のセットで、点群プロセッサの回転同変性は、夜空（または観測者）が回転する場合、決定された方向が回転することを意味する。

ここで、同変とは、equivariant の訳で、2D 上の平行移動・回転等の移動で、図形の合同性が保たれることを意味している。3D 空間での回転や奥行方向の移動は、形状の変形を伴うため、同変とはならない。同変は、変形の中でも形状変化がない最も基本的な場合であるが、CNN との組み合わせ、計算量の爆発などから、CNN と同変の研究が論文に多数採択されているものと考えられる。

基本問題 ($a = 0^\circ$) ではうまく機能しない。（著者はパラメータ不足のためではないか、と述べているが、違和感が大である。）回転同変および順列不変のニューラルネットワークアーキテクチャに基づくタスクを学習するための基本的なフレームワークを提示している。このアーキテクチャが実際に普遍的であることを証明した。アーキテクチャを変更するいくつかの方法、特に、対応問題に現れる点群のペアに拡張する方法と効率的な計算を実行する方法について述べている。制限については、フレームワークは 2 次元でのみ適用される点である。30~60 度の回転では従来方法より優位であるが、30 度以下では同等で

ある。また 60 度以上は非対応。

Feng ら [5] は、航空画像からの弱教師付きオブジェクト検出 (WSOD: weakly supervised object detection) のタスクに関し、長年にわたり、まだ調査されていない難しい問題の一つと述べている。通常の CNN に基づいて構築された既存の主要な WSOD アプローチは、対応する制約なしでオブジェクトの回転に取り組むように本質的に設計されていないため回転に敏感な (不安定な) オブジェクト検出器が生成されてくる問題を指摘している。この論文では、新しい弱い教師あり学習の分野で回転不変の空中物体検出ネットワーク (RINet) を構築している。方向付けられたオブジェクトに対して自然に回転を認識できるようになっている。具体的には、提案方式の RINet は最初に、予測されたインスタンスから回転されたインスタンスへのラベルの伝播を行い、回転一貫性のある教師データを生成する

RINet は、さまざまな回転知覚を備えたオンライン検出器の改良で実装されている。トレーニング中に、回転一貫性のある教師データ (タグ) を生成し、その間、予測されたインスタンス ラベルを異なる回転知覚ブランチ間で補完的な方法で結合することにより、すべての可能なインスタンスを追跡する。包括的な実験により、提案された RINet が既存のすべての WSOD メソッドよりも優れており、新しい最先端の結果が得られたことが実証されたと述べている。

Chen ら [6] は、回転不変性 (RI) を 3D 深層学習手法に導入する際の最近の進歩に関し、入力において 3D 座標を置き換えることに着目している。この手法は、入力 RI 機能によって失われたグローバル情報を復元することにある。最新の研究では、追加のブロックや複雑なグローバル表現を発生させようとしているが、計算時間がかかる問題があった。この論文では、グローバルな情報損失は未調査のポーズ情報損失の問題に起因することを指摘している。一般的な畳み込みレイヤーは RI 機能間の相対的なポーズをキャプチャできないため、グローバル情報が深いネットワークで階層的に集約されるのを妨げていると考え、相対ポーズに基づいてカーネルを動的に適応させる Pose-ware Rotation Invariant Convolution (つまり PaRI-Conv) を開発した。具体的には、各 PaRI-Conv レイヤーで、軽量の Augmented Point Pair Feature (APPF) が設計され、RI 相対ポーズ情報を完全にエンコードする。次に、因数分解された動的カーネルを合成する。これは、APPF から学習できる共有基底行列と姿勢認識対角行列に分解することで、計算コストとメモリ負荷を削減している。形状の分類とパーツのセグメンテーション・タスクに関する広範な実験により、PaRI-Conv が最先端の RI メソッドを凌駕すると同時に、よりコンパクトで効率的であることが示された。法線を安定軸として座標を入力として直接取得することにより、PaRI-Conv は 93.8% と従来例より、0.1 ポイント高い総合精度 (総合精度、overall accuracy; OA は全画素の何割が正しく分類されたかを示す精度評価指標) を達成している。

Seo ら [7] は、対称性を検出する時、対称性パターンが任意の方向から生じる問題があるが画像から対称パターンを発見することは、画像の反射と回転に応じて一貫して変化する同変特徴表現が有効であると見出している。対称性検出のためのグループ同変畳み込みネットワーク (group-equivariant convolutional network) EquiSym を提案している。これは、反射と回転の二面体グループに関して同変特徴マップを活用している。提案したネットワークは、二面体同変層 (dihedrally-equivariant layers) で構築され、反射軸または回転中

心の空間マップを出力するようにトレーニングされる。実験では、提案方式が LDRS と DENDI というテスト用に対称変換、回転変換して自作したデータセットに対して最先端を達成することを示している。

入力画像がグループ等価エンコーダー Enc に渡された後、反射と回転のグループ等価デコーダーを介し、反射と回転の2系統の CNN で検出が行われる。

Yu ら [8] は、点群データから、方向性、回転、対称性を見出し、物体検出をする。方向と物体切り出しを統合処理したが、精度は、統合せずに単独に処理したほうが良かった。統合したシステム EON を開発したところが特徴で、まだ性能的には進展していない。

回転の同変性は、最近、3D ディープ ラーニング分野で注目されているが回転対称性が独自の空間サポートを持っているという事実を無視し、グローバルな入力回転に関する同変性に焦点を当てている。本論文では、シーンの動きとは無関係に、オブジェクトの境界ボックスがオブジェクトの姿勢に関して同変である必要がある 3D オブジェクト検出を行う。これは、オブジェクトレベルの回転の同変性と呼ばれる新しい望ましい特性を示唆していると述べている。

オブジェクトレベルの回転の同変性を 3D オブジェクト検出器に組み込むには、クロスオブジェクトコンテキスト情報をモデル化しながら、ローカルオブジェクトレベルの空間サポートを使用して同変特徴を抽出するメカニズムが必要で、その目的のために、オブジェクトレベルの同変性を達成するための回転同変サスペンション設計を備えた同変オブジェクト検出ネットワーク (EON) を提案している。EON は、VoteNet や PointRCNN などの最新のポイントクラウドオブジェクト検出器に適用でき、シーンスケールの入力でオブジェクトの回転対称性を活用できる。屋内シーンと自動運転データセットの両方での実験では、EON 設計を既存の最先端の 3D オブジェクト検出器にプラグインすることで大幅な改善が得られることが示されている。

システムは3つのモジュール、バックボーンが点群を処理して高密度のフィーチャセットにする「シードフィーチャ抽出」、空間領域を要約する「領域コンテキスト集約」各地域フィーチャから候補を提案する「OBB (指向性バウンディングボックス) を生成」から成る。この構成を回転同変サスペンション設計と呼んでいる。

Kang ら [9] は、回転した画像を回転する前の画像と同じクラスに属す様にして、データ増強を行い、Leave-One-Out 画像分類と回転画像識別の結合確率を最大化することにより、新しい損失関数を提案している。他の最先端の損失関数と比較し、有効性を確認して

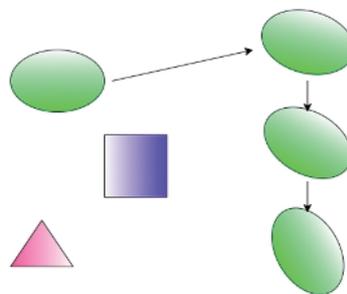


図2 画像から物体を取り出し、回転した画像を生成し、同じクラスに属する様にして、データ増強 (埋め込み) する説明図。文献 [9]Kang の Fig.1 参照。

いる

Zandら[10]は、現在のオブジェクト検出方法は、もともと軸に沿ったバウンディングボックス検出に対応するように設計されているため、自由に回転するオブジェクトを最もよく表す方向ボックスを正確に特定できない。提案手法は、CNNベースのアプローチで、アンカーボックスなどの外部リソースを必要とせずに、複数のスケールレベルで潜在的なピクセル情報を使用する。この方法は、グリッドセル位置でのターゲットオブジェクトのフィーチャの正確な位置と方向をエンコードする。境界ボックスの位置と寸法を回帰する既存の方法とは異なり、提案された方法は、回転した物体の枠と成るバウンディングボックスを含む情報を学習することができる。さらに、回転不変の特徴表現が各スケールに適用され、同様の特徴を共有するためにトレーニングサンプルの面内回転の360度の範囲をカバーするという正則化制約を課している。xView(Lamらの衛星から見た地上の物体のデータベース)およびDOTA(XiaらのDataset for Object deTection in Aerial imagesというデータセット)での評価は、提案された方法が既存の最先端の方法よりも一様にパフォーマンスを向上させることを示している。

Zhangら[11]は、リモートセンシング画像(RSI)の背景の複雑さを課題として取り上げ、機能と最適化の観点からフォアグラウンド(前景)領域の情報を活用することによる回転精密検出器「フォアグラウンド・リファインメント・ネットワーク(ForRDet)」を提案している。粗密2段階方式で、粗い段階では前景コンテキスト表現を集約し、詳細段階で特徴マップ上の前景領域の識別を改善する前景関係モジュール(FRL)を開発。粗い段階(第一段階)から前景アンカーの分類信頼度とローカリゼーション精度を統合する前景アンカーの再重み付け(FRW)損失を設計し、それらの寄与を動的に調整している。前景アンカー強調部、回転オブジェクト検出DOTA、HRSC2016、およびUCAS-AODの3つの公開データセットに関する実験結果は、提案された方法の有効性を示している。

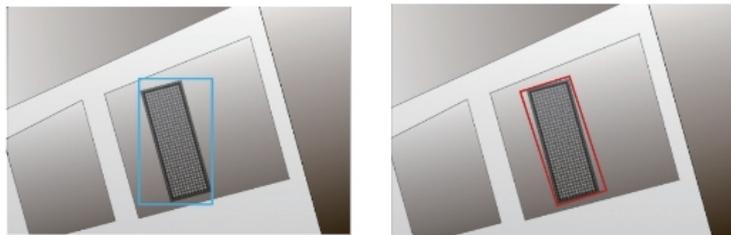


図3 リモートセンシング画像に対する、前景の物体(建物)の切り出し(アンカー)の様子。左:青線の枠が初期の粗い状態、右が、赤線の枠が詳細段階で、回転した枠の近似が得られている。[11]ZhangのFig.3参照。

Cohenら[12]は、Group equivariant Convolutional Neural Networks (G-CNN)について発表している。対称性を利用してサンプルの複雑さを軽減する畳み込みニューラルネットワークの自然な一般化を行う。G-CNNは、通常の畳み込み層よりも大幅に高度な重み共有ができる新しいタイプの層であるG-畳み込みを使用している。G畳み込みは、パラメータの数を増やすことなく、ネットワークの表現力を高められる。グループ畳み込み層は使いやすく、平行移動、反射、回転によって生成される離散グループの計算オーバーヘッドを

無視して実装できる。反転と小さな変換による拡張は、p4 と p4m-CNN の結果を一貫して改善した。(p4 とは、90 度の回転で 4 要素の群ができていていることを指す)

G-CNN は、CIFAR10 およびローテーションされた MNIST で最先端の結果を達成している。回転を組み込んでいるが、離散的ものに限定され、4 種の回転 (90 度単位) の例が示されている。

表 2 Rotation 比較

番号	著者	概要	性能
[3]	Bao	視線推定、回転したサンプルを学習: 回転した学習サンプルを多数生成するのが大変	+12~31%
[4]	Bökman	2D 上での合同図形の回転(同変)と CNN の融合: 点群データなので、背景は考慮不要	30~60 度回転で優位
[5]	Feng	航空画像、回転一貫性のある教師データ (タグ) を生成: 回転不変の情報を CNN に入力	WSOD の範囲で優れる
[6]	R. Chen	回転不変の CNN で、ポーズ情報を法線から取得し入力に加える: ポーズ情報を CNN に与える	精度 93.8% は従来最高の 93.7% を上回る
[7]	Seo	反射 (鏡映) と回転を CNN に組み込んだグループ同変畳み込みネットワーク EquiSym を開発: 対称性と回転角度の 2 面性をグループ化した二面体同変層を開発	最先端と同等
[8]	Yu	3D 検出にオブジェクトレベルの同変性を活用する見込みがある: 点群データの方向データを CNN に送る	途上だが、動作例などが有益
[9]	Kang	回転した画像を回転する前の画像と同じクラスに属す様にする: 回転画像のデータ増強	新しい損失関数で実現
[10]	Zand	回転した物体から位置と方向を検出し学習する: 枠情報は送らず画像から検出する	パフォーマンスが向上
[11]	Zhang	前景を基に回転精密検出を行い、傾いた領域検出を行っている。: コースファイン方式で、背景から注目物体 (前景) を分離	
[12]	Cohen	4 種の回転を組み入れ、群論に対応している	理論面で先行

3. Kendall の形状空間に関する研究

回転や平行移動による物体の視点から見た形状の変化は、剛体の場合に加え、生物のような動いて変形する場合も対象となる。Kendall は物体の認識を生物が形を変えるところまで考慮した。全体を形状空間(Shape Space)と呼び、端点である 3 次元の特徴点(Landmark)の動きを定義して。この理論の解説として、Klingenberg の解説論文 [13] がある。

Paskin ら [14] は、人体、動物などの柔軟に変形する物体形状の同一視、識別に、物体の特徴点 (Landmark) の点群の分布や、接続関係を表現した shape space (形状空間) の枠組みを用い、2D の特徴点から 3D 形状の推定を行った。3D 形状は、2D 画像よりもはるかに多くの情報を提供できる。ただし、3D 形状の取得は、2D 画像の取得と比較して非常に困難または不可能な場合があり、2D 画像から 3D 形状を導出する必要がある。一般に、これは数学的に不適切な設定の問題だが、事前情報を使用して問題の定式化を制約することで解決できる場合がある。単一の単眼 2D 画像から 3D 形状を再構築するために、

Kendall の形状空間に基づく新しいアプローチを提案している。この研究は、絶滅危惧種であるウバザメの摂食行動を研究するためのアプリケーションに始まった。ウバザメは巨大なサイズと移動性のために 3D 形状データを取得することがほぼ不可能であり、摂食行動と生態学の理解を妨げていた。一方、これらの動物の摂食位置の 2D 画像はすぐに入手できる。人間の棒モデルとサメの頭の骨格の両方で、提案アプローチを最先端の形状ベースのアプローチと比較した。トレーニング形状の小さなセットを使用して、Kendall 形状空間アプローチが以前の方法よりも大幅に堅牢であり、妥当な形状になることを示した。

これは、標本がまれであり、したがって利用できるトレーニング形状がほとんどないアプリケーションに好適である。

一般に、オブジェクトの形状は、回転、並進、およびスケールに対して不変であると見なされているため、商構造を持つ非線形空間で値をとる。特に、ランドマーク（特徴点）ベースの表現の場合、この概念はよく知られている Kendall 形状空間を生み出していく形状空間の非ユークリッドの性質は、線形性の仮定に反するだけでなく、グローバルなベクトル空間構造がないため、式

$$X = \sum_{j=1}^n c_j B_j, \quad (2)$$

の代数式を直接適用することを妨げる。それにもかかわらず、(計算) 微分幾何学のフレームワークは、再構成問題内で使用するための ASM (*active shape model*) アプローチを一般化するための豊富なツールセットを提供してくれる。

結果として得られる幾何学的モデルは、制約が自然にエンコードされるため、3D 形状の効率的かつ一貫性のある推定を提供している。以前のアプローチはより低い再投影エラーを達成したが、対応する 3D 形状は、ドメイン固有のさらなる正則化の必要性を示す非生理学的な歪みのような欠陥を示した。たとえば ASM の凸緩和は、基底形状が対称であるにもかかわらず、強い非対称性を発達させていた。対照的に、この Paskin らの幾何学的方法は、ターゲット形状がトレーニング分布と大きく異なる困難な状況でも、高度に生理学的な結果をもたらした。補助的な正則化なしで妥当な補間を行った。これは、推定された形状が、トレーニングデータがまたがる Kendall の形状空間の部分空間に常にあるためである。

三角形の頂点である特徴点と推定三角形の形状との関係が Paskin ら文献 [14] の Fig.1 に示されている。ウバザメ (*basking shark*) のような変形する形状である生物の口を開いた 2D 画像に対する 3D 形状推定結果を、上から見た図、横から見た図を示し、従来の ActiveShapeModel(ASM) による手法より、Kendall の形状空間による 3D モデルが優れていることを述べている。Paskin らの文献 [14] Fig 7 参照。

表 3 Shape Space

番号	著者	概要	性能
[13]	Klingenberg	Kendall の形状区間を歩く感覚で解説	解説のみ
[14]	Paskin	Kendall の手法で、2D 特徴点から 3D 再構成を行った	再構成が従来より良い

5. 同変学習による変形と CNN の融合

Luo ら [15] は、同変理論は、長年の関心事だが複雑すぎるなどの問題があったとの観点で、メッセージパッシング（グラフニューラルネットワーク）スキームに基づき、点群分析の同変量を達成するためのフレームワークを提案している。各ポイントの相対位置をポイントクラウド全体のグローバル・ポーズから切り離すために、各ポイントに方向を導入することで、同変プロパティを取得できることがわかった。したがって、各ポイントの向きを学習するモジュールを使用して、現在のメッセージ・パッシング・ネットワークを拡張した。ポイントの近隣からの情報を集約する前に、ネットワークはポイントの学習した方向に基づいて近隣の座標を変換している。提案されたフレームワークの同変量を示す正式な証明を示した。経験的に、提案された方法だが点群解析と物理モデリングタスクの両方で競争力があることを示している。

Luo らの提案手法では、最初に点群の各点の向きを学習する。情報を集約する前に隣接点の相対座標を投影することにより、モデルはグローバルな回転をうまく分離し、同変性を達成する。回転した点群データから、飛行機その他、室内のテーブル、椅子、ランプなどの識別を行い、各物体ごとに方向を検出し、基準位置、不変形状を確保している。Luo らの文献 [15] Fig.1 参照。

・方向の視覚化

Liu ら [15] は更に、点群分類モデルから学習した方向の2例（Airplane, Chair）を示している。学習した方向がグローバル構造と関連していることがわかる。たとえば、学習により、飛行機の翼と尾翼の最初の方向ベクトルは、翼と尾翼が伸びる方向に向かい、2番目の方向ベクトルは翼に法線方向になっている。さらに、椅子の両前脚の最初の方向ベクトルは一貫して正面方向を向いており、学習した方向が構造上の類似性を認識していることを示している。

この論文では、同変点集合分析のスキームを紹介している。中心的な要素は、情報を集約するときに、点ごとの向きを学習し、学習した向きを使用して近隣座標を投影することだ。広範な実験により、モデルの有効性と一般性を実証している。

提案された方法では、ポイントごとの方向を推定するために追加のサブネットワークが必要となる。これは無視できない計算量のオーバーヘッドであり、向きに対する学習のコストを削減することが重要となる。この方法のもう1つの懸念は、ノイズ耐性だ。学習した向きがノイズの多いデータに対してどの程度脆弱であるかは不明で、これは現実世界の設定では避けられないので、今後の課題としている。

コードは <https://github.com/luost26/Equivariant-OrientedMP> で入手できる。

Musallam ら [16] は、姿勢推定において3Dジオメトリベースの方法では end-to-end を達成することはまだできていないこと、さらに、絶対姿勢回帰は、画像検索との関連性が高いことが述べられている。その結果、従来のCNNによって学習された統計的特徴には、この本質的に幾何学的なタスクを確実に解決するのに十分な幾何学的情報が含まれていないという仮説を出している。この論文では、平行移動と回転の同変CNNがカメラの動きの表現を特徴空間に直接誘導する方法を示している。次に、この幾何学的特性により、イメージプレーン保存変換のグループ全体でトレーニングデータを暗黙的に拡張できること

を示した。したがって、データ集約型の中間表現を学習するよりも、同変特徴を直接学習する方が好ましいと主張している。

包括的な実験的検証により、軽量モデルが標準データセットでの既存のモデルよりも優れていることが実証された。

Musallam らの文献 [16] の Fig.1 に、このアプローチを示されている。方法は、カメラの平面運動 R, t を直接エンコードするジオメトリ認識機能を抽出するために、並進および回転同変畳み込みニューラルネットワークを採用している。またカメラが動いている間、提案された特徴抽出器 F の同変量は、明示的な画像 ($\phi_{R,t}^{(I)}$) と特徴 ($\phi_{R,t}^{(F)}$) の変化の関係をつなげる。このプロパティは、絶対姿勢回帰の問題に対するより効率的なソリューションを提案するために活用される。

・この論文の貢献として、下記が挙げられている。

- (1) 同変 CNN が SE(2) にある平面カメラの動きの表現を特徴空間に直接誘導する方法の定式化。(セクション 4.1) (SE(2) は 2 次元の特殊 Euclidean 群)
- (2) SE(3) にあるカメラの動きを復元するために、SE(2) の同変特徴をどのように活用できるかについて、直感的な説明の提供。(セクション 4.2、SE(3) は 3 次元の特殊 Euclidean 群)
- (3) E-PoseNet と呼ばれる軽量の同変ポーズ回帰モデルの導入。(セクション 5)
- (4) E-PoseNet 広範な実験的評価は、標準データセットでの既存の APR (Absolute Pose Regression) メソッドと比較して、その競争力のあるパフォーマンス。(セクション 6)

この論文には、以下の解説が述べられている。深層学習における同変特徴について。コンピュータービジョンには、手作りの同変機能の設計に関する豊富な歴史がある (たとえば、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)、Oriented フィルター、Steerable フィルター、Rotation-equivariant Fields of Experts (R-FoE)、リー群ベースのフィルター)。深層学習の文献では、畳み込み層は画像シフトに対して同変であることが証明されているが、最大プーリング層は入力画像の小さなシフトに対してのみ不変である。

畳み込み層は本質的に変換と同変だが、CNN によって正確にエンコードされていない入力に関する大量の空間情報がある。より具体的には、ローカルおよびグローバルプーリングが CNN に追加された場合、変換情報を回復不能にし、前述の同変条件が破棄される。

最近の調査では、CNN の多くのニューロンが、同じ基本機能のわずかに変換された (回転などの) バージョンを学習することが示されている。これらは、曲線検出器、高低周波数検出器、線検出器など、初期の視覚で特に一般的だ。

G-CNN をより広い変換グループに拡張する試みが行われている。マラットらは事前定義されたウェーブレットによる散乱変換を使用して、CNN を SE(2) と同変になるように拡張した。ベッカーズらは、また、Bsplines を介して CNN を SE(2) グループと同変になるように拡張した。

Cohen らは、90 度の回転と反転を介して p4m 離散グループと等価なグループ畳み込みネットワークを提案し、分類タスクに対するグループ畳み込みの有効性を実証した。(前記でも紹介済)

最近では、HaiweiChen による 3D 点群解、空中物体検出 (Jiaming)、2D 追跡 (Siamese) などのさまざまなコンピューター・ビジョン・タスクを解決するために、同変機能の使用が探究されている。Esteves らはオブジェクトの相対的な向きを推定するために、2D 画像が

ら球状 CNN 潜在空間への投影と埋め込みを使用することを提案した。同様に、Zhang らは、全方向ローカリゼーションにおけるカメラ姿勢推定の学習に球状 CNN を使用することを提案している。ただし、著者の Musallam らの知る限り、単一の 2D 入力画像の APR のコンテキストでは、同変量の機能はまだ明示的に活用されていないと述べている。

APR パイプラインの特徴抽出部分に同変操作を導入することに重点を置いているが、次の段階（つまり、埋め込み、回帰）には同じプロパティがないため、パイプライン全体の同変が成立しない。提案された APR モデルのもう 1 つの制限は、従来の CNN モデルと比較して、同変 CNN モデルに必要な計算時間が長いことだ。これはトレーニング中のみであり、推論時間は少ない。

この論文では、入力画像に関するより多くの幾何学的情報をエンコードするために、同変な特徴を活用するカメラ ポーズ回帰の問題の新しい方向性を提示した。SE(2)-equivariant 特徴抽出器を使用することにより、モデルは屋外と屋内の両方のベンチマークで既存の方法よりも優れたパフォーマンスを発揮できた。さらに、幾何学的推論に使用される深層学習モデルの同変特性は、絶対姿勢回帰の可能性に到達するための有望な方向性を提供すると結論付けている。

Atzmon ら [17] は、形状空間学習のタスクには、形状のトレーニングセットを、適切な一般化特性を持つ潜在表現空間に対してマッピングすることに注目している。実世界の物体の形状には対称性があり、形状の本質を変えない変換として定義できる。形状空間学習に対称性を組み込む自然な方法は、形状空間へのマッピング（エンコーダー）と形状空間からのマッピング（デコーダー）が対称性に対して同変であることを活かすことである。

この研究論文では、次の 2 つの貢献を導入することにより、エンコーダとデコーダに同変を組み込むためのフレームワークを提示している。

(i) 最近のフレーム平均化 (FA) フレームワークを適応させて、一般的で効率的で最大限に表現力のある同変オートエンコーダーを構築する。トレーニングでは、新しい損失の導入を必要とせず、標準のオートエンコーダー再構成損失のみでよい。

(ii) 関節のある人体など、形状のさまざまな部分に適用された区分的なユークリッド運動に同変なオートエンコーダーを構築する。

著者 Atzmon らの知る限り、この論文は最初の完全に区分的なユークリッドの同変オートエンコーダーの構築であると述べている。フレームワークのトレーニングは簡単である。標準的な再構成損失を使用し、新しい損失を導入する必要はない。著者らのアーキテクチャは、標準（バックボーン）アーキテクチャで構築されており、適切なフレーム平均化を行って同変性を実現しているとのことである。

暗黙的なニューラル表現を使用した剛体形状データセットと、メッシュベースのニューラル ネットワークを使用した多関節形状データセットの両方でフレームワークをテストすると、目に見えないテスト形状への最先端の一般化が示され、関連するベースラインが大幅に改善された。特に、この方法は、目に見えない多関節ポーズへの一般化において大幅な改善を示している。

Atzmon らの文献 [17] の Fig_1 に区分ユークリッドの説明がなされている。メッシュ→メッシュでは、各部分の同変符号化（エンコード）には、同じ ϕ バックボーンが使用される。同様に、各部分の潜在コードの同変復号（デコード）には、同じ ψ バックボーンが使

用される。最後に、最終的な予測は、各パーツの同変出力メッシュの加重合計である。

形状空間を学習することは、目に見えないテスト形状にうまく一般化する入力トレーニング形状のコレクションに対する潜在的な表現を見つけるタスクである。これは多くの場合、オートエンコーダーフレームワーク、つまりエンコーダー $\Phi : X \rightarrow Z$ 内で行われ、 X の入力形状 (何らかの 3D 表現) を潜在空間 Z にマッピングすることである。デコーダ $\Psi : Z \rightarrow Y$ 、

Z の潜在的な表現を形状 Y に (おそらく X 以外の 3D 表現で) マッピングする。多くの一物体に対する入力は対称性を有す。つまり、形の本質を変えない変形である。たとえば、ユークリッド・モーショ (回転、反射、平行移動) を家具などの剛体オブジェクトに適用すると、同等のバージョンのオブジェクトが生成される。同様に、動物や人間などの同じ多関節体が、空間でさまざまなポーズを取ることができる。形状空間学習に対称性を組み込む方法は、潜在空間 (中間層) へのマッピングを定義することである。つまり、エンコーダー、および潜在空間からのマッピング (デコーダー) は、関連する対称性に対して同変になる。つまり、入力形状に対称性を適用してからそれをエンコードすると、元の形状の潜在コードに適用されるのと同じ対称性が得られ、同様に、変換された潜在コードから形状を再構築すると (不要な情報が除かれて) もとの形状になる。

モデルが単一の形状を学習した場合、モデルはすべての対称バージョンに完全に一般化できる。残念ながら、グローバル ユークリッド モーションのおそらくより単純な設定であっても、表現力と効率性を兼ね備えた同変ニューラル ネットワークを構築することは依然として課題です。ユークリッド運動同変関数に普遍的であることが知られている唯一のアーキテクチャは、テンソル フィールド ネットワークとグループ平均化であり、どちらも計算量が多く、メモリ集約的です。Vector Neurons などの他のアーキテクチャは、計算上は効率的ですが、普遍的であるとは知られていない、と述べられている。

形状空間学習のコンテキストで、構成によって対称性をエンコーダー・デコーダーに組み込むための一般的な方法論を導入した。フレーム平均化を使用して、表現力豊かで効率的な同変オートエンコーダーを構築する方法を示した。グローバルおよび区分的なユークリッド モーションの場合、メッシュ \rightarrow メッシュ、点群 \rightarrow 暗黙のシナリオのフレームワークをインスタンス化した。すべての実験で最先端の定量的および定性的な結果を達成した。

この方法にはいくつかの制限がある。まず、メッシュ \rightarrow メッシュの場合、固定接続とスキニング ウェイトを使用する。

区分的なユークリッドのケースを暗黙的な表現に一般化すること、複数のオブジェクトを含む大規模なシーンを処理すること、またはスキニングの重みを学習することは、将来の課題としている。点群データの学習の様子が文献 [17] の Fig.2 等々に示されている。

入力点群、暗黙の学習に他の教師データを使用していない。ティディベア (747 ポイントクラウド)、ボトル (296 ポイントクラウド)、スーツケース (480 ポイントクラウド)、バナナ (197 ポイントクラウド) の 4 つのオブジェクトカテゴリを使用している。70% から 30% の分割に基づいてランダムにセットを分割した。VAE (Variational Auto-Encoder) は変分オートエンコーダーを示す。この VAE の VectorNeurons バージョンを、VN と表示。区分的ユークリッド人体の動きに対する再構成例が、文献 [17] の Fig.3 等々に示されている。AE、ArapReg (As-Rigid-As-Possible Regularization) よりは優れ、正解の例とはあまり変わ

らない。

D.Chen ら [18] は、医用画像に対し、end-to-end（最初から最後まで全自動：部分研究ではない）の剛体（内蔵等）の部分画像から完全な画像への同変再構成を発表している。ノイズを加えた耐性評価で、ノイズの性質を与える必要がある。この同変イメージングでは、同変にしたいのはネットワークではない。

5. 剛体回転による変形をと CNN に組み込む方式

これまでの調査で、回転や平行移動対称性のある物体に対し、同一物体に対して、視点が変わることで、形状が変化し、CNN の学習が不完全になることが知られており、その対策が鋭意なされている様子が分かった。物体の回転は容易な処理で認識できそうな感があるが、CNN への組み込みを行うには、大変な工夫を行う必要がある。剛体や可塑性のある人体などに対する研究がそれぞれ行われている。本章では、自動運転における車両認識・検出に於いて剛体をターゲットとした、回転による変形で、射影歪を含む場合について、参考となる文献を調査する。

自動運転では、車両の認識（識別）はかなりの精度が達成されているが、天候、夜間などの広い環境での完全な認識には至っていない。そのため、性能を更に向上させる必要がある。学習データの増強だけではなく、NN の構成の改良も必要である。元々単一の形状の物体が、視点位置により別の形状になることに対応する、形状空間の同変学習が回転や平行移動という線形だが回転する多種の学習データを与えないと学習しないことから、学習データを増強するか、学習ネットワークで回転に対応するかという2つの方向性を抽出できた。同変学習には点群データに対してではあるが、実装プログラムが公開されており、3D 回転による射影変換の要素を追加することが可能になっている。

Marcos ら [19] は、テクスチャを考慮する場合、回転、平行移動、スケーリングなどの特定の変換に対して不変な外観記述子を使用した。これは、ほとんどの場合、カメラに対する相対的な位置に関係なく、マテリアルを識別しなければならないためである。多くのコンピュータービジョンの問題が任意の向きの画像を考慮していることを考えると、回転不変性は特に重要である。取り上げた例は、リモートセンシング画像と顕微鏡画像だ。

バイキュービック補間による標準の画像回転を実装し、R は合計数です。

各回転グループで考慮される角度。一部の回転でフィルターの外側にあるピクセルの影

表4 同変 CNN 学習

番号	著者	概要	性能
[15]	Luo	点群データ、同じ物体が 3D 多方向に回転している時、その方向を CNN で検出できた。	ノイズ耐性は不明
[16]	Musallam	従来技術のレビューが豊富。平行移動と回転の同変 CNN がカメラの動きの表現を特徴空間に直接誘導する方法を開発し、回転のデータ増強で CNN 学習を進めた。	
[17]	Atzmon	剛体と人体等の可塑性動きの単一物体の同変学習する。Enc-Dec で対称の変形を自動生成する。	目に見えない部分の一般化で改善
[18]	D. Chen	医用画像、end-to-end での耐ノイズ同変学習	

響を無視することが重要です。したがって、正方形フィルターに外接する円内のピクセルのみを使用する。

この畳み込み層の後、向きの次元に適用される max-pooling 操作を適用し、同じ回転グループのアクティベーション全体で最大値を求める。これにより、ローカル回転に対する不変性が保証され、したがって入力画像のグローバル回転に対する同変性が保証される。図 4 に、この不変性がどのように得られるかを示す。バックワードパスでは、標準の max-pooling の動作と非常によく似た、最大のアクティベーションを生成する角度の勾配が渡される。向きの最大プーリングをアクティブにする角度のインデックスは、フォワードパス中に記録され、フィルターの重みが更新される。

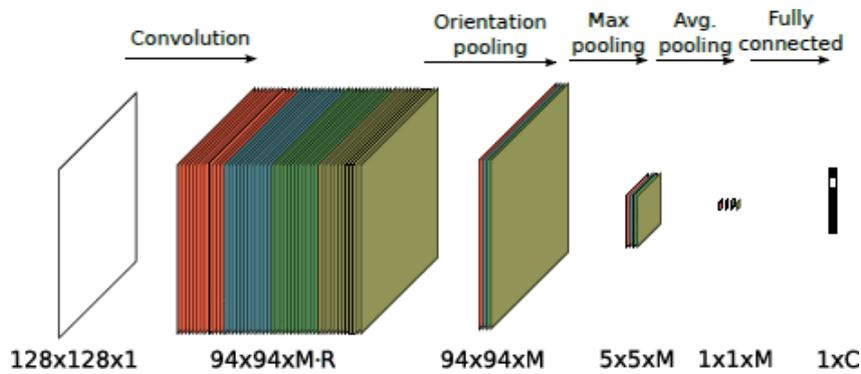


図 4 回転フィルターを有する CNN (Marcos らの文献 [19] の Fig2 より引用)

モデルは各トレーニングイメージの複数の場所 (最大プーリングウィンドウごとに一つずつ) から学習できる。M は回転グループの総数 (つまり、固有の標準フィルターの総数) であり、R は各グループ内で考慮される個別の向きの数で、C は分類問題のクラス数である。CNN パラメーターは畳み込みフィルターで重み減衰を使用している (ただし、バイアスでは使用していない)。Weight Decay は、小さな大きさのパラメーターを優先する正則化である。これにより、誤った大きなパラメーターが排除され、収束が促進される。

この論文では、標準的な畳み込みニューラルネットワーク (CNN) の定式化を使用して、回転不変の回転可能なフィルターを明示的に学習する戦略を提案している。テキストチャ分類の識別フィルターバンクを学習するとき、回転不変性を明示的に考慮することの利点を示している。これらの結果は、各フィルターがグループ内の他のフィルターの回転バージョンになるように、浅い CNN の最初のレイヤーでフィルターの各グループの重みを結び付けることによって達成した。これらの回転可能なフィルターの高い表現力と、それに続く学習するパラメーターの数の削減により、回転不変テキストチャ分類のベンチマークで最先端技術を満たすのに十分なパフォーマンスの向上が実現した。

さらに、提案された方法論が、特に小さなトレーニングセットのシナリオで、標準のデータ拡張 CNN よりも大幅に優れていることを示している。

5. まとめ

以上、自動運転の車両検出において、車両の形状がカメラの位置の違いによる視点の変化で形状が3D的に変わり、射影歪を保証する必要がある状態での方式の検討を行った。一つは、各種の回転をする画像をデータ増強で用意し、学習を深めるやり方、もう一つは剛体の同変性を利用する同変学習によりCNNの内部で対応させるやり方がある。更に大きくは、形状区間での変形の一般化で対処する研究が多くなっていることが分かった。回転対称性をCNNに埋め込む手法では、依然として固有性が高く、汎用性が達成されていない。そこで、データ増強と、剛体の回転や変形の程度が小さい対象に限定して、CNNの改造を進めていくことが堅実な方向と考えられた。

図5は車両の画像を入力し、3Dのワイヤフレームをマッチングさせ、水平回転を与えて、形状変化した画像を得る例を示している。これは、データ増強にも使用可能であるまた、図6に示すように学習ネットワークに図5を埋め込んで使うことへの拡張については今後行っていく。

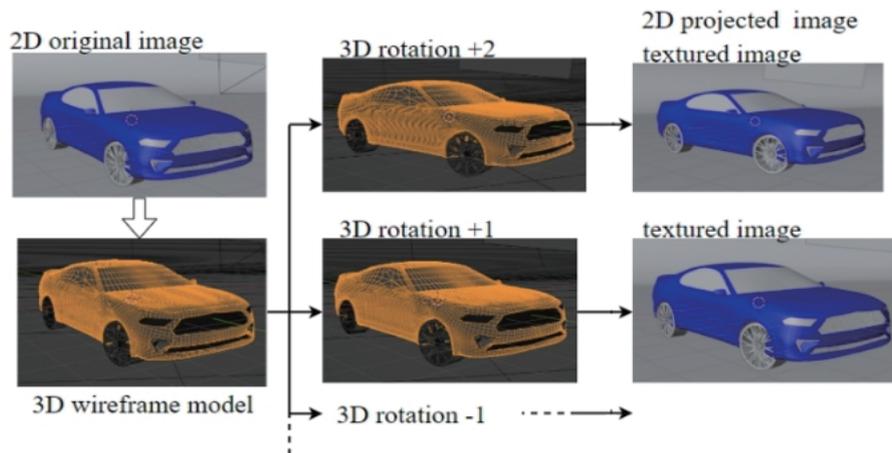


図5 入力画像から3Dデータを生成する構成

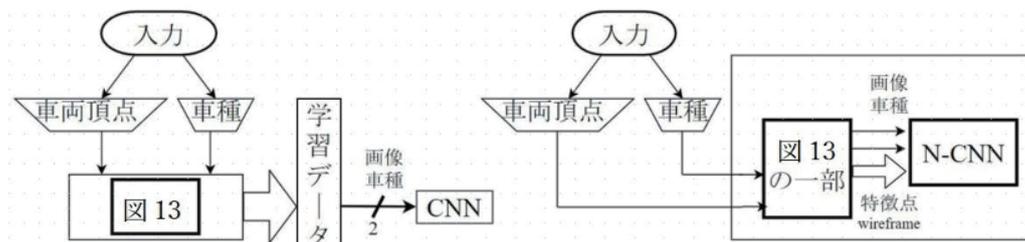


図6(a) 学習データ数の回転による増強 (b) CNNでの回転の学習では特徴点をタグに追加

参考文献

- [1] Research Port(リサーチポート)「CVPR2022」ResearchPort トップカンファレンス定点観測 vol.3 <https://research-p.com/column/561>

- [2] Open Access versions, provided by the Computer Vision Foundation
<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2022?day=all>
- [3] Y. Bao, Y. Liu, H. Wang and F. Lu, "Generalizing Gaze Estimation with Rotation Consistency," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 4197-4206.
- [4] G. Bökman, F. Kahla and A. Flinth, "ZZ-Net: A Universal Rotation Equivariant Architecture for 2D Point Clouds," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 10966-10975.
- [5] X. Feng, X. Yao, G. Cheng and J. Han, "Weakly Supervised Rotation-Invariant Aerial Object Detection Network," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 14126-14135.
- [6] R. Chen and Y. Cong, "The Devil is in the Pose: Ambiguity-free 3D Rotation-invariant Learning via Pose-aware Convolution," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 7462-7471.
- [7] A. Seo, B. Kim, S. Kwak and M. Cho, "Reflection and Rotation Symmetry Detection via Equivariant Learning," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 9529-9538.
- [8] H. -X. Yu, J. Wu and L. Yi, "Rotationally Equivariant 3D Object Detection," IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 1446-1454.
- [9] J. Kang, R. Fernandez-Beltran, Z. Wang, X. Sun, J. Ni and A. Plaza, "Rotation-Invariant Deep Embedding for Remote Sensing Images," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-13, 2022, Art no. 5509713.
- [10] M. Zand, A. Etemad and M. Greenspan, "Oriented Bounding Boxes for Small and Freely Rotated Objects," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp.1-15, 2022, Art no. 4701715.
- [11] T. Zhang et al., "Foreground Refinement Network for Rotated Object Detection in Remote Sensing Images," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-13, 2022, Art no. 5610013,.
- [12] Taco S. Cohen, and Max Welling, "Group Equivariant Convolutional Networks", Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning ICML'16 - Volume 48 June 2016 Pages 2990–2999.
- [13] Klingenberg, C.P. Walking on Kendall's Shape Space: Understanding Shape Spaces and Their Coordinate Systems. *Evol Biol* 47, 334–352 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11692-020-09513-x>
- [14] Paskin, M., Baum, D., Dean, M.N., von Tycowicz, C. (2022). A Kendall Shape Space Approach to 3D Shape Estimation from 2D Landmarks. In: Avidan, S., Brostow, G., Cissé, M., Farinella, G.M., Hassner, T. (eds) *Computer Vision – ECCV 2022*. ECCV 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13662. Springer, Cham.
- [15] S. Luo et al., "Equivariant Point Cloud Analysis via Learning Orientations for Message Passing," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 18910-18919.
- [16] M. A. Musallam, V. Gaudillière, M. O. Del Castillo, K. Al Ismaeil and D. Aouada, "Leveraging Equivariant Features for Absolute Pose Regression," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 6866-6876.
- [17] M. Atzmon, K. Nagano, S. Fidler, S. Khamis and Y. Lipman, "Frame Averaging for Equivariant Shape Space Learning," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 621-631.
- [18] D. Chen, J. Tachella and M. E. Davies, "Robust Equivariant Imaging: a fully unsupervised framework

- for learning to image from noisy and partial measurements," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 5637-5646.
- [19] D. Marcos, M. Volpi and D. Tuia, "Learning rotation invariant convolutional filters for texture classification," 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2016, pp. 2012-2017.

大関和夫 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授
上條浩一 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 教授

実習関係の著述に対する頭辞

東京国際工科専門職大学は、専門職大学として地域共創デザイン実習や臨地実務実習を行っております。卒業までに延 600 時間に及ぶ実習では、学生が多方面で活躍し、その成果が企業からも評価されています。

本年は、その成果に関する 5 件の寄稿があり、掲載することとなりました。

“LinearSVC による機械音異常検知”では、機械音異常検知の実運用を想定し、僅かに得られた異常時の音響データを活用した機械学習の教師ありモデルを構築することにより、F1 スコア 0.95 という高い評価値を実現しました。

“シビックプライド醸成に繋がる住民価値の掘り起こしと貢献度の検証に関する研究”では、ある自治体様でのシビックプライド醸成という課題に対して、自治体住民に対して行ったアンケート結果に、多変量解析や機械学習を用いて、潜在的な住民意識の見える化を実現いたしました。

他 3 件は、いずれもデジタルツインに関する寄稿です。“デジタルツインを用いた騒音問題の解決についての一考察”、“デジタルツインを用いた飲食店の混雑についての一考察”、“デジタルツインを用いた選挙の投票率を上げるための試みについての一考察”では各々、「部屋内外からの音漏れによる騒音問題」、「新宿における昼食難民問題」、「日本の若年層の低投票率問題」、という具体的な課題を設定し、その解決策を、現地での聞き込み、アンケート結果等を基に、デジタルツインで課題の見える化を行い、課題解決へ向けての具体的なプロトタイプ的设计を行っています。

これら 5 件に共通していることは、社会で実際に起きている具体的な課題に対して、大学の講義で習得した技術を、逆に大学の講義だけでは得られない生のデータに対して適用し、課題の見える化や具体的な解決に向けたプロトタイプ的设计を行っている、という点です。本学における実習は 2 年生から 4 年生の間に計 6 回ありますが、このように、講義と実習を繰り返して行うことにより、講義で習得した技術を、机上の空論で終わらせず、「生の」データに適用することにより、学生の理解が深まるだけでなく、社会的にも有用なソリューションの提供が可能になります。本学は開校してまだ 3 年半であり、実習の成果は、先輩から後輩へも引き継がれていきますので、今後のさらなる実習の成果に、ご期待いただきたく存じます。

実習運営会議長 上條浩一

LinearSVC による機械音異常検知

大柴義永・富山哲男・西田健次*・宮崎淳*

Abnormal machine noise detection with LinearSVC

Yoshito Oshiba, Tetsuo Tomiyama, Kenji Nishida* and Jun Miyazaki*

Abstract: With the advent of Industry 4.0, the use of machine sound abnormality detection systems has become increasingly important for the maintenance of industrial equipment used in fully automated plants and warehouses. In this paper, we conducted machine sound anomaly detection using supervised learning on bearings. An excellent learning model was constructed, achieving an F1 score of 0.95 and an AUC of 0.94 in the test validation.

Keywords: Abnormal machine noise detection, SVC

1. はじめに

環境音から得られる音響情報から機械やモノなどの異常状態を発見する異常音検知の研究は応用範囲が広い。先行研究 [1] を見ると、音響情報を用いた監視システム、特に事件事故に関連する銃声 [2,3]、悲鳴 [4]、爆発音 [5] などの検知。また、医療・メンタルヘルス分野では高齢者の転倒音 [6] や肺音からの異常検知 [7] などの研究が行われている。近年では、Industry4.0 に伴い全自動の工場や倉庫に用いられる産業機器の保守(メンテナンス)への応用に需要が高まっている。従来は、熟練の検査作業員が機械音を聞くことでメンテナンスが行われているが、機械音異常検知を用いると検査作業員育成にかかる時間、メンテナンスに対する人的時間的労力を削減し、生産性、効率性の向上が可能になると期待されている。

機械音異常検知に関する従来研究では、wavelet 解析をベースとした異常音検知 [8,9] が行われていたが、近年の傾向として機械学習を用いた異常音検知の研究が進められている。機械学習に用いられる学習方法として、教師あり異常音検知と教師なし異常音検知の2種類に分類される。機械音異常検知の課題として、まず産業機器が故障する頻度が少ないことから異常データの取得が困難という点が挙げられる [10,11]。次に機器の故障するパターンは無数にあり異常状態を定義するのが困難であり大部分が未知である。さらに、産業機器によって正常状態であっても機器の運転状況によってパターンの変化なのか損傷であるのかの判断が困難である。

この課題を踏まえて教師なし学習では、異常時のデータを使わずに正常状態のみをデータとして用いた機械音異常検知の研究が行われている。基本的にはクラスタリング(混合

* 株式会社オレンジテクラボ

ガウス分布モデル、自己組織化マップなど)による外れ値検知を行う事で通常とは違う音、つまり異常と定義され研究が行われていることが多い[10,11,13]。

また、教師あり学習に関しても異常検知に対する研究が行われている。ただ、機械音異常検知の課題を述べたように、異常時のデータの取得が困難であったり、異常状態の大半が未知であるという課題から学習に必要なデータが得られないという課題がある。これらの課題に対して、検知対象となる機械を運用していく中で僅かに得られた異常データや機器によって異常データを取得可能な事象を活用して、GMM[2]、HMM[5]など教師あり学習を用いて2値分類を行う研究が行われている。また、教師あり学習と教師なし学習双方を比べた時、教師あり学習の方が高い精度で異常検知できることが分かっている[12]。

以上を踏まえ実運用を想定すると、異常データを使わず正常状態のみで行う教師なし学習の方が実装はしやすい。一方で、機械を運用している中で僅かに得られた異常データなどを使った教師あり学習では異常状態(異常音)を明示的に定義することが可能であるという利点がある。さらに、教師あり学習の精度を上げるために、教師なし学習も交えた判定精度を高める研究[12]が行われている。

本稿では、機械音異常検知の実運用を想定し、僅かに得られた異常時の音響データを活用した教師あり学習を行った。一部の異常状態を明示的に定義する実験を行った上で、教師あり学習で得られた結果を教師なし学習へのデータとして活用することで教師なし学習の精度向上を目的としている。

2. 方法論

学習に用いたデータセットは世界最大の音響認識分野における国際コンペティション DCASE2022 (Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events) の task2 である (<https://dcase.community/challenge2022/index>)。出題されるタスクには音響シーン分類、音響イベント検出、音響イベント音源推定検知などが用意されている。2022年のtask2には7種類の機械を対象とした異常音検知タスクが出題された。ファン、ギアボックス、ベアリング、スライドレール、おもちゃの車、列車、バブルが対象となり、それぞれ付属の情報が与えられている。今回は回転機器であるベアリングを対象とした異常音検知を行った。ベアリングに与えられるデータには3つの異なる条件が組み合わされて、1. 回転数が異なるもの。2. マイクの位置を変えたもの。3. ノイズが異なるものが用意されていた。1. 回転数が異なるもの、2. マイクの位置を変えたものを使い、正常時のデータ200個、異常時のデータ200個の計400個の音響データを学習データとした。400個の内、200個には12種類の回転速度、もう200個には2種類の回転速度が9種類の異なる位置にマイクをセットし音響データを取得したデータとなっている。これらのデータを用いて音響データを識別器に掛けた時に正常、異常の二値分類ができるのではないかと仮説の元、実験を行った(図1)。

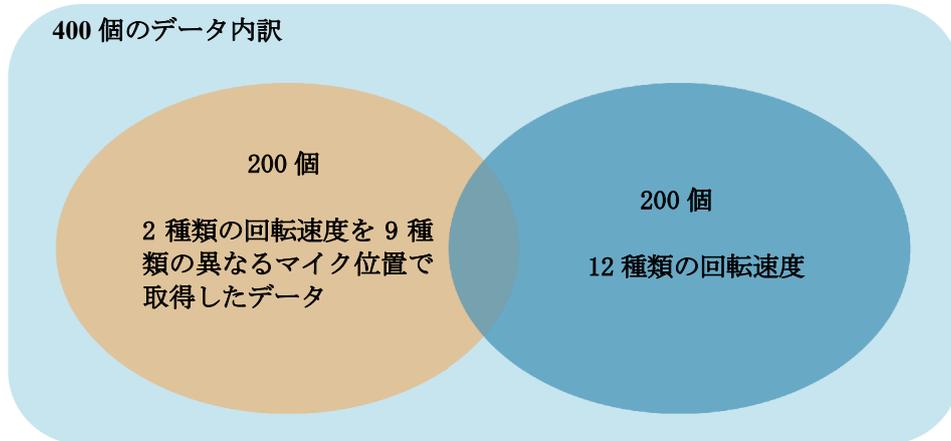


図 1. 使用したデータの内訳について

特徴量抽出には、まず音響データに対して短時間フーリエ変換を施した。入力信号を 1024 サンプルのフレームに分割し、各フレームに hamming 窓関数を適用した。hamming 窓関数を用いる事で信号の両端を滑らかにフェードイン・アウトさせることで、フレームの端で発生する波形の不連続性を低減する効果がある。そして、各フレームのサンプリングレートを 512 にして高速フーリエ変換を行う。得られたスペクトルを時間軸と周波数軸に分けた 2 次元グラフの出力を絶対値に直し、対数スケールにしたものを一次元に変換したものを学習データとした。400 個のデータは、訓練データ：240 個、検証データ：80 個、テストデータ：80 個に分割し学習・評価を行った。

二値分類をする機械学習モデルには、scikit-learn の LinearSVC を使用した。パラメータは、正規化パラメータを 15、収束の基準となる許容誤差の値を 0.01 に設定。その他は、デフォルトの値で実験を行った。まず、検証データを使ったモデルの評価は f1 スコアと混合行列を用いた。F1 スコアとは、(1) の式から導き出せるものであり *precision* (適合率) と *recall* (再現率) の調和平均として定義される値である。F1 スコアから分類器の精度を総合的に評価する事ができ、値が 1.0 (100%) に近づくほど *precision* と *recall* の両方の精度が高く効率よくバランスの取れたモデルと判断することが可能である。実験結果として、検証データを用いた f1 スコアは 0.96 という値が出力された。

$$F1 \text{ score} = 2 \times \frac{\text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (1)$$

次に混合行列を用いた評価を行った。混合行列とは分類器の予測結果と実際のクラスの対応関係を表した行列の事である。これは、True Positive (TP)、False Negative (FN)、False Positive (FP)、True Negative (TN) の 4 つの要素で構成されている。TP とは、分類器が陽性と判断し実際に陽性であったデータ。FN は、陰性と判断したが、実際に陽性であったデータ。FP は、陽性と判断したが実際に陰性であったデータ。TN は、陰性と判断し、実際に陰性であったデータを表している (図 2)。本稿の場合、Positive が異常時、Negative を正常時と定義する。

		モデルの予測値	
		Positive	Negative
実際のクラス (正解値)	Positive	TP	FN
	Negative	FP	TN

図 2. 混合行列の構成について

検証データ 80 個 (異常データ: 42 個、正常データ: 38) を使った二値分類結果の内訳を混合行列で確認すると、TP: 42 個、TN: 35 個、FP が 3 個という結果になった。つまり、80 個の内、77 個は正しく分類できており、また 3 個は異常と判断したが、実際には正常であるものがあつた (図 3)。

		モデルの予測値	
		Positive(異常)	Negative(正常)
実際のクラス (正解値)	Positive(異常)	42	0
	Negative(正常)	3	35

図 3. 検証データを使った混合行列

検証データでは、F1 スコアが 0.96 で混合行列を見ても比較的精度良く分類が出来ていると言える。

次に、テストデータ 80 個 (異常データ: 34 個、正常データ: 46 個) を用いてこの分類器の精度を確認する。テストデータでは、検証データでの評価と同様に F1 スコア、混合行列を用いたモデル評価を行う。まず、F1 スコアは 0.95 という値が得られた。混合行列を見てみると FP に 2 個、FN に 2 個の誤検知が確認できた (図 4)。

		モデルの予測値	
		Positive(異常)	Negative(正常)
実際のクラス (正解値)	Positive(異常)	32	2
	Negative(正常)	2	44

図 4. テストデータを使った混合行列

そして、テストデータでは、ROC (Receive Operating Characteristic Curve) 曲線を用いた AUC 評価を行った。まず ROC 曲線とは、二値分類モデルの性能を評価する為の指標であり True Positive Rate(TPR) と False Positive Rate(FPR) の関係を表したグラフである。TPR とは、Positive の中で正しく分類された割合を示し (2) の数式で求められる。FPR は、Negative の中で誤って Positive と分類された割合であり (3) の数式で導ける。

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (3)$$

つまり、TPR が高く、FPR が低いほどモデル性能が良いと言える。また、この ROC 曲線の下部に囲まれた面積を表す数値が AUC (Area Under the ROC Curve) であり、モデル性能を数値化した指標になる。0 から 1.0 までの値を取り 1.0 に近づくとモデル性能が良いと判断する事ができ、テストデータを用いた ROC 曲線を用いた AUC 評価では、0.94 とモデル性能が高いと言える値が得られた (図 5)。

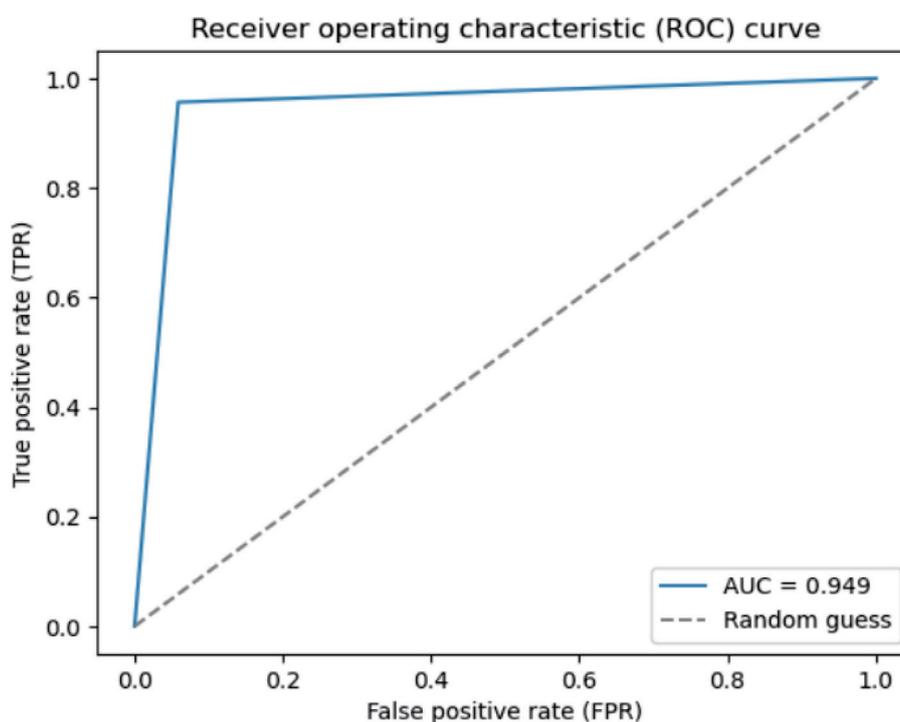


図 5. テストデータでの ROC 曲線を用いた AUC 評価

3. 考察

実験結果として、テストデータでの評価が F1 スコア 0.95、AUC 評価が 0.94 と二値分類モデルとして優れたモデルが得られた。学習コストとして、Windows CORE-i7 の CPU を用いた学習にかかった時間は 33 秒。最適なモデルパラメータを求める為の反復回数であるイタレーション数は、235 であった。本稿の研究では、12 種類の回転速度と 9 種類のマイクの位置の 2 つの条件に絞り実験を行ったが実際の機器での運用を想定すると、動作パターンはいくつもあり、ノイズなど様々な条件を考慮しなければならない。

4. 結論

本稿での実験結果から、特定の条件下で扱える2値分類モデルとして期待する結果が得られる学習モデルを構築することが出来た。次のステップとして製造機器にこの学習モデルを実適用する為に、学習データに使う音響情報を広げ(検知対象以外の異なるノイズ音、様々な回転速度など)このモデルを教師なし学習に応用させる実験を行う事で実用化を進めていきたい。

参考文献

- [1] 伊藤彰則 (2019),"環境音から異常を検知する統計的手法",日本音響学会誌 75 巻 ,pp.538-543
- [2] C. Clavel, T. Ehrette, and G. Richard(2005), "Events detection for an audio-based surveillance system," Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME),pp.1306–1309.
- [3] K.M. Jeon, D.Y. Lee, H.K. Kim, and M.J. Lee, "Acoustic surveillance of hazardous situations using nonnegative matrix factorization and hidden Markov model," Proc. 137th Audio Engineering Society (AES) Convention, 2014.
- [4] G. Valenzise, L. Gerosa, M. Tagliasacchi, F. Antonacci, and A. Sarti(2007), "Scream and gunshot detection and localization for audio-surveillance systems," Proc. IEEE Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), pp.21–26.
- [5] S. Ntalampiras, I. Potamitis, and N. Fakotakis(2009), "On acoustic surveillance of hazardous situations," Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.165–168.
- [6] C.N. Doukas and I. Maglogiannis(2011), "Emergency fall incidents detection in assisted living environments utilizing motion, sound, and visual perceptual components," IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed., vol. 15, no. 2, pp.277–289.
- [7] R.L.H. Murphy, A. Vyshedskiy, V.-A. PowerCharnitsky, D.S. Bana, P.M. Marinelli, A. Wong-Tse, and R. Paciej(2004), "Automated lung sound analysis in patients with pneumonia," Respiratory Care, vol. 49, no. 12, pp.1490–1497.
- [8] T. Anmen, T. Murosaki, N. Takaha, H. Ito, and Y. Kondo(2004), "Fricative inspection with wavelet analysis," SICE Annual Conference, pp.807–812.
- [9] Masahiro TSUCHIYA, Michiyuki TAKAGI(1998),"Vibration and Acoustic Fault Diagnosis of Total Machine", 日本機械が学会論文集 64, pp.465-472
- [10] 緒方淳, 村川正宏 (2015),"風力発電スマートメンテナンスのための機械学習技術に基づく異常検知システムの構築", 日本機械学会シンポジウム講演論文集 14
- [11] 植松 尚, 小泉 悠馬, 齊藤 翔一郎, 中川 朗, 原田 登 (2017),"動作音から機器の異常を検知する異常音検知技術",NTT 技術ジャーナル 29,pp.24-26
- [12] Y. Kawachi, Y. Koizumi, and N. Harada, "Complementary set variational autoencoder for supervised anomaly detection(2018)," Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP),pp. 2366–2370.
- [13] 江原 史朗, 武藤 義彦 (2021),"One Class SVM を用いたベアリング異常音検知システム", 産業応用工学学会論文誌 ,9 巻 1 号 p.31-37

大柴義永 東京国際工科専門職大学 工科学部 情報工学科 4年生
富山哲男 東京国際工科専門職大学 副学長・工科学部長 情報工学科教授

西田健次 東京工業大学システム制御系 特任准教授、オレンジテクラボ CTO
宮崎 淳 東京国際工科専門職大学 客員教授、オレンジテクラボ CEO

デジタルツインを用いた騒音問題の解決について の一考察

島村涼平・森 慧・高垣颯介・諸井聖隼

波多江茂樹

A Study on Solving Noise Problems Using Digital Twin

Ryouhei Shimamura, Kei Mori, Sousuke Takagaki, Akito Moroi
and Shigeki Hatae

Abstract: The theme of "solving social problems" using the digital twin was presented as a practical training assignment. The reasons for selecting "solving a noise problem," the identification of the problem in a questionnaire survey, the creation of a prototype, and the cost of putting it into operation are described.

Keywords: Digital Twin, Solving a noise problem, Questionnaire survey, Cost management

はじめに

これは東京国際工科専門職大学の地域共創デザイン実習で行ったものをまとめたものである。デジタルツインとは、現実世界を模した3Dモデルと、それに紐づくデータが統合された仮想現実を作成し、それを用いて新たなソリューションを見つけるプロセス全体を表すものである。実習課題でデジタルツインを用いて「社会課題を解決する」をテーマとして提示された。「騒音問題の解決」を選定した理由、アンケート調査による課題の抽出、プロトタイプ作成、それを運用するためのコストについて述べる。

1. 課題の設定

我々が経験した騒音によるご近所トラブルから音について着目した。そして、実際に騒音などの音が原因でご近所トラブルになっているかどうか調べた結果、トラブルの原因で音に関係するものは「騒音」、「ペットの飼育やマナー」、「子供の泣き声」があり、全体の4割を占めることからご近所トラブルと音による問題は関係性があることが分かった [1]。しかし、生活する中で音には部屋の内側からの音と外側からの音の2つがあり、その2つの音は性質が異なるため、1つに絞る必要がある。また、提案するサービスに対するニ-

ズやターゲットとする客層を調べるため、いくつかのアンケートを行った。アンケート結果から解決すべき課題を「音漏れの不安」とし、本サービスのターゲットを「音漏れ対策をしたい10～20代、特に20代の若者」とした。

2. アンケート調査

「提案するサービスに対するニーズはあるか、そのサービスにどれくらいの人がコストをかけるかが分からない」の調査を目的として実習内でアンケート実施した。実施する際は、実際にどのような状況で、どのような人々が、このサービスを必要とするかを明らかにできるように質問を設定した。

2.1 アンケートの内容

アンケート内容は、以下のようになっている。

- ①あなたの年齢について教えてください。
- ②あなたが現在お住いの家は？
- ③自分の部屋から音漏れしているか、気になることはありますか？ありましたか
- ④音漏れ対策に、いくらまでお金を出せますか？
- ⑤どの程度、音漏れを防ぎたいですか？
- ⑥実際、音漏れ対策をしていますか？
- ⑦どのくらいかかりましたか？
- ⑧どのくらい時間がかかりましたか？
- ⑨音漏れ対策をしないのはなぜですか？
- ⑩近隣住民の生活音、気になりますか？
- ⑪生活音を気にならなくするために、いくらまでお金を出せますか？
- ⑫どの程度、周囲の音を防ぎたい？

2.2 アンケート結果

181人に調査を行った結果から以下のことが分かった。

図1より「自分の部屋からの音漏れ」の方が「近隣住民の生活音の音漏れ」よりも気にしている割合が高いことが読み取れる。この結果から「自分の部屋からの音漏れ」についての課題の方が防音対策をするためのシステム・サービスのニーズがあることが分かった。

自分の部屋から音漏れしているか、気になることはありますか？ ありましたか？
159 件の回答



近隣住民の生活音、気になりますか？
159 件の回答

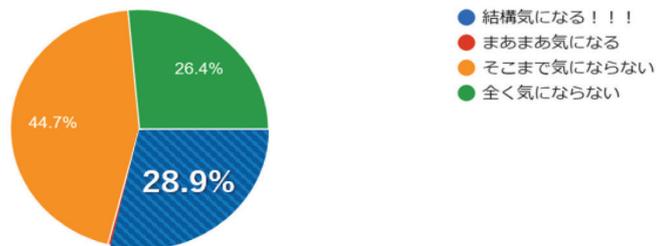


図1 音漏れを気にする割合

図1より「自分の部屋からの音漏れ」に最も気にしている年齢層は10代から30代が多くなっている。また、年齢別で「お金を出せる」かつ「自分の部屋からの音漏れが気になっている」割合のこの2つの事柄よりターゲットは10代から20代の若者として設定することが最も望ましいと考えられる。また、図4より「音漏れ対策をするために50000円までなら出せるという割合」が64.2%を占めていた。この結果より課題として考えている人はコストを費やしてまで解決したい課題であるということが分かった。

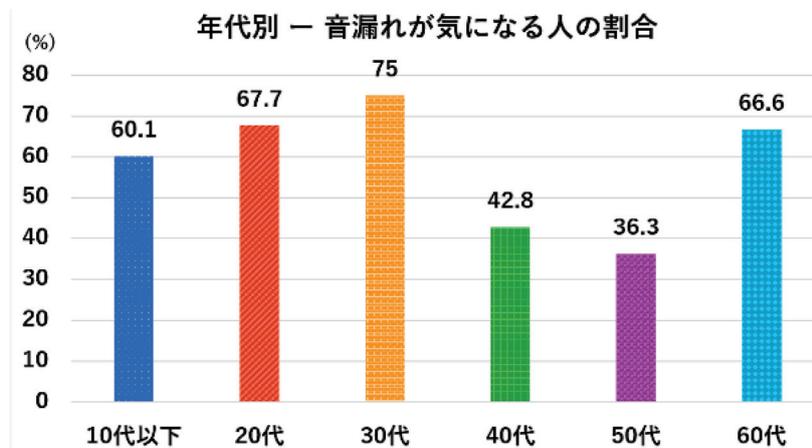


図2 年代別 - 音漏れが気になる人の割合

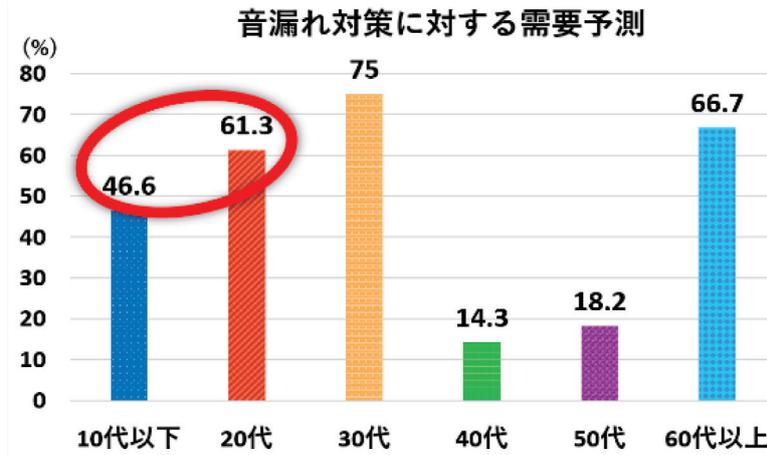


図3 音漏れ対策に対する需要予測

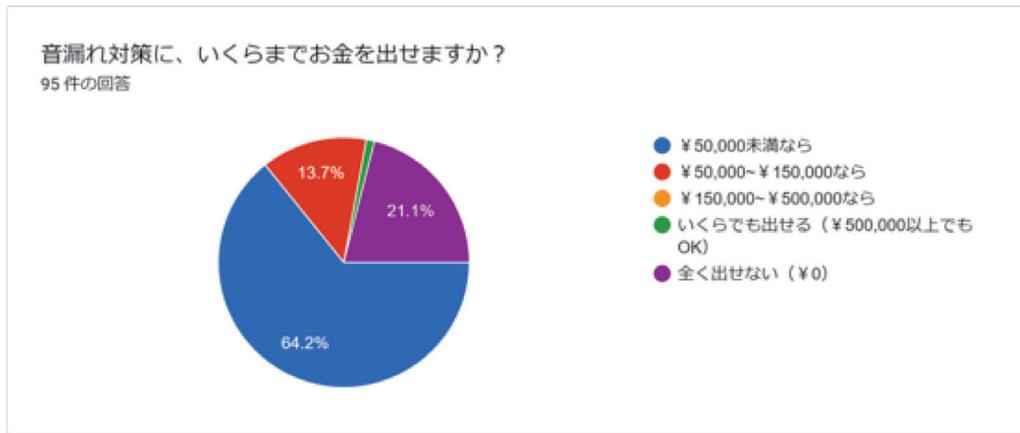


図4 音漏れ対策に費やすことのできるコスト

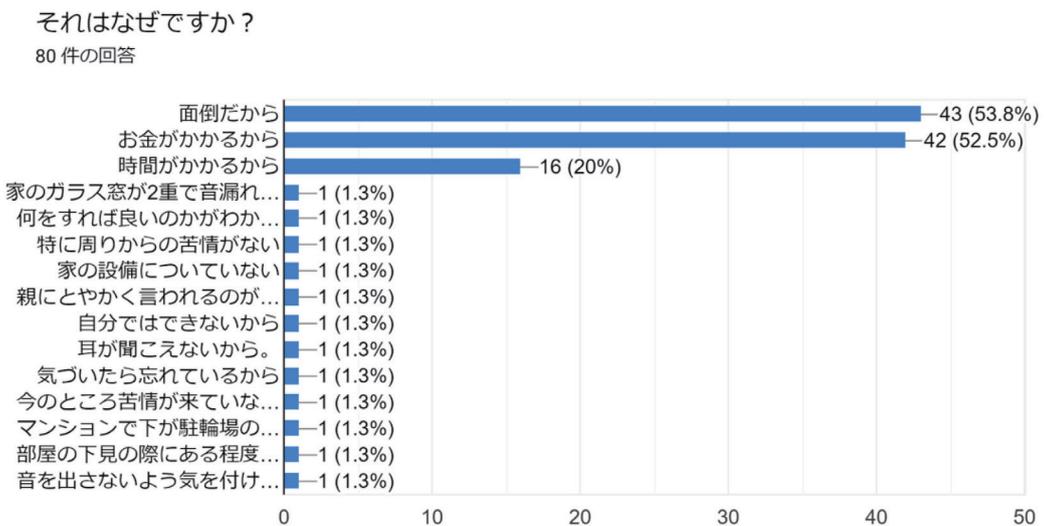


図5 音漏れ対策をしない理由

図5より、音漏れ対策をしていない理由の上位2つは「面倒だから(53.5%)」、「お金がかかるから(52.5%)」であることが読み取れる。この結果からユーザーに分かりやすく音漏れ対策を提案する。また、ユーザーにかかるコスト的負担を少しでも低減することができるサービスがニーズを満たしていることが考えられる。

アンケート調査の実施を総括すると、アンケート調査の目的であった「本当にニーズはあるか、そのソフトにどれくらいの人がコストをかけるかがわからない」に対して、私たちが開発しようと試みているシステム・サービスはニーズがあり、コストを費やしてまで解決したい課題の1つであるためビジネスとして成立させることができるという結論に達することができた。

3. サービスのシステムの概要

デジタルツインを活かした課題解決方法を考えた際、音漏れの不安を解消する場合、防音材を使用するが、時間や金銭的なコストがかかることや、「dB(デシベル)」という単位がわかりにくいことなどの問題があるため、これらの問題をクリアする解決方法が必要となる。

そこで我々は3D空間上でシミュレーションを行い、その部屋でどのくらいの音が外に漏れてしまうかを音の可視化によって明らかにすることにした。システム的にはユーザーにLiDAR機能のあるスマートフォンで検証したい部屋のデータをもらい、サーバー上でシミュレーションを行い、結果をユーザーに返すという形になる。金銭的なコストの問題を解決するために防音に必要な最低限の防音材とそれを張る位置を人工知能を利用して提案することにする。

サービス名に関して、デジタルツインを使用すること、音に関する課題を解決することの二つから、語感が良く、親しみを感じられるものを考えた結果「デジタルツ音(オン)」に決定した。

4. プロトタイプの実装

プロトタイプの実装に関して、上述したサービスの開発には音のシミュレーションが必要であったため、Unreal Engine 5のメタサウンドの活用を考えた。しかし、これらを活用できる環境がなかったため、サービス全体のプロトタイプの実装は断念した。その代わりに、シミュレーション結果のイメージとアプリの使用方法を共有するためにシミュレーションのソフトウェアとアプリのGUIの実装を行った(図6参照)。

プロトタイプは、音響3Dシミュレーションのイメージを想起させることを目的として作成されたソフトウェアであり、同ソフトウェア内で放出されるパーティクルを音と見立てて、擬似的にシミュレーションを行うものである。本サービスの開発環境はUnreal Engine 5(以下UE5)としているが、プロトタイプはUE5同様、汎用ゲームエンジンであるUnityを用いて作成し、パーティクルの表現は同エンジンに実装されているParticle Systemを使用している。なお実行環境としてWindows 10を搭載したPC上での動作を確認している。ソフトウェア実行時の各種操作に関して、カメラ操作はマウスとキーボード

を用いて行う。その他、十字キーやソフトウェアに実装されている各種ボタンにて(Ⅰ)パーティクルの放出(Ⅱ)壁面の表示、非表示(同時にパーティクルの動作開始と停止)(Ⅲ)パーティクルの通過度(コリジョン判定の精度)の設定(Ⅳ)全レッドチップ(パーティクルが壁を通過した際、その部分に生成されるオブジェクト)の削除(Ⅴ)シーンの再読み込み(Ⅵ)全セーブデータの削除(Ⅶ)パーティクルの反発具合の設定(Ⅷ)パーティクルの吸収基準の設定を行う。パーティクルは放出時から連続的に縮小していき、それに伴い変色していく。また、壁(オブジェクト)との衝突判定が行われた時も縮小する。

本プロトタイプはPCの画面サイズ(16:9・Full HD)に合わせて設計されている。しかし本企画は、LiDAR機能を搭載したスマートフォンをプラットフォームとして展開する予定のものであるため、本企画実現時にはGUIや視野角などをスマートフォン向けに大幅に調整する必要がある(図7参照)。



図6 作成したGUI

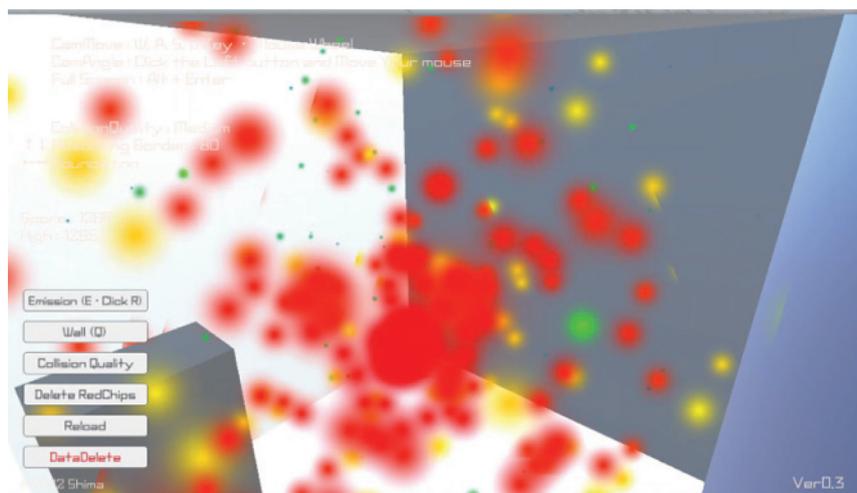


図7 プロトタイプ実行中のスクリーンショット

5. 開発したシステムの操作フロー

このサービスを使用するにあたり、ユーザーが行う操作はどんなものなのか、システムはどのような動きをするのかを分かりやすくまとめる必要があると考え、右の画像の操作フローを作成した（図8参照）。

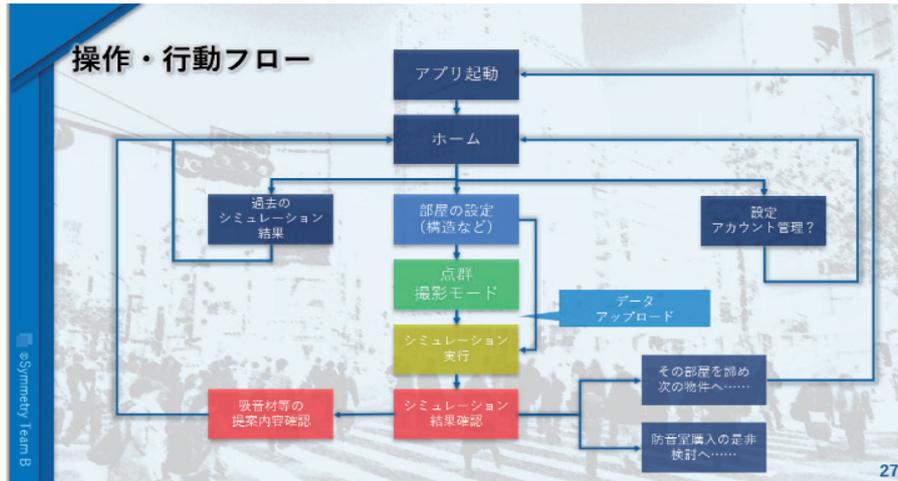


図8 ユーザーの行動の流れ

6. 運用コスト

このサービスの運営を行う際のコストについて、初期費用はどれくらいかかるのか、運営していく場合、年間にいくらかかるのか、その内訳まで細かく議論し、そのコストを3年で回収する際の必要売り上げを求めた。また、1年間の売り上げ目標を6か月で達成することを基準として、達成できなければこのサービスの黒字の目途が立たない場合撤退を行うと決めた。理由としては、売り上げが出せない事業を続けることは会社として良い選択ではないと考えたためである。なお、運用コストの回収（収益の確保）は、シミュレーションを行っている間の待機時間等に表示する広告（主に音漏れ対策に関する企業のもの）や、主に企業（ex. 不動産関係）が使用することを想定したサブスクリプションサービス（定期的に料金を支払い利用するコンテンツやサービス）を通して行うことを想定している。

7. 開発・維持コスト

開発・維持コストについて「Amazon Web Service」（以後AWS）の従量課金制クラウド上での運用が理想的なサーバーの環境であると考えている。クラウド上での設計イメージは図9のようになっている。主に、「Cloud Front」、「VPC」、「EC2」、「RDS」、「S3」というサービスを使用する。これらのサービスを利用することで自分たちがサービス提供を行う際に発生する可能性のある「遅延によるユーザーへのストレス」、「セキュリティ」、「アクセス

制御」、「Unreal Engine5 の動作、処理」、「個人ごとのアカウント管理」、「実行データの保存」の問題を事前に対策を行った上でサービスを提供することができるからである。

運用コストについては月 1000 万アクセスを受けつけ、サービス提供開始から 3 年間で黒字経営にするための年間売上目標を計算した場合、上記の AWS を利用費である約 61 万円と AI の外注費を加え 261 万円として試算した。しかし、この AI の外注費を細かく述べる事が出来ず説明の信憑性に欠けてしまったためこの部分は課題である。

収入源についてはこのサービス内での広告収入とスポンサーである。理由としては以前行った「音漏れ対策におけるいくらまでお金をだせるのか」というアンケート調査の結果から「面倒だから」及び「お金がかかるから」という回答が共に 40% 以上を占めていたため、広告収入にすることで「お金がかかる」という問題点を解決することができるからである。もう 1 つの収入源であるスポンサーに関してはサブスクリプション機能の使用料を取ることで収入源の 1 つとして考えている。サブスクリプション機能「デジタルツオン pro」のサービスについては「今まで行ったシミュレーション結果との比較用に結果の保持」、「音の流れ方を表現した動画形式のダウンロード」、「広告再生なし」、「店舗ごとのアカウント共有」、「入力データの保存」のサービス提供を計画している。また、図 9 はサブスクリプションの料金設定である。価格設定は日本の不動産上位 7 社が展開している約 7000 店舗のうち 1700 店舗がサブスクリプションを利用することで年間の運用コストを賄える価格に設定した。

運用コストを考える デジタルツオン Pro(仮)

- ◆シミュレーション結果をサブスク期間保持&動画形式でダウンロード
—過去に内見した部屋との比較検討にどうぞ！
- ◆広告非表示
- ◆(法人) 12ヶ月分購入の場合 アカウントを共有できる
- ◆過去に入力した部屋構造を保存。
—面倒な作業をスキップ！

期間	初回	2回目以降
1ヶ月	¥100	¥200
6ヶ月	¥500	¥1,000
12ヶ月	¥1,000	¥2,000

42

図9 サブスクリプションサービス

おわりに

デジタルツインという技術を用いて、社会問題の新しい解決方法を探し出す課題に取り組んだ。我々が選んだのは「騒音問題の解決」についてである。まず最初に、アンケート調査により課題を抽出した。次に、プロトタイプを作成し、それを運用するためのコストについて考察した。さらに、開発・維持するコストについても考察した。

「デジタルツ音」は、どこからどのくらい音漏れをしているのか、どんな対策にどれくらいのコストがかかるのかといった、(音の)可視化から(音漏れ対策の)可視化を実現するサービスである。このサービスによって賃貸契約、防音設備、吸音材やスピーカーの位置を調整するなどの対策を行うことで、音漏れ解消といった課題が解決されることを期

待している。

参考文献

- [1] 「近隣トラブルに関する実態調査」あなたのご近所でも起きている！？ご近所トラブルに巻き込まれたことがある人は、2人に1人！トラブル解決に動く人は、全体の7割近くに！ - 相談サポート通信 | アスクプロ株式会社

<https://news.soudan-form.com/news/post183.html>

島村涼平	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
森 慧	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
高垣颯介	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
諸井聖隼	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
波多江茂樹	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	講師

デジタルツインを用いた飲食店の混雑についての 一考察

國江貴之・和田 輝・湯浅翔太・中澤一馬・園田もえ

波多江茂樹

A study of restaurant crowding using the digital twin

Takayuki Kunie, Akira Wada, Syota Yuasa, Kazuma Nakazawa, Moe Sonoda
and Shigeki Hatae

Abstract: For our practical assignment, we were presented with the theme of 'Solving urban problems with a digital twin using a digital twin.' We decided on the theme of 'restaurant congestion' in line with this theme. The theme of the project was "solving social problems". The reasons for selecting 'restaurant congestion', the proposed solution to the problem and the prototype are described.

Keywords: Digital Twin, restaurant crowding, application software

はじめに

これは東京国際工科専門職大学の地域共創デザイン実習で行ったものをまとめたものである。デジタルツインとは、現実世界を模した3Dモデルと、それに紐づくデータが統合された仮想現実を作成し、それを用いて新たなソリューションを見つけるプロセス全体を表すものである。実習課題でデジタルツインを用いて「都市の課題を解決する」というテーマを提示され、そのテーマに沿い「飲食店の混雑」という課題に決定した。「飲食店の混雑」を選定した理由、課題の解決方法を提案し、プロトタイプについて述べる。

1. 飲食店の混雑をテーマとして選定した理由

東京国際工科専門職大学が立地する場所は新宿であり、周辺には学校や企業がたくさん存在する。そのためランチタイムになると、人々が近くの飲食店に集まり混雑が発生する。

その際、最初に選んだ飲食店が空いていた場合は良いが、空いていなかった場合は他の飲食店を探す、コンビニに行くなどの行動をとる。これにより想定されていた時間より時間がかかり、休憩時間が無くなり授業、業務に遅れたりする。こうした実体験と「ランチ難民」という都市の課題にもつながると考えたため、課題とした。

1.2 ランチ難民について

ランチ難民の具体的な定義としては以下の2つがあることがわかった。([1]、[2])

- ① 勤務中に設定された昼休み内に食事をとれない人たち
- ② 昼食を満足いく形で食べることができない状態

昼食を食べられないだけでなく、食べられるが満足できていない人も含まれることがわかる。実際にランチ難民がどのくらいいるのか調査を行ったデータがある。([3])

東京都の23区エリアの主にオフィス街にある会社に勤務する405名へのアンケート結果によると約50%が、「昼食を食べられなかった」、「食べたいものを食べられなかった」ことがあると回答している。半数の人がランチ難民の状況に陥ったことがあるという状況は、とても大きな問題だと考えられる。このようなランチ難民が生まれてしまう原因として、以下の3つが挙げられる。

- ① 他者と昼休みの時間設定がかぶってしまう
- ② オフィス街ではお店が混んでしまう
- ③ 外に出る、お店に並ぶのに時間がかかる

多くの会社では12時から13時を中心に昼休みを取っていることが推測できるため、①より、ランチ難民を加速していると考えられる。また、この時間帯は我々学生なども飲食店を利用する時間帯なため、それらも付加されていると考えられる。②、③より、昼食を食べることをあきらめてしまうことや、気軽に食べられるコンビニで我慢するような状態になることが推測できる。

1.3 飲食店の混雑を解決することで得られるメリット・デメリット

ユーザが得られるメリットとしては以下の①～⑤が考えられる。

- ① 時間が余るようになり、休憩時間を有効に活用できる。
- ② 昼食の際にランチ難民にならない。
- ③ 食べたいものが食べられる
- ④ 人がたくさん集まっているお店に行かなくてよくなる。
- ⑤ 穴場が見つかる（普段行かないような飲食店がオスズメに表示されるので、これまで来店機会がなかった飲食店や、これまで知らなかった飲食店に行くことができる）。

飲食店が得られるメリットとしては、以下の①と②が考えられる。

- ① ユーザが分散される（近くに何店舗もあるが、一部の店舗にだけ偏って混んでしまうことがある。繫盛しているお店はそのままでもよいが、混雑していない方のお店にもユーザが増え、お店によって待ち時間があることによって生まれていた機会損失がなくなる）。
- ② 新規顧客の参入（休憩時間が短く、昼食をコンビニで済ませているようなユーザが、飲食店に足を運んでくれるようになる）。

飲食店が課題解決する上でのデメリットとしては、以下の①と②が考えられる

- ① 競合他社の飲食店をおすすめするため、ユーザが分散する可能性がある。
- ② 近くに系列店がない飲食店は、混雑していない他社の飲食店にユーザが流れてしま

い利益が分散してしまう。

2. 市場規模

2.1 TAM,SAM,SOM について

我々が日頃利用しているアプリのアプリ市場を TAM ,SAM ,SOM の三つに分類した。TAM, SAM ,SOM とは市場規模を表す指標のひとつである。それぞれを簡単に説明すると以下になる。

TAM (Total Addressable Market) は実現可能な最大の市場規模で、市場における製品またはサービスの総需要を示す。

SAM (Serviceable Available Market) は TAM のうちの特定の顧客セグメントの需要を示している指標である。企業が当面追求すべき目標市場のシェアを示す。

SOM (Serviceable Obtainable Market) は実際に自社が取得できる SAM の部分を示している。SOM は短期的な売り上げの目標であり、重要な指標になる。

これらを明確化することにより、アプリの顧客ニーズ、商品の評価、市場動向などがわかりやすく示すことができる。

我々が課題を解決するために開発するアプリをそれぞれ TAM ,SAM, SOM に当てはめると次のようになる。

TAM：人々の行先を提案するアプリとしての市場

SAM：全国の飲食店提案アプリとしての市場

SOM：ランチ難民解消

TAM は、飲食店に限らずホテルや駐車場など幅広く人々の行先を提案するアプリとしての市場を目標としている。SAM は、飲食店において東京やオフィス街に限らず全国の飲食店を提案するアプリとしての市場を考えている。SOM においては、オフィス街などで多くみられる昼食を満腹に食べられないランチ難民の解決を目標としている。

図1より、2020年の日本国内のB to C-EC市場規模は、約19.3兆円となり、2019年より多少減少した。その理由として新型コロナウイルスの影響で外出自粛とECの利用が増加したことが原因だと考えられる。その結果、物販系分野の大幅な市場規模拡大につながった一方、サービス系分野の市場規模は、大幅に減少した。そして物販系分野の大幅な増加分とサービス系分野の大幅な減少分が埋め合わせになり、全体としては、約830億円の減少となった。

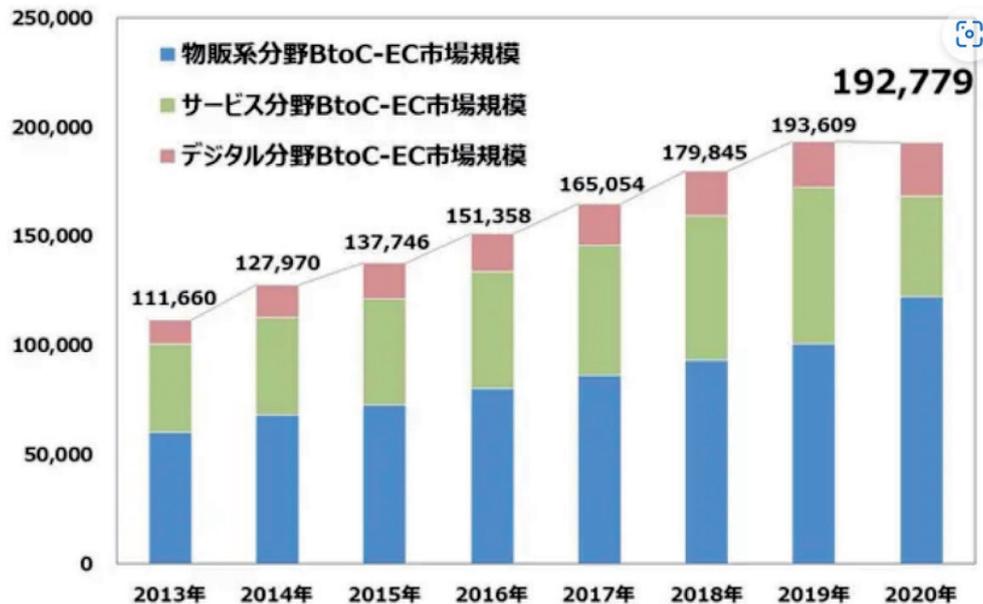


図1 サービス系分野の B to C-E の市場規模

(出典：経済産業省ウェブサイト (<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210730010/20210730010.html>))

図2は、図1のB to C市場規模の経年推移の図を旅行、宿泊、あるいは飲食などのサービス系分野に焦点をあててこの分野の市場規模をさらに細分化したものである。サービス系分野のB to C-EC市場規模の内訳をみると、「旅行サービス」の1兆5,494億円が大きな割合を占めているが、新型コロナウイルス感染症拡大の影響で「旅行サービス」、「飲食サービス」、「チケット販売」の市場規模が大きく縮小したのが分かる。但し「旅行サービス」や「チケット販売」の二つのサービスに比べ、「飲食サービス」の縮小率は18%に抑えられている。原因として考えられるのは、それによって飲食サービスのB to C-EC市場規模(インターネットを介して、お店を検査&予約する市場)は5,975億円となった。また、アンケート調査からはオフィス街に務めている社員の50%がランチ難民になったことがあることが分かっており、オフィス街の代表地である新宿の昼間人口は2015年時点で77万6千人となっている。よってこれらの情報を照らし合わせると、新宿の昼間人口77万6千人のうちの50%の39万人が新宿でランチ難民を経験しているということが予想される。また、全国の飲食店提案アプリの市場規模の約6千億円からグルメサイトの代表格である食べログ・ホットペッパーグルメ・ぐるなび・Rettyの合計利用ユーザー数の約2億人を割り、飲食店提案アプリの利用ユーザー一人当たりの単価を求めると、約3000円となった。

ランチ難民の数と飲食店提案アプリの一人当たりの単価が求められたため、それぞれを掛け合わせると大体のランチ難民解消の市場規模が推測できる。よってランチ難民解消の市場規模は約12億円と予想できる。

サービス系分野のBtoC-ECの市場規模

分類	2019年	2020年
	市場規模 (億円) ※下段：前年比	市場規模 (億円) ※下段：前年比
① 旅行サービス	38,971 (4.80%)	15,494 (▲60.24%)
② 飲食サービス	7,290 (14.34%)	5,975 (▲18.03%)
③ チケット販売	5,583 (14.25%)	1,922 (▲65.58%)
④ 金融サービス	5,911 (▲1.90%)	6,689 (13.17%)
⑤ 理美容サービス	6,212 (26.06%)	6,229 (0.27%)
⑥ フードデリバリーサービス	7,706 (9.00%)	3,487
⑦ その他（医療、保険、住居関連、教育等）		6,036
合計	71,672 (7.82%)	45,832 (▲36.05%)

図2 サービス系分野のB to C-ECの市場規模

(出典：経済産業省ウェブサイト (<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210730010/20210730010.html>))

2.2 店選びの実態

飲食店選びに慣れているかの調査を行ったデータがある ([6])。

図3は、飲食店選びをしたことがある人を熟練者と初心者に分けたものである。「飲食店選びには慣れている人」は29.1%、「飲食店選びには慣れていない人」は32.7%となり、飲食店を選ぶことに慣れていない人の方が多いことがわかる。熟練者と初心者の飲食店選びの特徴を比較すると、熟練者は、日常的に飲食店の情報収集を行い、SNSを頻繁にチェックしている。それに対して、初心者は基本的にインドア傾向にあり、複数人で飲食店に行く場合は自分以外の人に入る店を選んでほしいという意識を持っていて、自分で選ぶ場合は入りやすさを重視して選んでいる。以上のことより、熟練者は飲食店選びを楽しんでおり、グルメサイトを特徴的に利用している。一方、初心者は、飲食店選びへの苦手意識を持ち、お店は入りやすさと行きやすさという簡単な要素で絞る傾向があることが分かる。

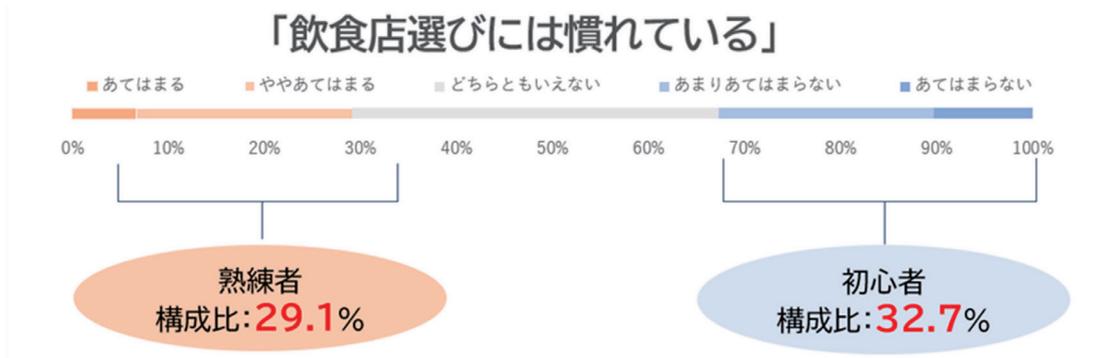


図3 飲食店選びに慣れているかのアンケート調査

3. 開発したアプリ

3.1 アプリの概要

ユーザの好みに合わせたレストランを三択に絞って提案するアプリのプロトタイプを Adobe XD で作成した。絞り込み機能として「値段」「距離」「ジャンル」をサブメニューや上部のバーにて変更可能にし、下部のルーレットボタンでレストランを再絞り込みする。それによってユーザの好みに合わせたレストラン選びが可能となる。

3.2 アプリの機能

(1) メイン画面 (図5)

メイン画面にはレストランを三択に絞って表示させている。選択のパラドックスという選択肢が多ければ多いほど自由で幸せになるという一見正しそうな考えに反して、現実には選択肢が多ければ多いほど不幸になっていくという心理作用を活用し、あえて選択肢を三択にすることによってユーザの飲食店選びを助長している。またレビューをあえてみせないことによって周りの人の意見に流されないため主観的なレストラン選びが可能となり、入店後や食事後に「やっぱりあの店が良かった」と後悔することを防ぐことができる。

(2) サブメニュー (図4)

上部のジャンルバーを左右にスクロールするとジャンルの一覧を見ることができる。これによって現在選択しているジャンルを一目で見ることができる。左にあるバーを右にスライドするとサブメニューが表示され、値段・距離・ジャンルなどを細かく調整できる。この絞り込み機能によってユーザの好みにあったレストランが表示されやすくなりよりマッチしたお店選びが可能になる。それによってユーザの満足度を高めることができる。

(3) ルーレットボタン

自分の好みのレストランが見つからなかった際にメイン画面の下部にあるルーレットボタンを押すと絞り込みした条件の中からレストランを自動的に三つに絞ってくれる。またアニメーションをつけることによってワクワク感を演出しながらレストランの更新回数も

減らすことができると予想される。それによってユーザの意思決定を助長することができる。



図4 サブ画面



図5 メイン画面

(4) レコメンド方法

混雑している店をアプリ側で回避し、空いているお店のみを提案する機能である。混雑状況をあえてユーザにみせないことによって情報過多による困難を軽減することができる。

3.3 アプリを使用することによるメリット

このアプリを使うことで得られるメリットは ①探す・見つける ②絞る・決める ③待つ・諦めるなどのタイムロスが削減できるメリットある。

3.4 類似の既存サービス

類似の既存サービスとして2018年2月にサービスが開始された「シャカシャカ」というサービスがあるが、現在ではサービスの提供が終わっている。これは、ユーザの現在位置によりランダムでお店を選ぶものである。最短2秒で飲食店を決定できるというのが特徴である。ユーザはお店の評価、口コミ、写真などの情報を見ることなく飲食店を決定することができる。

現在このサービスが終了していることから、ランダムで選べるというだけではユーザの評価が得られないことが分かった。それに加え、マネタイズにつながるほどの体験をユーザに提供することが出来なかったことも、サービス終了の一因として考えられる。

おわりに

ランチ難民を解消するという問題に対してのアプローチの仕方は見つかった。しかし、

解決できなかった課題も多々残った。一点目は、混雑情報を外部から取得することである。その情報をデジタルツイン上にマッピングし、密集具合で混雑と判断するプログラムとして、それを混雑情報として取得しアプリに反映させることである。二点目は、三択で提案するためのプログラムである。この開発したアプリでは、混雑上に加え、フィルタリング、ユーザの好みなどの要素も提案する際の判断材料になるため、このシステムの構築が困難であった。三点目は、飲食店へのアンケートである。実際にこのアプリのサービスが開始された場合、飲食店の協力が不可欠である。そのために、実際の飲食店へアンケートを取ることが必要であった。四点目は、マネタイズの方法の考案である。このアプリをリリースした場合、サービスを継続するためにはマネタイズが必須である。五点目は、更なるUI・UX（ユーザーインタフェース・ユーザーエクスペリエンス）の改善である。上述した5つの課題を克服することにより、ランチ難民を解消できると考えられる。

参考文献

- [1] おべんとね！っと、ランチ難民とは？ランチ難民を生まないために企業でできることは？ (<https://content.obentonet.jp/blog/lunch-nanmin2/>)accessed on 16 november 2022.
- [2] おかんの給湯室、ランチ難民を救え！従業員のランチタイムを充実させる対策とは？ (<https://www.okan-media.jp/fulfilled-lunchtime>)accessed on 16 november 2022.
- [3] Panasonic Game Changer Catapult, 23区内で働く人のランチ事情から考えた“ランチ難民”が生まれる現場 (<https://gccatapult.panasonic.com/stories/story29.php>)accessed on 16 november 2022.
- [4] When Choice is Demotivating: Can One Desire Too Much of a Good Thing?([https://faculty.washington.edu/jdb/345/345%20Articles/Iyengar%20%26%20Lepper%20\(2000\).pdf](https://faculty.washington.edu/jdb/345/345%20Articles/Iyengar%20%26%20Lepper%20(2000).pdf))accessed on 16 november 2022.
- [5] 令和2年度産業経済研究委託事業（電子商取引に関する市場調査）(<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210730010/20210730010.html>)accessed on 16 november 2022.
- [6] VALUES, 【調査リリース】コロナ感染拡大後の飲食店の選び方変化を調査 「外食シーン」「利用媒体」「人」視点で分析 (<https://www.valuescgc.com/news/20211108-3627/>)accessed on 16 november 2022.

國江貴之	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
和田 輝	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
湯浅翔太	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
中澤一馬	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
園田もえ	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
波多江茂樹	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	講師

デジタルツインを用いた選挙の投票率を 上げるための試みについての一考察

伊藤雄飛・菊池遼太・種村理音・千木良瞬・青木悠馬

波多江茂樹

A study of attempts to increase election turnout using the digital twin

Yuhi Itoh, Ryota Kikuchi, Rion Tanemura, Syun Chigira, Yuma Aoki
and Shigeki Hatae

Abstract: The theme of 'solving social issues' using Digital Twin was presented as a practical assignment. The reasons for selecting 'increasing voter turnout in elections', the proposed solution to the problem, and the prototype created for visualisation in small communities are described.

Keywords: Digital Twin, Election voter turnout, Blender, Cesium ion

はじめに

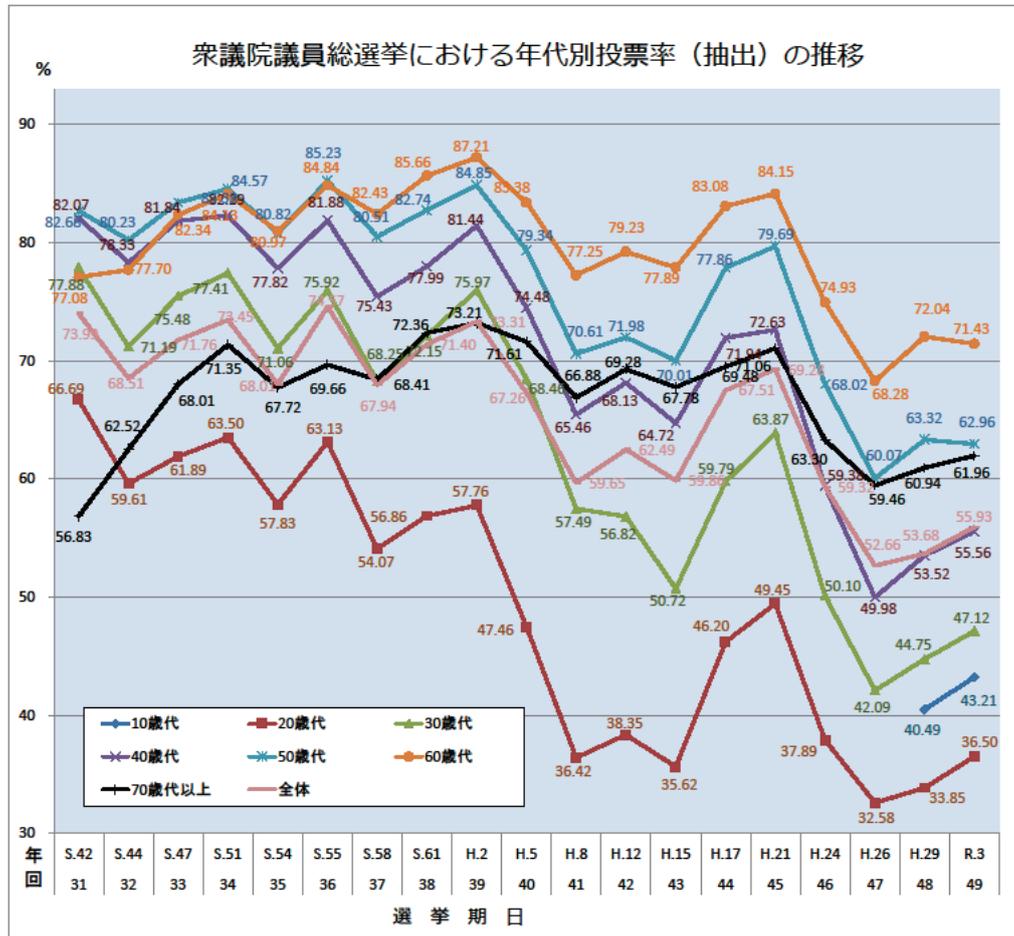
これは東京国際工科専門職大学の地域共創デザイン実習で行ったものをまとめたものである。デジタルツインとは、現実世界を模した3Dモデルと、それに紐づくデータが統合された仮想現実を作成し、それを用いて新たなソリューションを見つけるプロセス全体を表すものである。実習課題でデジタルツインを用いて「社会課題を解決する」をテーマとして提示された。「選挙の投票率を上げること」を選定した理由、課題の解決方法を提案し、小規模地域での可視化のための作成したプロトタイプについて述べる。

1. 選挙の投票率を上げることをテーマとして選定した理由

現在日本にはインフラ問題やエネルギー問題、人口の過疎過密など様々な地域課題が存在している。それらの課題を一つ一つ解決することも大事であるが、根本的に解決すべきなのは政治や政策なのではないのかという考えに基づいて、選挙の投票率を上げることをテーマとして選んだ。

2. 各年代の選挙投票率

図1は、衆議院議員総選挙における年代別投票率を表すグラフである。このグラフより、投票率が低いのは30代、20代、10代である。特に、投票率が低いのは20代である。若年者の投票率が低いと、政治家は若者受けがいいものよりも年配の方が得するような政策を多く公約として出す。その結果、40代以上の人を優先するような政治となる。その結果、将来の日本を背負う後進の育成の遅れ、子育て世代への負担の増加による出生率の低下などを防げず、人口が減少や国際競争力の低下が考えられる。また、投票率が低いと政治家は政治に対して真剣に向き合う必要性が低くなる。理由としては、適当に政治を実施しても、自分を支持している国民に対していい印象を残せば、次も当選できるからである。しかし、若年者の投票率が高ければ政治家は政治に対して真剣に取り組まなければいけなくなり、どの世代も同じような割合の投票率になれば、すべての世代が納得するような政治を行う必要があるようになる。現状として、政治家がまじめに働いていない証拠として、国会で寝ている映像がテレビで放映されていたり、税金の横領問題がニュースで報道されている。そのような問題を失くすためには、投票率を上げて政治家に危機感を持たせることが大事である。また、若年者の選挙率が低いと、より良い公約を考えている新しい世代の政治家の参入が難しくなる。以上の理由より、投票率が低いことは問題だと考えられる。



(%)

年	S.42	S.44	S.47	S.51	S.54	S.55	S.58	S.61	H.2	H.5	H.8	H.12	H.15	H.17	H.21	H.24	H.26	H.29	R.3	
回	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
10歳代	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	40.49	43.21
20歳代	66.69	59.61	61.89	63.50	57.83	63.13	54.07	56.86	57.76	47.46	36.42	38.35	35.62	46.20	49.45	37.89	32.58	33.85	36.50	
30歳代	77.88	71.19	75.48	77.41	71.06	75.92	68.25	72.15	75.97	67.26	57.49	56.82	50.72	59.79	63.87	50.10	42.09	44.75	47.12	
40歳代	82.07	78.33	81.84	82.29	77.82	81.88	75.43	77.99	81.44	74.48	65.46	68.13	64.72	71.94	72.63	59.38	49.98	53.52	55.56	
50歳代	82.68	80.23	83.38	84.57	80.82	85.23	80.51	82.74	84.85	79.34	70.61	71.98	70.01	77.86	79.69	68.02	60.07	63.32	62.96	
60歳代	77.08	77.70	82.34	84.13	80.97	84.84	82.43	85.66	87.21	83.38	77.25	79.23	77.89	83.08	84.15	74.93	68.28	72.04	71.43	
70歳代以上	56.83	62.52	68.01	71.35	67.72	69.66	68.41	72.36	73.21	71.61	66.88	69.28	67.78	69.48	71.06	63.30	59.46	60.94	61.96	
全体	73.99	68.51	71.76	73.45	68.01	74.57	67.94	71.40	73.31	67.26	59.65	62.49	59.86	67.51	69.28	59.32	52.66	53.68	55.93	

※① この表のうち、年代別の投票率は、全国の投票区から、回ごとに144～188投票区を抽出し調査したものです。

※② 第31回の60歳代の投票率は60歳～70歳の値に、70歳以上の投票率は71歳以上の値となっています。

※③ 第48回の第10歳代の投票率は、全数調査による数値です。

図1 衆議院議員総選挙における年代別投票率の推移

3. 課題の解決案

目的は、20代、30代の有権者に政治について興味を持ってもらい、若年者の投票率を上げることである。それを実現するために、デジタルツインを用いて公約の可視化する必

要がある。具体的には、政党が公約として実現する前と実現した後をデジタルツイン上で再現する。そうすることで、政治で何が変わったのか自分の目で俯瞰的に確かめることができる。その結果、政治に興味を持ち投票率が上がる効果が期待できる。選挙での公約をデジタルツイン上で再現できれば、有権者が公約をイメージすることが容易になり、投票率が上がると考えられるからである。

4. 可視化について

4.1 小規模地域の選定

最終目標は、デジタルツインで日本全国の政策や公約を実現し、日本の選挙投票率を向上させることである。しかし、いきなり日本全体をデジタルツイン化させるのは困難であるため、プロトタイプでは小規模地域でデジタルツインを用いた投票率向上を目指す。

選んだ小規模地域は、長野県飯田市である。理由は2つある。1つ目は「中央新幹線が開業するから」からである。中央新幹線とは、東京大阪間をつなぐ新幹線である。その途中下車駅に飯田駅があり、飯田市は現在飯田駅を中心とした街づくりが進んでいる。そこで、デジタルツインを用いて飯田市の公約や未来像を現実世界よりも先に可視化することにより、市長がどのようなことを考えていて市がどういった方向に向かっているのか知ることができる。市長を選ぶときの判断材料にすることができる。

2つ目の理由は、飯田市の選挙投票率が国の選挙投票率の推移と似ているからである。図2は飯田市議会議員選挙の投票率推移で、図3は衆議院総選挙における投票率の推移である。衆議院総選挙のほうが、投票率の低下が大きい。しかし、令和3年の投票率は飯田市が60.74%に対して衆議院総選挙は55.93%で、5%の違いのみである。もしも、今回の解決方法が成功し、飯田市の投票率が10%程度向上することができれば、全国を舞台にしても、投票率を10%程度上げることが可能になると考えられるからである。



図2 飯田市議会議員選挙 投票率の推移



図3 衆議院議員総選挙における投票率の推移

4.2 飯田市民の望んでいる公約

図4より、飯田市が今後力を入れるべきと思う施策のベスト4を挙げると次のようになる。

()内の数字は「そう思う」よと「どちらかと言えばそう思う」を足した数字である。

1. 稼ぎ、安心して働ける「魅力ある産業」を作る (87.4%)
2. 飯田の魅力発信し、飯田市への人の流れをつくる (84.6%)
3. 災害等に備え、社会基盤を強化し、防災力の向上を図る (84%)
4. 結婚・出産・子育ての希望をかなえる (84%)

上の4つを解決するためには、中央新幹線が通る飯田駅を中心に街づくりを進めれば解決できると考えられる。

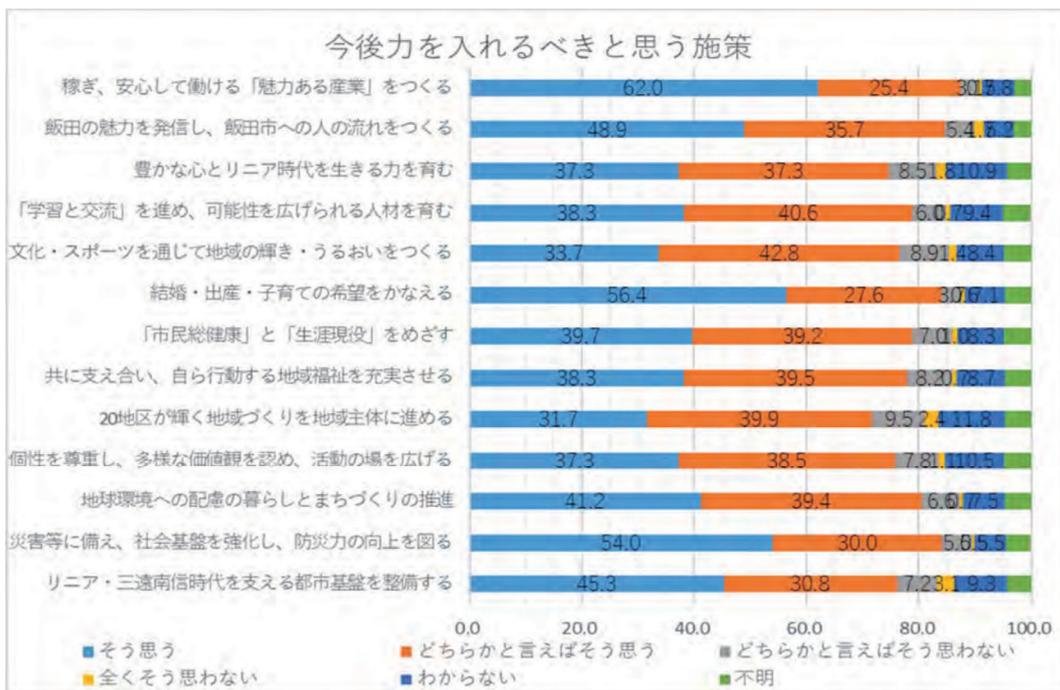


図4 飯田市民が望んでいる公約

4.3 可視化する内容

2022年現在の飯田駅周辺の3Dマップと中央新幹線開業後の飯田駅周辺の3Dマップを作成し、交通機関が増えたことによる利便性や買い物のしやすさを可視化する。また、人の流れはどのように変化するのか、中央新幹線開業後どのような経済効果があるのかをデジタルツイン上で再現する。そのような、データを飯田市民に提供することにより市長の政策や政治に興味関心を抱かせることが可能になる。

5. プロトタイプの作成

プロトタイプを作成するために、ツールとしてBlenderとCesium ion(図5)を用いた。Blenderは3Dモデリングができるツールであり、オープンソフトウェアとなっており、無償で提供されているため誰でも使用することができるものである。Cesium ionはブラウ

ザ上で表示することができる 3D データのプラットフォームである。もともと地球儀が用意されておりその上に地図や 3D モデルなど様々な 3D データをビジュアライズして、分析や解析を行うことができるツールである。Blender では、リニアの通る新しい駅の 3D モデルと駅の周辺の建物のモデルを作成した。駅のモデルは完成予想図が飯田市の公式ウェブサイトに掲載しているのみであった。リアルなサイズ感でなければ完成したモデルを見ても自分たちの町にどのような感じで駅ができるのかわかりづらいため、線路の幅や駅の柱の大きさ、平均的な道路の幅などを調べ上げ作成した。駅周辺の建物のモデルは、プラトーで探したがデータがなかったため、Blender のアドオンで google map から 3D モデルを作成し、足りない建物は地図をもとにすべて手作業で 3D モデルを作成した。また、駅と周辺の建物のモデルを重ねる際邪魔な建物が多数あったのでその建物群を削除した 3D モデルの作成も行った。

Cesium ion は、Blender で作成した飯田駅の 3D モデル（図 5）と駅周辺の建物（図 6）を地球儀の飯田市に設置し、変化がわかりやすくなるように飯田市の航空写真、飯田駅周辺の建物の 3D モデルを挿入したもの、不要な部分を削除した駅周辺の建物と飯田駅の 3D モデルを合わせ挿入したものの順番でそれぞれスライドを作成し流れで見ることができるようにした（図 7、図 8）。

また、これらだけでは飯田駅ができた際のメリットの表示ができないため、JR 東日本のウェブサイトに掲載されている新幹線駅の一日の平均利用者のデータをもとに 2012 ～ 2018 年のグラフを作成した。十数個の駅のグラフを作成し、最も増加の仕方が良かった駅、大宮駅、宇都宮駅、仙台駅の 3 つを選出した。このデータによって新幹線駅は利用者の増加数が少ないところもあるが、すべての駅で一日の平均利用者が増加していることがわかり、新しくできる中央新幹線の駅の飯田駅も徐々に利用者が増加し、利用者が増加することによって経済効果なども増加すると考えられる。

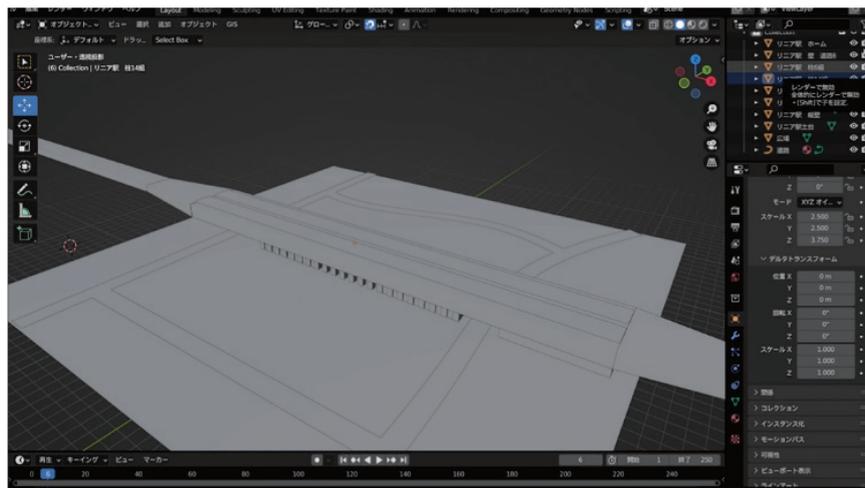


図 5 Blender 上で作成した中央新幹線の飯田駅の 3D モデル

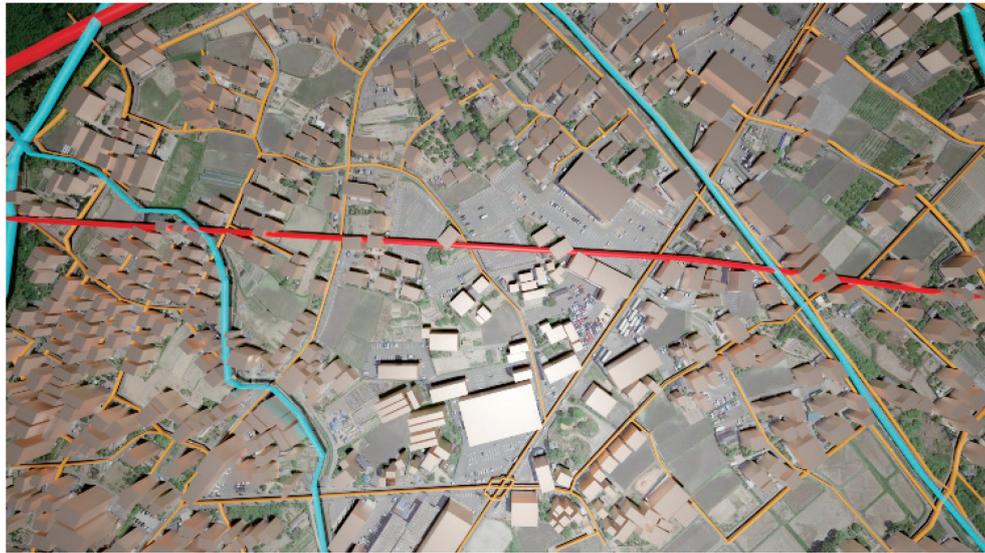


図6 Blender上で作成した中央新幹線の飯田駅ができる周辺の建物の3Dモデル



図7 Cesium ion上に中央新幹線の飯田駅の3Dモデルと周辺の建物の3Dモデルを挿入したもの



図8 Cesium ion 上に中央新幹線の飯田駅の3Dモデルと周辺の建物の3Dモデルを挿入したもの

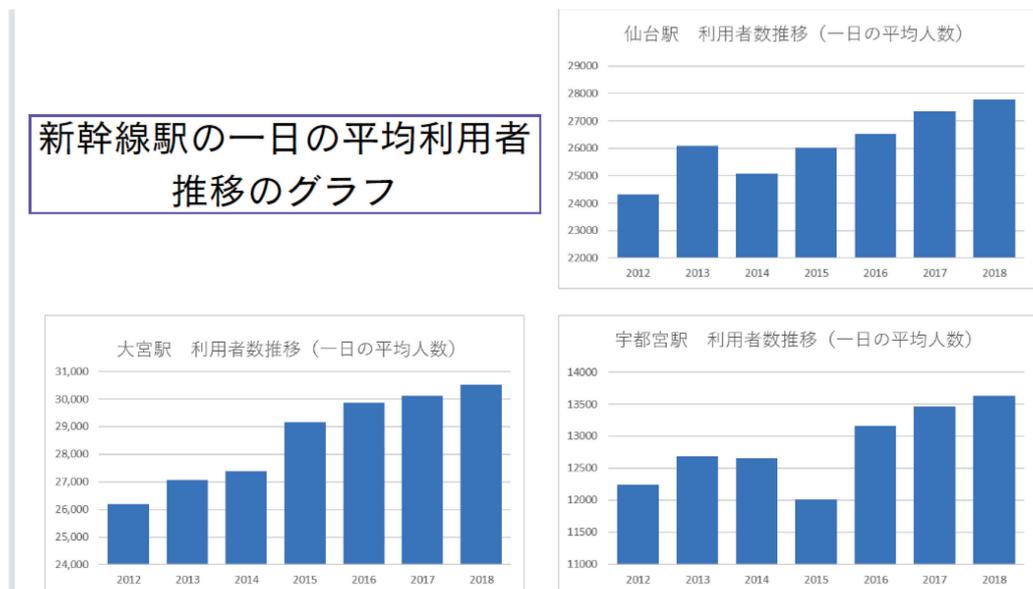


図9 新幹線駅の一日の平均利用者のデータを元にしたグラフ

おわりに

デジタルツインという技術を用いて、社会問題の新しい解決方法を探し出す課題に取り組んだ。選んだ課題は「日本の若年層における投票率の低さ」についてである。選挙の投票率を調査すると、20代と60代の投票率を比較すると約2倍近くの差があり、これからの日本を担うべき若年者向けの政策が通りづらくなっていることが分る。

そこで、今回提案する解決案は「政治の見える化」である。見える化とは、わかりにくいものを誰でもわかりやすい形にして発信することである。若年者の投票率が低い理由は、政治がわからない、投票しても現状が変わる気がしないというものである。そのため、公

約達成で変わったこと、変わることをわかりやすくする「政治の見える化」で、投票に対する意欲を促進できるのではないかと考えた。

デジタルツインを実際どう扱って「政治の見える化」を実現するために、2種類の手法を用いた。1つ目は kepler.gl というウェブサービスを使うことである。このサイトは任意のパラメータをまとめた csv ファイルを入稿することで、変数毎にレイヤー分けされた日本の 2D マップを作成することができる。このマップを使えば、政治家が達成した公約でどのように地域の状況が変わったのか、人口推移や満足度などを視覚的に伝えることができる。

2つ目は Blender という 3DCG ツールを用いて町の 3D マップを作り、新しくできる建物を作成することである。例えば空港ができるとき、地域住民の反対があることは珍しいことではない。そこで、事前に 3D マップ上に再現した町に施工予定の建物を再現し、それを公開することで市民が町に起こる変化を事前に理解することができる。これらの解決策を実現するためプロトタイプの作成に取り組んだが、日本全国の状態をまとめるのは現実的ではない。そこで、今回は新しく新幹線の駅ができる長野県飯田市にターゲットを絞ることとした。結果として、二つのプロトタイプは無事に完成したが、細かいディテール等改善すべき点はあった。しかし、国土交通省が提供する PLATEAU 等高品質なデジタルツインが日本の地域を再現するプロジェクトが進んでいることもあり、モデルの品質は特に問題にならない。むしろ今後供給が増えるフリーのモデルの活用法で差別化が可能であるため、今回のアイデアを発案できたことは大きな成果と言える。

今回、デジタルツインを用いて公約実現による影響が見える化するすることで、若年層の政治への理解を深めてもらう試みを行った。

参考文献

- [1] 図 1 総務省、国政選挙の年代別投票率の推移についてより
https://www.soumu.go.jp/senkyo/senkyo_s/news/sonota/nendaibetu/
- [2] 図 2 飯田市議会議員一般選挙 投票結果・開票結果の概要より
<https://www.city.iida.lg.jp/soshiki/46/kekka-shigi20210425.html>
- [3] 図 3 総務省、国政選挙における投票率の推移より
https://www.soumu.go.jp/senkyo/senkyo_s/news/sonota/ritu/index.html
- [4] 図 4 飯田市、市民の意識に関する基礎世論調査結果 18 ページより
https://www.city.iida.lg.jp/uploaded/life/95353_269206_misc.pdf

伊藤雄飛	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
菊池遼太	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
種村理音	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	2年生
千木良瞬	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
青木悠馬	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	2年生
波多江茂樹	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	講師

編集後記

本学初2回目の紀要を発行いたします。2020年4月より開学した本学（東京国際工科専門職大学）では、学生は卒業まで600時間もの実習時間があり、企業からの実践的な職業体験が与えられ、社会性の認識や、将来のイノベーションを考える力が醸成されていく姿が、見られるようになってきており、期間の長い実習の有効性が認識され始めています。教育に於ける学生参加の機会が増え、積極的な活動がなされることから、アクティブ・ラーニングと異なる効果を発揮し始めていると思われます。その結果として、今回は学生主体による投稿が5件集まりました。企業からのサポート・協力を仰いだ地域共創デザイン実習と隣地実務実習Ⅰ、Ⅱ、ソリューション開発、デジタルコンテンツ制作応用、デジタルコンテンツ制作応用実習を通じ、プロジェクトの推進や実務の詳細な実践を行う事ができるようになってきました。短期のインターンシップとは異なる隣地実務実習Ⅰ、Ⅱにより社会の仕組みを身に着け、職業感の育成が図られていると思われます。

このように企業との協同関係を紀要にも反映できるように、今回から、著者の条件を学内のみから学外者も可能とすることに変更しました。今回、2件の学生の投稿が企業との連名のものであり、学外社会での活動が活発化しています。このような著述を元に、内外の議論が活性化し、教育研究のさらなる発展や展開が進んで行くことが期待できます。

編集委員長 大関和夫

『東京国際工科専門職大学紀要』規定

(名称及び発行)

第1条 東京国際工科専門職大学紀要と称し、英語名を Bulletin of International Professional University of Technology in Tokyo とする。

(委員会の設置)

第2条 東京国際工科専門職大学は紀要を発行するため紀要委員会（以下「委員会」という）を設置する。

2 委員会は編集委員長および編集委員若干名から構成される。

(投稿者・分野)

第3条 投稿者は東京国際工科専門職大学の常勤あるいは非常勤の教員、助手、ティーチングアシスタント、その他学部長が認めた者とし、分野は各研究分野を主たる対象とする。共著者は他の研究機関等に所属する者も可能とする。

2 投稿された原稿の分類は、論文、総説、研究ノート、調査報告、研究資料等とする。

(執筆要項)

第4条 投稿は、別に定める執筆要項に基づかなければならない。(投稿要件案を参照)

(査読及び採録)

第5条 投稿された原稿は、論文については原則的に査読を受ける。この結果を踏まえて委員会は、全ての原稿の採録可否の決定及び編集を行う。

2 査読の方法は別に定める。

3 査読者は1名以上とする。

(投稿原稿について)

第6条 投稿する論文原稿は、未発表のものに限り、他の学術誌等にすでに掲載されたもの、または投稿中のものと同一あるいは類似した内容の原稿は掲載できない。ただし、総説、研究ノート、調査報告、研究資料等はこの限りではない。また、学会等での口頭発表の原稿に加筆修正を加えたものはその旨を記載しなければならない。

2 一度提出した原稿は、発行までの過程において、大幅に変更することはできない。

(発行及び公開)

第7条 発行は原則として年に1回とする。

2 公開は紙媒体や電子媒体とする。

(著作権等)

第8条 原稿の著作権は、投稿者（著者）に帰属する。他誌などにその全部または一部を使用する場合には、出典が本紀要であることを明記する。

- 2 前項のうち複製権、公衆送信権については、東京国際工科専門職大学に帰属する。
- 3 第三者の有する知的所有権については、投稿者の責任において、著者・発行者等の知的所有権者と交渉して当該問題を処理し、各種権利処理の状況を編集委員会に報告する。

付 則

この規定は、令和3年4月1日より施行する。

『東京国際工科専門職大学紀要』執筆要項

原稿の長さ

1. 原稿の長さは原則として以下の範囲内とする。なお、文字数には要約、注、参考文献、図表等を含める。制限字数を大幅に超えたものは受理しない場合がある。
 - ・ 論文、総説：20 ページ以内
 - ・ 研究ノート：20 ページ以内
 - ・ 調査報告：15 ページ以内
 - ・ 研究資料：15 ページ以内

要約とキーワード

1. 論文には英文要約（原則 300 語以内）とキーワード（原則日本語または英語 3～5 語程度）を置く。

書式

2. 執筆原稿は日本語または英語とする。
3. ファイルを提出する形式は原則として pdf とする。
4. 原稿は A4 版、1 頁全角文字の場合 40 字×40 行とした 1,600 字が最大となる、横書きを原則とする。
5. 論文は表題（日本語と英語）、英文要約、キーワード、本文、注、参考文献の順とする。論文以外の原稿は表題、本文、注、参考文献の順とする。
6. 図表は原稿の該当箇所にあらかじめ挿入しておく。図は下にキャプションを付ける。表は上にキャプションをつける。
7. フォントおよびフォントサイズは下記の通りとする。
8. 句読点は、和文は、「、」「。」、英文は、「,」「.」とする。

	表題	著者名	要約と キーワード	本文	注と 参考文献
和文	和文： ゴシック 18pt 英文： Times 14pt	和文： 明朝 14pt 英文： Times 12pt	和文： 明朝 10.5pt 英文： Times 10.5pt	明朝 10pt	明朝 9pt
英文	ゴシック 18pt	Times 14pt	Times 12pt	Times 10pt	Times 10pt

投稿方法

1. 投稿の締め切りは原則として毎年 5 月末とする。
2. 依頼原稿を除き、ファーストオーサーは投稿資格を有する者に限られる。
3. 投稿者は、紀要委員会が配布する投稿申込書に必要事項を記入し、原稿と併せて提出する。
4. 投稿申込書および原稿の投稿は原則として pdf 形式での提出とする。
5. 文章はわかりやすく書くようにお願いします。例えば、専門用語、略語などは、詳し

い説明を付するようお願いします。

校正

1. 校正は原則として2回までとし、著者が責任をもって行うものとする。
2. 査読の結果、論文の修正・再提出がある場合、執筆者は指定の期日までに修正個所を明記する形で論文を再提出する。
3. 原稿が発酵過程で著しく遅延した場合、次号への投稿扱いとする。

著作権

1. 第三者の有する知的所有権については、投稿者の責任において、著者・発行者等の知的所有権者と交渉して当該問題を処理し、各種権利処理の状況を編集委員会に報告する。
2. 複製権、公衆送信権については、東京国際工科専門職大学に帰属する。

執筆者一覧

富山 哲男	工科学部	
鈴木 雅実	工科学部	情報工学科
上條 浩一	工科学部	情報工学科
大関 和夫	工科学部	情報工学科
爰川 知宏	工科学部	情報工学科
辻野 雅之	工科学部	情報工学科
武本 充治	工科学部	情報工学科
山本 裕	工科学部	情報工学科
波多江茂樹	工科学部	情報工学科
水上 憲明	工科学部	情報工学科
山口 直彦	工科学部	情報工学科
小野 憲史	工科学部	デジタルエンタテイメント学科
二村 忍	工科学部	デジタルエンタテイメント学科
根岸 豊	工科学部	デジタルエンタテイメント学科
西田 健次		株式会社オレンジテクラボ
宮崎 淳		株式会社オレンジテクラボ
橋本沙也加		株式会社百代
橋本 尚子		株式会社百代
岡田ゆかり		株式会社百代

学生 青木悠馬、伊藤雄飛、大柴義永、菊池遼太、國江貴之、黒羽 晟、島村涼平、
園田もえ、高垣颯介、高田晃希、種村理音、千木良瞬、中澤一馬、湯浅翔太、
森 慧、諸井聖隼、和田 輝

編集委員

大関 和夫
武本 充治
水上 憲明
水上 恵太
山根 信二
三宅 茂樹
鈴木 雅実
駒井 章治

東京国際工科専門職大学 紀要 第2号

2023年3月31日 発行

発行 東京国際工科専門職大学
東京都新宿区西新宿 1-7-3
電話 03-3344-5555 (代表)

印刷 日本アスペクトコア株式会社
東京都新宿区新小川町 6-29