

第 59 回 東海フアジィ研究会 in 日間賀島(ヒマ研 2026) 予稿集



主催：日本知能フアジィ学会東海支部
協賛：IEEE 名古屋支部
日時：2026年2月24日(火)-25日(水)
会場：日間賀区民会館・日間賀島公民館

第59回東海フアジィ研究会（2026年2月24日～25日）プログラム

2月24日(火) 会場：日間賀島区民会館

12:40-12:45 【開会挨拶】東海フアジィ研究会・支部長 加納政芳（中京大学）

12:45-13:55 セッション1 座長：矢野 良和（愛知工業大学）

- P1-01* 「イケメン」は時代で変わるのか？自然言語処理と生成AIによる人物像の可視化
○天野優愛 早瀬光浩
- P1-02* ビジネスホテルとラブホテルの名称の比較
○三浦太一 中村剛士
- P1-03* 教育支援ロボットにおける問題数交渉手法と認知的徒弟制理論の組合せが大学生に与える学習効果の検討
○河野 太郎 楓 紘希 ジメネス フェリックス
- P1-04* 知能検査訓練ロボットにおける人格変更の基礎的検討
○木藤葵 石川育恵 ジメネスフェリックス 三谷真優 中島卓裕 吉田翔子
- P1-05* 人の動きに適応するInt-Ball2制御システム
○倉田航希 西野順二
- P1-06* ミニ四駆AIにおけるセンサ統合によるタイヤ空転挙動の推定
○小林大喜 早川博章 西野順二
- P1-07 SuperSonicに対する非線形処理に着目したフォールト解析の検討
○竹本修, 野崎佑典, 吉川雅弥

13:55-14:10 休憩

14:10-15:20 セッション2 座長：竹本 修（名城大学）

- P2-01* 誘導プロンプトはLLMをどこまで偏らせるか？
○原舞帆 早瀬光浩
- P2-02* 「高い店」と「安い店」の音はどう違うか？
○平井優大 中村剛士
- P2-03* 発達障碍児に対して共感を表出するパートナー型ロボットの基礎的検討
○高橋柚季 木股佳美 ジメネスフェリックス
- P2-04* 作業負担の軽減を目指した棚卸アプリケーションの基礎的検討
○山根彰真 ジメネスフェリックス
- P2-05* オノマトペの文字情報に基づくロボット歩容の感情・印象推定手法
○梅田拓実 加納政芳
- P2-06* モデルとの差異に基づくトロンボーン演奏姿勢の学習支援
○小野祥太郎 西野順二
- P2-07 平面領域を対象とした指差し位置推定とデータ収集負荷の低減化に関する研究
○矢野良和

15:20-15:45 休憩

15:45-16:45 招待講演 司会：吉川 大弘（鈴鹿医療科学大学）

題名 知 (Intelligence) - 人と機械の調和に向けて

講演者 中嶋 宏（東京都立大学）

16:45-18:30 休憩

18:30-21:30 ナイトセッション 司会：野崎 佑典（名城大学）

2月25日(水) 会場：日間賀島公民館

9:45-10:55 セッション3 座長：高野 敏明（静岡理科大学）

- P3-01* MLBトラッキングデータに基づく投手の連続した配球パターンと被安打リスクの関係
○渋谷明翔 西野順二
- P3-02* チェス接待AIの悪手生成
○小松原舞 高橋里司 西野順二
- P3-03* ドライビングシミュレータ上での妨害運転がドライバー心理に及ぼす影響
○奥井伶弥 加納政芳
- P3-04* 数字当てゲームにおけるロボットとサーバー間の通信性能に関する基礎的検討
○姫野祐輝 ジメネスフェリックス 牧翔吾

- P3-05* Webサイトの月間収益を自動確認するアプリケーションの開発
○塚本幹久 ジメネスフェリクス
- P3-06* 注文情報の表示・転写を行うアプリケーションの改良検討
○加藤勇護 牧翔吾 岡本貫志 ジメネスフェリックス
- P3-07* 運転行動を教示するロボットに適用できる共感表出法の基礎検討
○成田琴美 ジメネスフェリックス 吉川大弘
- P3-08 エコーステートネットワークにおける悪性回路のセキュリティ評価
○野崎佑典 竹本修 吉川雅弥

10:55-11:00 【閉会挨拶】東海ファジィ研究会・副支部長 早瀬 光浩（椋山女学園大学）

※ 発表者番号に * が付いたものは、受賞の審査対象

※ ○ が付いた著者は発表者

「イケメン」は時代で変わるのか？ 自然言語処理と生成 AI による人物像の可視化

天野 優愛¹ 早瀬 光浩¹

¹ 梶山女学園大学

1 はじめに

人物の魅力や「理想像」は普遍的なものではなく、社会的価値観や流行の影響を受けて変化すると考えられる。とりわけ俳優やタレントの人物像はメディアを介して広く共有されるが、年代ごとの差異を客観的に比較することは容易ではない。

近年は、自然言語処理技術の発展により、人物紹介文や特徴記述を分散表現として数値化し、傾向抽出やクラスタリングを行えるようになってきている。さらに、画像生成 AI の進展により、抽象的な特徴を視覚的に表現することも可能になった。

本研究では、年代別の人物情報を自然言語処理で分析し、年代ごとの代表的傾向を抽出したうえで、生成 AI を用いて人物像を可視化する枠組みを提案する。

2 関連研究

本研究は、「理想の男性像（イケメン像）」が社会的背景やメディア表象の影響を受けつつ、時代とともに変化してきたという議論に基づく。中尾は、戦後の女性誌『婦人公論』における男性像の分析を通じて、男性が社会では仕事を担う存在として描かれる一方、家庭内では甘える存在としても表象されていたことを指摘している [1]。北方らは 1980 年代以降の男性ファッション誌を対象に、「都会的で洗練されたスタイル」と「男らしい硬派なスタイル」といった対立的な枠組みの中で男性像が構築されてきたことを報告している [2]。飯野は男性の美意識が時代とともに変化し、多様な価値観が広がっている可能性を示している [3]。

近年は、人物像や理想像の変化を扱う研究として、顔画像を対象とした分析も報告されている。高橋らは、ジュノン・スーパーボーイ・コンテスト通過者を題材として、美男子平均顔の時代変化と女性の配偶戦略との関連について考察している [4]。

一方で、年代ごとの人物像をデータ駆動で整理し、視覚的に比較できる形で提示する枠組みは十分に整備されていない。本研究では、人物特徴の記述テキストを文埋め込みによりベクトル化し、クラスタリングにより年代別人物像の傾向を抽出したうえで、生成 AI を用いて人物像を可視化することで、理想の男性像の変遷を直感的に比較できる形で提示する。

3 提案手法

本研究の全体フローを図 1 に示す。提案手法は、人物情報テキストの収集と特徴抽出、分散表現によるベクトル化、K-means 法によるクラスタリングと代表抽出、LLM による人物像の文章化、生成 AI による可視化の 5 段階から構成される。

3.1 データ構築と特徴抽出

年代別に人物情報を収集し、各人物について外見的特徴に関する記述を整理する。以降の処理では、人物記述をテキスト特徴として扱い、各年代内で人物像の傾向を抽出する。

3.2 文埋め込みによるベクトル化

収集した人物記述テキストを、Sentence-BERT により埋め込みベクトルへ変換する。Sentence-BERT は BERT を基盤とし、文単位の意味類似性を反映したベクトル表現を得る手法である [5, 6]。本研究では、テキストを 384 次元のベクトルとして扱う。これにより、各人物を意味的な近さに基づいて比較可能となる。

3.3 K-means 法によるクラスタリングと代表抽出

各年代の埋め込みベクトルに対して K-means 法を適用し、人物像の系統を複数のクラスタとして分割する。K-means 法はデータをクラスタ数 K 個に分割し、重心の更新を繰り返すことでクラスタを形成する手法である [7]。クラスタ数 K は年代により過不足が生じる可能性があるため、本研究では K を 2~4 の範囲で探索し、シルエット係数が最大となる K を採用する（データ数が少ない場合は $K = 1$ として扱う）。この手順はプログラムにより自動化している。

また、各年代における代表的傾向を抽出するため、所属人数が最も多いクラスタを「主流クラスタ」と定義する。本研究では年代ごとの“最頻傾向”を代表とみなし、最多人数クラスタを主流クラスタとして扱うことで、当該年代で相対的に多く観測される特徴が反映されやすいと考えられる。

3.4 PCA による人物分布の可視化

埋め込みベクトルは高次元であるため、PCA により 2 次元へ次元削減し、散布図として可視化する。可視化の目的は、クラスタ数が分布に対して過不足ないか、および主流クラスタが分布のどの位置にあるかを視覚的

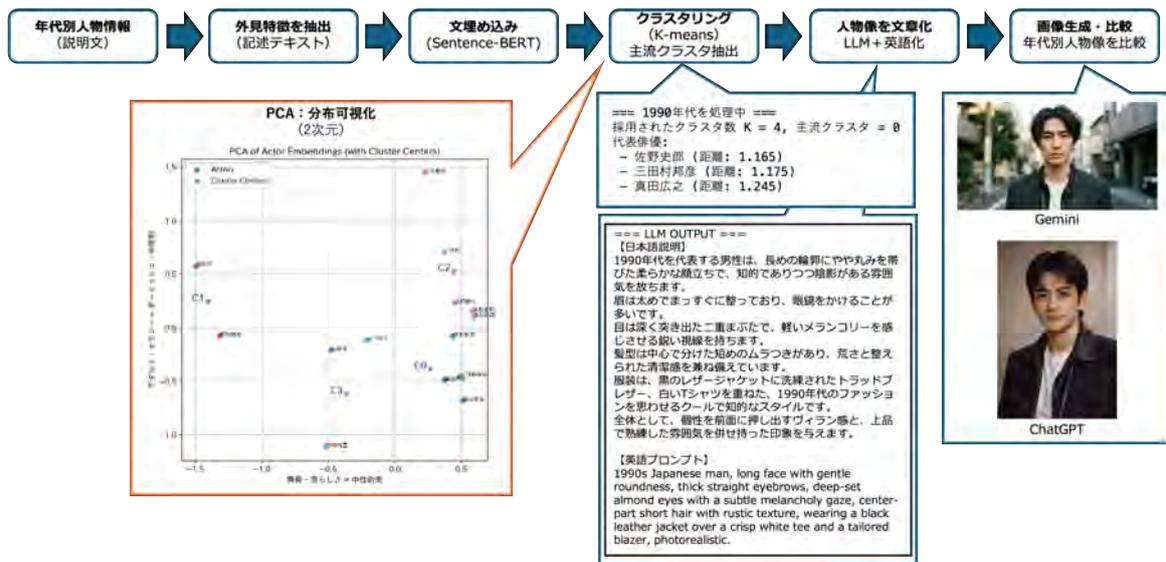


図 1: 提案手法の全体フロー (人物情報→埋め込み→クラスタリング→文章化→画像生成)

表 1: 年代別クラスタ数 K と主流クラスタの特徴

年代	採用 K	主流人数	主流クラスタの特徴 (要約)
1970 年代	2	5	爽やか, 端正, 短髪, 清潔感
1980 年代	2	5	都会的, 洗練, 整った眉, スタイリッシュ
1990 年代	4	5	やや中性的, 落ち着いた, 影のある雰囲気
2000 年代	2	10	若々しい, ナチュラル, 柔らかい印象
2010 年代	4	50	韓流風, 細身, 透明感, トレンド感
2020 年代	4	81	中性的, 清潔感, 整った顔立ち, 多様性

に確認することである。また、K-means 法で算出された各クラスタの重心も散布図上にプロットする。クラスタリング結果を PCA で可視化した一例を図 2 に示す。

4 人物像文章化と生成 AI による可視化

クラスタリングにより抽出した年代別特徴は、単語列や短い記述の集合として得られるため、人物像として直感的に理解するには統合的な表現が必要である。そこで本研究では、抽出された特徴を大規模言語モデル (LLM) により人物像として文章化し、画像生成 AI に入力可能な英語プロンプトへ変換する。

具体的には、主流クラスタの特徴語を入力として、ローカル環境で動作する LLM (Ollama 上の gpt-oss:20b) により人物像の文章を生成し、続いて画像生成向けの英語プロンプトへ整形する。これにより、年代ごとに得られた特徴を一貫した形式で表現し、視覚化に利用できるようにする。

画像生成には複数の画像生成 AI (ImageFX, Gemini, ChatGPT) を用いる。生成結果はモデルの特性や生成条件に依存するため、解釈には注意が必要である。本研究では、年代ごとの人物像を同一構成で並列配置し、

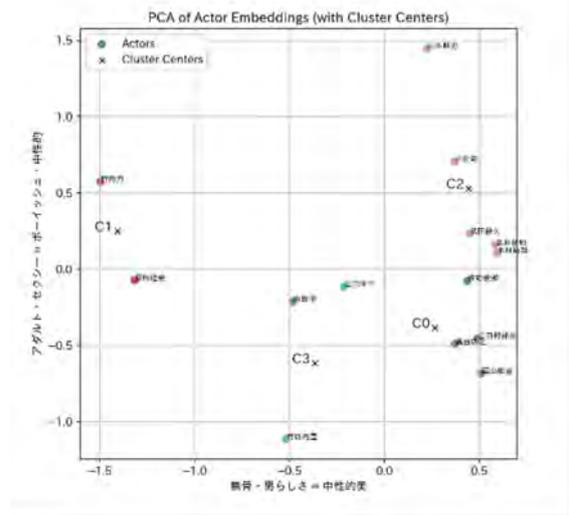


図 2: PCA による人物分布の可視化例 (1990 年代). 色は K-means によるクラスタ, × はクラスタ中心を示す。

生成画像に現れる差異を定性的に検討する。図 3 に、ImageFX による年代別人物像の生成結果の一例を示す。

5 結果

本章では、年代別クラスタリングによって得られた人物特徴の分布と可視化結果を示す。また、抽出特徴を LLM により人物像として文章化し、画像生成 AI により可視化した結果を示す。



図 3: ImageFX による年代別人物像の生成結果 (各年代について 5 回生成したうち代表例を 1 枚選定)

5.1 年代別クラスタリング結果

年代ごとに人物記述の分布が異なり、適切なクラスタ数 K も年代に応じて変動した。また、主流クラスタに含まれる代表特徴は年代ごとに異なり、同年代に活躍した人物であっても単一の顔立ちに収束しない (複数の系統が混在する) という仮説と整合する傾向が確認された。

5.2 PCA 可視化による分布確認

埋め込みベクトルを PCA により 2 次元へ次元削減し、散布図として可視化した。その結果、年代ごとに分布の広がりやクラスタ重心の位置関係が異なる傾向が見られた。これにより、クラスタ数が分布に対して過不足ないか、および主流クラスタが分布のどの位置に存在するかを視覚的に確認できた (図 2)。

5.3 生成画像による人物像比較

クラスタリングによって抽出された年代別特徴は単語列や短い記述の集合として得られるため、人物像として直感的に理解するには統合的な表現が必要である。そこで本研究では、抽出特徴を LLM により人物像として文章化し、画像生成 AI に入力可能な英語プロンプトへ変換した。

5.3.1 年代別人物像の可視化

画像生成には ImageFX, Gemini, ChatGPT を用い、年代ごとに得られたプロンプトから人物像画像を生成した。図 3 に、ImageFX による年代別人物像の生成例を示す。生成結果を年代ごとに並列配置して比較したところ、人物像の雰囲気や年代に応じて変化する傾向が視覚的に確認された。

図 4: 2010 年代における生成モデル間比較 (同一英語プロンプト, ImageFX / Gemini / ChatGPT)

5.3.2 2010 年代における生成モデル間比較

生成結果は画像生成モデルの特性にも依存するため、年代差の解釈可能性を補強する目的で、2010 年代を対象に 3 モデル (ImageFX, Gemini, ChatGPT) の生成結果を比較した。同一の英語プロンプトを入力した場合でも、写実性、肌や髪質感、表情の強調度合い、背景の情報量などに差が生じる場合があった。2010 年代における 3 モデル比較結果を図 4 に示す。この結果は、年代差の可視化だけでなく、生成モデル自体の表現特性の差が可視化結果に影響する可能性を示す。

6 考察

本研究では、自然言語処理により抽出した年代別人物特徴が、クラスタリングによって一定の代表傾向として整理可能であることを確認した。また、抽出された特徴を文章化し画像生成 AI に入力することで、年代ごとの人物像を視覚的に比較できることを示した。これにより、「年代別人物像の差異を人物像生成として可視化できるか」という目的に対して、一定の有効性が示唆された。

特に、年代ごとの生成結果を並列配置することで、特徴語だけでは把握しにくい雰囲気の差異を直感的に理解でき、分析結果の説明力を高める表現として有効である可能性がある。また、画像生成モデルを複数用いた比較により、同一の人物像の文章から得られる生成結果がモデルにより変化することも確認され、生成 AI を用いた人物像可視化では、モデル依存性を踏まえた解釈が必要であることが示唆された。

一方で、本研究の限界として、(1) 人物記述データの収集範囲や記述粒度が結果に影響する点、(2) 生成 AI の出力が確率的であり、再現性や解釈に注意が必要な点、(3) 生成画像の妥当性を検証するための定量指標や被験者評価が未実施である点が挙げられる。本研究の結果は、人物像生成による可視化の可能性を示す段階にとどまり、生成画像そのものの正確さを保証するものではない。

今後は、年代ごとの人物像の差異を定量的に評価する指標を設計し、被験者による印象評価と組み合わせることで、可視化結果の妥当性をより厳密に検証する必要がある。加えて、プロンプト設計や画像生成条件を統制し、生成結果の安定性と解釈可能性を高めることも課題である。

7 おわりに

本研究では、「理想の男性像」が時代によってどのように変化してきたかを、自然言語処理と生成 AI を用いて可視化する手法を提案した。人物記述テキストを Sentence-BERT によりベクトル化し、K-means 法によるクラスタリングで年代別特徴を抽出した。さらに、PCA により分布構造を可視化し、LLM と画像生成 AI を用いて人物像として表現した。生成画像の比較から、年代ごとの人物像の差異が視覚的に現れることを確認し、可視化の有効性と限界を考察した。

参考文献

- [1] 中尾香: "甘える男性像—戦後『婦人公論』にあらわれた男性像—", 社会学評論, Vol.54, No.1, pp.64-81, 2003.
- [2] 北方晴子, 大石さおり, 木村拓也, 菊田琢也, 廉恵晶: "現代における「男らしさ」の構築と男性ファッション誌の役割—1980年代以降, メンズノンノ誌を中心に—", 服飾文化共同研究最終報告 2012, pp.78-85, 2013.
- [3] 飯野智子: "男性の美意識の変化—その可能性—", 実践女子短期大学紀要, Vol.29, pp.237-245, 2008.
- [4] 高橋征仁, 染川みさと, "美男子平均顔の時代変化と女性の配偶戦略の関連についての一考察:—ジュノン・スーパーボーイ・コンテスト BEST30 通過者を題材として—", 異文化研究, Vol.17, pp.71-84, 2023.
- [5] J. Devlin, M. -W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova: "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding," Proc. NAACL-HLT, 2019.
- [6] N. Reimers and I. Gurevych: "Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks," Proc. EMNLP-IJCNLP, 2019.
- [7] J. MacQueen: "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations," Proc. 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967.

ビジネスホテルとラブホテルの名称の比較

三浦 太一¹ 中村 剛士¹

¹ 中部大学工学部情報工学科

1. はじめに

音そのものが、特定のイメージを喚起する事象は音象徴と呼ばれる[1]。音象徴にはいまだ解明されていない部分が多い。我々の研究の最終目的は音象徴の全容を明らかにすることである。

本研究では、ラブホテルの名称を事例として採用し、機械学習による分類実験を行うことで、音象徴の調査・解析を行う。ラブホテルとは、専ら、異性を同伴する客の宿泊の用に供する政令で定める施設のことである[2]。本研究の目的は、ラブホテルの店名が持つ音響的な特徴を、機械学習を用いて発見し、その特徴が音象徴であるかを議論することである。

2. 分類・特徴解析の方法

本研究では、ホテルの店名が持つ音象徴として、“ラブホテル”か“一般ホテル”の2クラスを識別できる音響的な特徴の存在を調査し、分類可否を正解率・F値によって示す。分類器にはCNNを用いた。また、分類結果に対してGrad-CAMによる特徴分析を行い、2クラスの識別に寄与した音響的な特徴を調査する。クラス分類については、店名を音響特徴量(MFCC)に変換しLeave-one-out法による2クラス分類を行う。この分類器は入力された店名に対して、“ラブホテル”か“一般ホテル”のいずれかのクラスを出力する。図1は本研究で用いた分類器であるCNNの構成を示す。

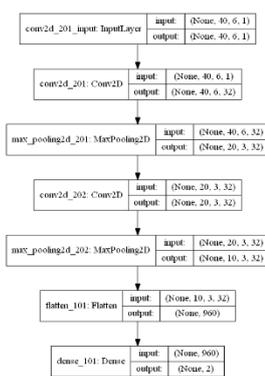


図1 CNNの構成

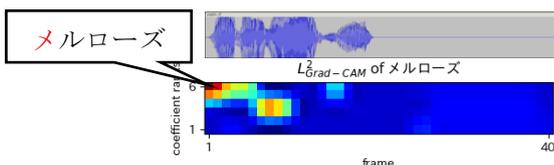


図2 Grad-CAMのヒートマップ例

次に、正しいクラスが出力された店名について、Grad-CAMによる特徴分析を行う。Grad-CAMによる特徴分析を行う。Grad-CAMは図2のようなヒートマップを出力し、入力した各店名のMFCCベ

クトルに対応する。ヒートマップ上に濃赤色で示される箇所は正分類に寄与したと考えられる箇所を示しており、分類する上で特徴的なモーラの一部であると考えられる。そこで、濃赤色箇所に対応するモーラを抽出し、それを重要モーラとした。本研究では、重要モーラを音象徴仮説設定の解析対象とした。

3. 分類結果と Grad-CAM による解析

分類実験に使用したデータセットはラブホテル72個、一般ホテル229個、合計301個である。その内、ラブホテルから50個、一般ホテルから50個ランダムに抽出し、合計100個のデータにて5回実験を行った。各回の結果を表1に示す。正解率の平均は約51%、F値の平均は約51%であった。チャンスレベルと大きな差はないが、1回目、2回目、3回目にてチャンスレベルを超えていることから、とある条件を満たした場合にホテルをある程度分類可能であることが分かる。

表1 各回の分類結果

実験回	正解率	F 値
1 回目	0.53	0.525
2 回目	0.57	0.574
3 回目	0.48	0.447
4 回目	0.47	0.495
5 回目	0.52	0.512

次に、出力された分類結果の正解データについて、Grad-CAMのヒートマップから、クラスの分類に影響を与えたと考えられる一部を表2に示す。比較するとトとグの音が一般ホテル名に多く出現している。一方、エとルの音がラブホテルに多く出現しており、ンの音は両クラスで頻出している。

	一般ホテル	ラブホテル
エ(e)	3	8
ル(ru)	6	10
グ(gu)	10	1
ン(N)	27	16
ト(to)	12	5

4. 考察

Grad-CAMのヒートマップから得られた結果から、ラブホテル名での重要なモーラはエとルである可能性がある。一方、一般ホテル名での重要なモーラはグとトである可能性がある。ンというモーラに関しては、両クラスにて出現していることから、ンが含まれているかではなく、出現する場所によって判断が変わってくる可能性があると思われる。

5. まとめ

本研究では、ホテルの店名を音象徴事例と仮定し調査した。また、ヒートマップから各ホテルにおける重要モーラおよび、モーラの位置の重要性を音響的な特徴として獲得した。しかし、そのモーラが実際に人にホテルの印象を喚起させるか否かを調査することはできていない。

今後は、音象徴仮説の設定から、重要モーラの解析を進めるとともに、重要なモーラの有無に対して、存在しない店名を作成し、被験者実験を通して音象徴の検証を行う予定である。

参考文献

- [1] Ohala, John J., “The frequency code underlies the sound symbolic use of voice pitch,” *Sound symbolism*, pp. 325–347, 1994.
- [2] 風俗営業, “風俗営業等業種一覧”, 警視庁, https://www.keishicho.metro.tokyo.lg.jp/tetsuzuki/fuzoku/gyoshu_ichiran.html

教育支援ロボットにおける問題数交渉手法と認知的徒弟制理論の組合せが大学生に与える学習効果の検討

○ 河野 太郎¹, 楓 紘希¹, ジメネス フェリックス¹

¹ 愛知県立大学

1 はじめに

ロボットとの共同作業は、画面上のエージェントと比べて、アドバイスが優位に働くこと [1], などが報告されている。また、教育現場においても、ロボットとの共同学習は、画面上のエージェントと比べて高い学習効果を与えること [2] が報告されている。これらの研究結果から、近年、人の学習を支援する教育支援ロボットが注目されている [3]。

教育学において、学習者の学習意欲を高め、より高い学習効果を与えるためには、自発的な学習を促すことが重要であると報告されている [4]。自発的な学習とは『他からの強制ではなく、自らの意思に従って行われる学習 [5]』のことである。楓らの研究では、ロボットが学習者と会話しながら解答する問題数（以下、解答問題数）を学習者自身で会話手法である「問題数交渉手法」を構築した [6]。実験結果から、問題数交渉手法に基づいて会話するロボットでは、従来の会話しないロボットと比べて、学習者が自発的に解答問題数をより多く解くことが示唆された。

また、従来の教育支援ロボットでは、ロボットが自律的に学習支援を提供する「認知的徒弟制理論 [7]」に基づく行動モデルを提案した [8]。その結果、認知的徒弟制理論を搭載したロボットは、従来の学習者がヒントを要求した時にヒントを提供するロボットと比べ、学習者の学習効果を高めることが示唆された。しかしながら、問題数交渉手法および認知的徒弟制理論を共に搭載したロボットが学習者に与える影響については検証されていない。

そこで本研究では、問題数交渉手法と認知的徒弟制理論を共に搭載したロボットが、大学生に与える学習効果を検証する。実験では、認知的徒弟制理論のみを搭載したロボットと問題数交渉手法と認知的徒弟制理論を共に搭載したロボットを比較し、各ロボットが学習者に与える影響を検証する。

2 問題数交渉手法

問題数交渉手法は、学習者の自発的な学習環境を構築するために、ロボットが学習者との会話によって解答問題数を決定するための会話手法である [6]。

本手法のフローチャートを図1に示す。このうち、赤枠で示される部分がロボットの発話、青枠で示される部分が学習者の発話である。本手法では、学習前にロボッ

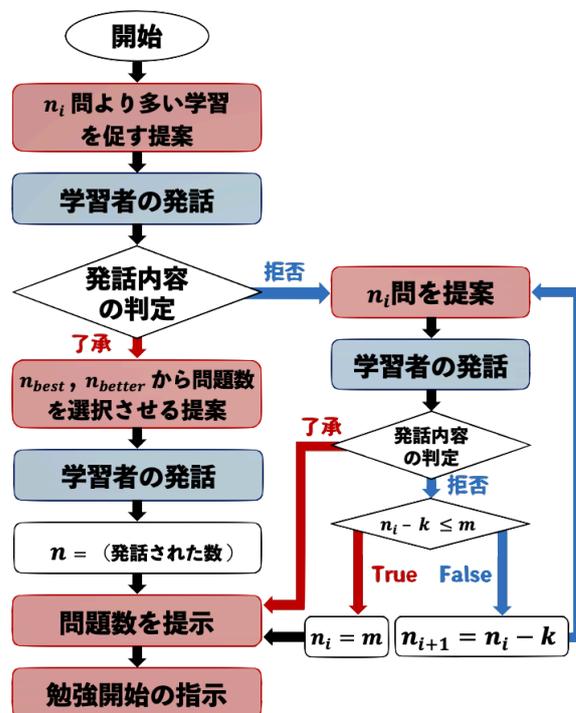


図 1: 問題数交渉手法のフローチャート

トが学習者に対し、問題数 n_i より多い学習をするように提案する。例えば、ロボットは「 n_i 問よりたくさん勉強してもらえないかな？」のように発話する。学習者はロボットの発話に対し、「いいよ」などの了承、もしくは「いやだ」などの拒否で解答する。学習者がロボットの提案を了承した場合、ロボットは学習者が最大限解答できそうな問題数 n_{best} および、学習者に対し、理想的な解答問題数 n_{better} を提案する。なお、 n_{better}, n_{best} は、 $n_{best} > n_{better}$ を満たす。例えば、ロボットは「 n_{best} 問と n_{better} 問で選べるよ。」のように発話する。学習者はこれに対し、「 n_{better} 問」のように返答する。ロボットは、学習者の返答の問題数で学習を開始する。一方で、学習者がロボットの最初の提案を拒否した場合、ロボットは n_i 問学習することを提案する。これに学習者が了承した場合、問題数を n_i 問として学習を開始する。また、 n_i 問の学習も拒否した場合、問題数を一定の値 k だけ減らし、問題数を $n_2 (= n_1 - k)$ として再提案する。学習者が拒否し続けると、その拒否回数 i に応じて、 $n_{i+1} (= n_i - k)$ と問題数を k だけ減らし、再提案し続ける。ただし、 $n_i - k \leq m$ となった場合（ロボットが提示

する問題数が m 以下となった場合), 学習者がロボットの提案を拒否した直後, 問題数を強制的に $n_i = m$ として提示し, 学習を開始する.

3 認知的徒弟制理論に基づくロボットの行動モデル

認知的徒弟制理論において, (1) から (3) 段階の学習支援は, 学習者の学習能力および応用力を向上させるために重要な段階であると報告されている [7][9]. そこで認知的徒弟制理論における (1) から (3) 段階による学習支援を切り替えながら提供する行動モデルが構築された [8]. 下記に行動モデルの概要を示す.

(1).Modeling

ロボットは, 問題が出題されてから 3 秒後に, 問題の解き方を学習者へ教示する.

(2).Coaching

ロボットは, 問題が出題されてから 3 秒後に, 問題を解くためのヒントを提供する.

(3).Scaffolding and Fading

ロボットは, 学習者が要求した場合に, Coaching の段階と同じヒントを学習者に提供する.

本モデルでは, 各問題に対して段階を切り替えながら学習支援を提供する. 各問題に対して「正解数」を次のように設定する. 初回の学習時の正解数を 0 とする. 問題に正解した場合, その問題の正解数に 1 を加える. このとき, 正解数が 2 より大きくなる場合は 2 のままとする. 間違えた場合, その問題の正解数を 1 だけ減らす. このとき, 正解数が 0 より小さくなる場合は 0 のままとする. これらの正解数に基づき, 各問題の正解数に応じて認知的徒弟制理論の (1) から (3) 段階目の学習支援を切り替えながら提供する. 具体的には, 正解数が 0 の問題が出題された場合, ロボットは Modeling による学習支援を提供する. 正解数が 1 の問題が出題された場合, ロボットは Coaching による学習支援を提供する. 正解数が 2 の問題が出題された場合, ロボットは学習者の要求に応じて Scaffolding and Fading による学習支援を提供する.

4 ロボットの概要

4.1 使用したロボット

実験には, 図 2 のようなモータを搭載した手と, 液晶パネルから構成される教育支援ロボット「Rasby」を使用した.



図 2: 使用したロボット「Rasby」

4.2 学習システム

学習者は Rasby の液晶パネル下部に表示される問題, 解答, 解説を用いて学習する. 本研究では, システム内に IT パスポートの問題 [10] を 40 問搭載し, 実験参加者に解答させる.

5 被験者間実験

5.1 方法

大学生 30 名を対象とし, 大学生と Rasby が共に学習する被験者間実験を実施した.

本評価実験は約 4 週間にわたる長期実験である. 各実験参加者は, 1 回目の学習より前に事前テストを受験する. その後, 1 週間に 1 回のロボットとの学習を計 4 回実施する. 4 回目の学習の 2 日後に事後テストを受験する.

実験参加者は, 事前テストの結果によって認知的徒弟制理論のみを搭載した群 (統制群), 問題数交渉手法と認知的徒弟制理論の両方を搭載した群 (提案群) に 15 名ずつ振り分けられる.

統制群は, 1 回の学習で 20 問学習する. 一方, 提案群の問題数交渉手法における $n_1, n_{best}, n_{better}$ をそれぞれ, $n_1 = 20, n_{best} = 30, n_{better} = 25$ とした. なお, 本研究では, 1 回目の学習者の発話で, ロボットの提案を学習者が拒否した場合, ロボットは強制的に n_1 問を学習者の解答問題数とし, 学習を開始した.

5.2 評価指標

本実験の評価指標では, 事前テストと事後テストの差を向上点として定義し, 評価指標として使用する.

5.3 結果

図 3 は, 各群における学習者の向上点の平均値を示す. 統制群の平均点に比べ, 提案群の平均点がおよそ 1.4 点



図 3: 各群の学習者の向上点の平均値

高いことが理解できる。そこで、各群の学習者の向上点の平均値に対し、ステューデントの t 検定を実施した結果、有意差が認められなかった (自由度 28, p 値=0.549 n.s.). これにより、認知的徒弟制理論のみを搭載したロボットと問題数交渉手法と認知的徒弟制理論を搭載したロボットの実験参加者に与える学習効果に差があるとは言えないことが示唆された。

6 終わりに

本稿では、問題数交渉手法と認知的徒弟制理論を共に搭載したロボットが学習者に与える学習効果を検証した。実験では、大学生を対象に、認知的徒弟制理論のみを搭載したロボット (統制ロボット) と、問題数交渉手法及び認知的徒弟制理論の両方を搭載したロボット (提案ロボット) を比較する実験を実施した。実験結果から、統制ロボットと提案ロボットが学習者に与える学習効果に、有意差は認められなかった。

今後はこれらの手法によるロボットへの印象効果を検討する予定である。

7 謝辞

本研究は、科研費 (C)(24K15149) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 小泉智史, 神田崇行, 宮下敬宏: "ソーシャルロボットを用いた協調学習実験", 日本ロボット学会誌, Vol29, No.10, pp902-905, (2016)
- [2] ジメネスフェリックス, 加納政芳, 吉川大弘, 古橋武: "建設的相互作用を元に行動するロボットとの協調学習の実現可能性", 人工知能学会論文誌, Vol31, No.3, pp.A-F93-1-10, (2016)
- [3] ジメネスフェリックス, 加納政芳: "教育現場で活躍されるロボットの研究動向", 知能と情報, Vol26, No.1, pp2-8, (2014)
- [4] 倉智佐一: "自発的学習のさせ方", 自動心理, Vol25, No.3, pp38-45, (2008)
- [5] 湊三郎, 浜田真: "プラトンの数学観は子どもの主体的学習を保障するか—数学観と数学カリキュラム論との接点の存在—", 日本数学教育学会誌, Vol76, No3, p.2-, (1994)
- [6] H.Kaede, F.Jimenez, T.Miyamoto: "Impact of Negotiating the Number of Solved Problems by a Robot on Junior High School Students in Collaborative Learning", J. Robot. Mechatron, Vol37, No.3, pp637-647, (2025)
- [7] A.Collins, J.S.Brown, S.E.Newman: Cognitive Apprenticeship: Teaching the Craft of Reading, Writing and Mathematics, Essays in Honor of Robert Glaser, Ebaum, HiLLsdale NJ, (1989)
- [8] R. Yoshizawa, F.Jimenez, K. Murakami: "Proposal of a Behavioral Model for Robots Supporting Learning According to Learners' Performance", J. Robot. Mechatron, Vol.32, No.4, pp.769-779, (2020)
- [9] S.P.Lajoie, A.LLesgold: Apprenticeship Training in the Workplace: Computer-Coached Practice Environment as a New Form of Apprenticeship, Machine Mediated Learning, No.3, pp7-28, (1989)
- [10] IT パスポート試験ドットコム: "IT パスポート過去問道場", IT パスポート試験ドットコム, (2026), (URL: <https://www.itpassportsiken.com/ipkakomon.php>)

知能検査訓練ロボットにおける人格変更の基礎的検討

木藤 葵¹ , 石川 育恵¹ , ジメネス フェリックス¹,
 三谷 真優², 中島 卓裕³, 吉田 翔子⁴
¹ 愛知県立大学 ² 名古屋大学,
³ 名古屋学芸大学 ⁴ 日本赤十字社愛知医療センター名古屋第一病院

1 はじめに

近年、教育現場において、発達障害児の割合が増加している [1][2]。発達障害児の困難や苦手な領域を理解する方法として心理検査が挙げられる。心理検査の実施は心理専門職の重要な専門業務の一つ [3] であり、心理支援の高まりとともに心理検査のニーズも高まっている [4]。臨床心理士養成大学院では心理検査の訓練は必修である。心理検査の訓練方法としては、座学による訓練と演習・実習による訓練がある。実習訓練方法は学生同士で行うロールプレイと、実際の子どもに対して行う試行に分けられる。

しかしながら、学生同士でロールプレイを実施できる体制や、子どもを対象に知能訓練を実施できる体制が十分に整っていない。そのため、訓練が不十分なまま発達障害児に対して初めて検査することになり、予測不能な児童の行動に対応できず、適切な検査が実施できない可能性が高い。

本研究では、学習者の学習を支援する教育支援ロボットを活用することで、臨床心理士の訓練環境を整えられると考えた。従来研究においてロボットを活用した臨床心理士における知能検査の訓練は有効に働く可能性があることが示唆された [5]。しかしながら、従来研究では正答と誤答をランダムで発話する行動モデルを構築したため、定型発達児や発達障害児が存在する実際の児童を再現できていない可能性がある。

そこで本稿では、臨床心理士が定型発達児を再現したロボット（以下、定型発達ロボット）と発達障害児を再現したロボット（以下、発達障害ロボット）に知能検査を実施することで、臨床心理士が定型発達ロボットと発達障害ロボットとの訓練に抱く印象を調査する。定型発達ロボットには、定型発達児が知能検査を受けた際の発話を搭載した。また発達障害ロボットには、発達障害児が知能検査を受けた際の発話を搭載した。被験者実験では、田中ビネー知能検査 V の知識を有する大学院生が、定型発達ロボットおよび発達障害ロボットに対して知能検査を実施した。

2 心理検査

2.1 心理検査の概要

心理検査には、知能検査、発達検査、人格検査などの種類がある [6]。本研究では、知能検査に着目する。知



図 1: Sciurus17 の外観

能検査とは、臨床心理士が行う心理検査のひとつであり、医療・福祉・教育の領域において最も活用されている検査である。臨床心理士は、発達障害の児童に対して学習や日常の困難感を把握することを目的として、知能検査を実施することが多い。

2.2 田中ビネー知能検査 V [7]

本稿では、児童に対する知能検査として病院や福祉施設でよく使用されている、田中ビネー知能検査 V [7] を使用した。

田中ビネー知能検査 V では、臨床心理士が検査対象である児童の年齢に応じた質問をすることで、児童の知能を測定する。質問内容は、「ボール取れる？」などの年齢に応じた質問事項が構成されている。田中ビネー知能検査 V の詳しい検査内容は公表すると、検査問題の内容を知りえた者が事前にトレーニングを行い、知能の測定に影響を与える可能性がある。そのため、本稿では、実際の検査内容は伏せて、検査の流れのみを説明する。

3 提案ロボット

3.1 ロボットの概要

本研究では、株式会社アールティの上半身ヒューマノイド型研究用 17 軸ロボット「Sciurus17」を使用した [8]。ロボットの外観を図 1 に示す。

3.2 ロボットにおける訓練内容

本研究では、3 歳級の知能検査を実施する訓練を構築し、ロボットに搭載した。音声は、3 歳児を想定した音

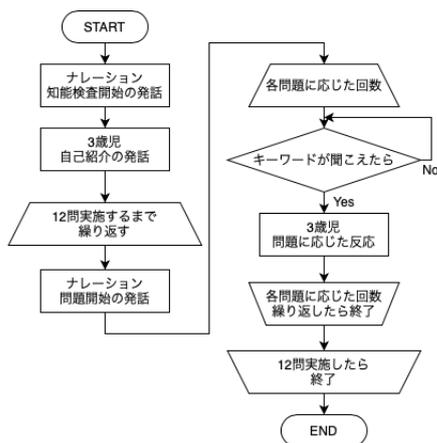


図 2: 提案ロボットでの訓練の流れ

声と、ナレーションの音声を搭載した。3歳児を想定した音声で問題の解答を行い、ナレーションを想定した音声で問題を進めていく。提案ロボットでの訓練の流れを図2に示す。

まず、ナレーションの音声で検査開始の案内を流した後、3歳児の音声で自己紹介をする。自己紹介後、検査の実施に移る。3歳級の検査は全部で12問存在する。

問題が開始されると、臨床心理士が問題番号に沿った問題内容を出題する。問題を出題する文言は決まっているので、その文言から検査者が必ず発話しなければならない単語や文章をキーワードとして設定した。例えば、「ボールは何個ありますか?」という問題であれば、「何個」というワードをキーワードとする。そのため、キーワードは複数個用意し、ロボットがスムーズに次の段階に進むことができるように設定する。

3.3 ロボットの発話内容

何か物を見せた時に、定型発達ロボットおよび発達障害ロボットは異なる発話をし、それぞれの人格らしい発話をする。

例えばももを見せた時に、「この名前を教えてください」と質問すると、定型発達ロボットは、「もも」と正解し、一方で、発達障害ロボットは、「ピンクの美味しいの」や、「これお家で食べるの。でも美味しくなくて私きらーい…」のように質問の答えにならないような受け答えを発話する。

4 被験者内実験

4.1 実験方法

被験者実験では、田中ビネー知能検査Vの知識を有する大学院生3名に対して、定型発達ロボットと発達障



図 3: 被験者実験の様子

害ロボットの2種類のロボットを使用し、ロボットとの訓練に対する印象を比較した。実験は、2026年1月16日に実施した。実験の様子を、図3に示す。

被験者は、1回目に定型発達ロボットもしくは発達障害ロボットのどちらかに対して、流れるナレーションの音声に従って、3歳級の検査内容を順番に実施していく。3歳級の検査(全12問)を実施し終わると、訓練終了とする。訓練終了後、訓練に対する印象についてのアンケートを実施する。その後、2回目に1回目で実施していないロボットに対して訓練を実施し、訓練終了後に訓練に対する印象についてのアンケートを実施する。アンケートには、ユーザーの体験や満足度を評価するためのアンケート手法である「UEQ[9]」を用いる。なお、順序効果を考慮し、訓練を実施する2種類のロボットの順番を、被験者によって変更している。

4.2 評価方法

UEQ[9]は、26個のアンケート項目で構成されている。アンケート項目には、「楽しくない-楽しい」、「価値がある-価値がない」、「モチベーションを高める-モチベーションを下げる」などがあり、それぞれの項目は、-3から+3の7段階で評価される。UEQでは、26個のアンケート項目を、6個の評価項目に分類している。評価項目は、「魅力度」、「明快度」、「効率度」、「信頼性」、「効果度」、「新規性」の6個に分類されている。それぞれの評価項目に対する結果を観察する。

UEQの解析方法について説明する。UEQでは、ベンチマークデータが提供されている。ベンチマークでの評価は、アンケートの回答の平均値が高いかどうかを推定する評価指標である。ベンチマークでは、468件の研究の訓練システムにおける21,175名がアンケートに回答したデータに基づいて、「Excellent」、「Good」、「Above Average」、「Below Average」、「Bad」の基準値が定められている。本実験における平均値がどの段階に位置しているかをベンチマークを用いて相対的に評価する。

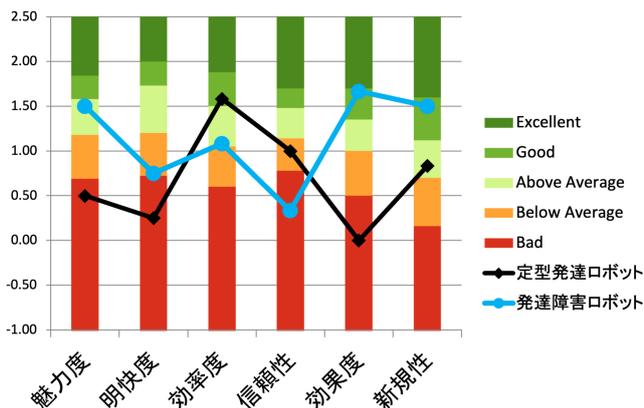


図 4: 被験者実験におけるベンチマークの評価

4.3 結果

本実験は被験者人数が3人であり、UEQで評価するには不十分であるが、ベンチマーク評価についてのみ評価した。定型発達ロボットと発達障害ロボットの被験者実験のベンチマークの評価結果を、図4に示す。

定型発達ロボットとの訓練における被験者実験のベンチマークの評価結果から、「効率度」の項目において「Good」、「新規性」の項目において「Above Average」、「信頼性」の項目において「Below Average」、「魅力度」「明快度」「効果度」の項目において「Bad」と示唆された。

発達障害ロボットとの訓練における被験者実験のベンチマークの評価結果から、「効果度」「新規性」の項目において「Good」、「魅力度」「効率度」の項目において「Above Average」、「明快度」の項目において「Below Average」、「信頼性」の項目において「Bad」と示唆された。

5 終わりに

本論文では、臨床心理士から知能検査を受ける児童型ロボットを開発した。ロボットが対応するのは、田中ビネー知能検査Vの3歳級の問題であり、定型発達ロボットと発達障害ロボットで被験者実験を実施した。被験者実験では、田中ビネー知能検査Vを学習済みの学生を対象に、2種類の提案ロボットに対して臨床心理士が心理検査を実施する訓練を通して、2種類の提案ロボットが臨床心理士に与える印象を調査した。実験結果から、定型発達ロボットに比べて、発達障害ロボットとの訓練の方が、訓練の効果が高いという印象を与えると考えられる。

また、発達障害ロボットに対する効率度の印象が低くなった要因として、知能検査の訓練としての難易度が上

がり、検査実施時間が増加したことが考えられる。

今後は、今回の結果を踏まえて、被験者人数を増加して、実験を実施する。

参考文献

- [1] 文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/2022/1421569_00005.htm, 2012.
- [2] 文部科学省, https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/tokubetu/material/1328729.htm, 2022.
- [3] 日本臨床心理士資格認定協会, 臨床心理士とは, <http://fjcbcp.or.jp/rinshou/about-2/>, 2024.
- [4] 百瀬良, 佐藤昌子, 松永しのぶ: "心理支援職養成大学院におけるウェクスラー式知能検査を活用した学内実習システムの検討-大学附属心理臨床相談室における心理検査のニーズを踏まえて-", 昭和女子大学生生活心理研究所紀要, Vol.24, pp.35-49, 2022.
- [5] 石川育恵, ジメネスフェリックス, 三谷真優, 中島卓裕, 吉田翔子: "臨床心理士に対して知能検査を訓練できる児童型ロボットの実現可能性," 知能と情報 (日本知能情報フアジィ学会誌), Vol.36, No.4, pp.501-508, 2024.
- [6] LITALICO ジュニア, 心理検査の種類と目的とは?発達障害の診断にも?, <https://junior.litalico.jp/about/hattatsu/news/detail/shinri001/>, 2024.
- [7] 田中教育研究所編. 田中ビネー知能検査 V. 田研出版, 2003.
- [8] 株式会社アールティ, Sciurus17 研究用上半身人型ロボット, <https://rt-net.jp/products/sciurus17/>, 2024.
- [9] B. Laugwitz, M. Schrepp, and T. Held: "Construction and evaluation of a user experience questionnaire.," Holzinger, A. (eds) HCI and Usability for Education and Work. USAB 2008. Lecture Notes in Computer Science, Vol.5298, pp. 63-76, 2008.

P1-05 人の動きに適応する Int-Ball2 制御システム

Int-Ball2 Control System Adapting to Human Movement

○ ¹倉田航希, ¹西野順二
 ○ ¹Koki Kurata, ¹Junji Nishino
¹玉川大学
¹Tamagawa University

Abstract: The objective of this study is to achieve flexible control that adapts to human movements for the astronaut support robot, IntBall2, by utilizing fuzzy control. For the behavioral control of an intra-vehicular robot—which demands a high level of safety within a zero-gravity, enclosed environment—we constructed a fuzzy control system comprising eight rules based on human knowledge. We then compared this system with conventional binary control across four different scenarios. The results confirmed that the proposed control enables the execution of more flexible avoidance choices and path planning.

1. はじめに

本研究の目的は、ファジィ制御を用いた Int-Ball2 の自律制御システムを構築し、人の動きに対しても柔軟に適応できる能力を実証することである。

現代の宇宙ミッションにおいて、宇宙飛行士の作業時間は極めて貴重なものである。限られた滞在時間の中で、科学実験や研究の成果を最大化するためには作業効率の向上が不可欠となる。この課題を解決するために JAXA は船内ドローン「Int-Ball2」を開発した[1]。本機は国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」内を自律飛行し、地上の管制官や宇宙飛行士の目となって実験の様子や作業風景を記録する。これにより、従来は宇宙飛行士自身が手持ちカメラで行っていた撮影業務を代替することができ、彼らが本来の作業に専念できる環境を提供することで作業効率の向上に大きく貢献している[2]。

しかし、閉鎖的かつ狭小な空間である ISS 船内で Int-Ball2 が完全な自律飛行を行い、宇宙飛行士と共存するためには、依然として解決すべき技術的課題が残されている。既存の自律移動ロボットにおける基本的な障害物回避アルゴリズムの一つとして、あらかじめ決められた値を基準に行動を切り替える制御がある。しかし、この手法は閾値をわずかでも超えると動作が即座に切り替わる性質を持つため、挙動が硬直的になりやすいという課題がある。本研究では、このような硬直制御を二値制御と呼ぶ。特に ISS のような微小重力下では、宇宙飛行士が三次元的に浮遊し、慣性的かつ予測困難な動きをするため、単純な二値制御でその動きに適応することは極めて困難である。このような環境下で硬直的な制御を採用すれば、頻繁な急停止や不自然な挙動を引き起こし、結果として Int-Ball2 本来の目的である作業効率の向上を阻害する要因となり得る。実際には、人間の持つ曖昧な状況判断や感覚的な危険予測を工学的に取り入れた、柔軟かつ適応的な制御が有効な場面も多い。

そこで本研究では、人間の曖昧な判断を数学的にモデル化する手法であるファジィ理論を Int-Ball2 の制御に適用する手法を提案する。人間は「少し近い」「危なそうだ」といった曖昧な感覚情報に基づいて、行動を決定し、進路の微調整ができる。この処理を制御システムに組み込むことで、障害物や宇宙飛行士との距離、相対速

度といった入力情報から、状況に応じた柔軟な行動を決定することを目指す。

2. Int-Ball2 の人の動きに適応したファジィ制御

2.1 開発環境

本研究では、JAXA が GitHub 上で一般公開している Int-Ball2 シミュレータ (Docker 版) を用いる[3]。本研究におけるシミュレーション環境および使用したソフトウェアを以下の表 1 に示す。

表 1 シミュレーション環境および使用したソフトウェア

項目	詳細/バージョン
GPU	NVIDIA GeForce (VRAM 8GB)
OS	Ubuntu 18.04
Middleware	ROS Melodic
Simulator	int-ball2 simulator docker
Physics Engine	Gazebo
Visualization	Rviz
Container Platform	Docker / Docker Compose
Language	Python

2.2 システムの概要

2.2.1 システムの流れ

本研究では、単に障害物を回避するのではなく、「移動中の人々が接近してきているから回避して通り過ぎるまで待とう」「人が作業をしているから少し距離に余裕を持って回避しよう」といった人間の感覚に基づく、状況に応じた柔軟な判断を可能にする制御システムを構築した。システムの流れを図 1 に示す。

本システムは Int-Ball2 シミュレータ上で ROS ノードとして動作し、シミュレータから得られる環境情報を入力として、ファジィ推論に基づいた意思決定を行い、最終的な機体動作を出力する一連の処理手順を実行する。システム全体の流れは大きく分けて、擬似センサによる情報の取得と識別を行う「入力」、人間の判断を適用する「ファジィ推論」、そして決定された行動に基づいて機体を制御する「行動実行」の 3 つの段階から構成される。通常時は設定された移動経路 (ウェイポイント) に

従って自律飛行を行い、移動経路上に障害物または宇宙飛行士 (人型オブジェクト) を検知し、衝突のリスクが生じた場合には、ファジィ推論で状況に応じた最適な回避行動を決定し、Int-Ball2 のフライトコントローラへ制御指令 (目標座標および姿勢) を出力する仕組みとなっている。

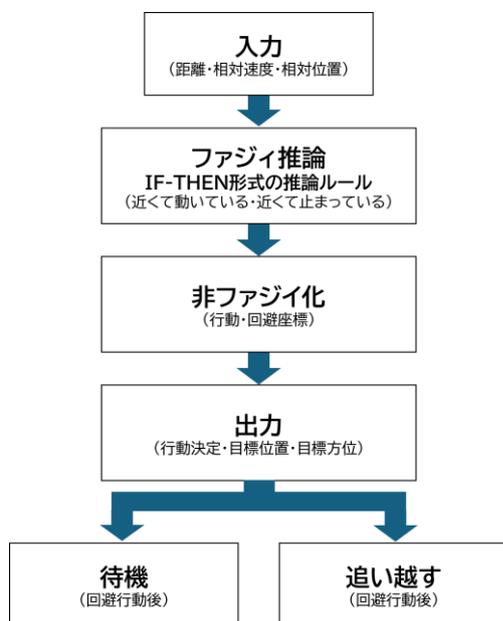


図 1 システムの流れ

2. 2. 2 入力 (環境認識)

処理の第一段階では、機体の周囲状況を把握するための環境認識を行う。本研究では、シミュレータから直接得られるオブジェクトの真値を利用した「擬似センサ機能」を実装した。具体的には、Gazebo が送信する全モデルの状態情報を受信し、以下の手順で必要な情報を抽出する。

1. 相対情報の算出: 世界座標系で与えられる各モデルの位置情報を、Int-Ball2 を原点とするローカル座標系へ変換し、機体から見た距離、相対速度、相対位置を算出する。
2. 人・物体の識別: 検知した障害物が人 (宇宙飛行士) であるか物体であるかの識別を行う。ここでは、シミュレータ上のモデル名を参照し、名称に“human”という文字列が含まれる場合は人、それ以外は物体として分類した。

この擬似センサ機能によって得られた数値データと識別ラベル (人/物体) は、次の処理であるファジィ推論へと送られる。

2. 2. 3 ファジィ推論

ファジィ推論による行動決定は以下の手順で行う。

1. 本システムでは、距離に対して「近い/普通/遠い」、速度に対して「速い (移動) /遅い (静止) 」という 5 つのラベルを割り当て、それぞれの適合度 (0.0 ~ 1.0) を算出する。また、計算コストとリアルタイム性を重視し、台形型および三角形のメンバーシップ関数を採用した。

主な入力変数の定義は以下の通りである。

- 距離 (Distance): 「近い (Near)」「普通 (Medium)」「遠い (Far) 」の 3 つの言語値を設定した。「近い」には台形型関数を用い、1.0[m]以下を完全な危険領域 (適合度 1.0) 、2.5[m]以上を安全 (適合度 0.0) として定義している。
- 相対速度 (Speed): 対象の挙動を「静止 (Static) 」と「移動中 (Moving) 」に分類する。誤検知を防ぐため、0.01[m/s]を境界値として設定した。
- 安全距離: 検知した対象が人である確率に基づき、確保すべき距離を算出する。人が対象の場合は 1.0[m] (ソーシャルディスタンス) 、物体の場合は 0.7[m] (接触回避最小距離) となるように設計されている。

また、本研究で設計した各入力変数のメンバーシップ関数を以下の図 2 に示す。

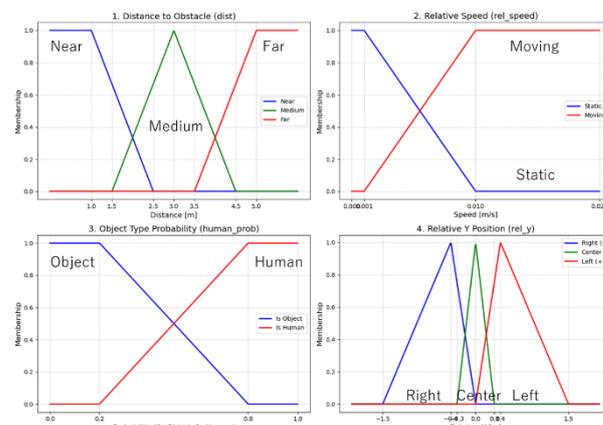


図 2 各入力変数のメンバーシップ関数

図 2 上段の「1. 距離」および「2. 相対速度」は、前述した安全基準に基づき、台形および三角形の関数を用いて危険度や動静を判定する。図 2 下段左の「3. 対象識別確率」は、認識システムから得られた確率値を入力とし、対象が「人 (Human) 」であるか「物体 (Object) 」であるかの所属度 (グレード) を決定する。この所属度は、安全距離 (1.0m または 0.7m) を決定するために用いられる。図 2 下段右の「4. 相対横位置」は、障害物がロボットに対して左右のどの位置に存在するかを表す。中央 (Center) の底辺幅を狭く設定することで、正面付近の障害物に対して敏感に反応し、早期に左右への回避行動 (Right/Left) の判断が行えるよう設計した。

2. ファジィ推論: 算出された適合度に対し、予め設計された「IF-THEN 形式の推論ルール」を適用する。ルールは以下の表 2 の通りである。

表 2 IF-THEN 形式の推論ルール

No.	IF (条件)	THEN (行動)
ルール 1	距離が近く AND 相手が移動	待機
ルール 2	距離が近く AND 相手が静止	追い越し
ルール 3	距離が遠い OR 普通	無視
ルール 4	対象が人	安全距離 = 1.0[m]
ルール 5	対象が物体	安全距離 = 0.7[m]
ルール 6	障害物が左にある	右方向へ小さく回避
ルール 7	障害物が右にある	左方向へ小さく回避
ルール 8	障害物が中央にある	左方向へ大きく回避

3. 非ファジィ化: 推論結果に基づいて、具体的な行動決定と回避座標を算出する。行動選択は最大値法、障害物回避のオフセットは重心法により非ファジィ化する。このとき、検知した対象の識別結果に基づき、対象が「人」であれば安全距離を大きく (1.0[m])、「物体」であれば小さく (0.7[m]) 設定する重み付け処理が行われる。

2. 2. 4 出力および行動実行

非ファジィ化によって決定された行動に基づき、以下の具体的な回避行動を実行する。

- ・ 待機: 動的障害物との衝突リスクが高い場合に選択される。算出した安全距離を保ち、通路の端へスライド移動し、障害物が通過して安全が確保されるまでその場で待機する。
- ・ 追い越し: 静的障害物に対して選択される。障害物の横位置に基づき算出されたオフセット量を経由点 (ウェイポイント) として設定し、滑らかな軌道を描いて障害物を回避した後、元の経路へ復帰する。

3. 実験

3. 1 実験方法

3. 1. 1 実験シナリオの設定

Int-Ball12 が実際に ISS 船内で活動する際、遭遇する状況は多岐にわたる。そこで本実験では、障害物の属性 (物体/人) および挙動 (静止/移動) を変えた 4 つのシナリオを設定し、二値制御と提案するファジィ制御における挙動の差異を比較・検証する。以下の図 3~6 は各シナリオにおけるオブジェクトの配置図である。



図 3 静止物体の回避実験における配置図

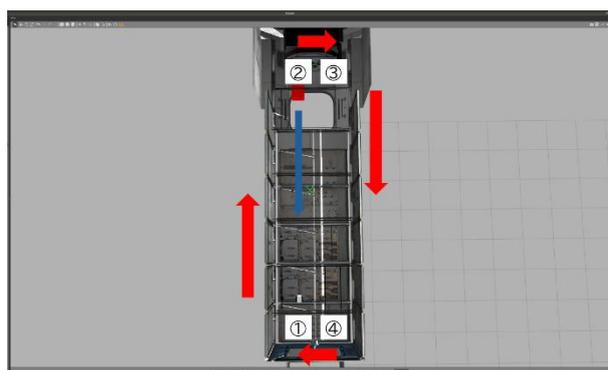


図 4 移動物体の回避実験における配置図

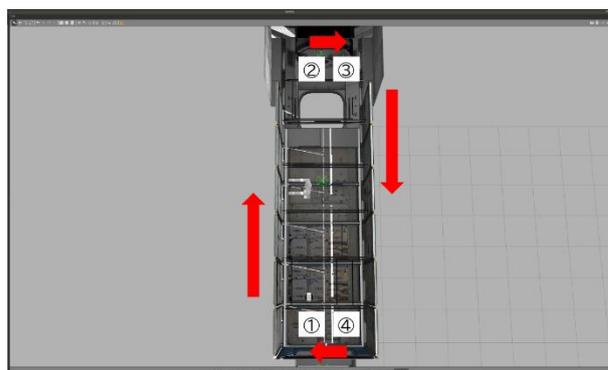


図 5 静止した人の回避実験における配置図

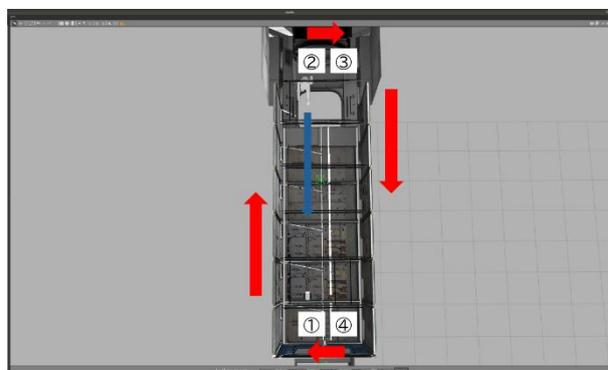


図 6 移動中の人の回避実験における配置図

3. 1. 2 実験手順

本実験は、二値制御およびファジィ制御の性能を厳密に比較するため、以下の統一された手順に従って実施し

た。なお、すべてのシナリオにおいて、シミュレータの物理演算パラメータおよび Int-Ball2 の機体パラメータは同一のものを使用した。

1. シミュレーション環境の初期化：ROS および Gazebo シミュレータを起動し、ISS 船内環境を構築する。その後 Int-Ball2 を初期位置に配置する。
2. シナリオの構築：設定した4つのシナリオ（静止物体、移動物体、静止した人、移動中の人）のいずれかを選択し、対応する障害物を指定された座標に配置する。
3. 制御プログラムの実行：二値制御またはファジィ制御を選択し、プログラムを実行する。
4. データ収集・記録の実行：制御プログラムの実行と同時に、各シナリオに対応するデータ収集用のプログラムを実行し、ROS トピック通信による位置情報および時刻の記録を開始する。
5. データ収集・記録の終了：機体が ISS の周回を完了したのを確認した時点で記録を終了する。記録されたデータを保存し、他のシナリオ実験に向けて環境をリセットする。
6. データの解析と可視化：取得したデータに対応するプログラムを用いて、評価指標の算出およびグラフの作成を行う。

3. 1. 3 評価方法

本実験では、各制御手法の性能を定量的に評価するため、ROS のトピック通信機能を用いてシミュレーション中の Int-Ball2 および障害物（物体・人型オブジェクト）の座標データを取得・記録し、以下の3点について評価を行った。

1. 移動軌跡：XY 平面上に機体の移動経路の軌跡を描画し、回避動作の質を定性的に評価する。具体的には、障害物を回避する際のアプローチに着目し、提案手法が滑らかな曲線をとまなう連続的な軌道を生成できているか、および目標到達までのルートに無駄な迂回や不自然な挙動がないかを確認する。
2. 移動効率：タスク遂行の効率を測るため、各シナリオにおける「一周の所要時間 (Total Time)」、「総移動距離 (Total Distance)」、「平均速度 (Average Speed)」を算出する。安全性を維持した上で、どの程度タスク時間を短縮し、効率的な移動を実現できたかを定量的に評価する。
3. 安全性：障害物との相対距離を時系列でグラフ化し、最も接近した瞬間の最小距離が、設定された衝突限界距離 (Collision Limit: 0.6[m]) に対して十分な安全距離を確保できているかを定量的に評価する。なお、この衝突限界距離 0.6[m] は、Int-Ball2 と宇宙飛行士（または物体）それぞれの占有半径の和に、接触判定の誤差余裕を加えた値として定義した値である。

3. 2 実験結果

3. 2. 1 静止物体の回避実験の結果

図7に静止物体の回避実験におけるXY平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）、表3に静止物体の回避実験における移動効率の定量評価（総移動距離

離・周回時間・平均速度）の結果を示す。

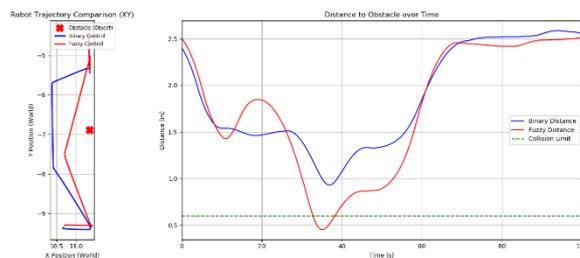


図7 静止物体の回避実験におけるXY平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）
（青線：二値制御，赤線：ファジィ制御）

表3 静止物体の回避実験における移動効率の定量評価

制御手法	総移動距離	周回時間	平均速度
二値制御	12.296[m]	168.987[s]	0.073[m/s]
ファジィ制御	12.498[m]	155.137[s]	0.081[m/s]

図7（左図）の軌跡において、青線の二値制御は障害物前で一時停止し、直角に大きく迂回する矩形状のルートを描いた。対して赤線のファジィ制御は、障害物が静止していると認識して「追い越し」を選択し、停止することなく滑らかな曲線で通過する挙動を示した。

図7（右図）の安全性については、二値制御が衝突限界距離 (0.6[m]) に対し約 0.9[m] 以上を常に保った。一方、赤線で示されるファジィ制御は、停止することなく滑らかな「追い越し」軌道を選択した結果、障害物に接近する挙動となった。また、グラフから障害物との距離が衝突限界距離を下回っていることが確認できる。この結果は、本シナリオにおいて、ファジィ制御は移動の滑らかさと効率を優先して追い越しを選択したことで、安全距離が一時的に減少したことを示している。

表3の結果より、効率性の観点で比較すると、ファジィ制御は一時停止せずに速度を維持したことで、二値制御よりも周回時間を約 13.8 秒短縮し、平均速度もわずかながら向上した。一方で、総移動距離はファジィ制御が約 0.2[m] 増加した。図7（右図）の 10~20[s] 付近で距離が一時的に増加していることから、これは障害物の検知直後にスムーズな追い越し軌道を確認すべく、ファジィ制御が事前の距離調整（予備動作）を行ったためと読み取れる。

3. 2. 2 移動物体の回避実験の結果

図8に移動物体の回避実験におけるXY平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）、表4に移動物体の回避実験における移動効率の定量評価（総移動距離・周回時間・平均速度）の結果を示す。

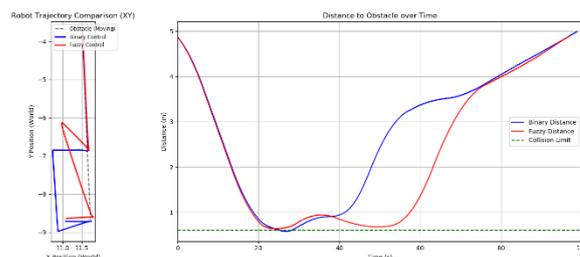


図8 移動物体の回避実験におけるXY平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）
（青線：二値制御，赤線：ファジィ制御）

表 4 移動物体の回避実験における移動効率の定量評価

制御手法	総移動距離	周回時間	平均速度
二値制御	13.500[m]	176.921[s]	0.076[m/s]
ファジィ制御	13.401[m]	173.906[s]	0.077[m/s]

図 8（左図）の軌跡において、青線の二値制御は障害物検知時に直角に移動し、矩形状に大きく迂回するルートを描いた。対して赤線のファジィ制御は、障害物の移動を認識して推論ルールに基づき「待機」を選択し、無理に前進せず進行ルートと干渉しない位置へ退避する挙動を示した。

図 8（右図）の安全性について、時刻 25～30[s]付近で両手法ともに障害物との距離が急激に縮まる。この際、二値制御は一時的に衝突限界距離（0.6[m]）を下回った。一方、ファジィ制御は適切なタイミングで停止したことで限界ライン直前で距離を維持し、動的環境下での接触回避に成功している。

表 4 の結果より、効率性の観点で比較すると、ファジィ制御が「待機」を選択したにもかかわらず、二値制御より周回時間を約 3.0 秒短縮した。これは、二値制御が閾値判定に基づく機械的な回避ロジックで大きく迂回したのに対し、ファジィ制御は必要最小限の退避移動に留め、障害物通過後に速やかに復帰できたためである。これらのことから、動的環境下においては閾値に従い闇雲に動き回るよりも、適切な位置で「待機」する方が結果的に時間や距離の移動効率が高いことが示された。

3. 2. 3 静止した人の回避実験の結果

図 9 に静止した人の回避実験における XY 平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）、表 5 に静止した人の回避実験における移動効率の定量評価（総移動距離・周回時間・平均速度）の結果を示す。

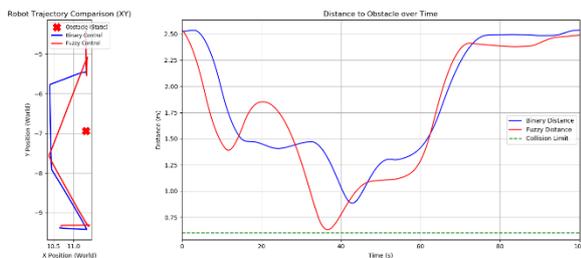


図 9 静止した人の回避実験における XY 平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）
（青線：二値制御，赤線：ファジィ制御）

表 5 静止した人の回避実験における移動効率の定量評価

制御手法	総移動距離	周回時間	平均速度
二値制御	12.384[m]	173.730[s]	0.071[m/s]
ファジィ制御	12.895[m]	168.321[s]	0.077[m/s]

図 9（左図）の軌跡において、青線の二値制御は人を検知して一時停止し、直角に回避方向へ移動して矩形状に大きく迂回した。対して赤線のファジィ制御は、対象の静止を認識して推論ルールに基づき「追い越し」を選択し、停止せず滑らかな曲線で通過する挙動を示した。

図 9（右図）の安全性について、二値制御は約 0.9[m]以上の安全距離を保った。一方、ファジィ制御は 35～40[s]付近で急接近したものの、衝突限界距離

（0.6[m]）を維持して回避に成功した。静止物体の回避実験では限界を下回る結果となったが、本シナリオでは効率と安全基準の遵守を両立できている。

表 5 の結果より、効率性の観点で比較すると、ファジィ制御は一時停止せず速度を維持したことで、二値制御より周回時間を約 5.4 秒短縮し、平均速度もわずかではあるが向上した。一方で、総移動距離はファジィ制御が約 0.5[m]増加した。図 9（右図）の 10～25[s]付近で距離が 1.4[m]から 1.8[m]へ増加していることから、人を検知した直後に、より安全な追い越しルートを確認するための距離調整を行ったためと読み取れる。

3. 2. 4 移動中の人の回避実験の結果

図 10 に移動中の人の回避実験における XY 平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）、表 6 に移動中の人の回避実験における移動効率の定量評価（総移動距離・周回時間・平均速度）の結果を示す。

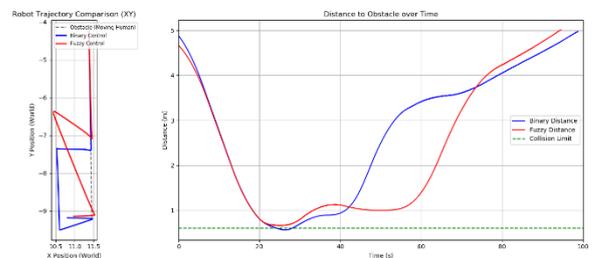


図 10 移動中の人の回避実験における XY 平面上の軌跡（左）と障害物との相対距離の変化（右）
（青線：二値制御，赤線：ファジィ制御）

表 6 移動中の人の回避実験における移動効率の定量評価

制御手法	総移動距離	周回時間	平均速度
二値制御	13.697[m]	174.484[s]	0.079[m/s]
ファジィ制御	13.676[m]	171.291[s]	0.080[m/s]

図 10（左図）の軌跡において、青線の二値制御は、接近する人を検知すると直角に左方向へ移動し、大きく矩形状に迂回するルートを描いた。対して赤線のファジィ制御は、対象が「移動している人」であることを認識し、推論ルールに基づき「待機」の行動を選択した。軌跡を見ると、無理に前進せず、人の進行ルートと干渉しない位置へ適切に退避していることがわかる。

図 10（右図）の安全性について、時刻 25～30[s]付近に注目すると、二値制御は衝突限界距離（0.6[m]）を明確に下回っており、安全距離の確保に失敗している。一方、赤線のファジィ制御は、もっとも接近した瞬間においても衝突限界距離を保っていることが確認できる。

表 6 の結果より、効率性の観点で比較すると、総移動距離と平均速度に大差はないものの、ファジィ制御は二値制御より周回時間を約 3.2 秒短縮した。ファジィ制御が「待機」で一時停止したにもかかわらず周回時間が短いのは、二値制御が不必要に大きく迂回したのに対し、最小限の位置調整のみで人をやり過ごし、最短経路で復帰できたためである。

3. 3 人の動きに適応するためのファジィ制御の効果

本研究では、人間の曖昧な判断をモデル化するファジィ

ィ理論を用い、Int-Ball12 が状況に応じた行動を自律的に選択できる制御システムを構築した。実験の結果、相対速度の小さい静止障害物に対しては「追い越し」、相対速度の大きい動的障害物に対しては「待機」を選択し、全てのシナリオにおいて二値制御よりも周回時間を短縮し、移動効率を向上させることに成功した。特に動的環境下において、「待機」を選択し、一時停止したにもかかわらず、動き続けた二値制御よりもタスクを早く完了できたことは評価できる。これらは、予測困難な環境において、常に動き続けることが必ずしも最適解ではなく、状況に応じて「移動」と「待機」を自律的かつ適切に使い分ける柔軟な行動決定の効果である。

この柔軟な判断を実現できた要因として、ファジィ制御特有の記述性の高さが挙げられる。閾値判定に基づく二値制御と同様の振る舞いを実装しようとするれば、複雑な条件分岐 (if-else 文) が不可避となりシステムが肥大化する。対してファジィ制御は、「距離が近く接近速度が速いならば待機する」といった人間の経験則に近い直感的なルール記述が可能である。これにより、複雑な条件分岐に頼ることなく、単一の推論モデル内で入力変数を連続的に評価し、「動くべきか、止まるべきか」という状況判断を統合的に処理できることが、本手法の優位性である。

また、安全性に関しても、対象の属性 (人/物体) に応じた安全距離の動的調整機能が有効に働いた。対象が人の場合は十分な距離 (目標 1.0[m]) を確保して物理的・心理的な対人親和性を担保し、物体の場合は限界値付近への接近 (目標 0.7[m]) を許容して効率を優先する自律的な判断が機能した。本実験の結果においても、対象が「人」である回避実験においては、静止・移動の状況を問わず、いずれも衝突限界距離 (0.6[m]) を上回る安全な距離を維持しつつタスクを遂行できており、属性に応じた余裕のある距離設定が意図通りに機能した。

しかし、静止物体の回避においては、ファジィ制御は衝突限界距離を下回る結果となった。これは、ファジィ制御が生成する滑らかな曲線軌道に対し、慣性や外乱の影響で Int-Ball12 に追従遅れが生じ、軌道が外側へ膨らむドリフト現象が発生したためと推察される。二値制御のような断続的な挙動は安全距離の厳守に有利な反面、効率を低下させる。対して本手法は、滑らかな移動で効率を高められる反面、軌道誤差が安全確保に影響を与える傾向がある。したがって、静止物体の回避において、滑らかな軌道生成による「移動効率の追求」と「安全性の確保」は、互いに相反するトレードオフの関係にある。実運用に向けては、この関係性を解消し、柔軟な軌道生成を維持しつつ安全距離を確実に遵守できるよう、速度や慣性を考慮した制御ルールおよびメンバーシップ関数のさらなる最適化が求められる。

4. おわりに

本研究では、微小重力下の有人環境において、Int-Ball12 が状況に応じた最適な行動を選択することで安全性と移動効率を両立させ、人の動きに即した円滑な回避行動を実現すべく、ファジィ理論を用いた自律制御システムを構築した。4つのシナリオによる回避実験を通じて、提案手法による柔軟な行動選択の有効性が示された。その具体的な成果として、静止障害物には「追い越し」、動的障害物には「待機」という行動選択を決定し

たことが挙げられる。この行動選択により、すべてのシナリオにおいて二値制御を上回る周回時間の短縮が確認され、高い移動効率が実証された。

一方で、滑らかな軌道生成による移動効率の追求が、慣性による追従遅れや軌道の膨らみ (ドリフト現象) を誘発し、安全距離の維持に影響を与えるというトレードオフの存在も確認された。対象の属性 (人・物体) に応じて安全距離を動的に調整する機能は有効に働いたものの、静止物体の回避実験においては衝突限界距離を下回る結果となった。これは、連続的で滑らかな移動と厳密な安全基準の遵守を同時に成立させることの難しさを示唆している。

今後の展望として、安全性と移動効率のトレードオフを解消し、効率を低下させずに安全距離を担保することが挙げられる。その実現に向け、Int-Ball12 の速度や慣性を新たな入力変数として導入し、ドリフト量の予測に基づく早期の回避行動が可能となるように制御ルールやメンバーシップ関数を調整する必要がある。また、複数の人や物資が行き交う複雑な環境下における優先順位の動的決定機能の構築や、微小重力環境特有の上下方向を含む三次元空間での全方位的な回避性能の検証も進めていく必要がある。

参考文献

- [1] JAXA 有人宇宙技術部門, 「ISS・「きぼう」での実験をより身近に、気軽に ~ポテンシャルを秘めた船内ドローン「Int-Ball12」」, <https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/case/detail/004150.html>, (閲覧日: 2025-12-20)
- [2] JAXA 宇宙ステーション・きぼう広報・情報センター, 「きぼう船内ドローン「Int-Ball」からの映像初公開!」, https://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/170714_int_ball.html, (閲覧日: 2025-12-20)
- [3] GitHub, 「jaxa/int-ball12_simulator_docker」, https://github.com/jaxa/int-ball12_simulator_docker, (閲覧日: 2025-12-30)
- [4] 文部科学省 宇宙開発利用部会 調査・安全小委員会, 「国際宇宙ステーション(ISS)に提供する ISS 構成要素及び搭載物の安全確認について【審査対象(Int-Ball12)】」, 資料 45-1-2, 2023, https://www.mext.go.jp/content/20230203-mxt_uchukai01-000027426_3.pdf, (閲覧日: 2025-12-20)
- [5] Shinji Mitani, Taisei Nishishita and Daichi Hirano, 「Int-Ball12: Compact High-torque Propulsion System Actively Utilizes Propeller Air Drag Polarity」, <https://jaxa.repo.nii.ac.jp/record/2000520/files/S46000193042.pdf>, (閲覧日: 2025-12-30)

連絡先

玉川大学 西野研究室 倉田航希
Email: ta9x22338@stu.tamagawa.ac.jp

ミニ四駆 AI におけるセンサ統合によるタイヤ空転挙動の推定

Estimation of Wheel Spin Behavior in Mini 4WD AI using Sensor Fusion

○¹ 小林 大喜, ¹ 早川 博章, ¹ 西野 順二
○¹ Taiki Kobayashi, ¹ Hirofumi Hayakawa, ¹ Junji Nishino
¹ 玉川大学

¹Tamagawa University

Abstract: This study proposes a model for estimating tire slip behavior in "Mini 4WD AI" by analyzing battery voltage and inertial sensor data. While Mini 4WD AI systems must adapt to dynamic internal and external environmental changes, conventional adjustments have largely relied on qualitative experience and intuition. This empirical approach lacks reproducibility and fails to provide real-time responses to tire slippage, which directly hinders stable driving and leads to significant performance loss. To address these issues, this research aims to achieve control based on quantitative environment recognition via sensor data rather than empirical rules. By focusing on tire slippage as a primary factor, this study extracts key behavioral characteristics to establish a foundation for data-driven machine setting and control. Ultimately, this work serves as a critical step toward integrated internal state recognition and environmental mapping, providing a methodological basis for robust autonomous systems.

1 はじめに

本研究の目的はミニ四駆 AI に搭載された慣性センサ等から得られる走行データを解析し、バッテリー電圧と慣性センサを用いたタイヤ空転挙動推定モデルを提案することである。タイヤの空転発生時の挙動特徴を抽出し、データ駆動型のセッティングや制御への足掛かりとする。

近年、安価で小型なロボット教材として、ミニ四駆にマイコンやセンサを搭載した「ミニ四駆 AI」が注目され、その自律走行性能を競う大会が開催されている [1]。本競技では、単なるプログラミング技術だけでなく、環境の動的な変化への対応が重要な課題となる [2]。具体的には、周回ごとのタイヤ摩耗や摩耗粉の堆積による路面摩擦係数の低下といった外部環境の変化、および電池の放電に伴う内部抵抗の増加とそれに起因する端子電圧の降下といった内部環境の変化が挙げられる [3]。

しかし従来これらの環境変化への対応は競技者の経験と勘に依存した定性的なセッティング調整が主流である [4]。このアプローチは属人性が高く再現性に乏しく、また走行中に刻一刻と変化する路面状況に対しリアルタイムかつ適切に対処することは困難である。特に路面状況の変化に起因するタイヤの空転はタイムロスやコースアウトに直結するため、その推定と対策は極めて重要である。

そこで本研究では、経験則に頼る調整ではなくセンサデータに基づいた定量的な環境認識に基づく制御を行うことを目指す。最終的には統合的な環境地図の生成や内部状態の認識を目指し、車両の安定走行を妨げる主要因であるタイヤの空転に焦点を当てる。

2 ミニ四駆 AI

2.1 ミニ四駆

ミニ四駆¹は、株式会社タミヤが発売する単一モータで四輪駆動する車長 15 センチ、重さ 100g 程度の車両模型である。シャーシ、モータ、タイヤなど各パーツに分かれており、パーツをカスタマイズすることが可能である。このカスタマイズはミニ四駆の性能に影響を与える。

2.2 ミニ四駆 AI

ミニ四駆 AI [1] とは、ミニ四駆にマイコンを搭載したものである。これによりミニ四駆を AI を用いて制御することが可能となる。

図 1 に一般的なミニ四駆 AI の構成図を示す。

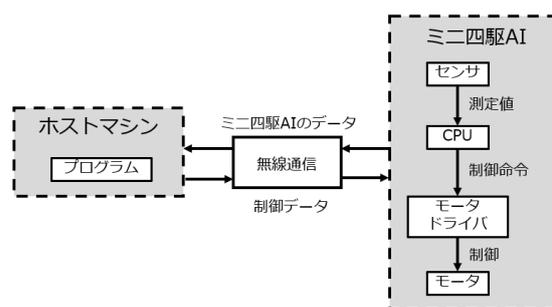


図 1: 一般的なミニ四駆 AI の構成図

ミニ四駆 AI 内では、センサの測定値が CPU に送られ、その情報が無線通信によって、ホストマシンに送信される。送信されたデータはホストマシン内のプログラムで処理され、制御データがミニ四駆 AI に送信される。受信した制御データに基づき CPU がモータドライバに制御命令を送り、モータを制御する。

図 2 に本実験で使用したミニ四駆 AI を示す。

¹「ミニ四駆」は株式会社タミヤの登録商標です。



図 2: 本研究で使したミニ四駆 AI

本研究ではミニ四駆 AI に搭載する制御ボードとして株式会社アルティが発売する AI chip V3 を使用した. AI chip V3 では時間, モータ駆動用及び制御ボード駆動用のそれぞれのバッテリー電圧, 加速度, 角速度, 地磁気が測定可能である.

3 提案手法

本研究で使用するシステムは, ミニ四駆 AI からセンサデータを取得し, Processing により記録するモジュールと, Python によりデータを解析するモジュールの 2 つによって構成される. 本研究で使した機器を表 1 及び表 2 に示す.

表 1: 使した機器

車体	タミヤ製ミニ四駆 ネオファルコン
モータ	タミヤ製ダブルシャフトモータ
制御ボード	RT-AICHP-V3
モータドライバ	TI 社製 DRV8850RGYR
センサ	9 軸 IMU センサ InvenSense 社製 MPU-9250
通信 IC	Microchip 社製 RN42XV

表 2: 開発環境

CPU	Intel®Core™i7-1065G7
RAM	16.00GB
OS	Windows 11

村上ら [5] はモータの回転数推定のために専用の計測回路を実装してモータの逆起電力を測定しているが, 本研究では AI chip V3 で取得できるバッテリー電圧を使用する. これにより専用回路の実装による重量への影響をなくし, システムの簡略化を図る.

Processing による記録モジュールではミニ四駆 AI と Bluetooth 通信を行い, タイムスタンプとバッテリー電圧, 3 軸加速度, 3 軸角速度の 8 つのデータを取得し, CSV ファイルに記録する. 図 3 に車体座標系と角速度の定義

を示す.

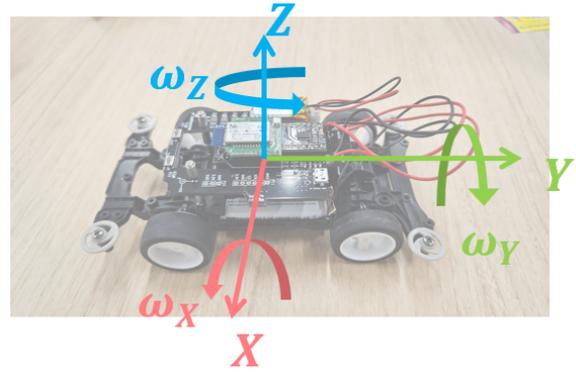


図 3: 車体座標系と角速度の定義

図 4 に本システムの構成を示す.

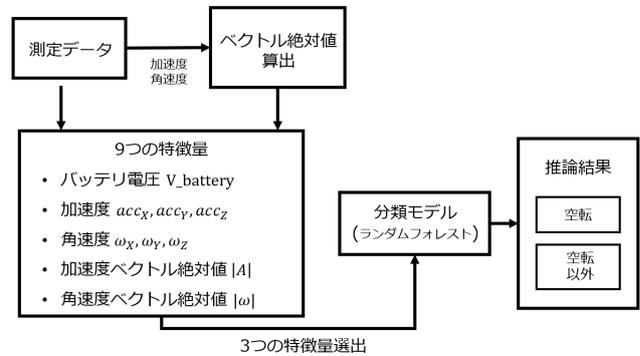


図 4: 本システムの構成

Python による解析モジュールでは, 3 軸加速度, 3 軸角速度を基にそれぞれ加速度ベクトルの絶対値, 角速度ベクトルの絶対値を算出する. 加速度ベクトルの絶対値, 角速度ベクトルの絶対値は式 (1), 式 (2) より算出する.

$$|A| = \sqrt{acc_x^2 + acc_y^2 + acc_z^2} \quad (1)$$

$$|\omega| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (2)$$

また, 得られた 9 つの特徴量から 3 つの特徴量を使用し, ランダムフォレスト [6] によって空転とそれ以外の状態に分類し, 組み合わせごとの性能を比較する.

4 実験

4.1 回転数とバッテリー電圧の関係

まずモータの回転数の変化のバッテリー電圧に対する調査をした. モータは回転によって逆起電力が発生し, 回転数によって逆起電力の大きさが変化する. モータの回転数が高くなると逆起電力は大きくなり, それに伴って電流の流れが阻害される. 一方でモータの回転数が低くなると逆起電力は小さくなり電流は大きくなる. このモータの逆起電流による電流の変化はバッテリーに影響する. 現実のバッテリーには内部抵抗が存在する. ここでバッ

テリの起電力 E , 回路を流れる電流を I , 内部抵抗を r , バッテリ電圧を V とするとオームの法則より式 (3) が成り立つ [7].

$$V = E - rI \quad (3)$$

回転数が上がり回路を流れる電流 I が小さくなるとバッテリーの内部抵抗による電圧降下 rI は小さくなり、バッテリー電圧 V は起電力 E に近づく.

ミニ四駆 AI のタイヤを指で押さえつけて摩擦を与えた状態の 2 つの状態を断続的に作ることでタイヤの回転数を意図的に変化させた際のバッテリー電圧の変化を調べた. 図 5 にタイヤの回転数変化によるバッテリー電圧の変化を示す.

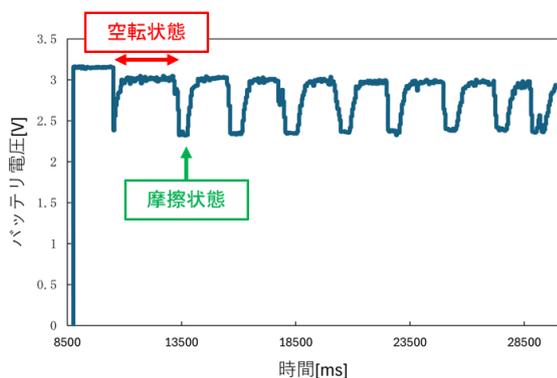


図 5: タイヤの回転数変化によるバッテリー電圧の変化

図 5 よりタイヤに摩擦を与えて回転数が空転時よりも下がると電圧が低下していることが分かった. よって、バッテリー電圧はモータ回転数の影響を受けていることを確認した.

4.2 ジャンプコースにおける実験

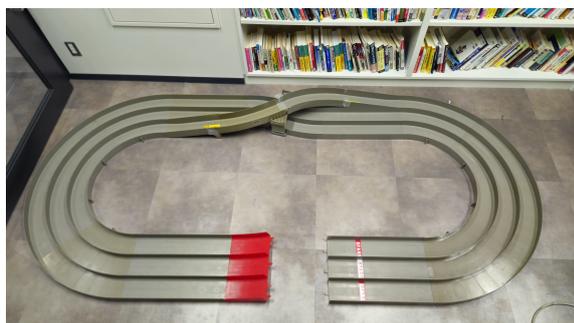


図 6: 作成したジャンプ台付きコース

タイヤが路面との摩擦を失い空転している状態を空転の極端な事例と定義する. これを再現するため, 図 6 のようにコースの一部にバンクアプローチ 20 を用いたジャンプ台を設置し, 滞空期間をスリップ状態, それ以外を通常走行として計測を行い電圧やセンサ値との関係を検討する.

実験手順として車両のモータ出力を Duty 比 100% に固定し, 1 データセットにつきコースを 3 周走行させてデータを記録した. 正解ラベルの作成には, 走行中を 60fps で撮影した動画を用いた. 動画をフレーム単位で目視確認し, タイヤが路面から離れている区間を特定してアノテーションを行うことで, 評価用データを作成した.

解析に用いる入力特徴量として, バッテリ電圧, 3 軸加速度, 3 軸角速度, および加速度ベクトルの絶対値, 角速度ベクトルの絶対値の計 9 つを定義した.

まず, これらの特徴量に対し, バッテリ電圧センサと IMU センサの間に発生する時刻の微小なズレを補償する, 時刻の同期処理の有無によるランダムフォレストの特徴量重要度の変化を検証した. 同期処理については相互相関を用いてバッテリー電圧と X 軸加速度の時刻ずれ推定値 T_0 を算出して, バッテリ電圧を基準に加速度, 角速度のデータを $acc(t + T_0)$, $\omega(t + T_0)$ とした. 図 7 に同期処理による特徴量重要度の変化を示す.

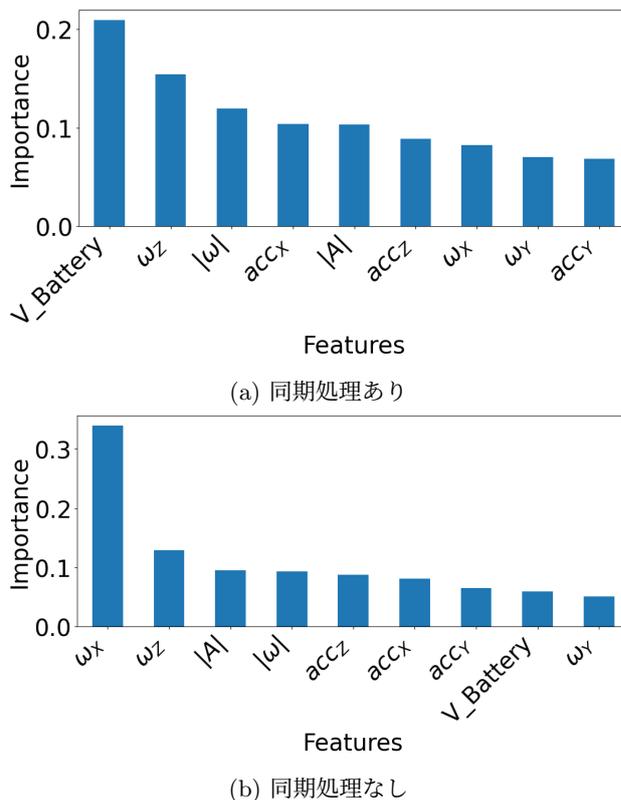


図 7: 同期処理による特徴量重要度の変化

図 7 より同期処理を行わない場合, バッテリ電圧の順位は 8 位となり寄与度は低かったが, 適切な同期処理を施すことでバッテリー電圧の順位 1 位となり寄与度が大幅に上昇し, 最重要特徴量の一つとなることが確認された. これは電圧変化が負荷変動を物理的に反映していることを強く示唆する.

次に, これら 9 つの特徴量から最適な組み合わせを探索するため, 全通りの中から 3 つの特徴量を選択し, 交

差検証により F1 スコアを算出した。なお、本検証では基礎検討においてベースラインの識別精度が高かった同期処理なしのデータを用いた。表 3 に上位の組み合わせ結果を示す。

表 3: 上位の特徴量の組み合わせと平均 F1 スコア

順位	特徴量の組み合わせ	平均 F1 スコア
1	$acc_Z, \omega_X, \omega_Z$	0.6973
2	$\omega_X, \omega_Z, A $	0.6947
3	$\omega_X, \omega_Z, \omega $	0.6801
4	$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$	0.6751
5	$V_Battery, \omega_Z, \omega $	0.6735
6	$acc_Y, \omega_X, \omega_Z$	0.6692
7	$V_Battery, \omega_X, \omega_Z$	0.6646
8	$V_Battery, \omega_X, A $	0.6599
9	$acc_X, \omega_X, \omega_Z$	0.6566
10	$V_Battery, acc_Y, \omega_X$	0.6450

表 3 より、最も識別精度が高かったのは慣性センサのみを用いた組み合わせ ($acc_Z, \omega_X, \omega_Z$) であった。これはジャンプに伴う離着陸時の衝撃 (acc_Z) や空中でのピッチング (ω_X)・ヨーイング (ω_Z) 挙動が支配的であることを示している。

一方で、バッテリー電圧 ($V_Battery$) を含む組み合わせが第 5 位となった。その平均 F1 スコアは 0.6735 であり、1 位との差はわずか 0.02 程度であった。これは、力学的挙動を捉える慣性センサに対し、バッテリー電圧がモータ負荷という異なる情報を相補的に提供できていることを示している。本研究の目的である電圧情報の有用性は、ジャンプのような瞬発的な挙動においても十分利用可能なことが確認できた。

最良値と比較して若干スコアが低下した要因として電池の電圧変化に伴う化学的な応答遅れ [8] であると考えられた。

5 まとめと今後の展望

本研究では環境認識システム構築の第一歩としてミニ四駆 AI におけるバッテリー電圧と慣性センサを統合したタイヤ空転推定モデルの提案を目的とし、実走行データを用いた検証を行った。

結論としてジャンプによる瞬発的な空転検知においては、慣性センサを主とするモデルが最も有効であるが、バッテリー電圧もそれに次ぐ高い識別性能を発揮することがわかった。

本研究結果は対象とする現象の時間的スケールに応じて慣性センサとバッテリー電圧の重み付けを適応的に変化させることで、よりロバストな環境認識が可能になることを示唆している。

今後の課題として慣性センサでは捉えにくい低摩擦路

での継続的な空転推定における電圧情報の活用やコースや車体などが異なる条件下におけるモデルの有効性検証を進める。

参考文献

- [1] 中島智晴. "ミニ四駆 AI." 知能と情報 29.4 (2017): 136-140.
- [2] 西野順二. "ミニ四駆 AI 大会が意味するもの." IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2015.
- [3] 井頭均. "乾電池の種類の違いによる消耗経過の比較." 教育学論究 7 (2015): 11-20.
- [4] 矢野良和. "ミニ四駆 AI の 10 年と少しを振り返って." 知能と情報 36.3 (2024): 85-88.
- [5] 村上弘樹, and 矢野良和. "ミニ四駆 AI における速度制御のためのモータ回転数の推定." 日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集 第 34 回ファジィシステムシンポジウム. 日本知能情報ファジィ学会, 2018.
- [6] Breiman, Leo. "Random forests." Machine learning 45.1 (2001): 5-32.
- [7] 堀田栄喜, 川嶋繁勝 監修. 電気理論基礎 1. 実教出版, 2014, p. 39.
- [8] Atlung, S., and T. Jacobsen. "The potential of battery active manganese dioxide." Electrochimica Acta 26.10 (1981): 1447-1456.

連絡先

玉川大学 知能情報研究室 小林大喜

E-mail: t33m22338@stu.tamagawa.ac.jp

SuperSonic に対する非線形処理に着目した フォールト解析の検討

竹本 修 野崎 佑典 吉川 雅弥
名城大学

1 はじめに

産業分野の様々な領域でサイバーフィジカルセキュリティに関するガイドラインが制定され始めており、サプライチェーン全体を通して基礎的なセキュリティ対策が求められている。セキュリティ対策を実装することによる産業デバイスへのレイテンシの増加や消費エネルギー量の増加といった影響について、標準暗号と比較して最小限にする暗号技術として軽量暗号が提案されている。軽量暗号は、暗号方式によって低遅延動作や低消費電力動作などに特化した設計が多く、SuperSonic[1] は低遅延動作として注目されている暗号方式の一つである。

他方で、軽量暗号はフォールト解析 [2, 3] に脆弱であることが指摘されており、いくつかの攻撃手法が提案されている。産業分野のサイバーフィジカルセキュリティを確保するためには、様々な攻撃手法や攻撃シナリオにおける安全性を網羅的に評価することが重要である。これまでに我々は、フォールト解析に対する SuperSonic の安全性評価手法 [4] を検討してきたが、従来手法 [4] では SuperSonic の実装方法および演算誤りの注入方法に制約を設けていた。そこで本研究は、現実的に想定される実装方式の SuperSonic を対象とし、攻撃シナリオを拡張したフォールト解析に対する SuperSonic を評価するための手法を検討し、SuperSonic の安全性について考察する。

2 準備

2.1 SuperSonic

SuperSonic[1] は、ブロック長 256 ビット、鍵長 256 ビットの共通鍵暗号方式である。暗号化処理では、式 (1) のように、平文 P に対して秘密鍵 K との加算と ENC 関数によって値を攪拌し、暗号文 C を生成する。ENC 関数は、非線形処理および線形処理を含むラウンド関数を 21 回繰り返し計算する処理である。

$$C = \text{ENC}(P \oplus K) \oplus K \quad (1)$$

図 1 は最終ラウンドの処理を示す。ラウンド関数の 256 ビット入力は、上位 128 ビット L^r と下位 128 ビット R^r に分割した上で、各処理を計算する。具体的には、非線形処理である NAND 演算を計算する F 関数 (式 (3))、入力 x に対する n ビットローテーションシフト処理 $\text{RS}(x, n)$ 、RS と定数 c^r との XOR を計算する Θ 関

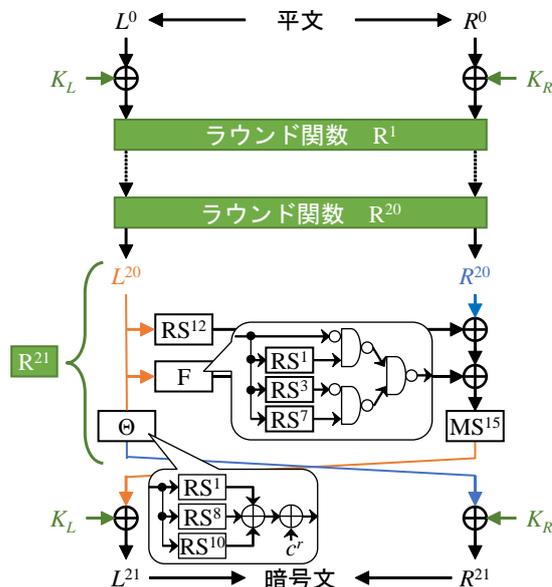


図 1: SuperSonic の暗号処理

数 (式 (2)) およびビットの位置を入れ替える乗算シャッフル処理 $\text{MS}(x)$ を計算する。

$$\Theta(x) = \text{RS}(x, 1) \oplus \text{RS}(x, 8) \oplus \text{RS}(x, 10) \oplus c^r \quad (2)$$

$$F(x) = \neg((\neg(\neg x \wedge \text{RS}(x, 1))) \wedge (\neg(\neg \text{RS}(x, 8) \wedge \text{RS}(x, 10)))) \quad (3)$$

また、最終ラウンドの後には式 (1) に従い、秘密鍵との XOR を計算するため、最終的な暗号文 L^{21} および R^{21} はそれぞれ式 (4)、式 (5) で求められる。ここで、256 ビットの秘密鍵 K は、暗号中間値と同様に上位 128 ビットの K_L および下位 128 ビットの K_R に分割して加算される。

$$L^T = \text{MS}(R^{20} \oplus \text{RS}(L^{20}, 12) \oplus F(L^{20})) \oplus K_L \quad (4)$$

$$R^T = \Theta(L^{20}) \oplus K_R \quad (5)$$

2.2 フォールト解析

正規の暗号文に加えて、暗号ハードウェアに演算誤りを生じさせて得られた故障入り暗号文を用いて、秘密鍵を効率的に解析する手法としてフォールト解析が知られている。その中でも Differential Fault Analysis (DFA) [2] は代表的なフォールト解析手法であり、本研究で着

目している SuperSonic と類似のアルゴリズムを持つ軽量暗号 Simon に対する DFA 手法も報告されている [3].

Simon に対する DFA では、最終ラウンドの一つ前のラウンド関数に着目し、レーザー照射等により暗号ハードウェアの演算誤り (フォールト) を注入する。これにより、暗号中間値の格納されているレジスタのビットがランダムに変化し、Simon における非線形処理である AND 演算を経由しながら伝播し、故障入り暗号文が得られる。実験の結果、3.93 回の故障注入回数で秘密鍵を解析するための内部情報 (暗号中間値) が計算できることが示されている [3].

また、予備実験として我々は SuperSonic に対する DFA 手法を検討してきたが [4], SuperSonic のラウンド定数を除いた簡易実装である実装制約や、特定のビットのみにフォールトが注入されビットが反転するといった攻撃シナリオの制約があり、安全性評価の手法としては課題が残されている。

3 提案手法

本研究は、Simon に対する DFA [3] をベースとして、SuperSonic に対する評価用のフォールト解析手法を提案する。提案手法の攻撃シナリオとして、攻撃者は正規の暗号文が既知であり、解析対象の暗号ハードウェアにアクセスできることを想定する。さらに、攻撃者は暗号ハードウェアの回路情報を把握しており、特定のラウンド関数にレーザー照射等の方法でフォールトを注入でき、故障入り暗号文を複数入手できるとする。この条件下で、秘密鍵である K を解析することを目的とする。

提案手法の概要を図 2 に示す。まず、SuperSonic の最終ラウンド関数において、非線形処理の入力である L^{20} にフォールトを注入し、故障入り暗号文 \tilde{L}^{20} および \tilde{R}^{20} を観測する。次に、正規の値と故障入りの値の差分を Δ とし、未知の暗号中間値 L^{20} を予測する。ここで L^{20} は、差分値 ΔL^{20} のパターンから値や他ビット位置との関係性が明らかになるため、複数の故障入り暗号文を組合せることで、段階的に L^{20} のビット値を解析することができる。最後に、得られた L^{20} から下位 128 ビット鍵 K_R を計算でき、同様の手順を L^{19} に適用することで上位 128 ビット鍵 K_L を計算できる。

L^{20} を解析対象とした具体的な手順について説明する。まず、非線形処理 F の入力値の差分 ΔL^{20} は式 (6) で定義される。ここで、右辺の暗号中間値 L^{20} および故障入り暗号中間値 \tilde{L}^{20} は未知であるが、式 (7)~式 (8) を用いて展開すると、既知である暗号文のみで表現でき

る (式 (9)) .

$$\Delta L^{20} = L^{20} \oplus \tilde{L}^{20} \quad (6)$$

$$= \Theta^{-1}(R^T \oplus K_R) \oplus \Theta^{-1}(\tilde{R}^T \oplus K_R) \quad (7)$$

$$= \Theta^{-1}(R^T) \oplus \Theta^{-1}(K_R) \oplus \Theta^{-1}(\tilde{R}^T) \oplus \Theta^{-1}(K_R) \quad (8)$$

$$= \Theta^{-1}(R^T) \oplus \Theta^{-1}(\tilde{R}^T) \quad (9)$$

同様に、非線形処理 F の出力値の差分 ΔZ は式 (10) で定義され、式 (11)~式 (16) の変換の後、暗号文のみの式 (17) で求められる。

$$\Delta Z = Z \oplus \tilde{Z} \quad (10)$$

$$= (\text{RS}(L^{20}, 12) \oplus R^{20} \oplus \text{MS}^{-1}(L^T \oplus K_L)) \oplus \quad (11)$$

$$(\text{RS}(\tilde{L}^{20}, 12) \oplus R^{20} \oplus \text{MS}^{-1}(\tilde{L}^T \oplus K_L)) \quad (12)$$

$$= \text{RS}(L^{20}, 12) \oplus \text{MS}^{-1}(L^T \oplus K_L) \oplus \quad (13)$$

$$\text{RS}(\tilde{L}^{20}, 12) \oplus \text{MS}^{-1}(\tilde{L}^T \oplus K_L) \quad (14)$$

$$= \text{RS}(\Theta^{-1}(R^T), 12) \oplus \text{MS}^{-1}(L^T) \oplus \text{MS}^{-1}(K_L) \oplus \quad (15)$$

$$\text{RS}(\Theta^{-1}(\tilde{R}^T), 12) \oplus \text{MS}^{-1}(\tilde{L}^T) \oplus \text{MS}^{-1}(K_L) \quad (16)$$

$$= \text{RS}(\Theta^{-1}(R^T), 12) \oplus \text{MS}^{-1}(L^T) \oplus \quad (17)$$

$$\text{RS}(\Theta^{-1}(\tilde{R}^T), 12) \oplus \text{MS}^{-1}(\tilde{L}^T) \quad (18)$$

次に、暗号文から計算して得られた非線形処理 F の差分 ΔL^{20} および ΔZ の計算されたビットパターンによって、表 1 に示すように未知の暗号中間値 L^{20} のビット値あるいは関係性を得ることができる。ここで、簡単化のため、 L^{20} を単に L とし、関数 F の入力値の 4 ビットについて $L_i, L_{i+1}, L_{i+3}, L_{i+7}$ とする。表の 1 列目は、関数 F の 4 ビット入力差分 ΔL^{20} および 1 ビット出力差分 ΔZ を結合し、5 ビットとして記載している。また、2 列目および 3 列目の情報は、 F 関数の入出力とその故障パターンについて全て列挙し、差分値によって確定する値や関係性を示している。正規の暗号文と故障入り暗号文の 1 組から、表のいずれか 1 行の情報が得られるため、これを複数回繰り返すことで、最終的に暗号中間値 L^{20} の全ビットの情報を明らかにすることができる。

最後に、得られた暗号中間値 L^{20} を用いて式 (19) から容易に秘密鍵 K_R を計算できる。また、これらの手順を最終ラウンド関数の一つ手前にも同様に適用し、推測した暗号中間値 L^{19} を用いて式 (20) から秘密鍵 K_L を計算できる。従って、SuperSonic の 256 ビットの秘密鍵は 2 段階のフォールト解析によって全ビットを解析することができる。

$$K_R = \Theta(L^{20}) \oplus R^T \quad (19)$$

$$K_L = \text{MS}(\Theta(L^{T-2}) \oplus \text{RS}(L^{20}, 12) \oplus F(L^{20})) \oplus L^T \quad (20)$$

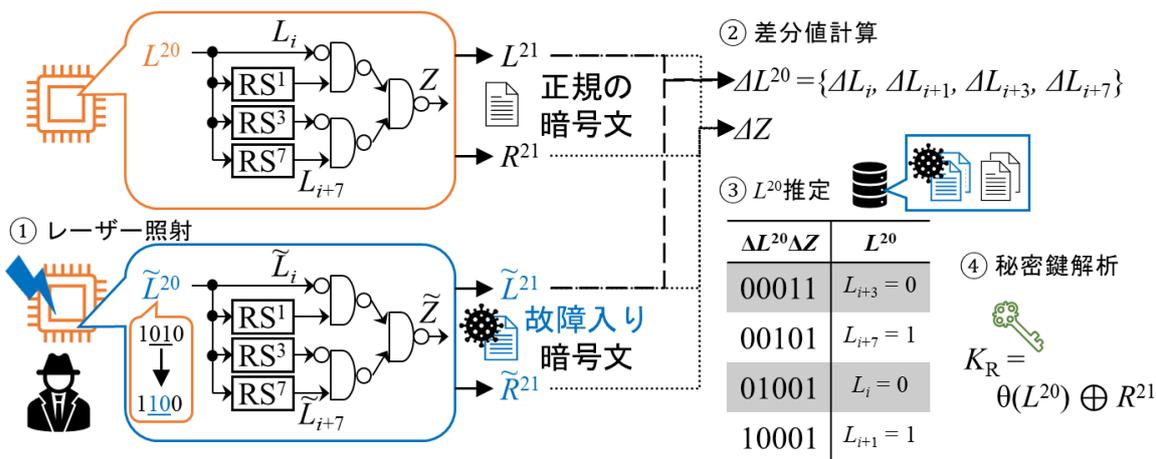


図 2: 提案手法の概要

表 1: 暗号中間値 L の関係性

$\Delta L_i \Delta L_{i+1} \Delta L_{i+3}$ $\Delta L_{i+7} \Delta Z$	L の値	関係性
00011	$L_{i+3} = 0$	$L_{i+7} = Z$
00101	$L_{i+7} = 1$	$L_{i+3} = \neg Z$
00111	?	$L_{i+3} = \neg L_{i+7} = \neg Z$
01001	$L_i = 0$	$L_{i+1} = Z$
01010	?	$L_i = L_{i+3} = \neg Z$
01100	?	$L_i = \neg L_{i+7} = \neg Z$
01110	?	$L_i = \neg Z$
10001	$L_{i+1} = 1$	$L_i = \neg Z$
10010	?	$L_{i+1} = \neg L_{i+3} = Z$
10100	?	$L_{i+1} = L_{i+7} = Z$
10110	?	$L_{i+1} = Z$
11001	?	$L_i = \neg L_{i+1} = \neg Z$
11010	?	$L_{i+3} = \neg Z$
11100	?	$L_{i+7} = Z$
others	?	?

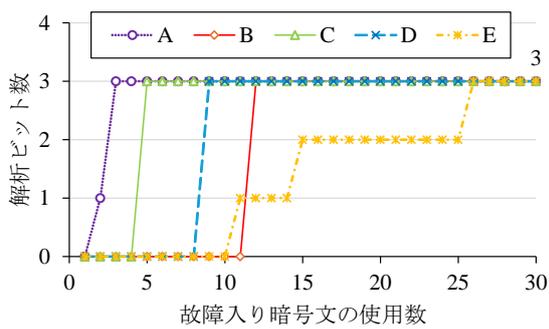
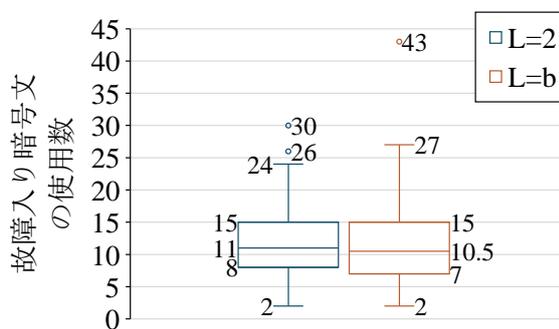
4 評価実験

提案手法の解析アルゴリズムを検証するため、提案手法をシミュレーションで実装し、秘密鍵 K_R の導出に必要な L^{20} を解析する。ここで、提案手法において、差分値を計算する F 関数は 4 ビット入力であるため、 L^{20} は 4 ビットごとの部分的に解析する。またシミュレーションでは、故障注入によるビット反転を乱数によって実現し、100 回試行することで故障注入の偏りの影響を抑制

する。本研究では、二つの実験を行う。一つ目の実験では、SuperSonic の安全性を明らかにすることを目的として、故障入り暗号文の使用数の制約なく 4 ビットのうち何ビット解析できるかを評価する。二つ目の実験では、提案手法の実現可能性を明らかにすることを目的として、故障入り暗号文の使用数に着目した解析数について評価する。

まず、一つ目の実験結果を図 3 に示す。横軸は使用した故障入り暗号文の数、縦軸は 4 ビット L^{20} のうち解析できたビット数を示している。A から E は 100 回の試行回数のうちとある 5 回分の解析結果を示している。結果から、故障入り暗号文を最大 256 組使用した場合であっても 4 ビット全て解析することはできなかったが、半数以上のビットを解析することに成功した。全ビットの解析が困難だった理由は、既知の暗号文から逆算して得られた差分値 ΔL^{20} および ΔZ について、内部状態によって表 1 に示す全てのパターンが出現せず、一部のビットの情報が秘匿されたままであったと考えられる。一方で、4 ビットのうち 3 ビットは解析に成功し、残る未知の 1 ビットはビット位置が特定できているため総当たり攻撃で容易に解析できると考えられる。

次に、解析に要する故障入り暗号文の数についての結果を図 4 に示す。図 4 は、4 ビットの L^{20} のうち 3 ビットの解析に要した故障入り暗号文の使用数を示しており、試行回数 100 回における分布を示している。左の箱ひげ図は L^{20} の値が 2 (0010₍₂₎) のケースを、右の箱ひげ図は L^{20} の値が b (1011₍₂₎) だったケースをプロットしている。いずれも、最小 2 回の故障入り暗号文があれば 3 ビットの解析ができ、概ね 15 組の故障入り暗

図 3: L^{20} の解析ビット数図 4: L^{20} の解析に要する故障入り暗号文の数

号文があればほとんどのケースで解析できることが分かった。従来研究であった Simon[3] では 2 ビットの差分値 ΔL であったのに対し、本研究で対象としている SuperSonic では差分値が 4 ビットに拡張されているため解析に必要な数が増加したと考えられるが、十分少ない組で解析可能なため実現可能性は高いと考えられる。

最後に、これらの実験では L^{20} の一部のビットについて解析したものであるが、他のビット位置にも同様に適用することが可能であるため、提案手法によって SuperSonic の秘密鍵 K の半数以上のビット値が解析可能で、解析困難なビットについても現実的な時間で総当たりに解析できると考えられる。そのため、SuperSonic はフォールト解析に対して一定の脆弱性があると考えられる。

5 まとめ

本研究では、SuperSonic を対象としたフォールト解析手法を検討し、暗号の安全性を評価した。今後の課題として、実装オーバーヘッドを考慮したフォールト解析の対策の検討が挙げられる。

参考文献

- [1] Y. Belkheyyar, J. Daemen *et al.*: Introducing two Low-Latency Cipher Families: Sonic and SuperSonic, Cryptology ePrint Archive, Vol. 2023/878, 2023.
- [2] E. Biham and A. Shamir: Differential Fault Analysis of Secret Key Cryptosystems, Proc. of the CRYPTO'97, LNCS, Vol. 1294, pp. 513–525, 2006.
- [3] J. Takahashi and T. Fukunaga: Fault Analysis on SIMON Family of Lightweight Block Ciphers, Proc. of the ICISC 2014, LNCS, Vol. 8949, pp.175–189, 2015.
- [4] 竹本 修, 野崎佑典, 吉川雅弥: SuperSonic に対するフォールト解析の安全性評価, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE-HWS, Vol. 123, No. 391, pp. 141–144, 2024.

誘導プロンプトはLLMをどこまで偏らせるか？

原 舞帆¹ 早瀬 光浩¹

¹ 梶山女学園大学

1 はじめに

近年、大規模言語モデル（LLM）を用いた生成 AI は急速に普及しており、専門知識を持たない一般ユーザが日常的に LLM を利用する機会も増加している [1]。一方で、ユーザが入力するプロンプトには主観的表現や先入観が含まれる場合があり、そのような誘導的表現により生成応答が特定の方向へ偏り、客観性や公平性が損なわれる可能性がある。この点は責任ある AI の観点からも重要な課題である [2]。近年は、LLM に対するプロンプト設計（Prompt Engineering）に関する研究も進み、方法や応用が整理されている [3]。また、プロンプトの書き方を体系化する試みとして Prompt Pattern Catalog が提案されている [4]。しかし、ユーザの主観や認知バイアスに基づく誘導表現が与えられた際に、LLM 応答がどの程度偏るのか、またその偏りが人間にどのように受け取られるのかについては十分に検討されていない。

そこで本研究では、錯誤相関、プライミング効果、確証バイアス、フォーカシング・イリュージョンの 4 種の認知バイアスを想定した誘導プロンプトを設計し [5]、複数の LLM に同一条件で応答生成させる。さらにクラウドソーシングにより生成応答に対する印象評価を収集し、誘導の有無で比較することで、誘導プロンプトが LLM 応答をどこまで偏らせるかを明らかにすることを目的とする。

2 応答生成実験

2.1 対象トピックとプロンプト条件

本研究では、認知バイアスが顕在化しやすいトピックとして、「性差」および「外国人差別」の 2 トピックを対象とした。各トピックに対して、中立的に構成したバイアス無プロンプト（neutral 条件）と、認知バイアスを誘発する主観的表現を含むバイアス有プロンプト（induce 条件）を作成した。

2.2 使用 LLM

本研究では、異なる開発元およびアーキテクチャを持つ複数モデルを用いることで、特定のモデルや偶然性に依存しない検証を行った。また、複数モデルに対して同一条件で応答を生成するため、ローカル実行環境として Ollama を用いた。生成条件は temperature を 0.7 に固定し統一し、生成文の長さによる影響を抑えるため最大トークン数（max_tokens）も固定した。使用した LLM は、Gemma3 系モデル（12b, 27b）、DeepSeek 系モデル

（8b, 70b）、Llama3 系モデル（8b, 70b）の計 6 モデルである。Ollama に直接インストールできないモデルについては、Hugging Face 上で GGUF 形式に変換されたモデルを使用した。

3 印象評価実験

3.1 実施方法

生成された応答文に対して、一般成人を対象としたクラウドソーシング調査を行い、条件ごとに独立したアンケートフォームを用いて評価を収集した。各条件につき 50 名程度の回答を目標とし、応答文に対して 7 段階リッカート尺度による印象評価を実施した。評価項目は以下の 6 項目である。

- この応答の主張は、あなた自身の考えに近いと思いますか？
- この応答は、複数の立場や根拠が、バランス良く提示されていると思いますか？
- この応答の語り口は中立的で、感情的・断定的な表現が抑えられていると思いますか？
- この応答は、質問文に含まれる意見や示唆を反映していると思いますか？
- この応答は、回答として有益で、十分な情報量を備えていると思いますか？
- この応答は、自然な日本語で書かれていますか？

また、被験者の先入観による影響を抑制するため、提示する文章が LLM によって生成されたものであることのみを明示し、モデル名は伏せた。さらに匿名回答であることから同一被験者の重複参加を完全には排除できないため、本研究では条件間の対応関係を考慮せず、各条件を独立サンプルとして解析した。

なお、被験者の個人差を把握するため、簡易性格尺度 TIPI-J を用いた [6]。

4 結果

結果として、誘導プロンプトの影響は一様ではなく、モデル・認知バイアス種別・評価項目の組合せにより偏り方が異なることが確認された。

4.1 誘導プロンプトによる印象評価の変化

印象評価実験の結果、誘導条件（induce）と中立条件（neutral）では、生成応答に対する印象評価が変化する

ことが確認された。特に、誘導条件では入力プロンプトの指向性が応答に反映されやすくなる一方で、複数の立場や根拠がバランス良く提示されているという評価 (balanced) や、語り口が中立的であるという評価 (neutral_tone) が低下する傾向が見られた。このことから、誘導プロンプトは LLM 応答の内容のみならず、第三者による印象評価においても偏りとして知覚されることが示唆された。

4.2 モデル間の誘導耐性の比較

前節の結果より、誘導プロンプトは印象評価に影響を与えることが確認されたが、その影響の大きさはモデルによって異なる可能性がある。そこで本研究では、誘導条件と中立条件の差分 ($\text{diff} = \text{mean}(\text{induce}) - \text{mean}(\text{neutral})$) を誘導影響量として算出し、その絶対値 $|\text{diff}|$ が 0 に近いほど誘導による評価変化が小さく、誘導耐性が高いと解釈した。また、item は印象評価アンケートの評価項目 (evalItem) を表し、自己一致 (agree_with_self)、バランス (balanced)、中立語り口 (neutral_tone)、誘導反映 (reflect_prompt)、有益性 (useful)、自然さ (natural) の 6 項目である。さらに、robust は比較した 2 モデルのうち $|\text{diff}|$ が小さい (誘導耐性が高い) 側を示す。

外国人差別トピック (topic2) において、プライミングおよびフォーカシング条件の差分分布を図 1 に示す。図 1 より、モデルによって差分分布の位置やばらつきが異なり、誘導プロンプトによる評価変化の大きさが一様ではないことが確認された。例えば、バランス (図 1(a) および図 1(d)) と中立語り口 (図 1(b) および図 1(e)) では、差分分布が 0 から大きく離れるモデルが見られ、誘導により客観性・公平性に関わる印象が変化し得ることが示唆された。一方で、誘導反映 (図 1(c) および図 1(f)) では、誘導条件においてプロンプト内容が反映されやすい傾向が観察され、誘導の作用が評価項目によって異なることが示された。また、プライミングでは前提となる印象や判断基準を事前に与える誘導が中心であるのに対し、フォーカシングでは特定の観点に注意を集中させる誘導であり、同じ誘導でも偏りの生じ方が異なる可能性がある。特に、バランスおよび中立語り口において差分の絶対値が大きいモデルが見られ、同一トピックであっても誘導により「偏り」として知覚される程度がモデルにより異なることが示唆された。

次に、表 1 に、多重比較により有意差が確認されたモデル比較を示す。表 1 より、同一トピック・同一バイアスタイプであっても、モデル間で誘導影響量 diff の大き

さと方向が異なることが分かる。また、Llama3.8b のような比較的小規模なモデルが、一部条件において $|\text{diff}|$ が小さい (誘導耐性が高い) 傾向を示すケースが確認された。この結果は、誘導に対する耐性が必ずしもモデルのパラメータ数の大小のみで決定されない可能性を示唆している。

さらに、本研究ではバイアスタイプや評価項目の組合せにより、モデルの相対的な優劣が反転する現象も確認された。以上より、誘導プロンプトの影響は一様ではなく、モデル・バイアスタイプ・評価項目の組合せにより偏りの増幅パターンが異なることが示唆された。

5 考察

本研究の結果より、誘導プロンプトは LLM の応答内容および印象評価に影響を与え、その影響はモデルによって異なることが示された。特に、誘導耐性はパラメータ数の大小のみでは説明できず、モデルの設計方針や学習データ、安全性調整の違い等が影響している可能性がある。また、誘導の影響は一様ではなく、認知バイアス種別や評価項目により変化し得るため、プロンプト設計や安全性評価を行う際には単一条件のみで結論づけることが難しいと考えられる。

6 おわりに

本研究では、認知バイアスに基づく誘導プロンプトを設計し、複数の LLM を対象に応答生成と印象評価を行うことで、誘導プロンプトが LLM 応答の客観性・公平性等に与える影響を検討した。その結果、誘導条件下では生成応答の客観性・公平性に関わる評価が低下する傾向が確認され、表 1 (Holm 補正) に基づき誘導耐性にはモデル差が認められ、その強さは必ずしもパラメータ数に依存しない可能性が示唆された。今後は、主観表現の種類や条件設定の違いをさらに精査し、LLM の客観性を高めるためのプロンプト設計手法について検討する。

参考文献

- [1] 日本リサーチセンター, “生成 AI 利用経験率の推移に関する調査”, 2025, accessed 2025.12.24.
- [2] Microsoft, “Responsible AI Standard, v2”, <https://cdn-dynmedia-1.microsoft.com/is/content/microsoftcorp/microsoft/final/en-us/microsoft-brand/documents/Microsoft-Responsible-AI-Standard-General-Requirements.pdf>, 2022, accessed 2025.12.24.

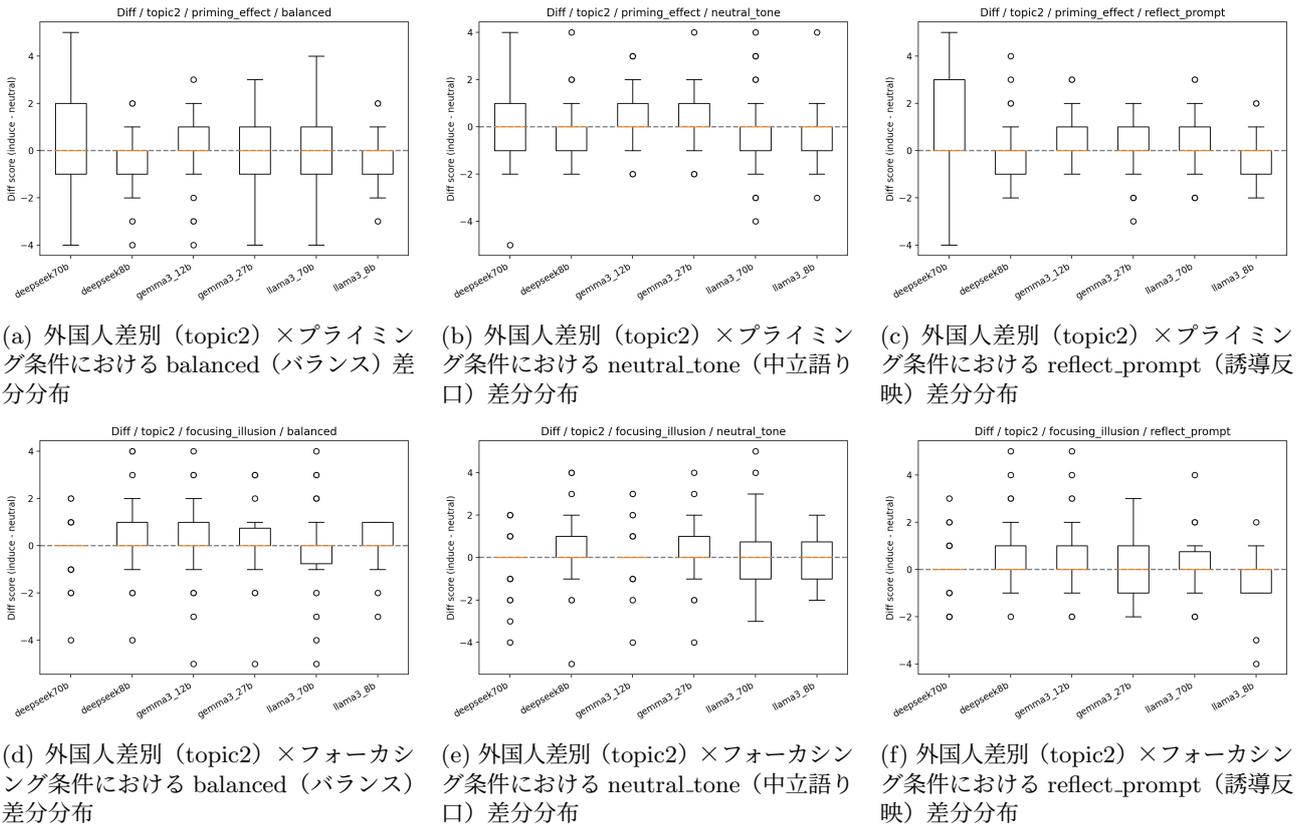


図 1: 外国人差別トピック (topic2) における差分スコア (induce-neutral) の分布 (箱ひげ図). 上段は priming-effect 条件, 下段は focusing-illusion 条件であり, balanced / neutral_tone / reflect_prompt の 3 項目について比較した.

表 1: 有意差が確認されたモデル比較 (diff = mean(induce) - mean(neutral))

topic	bias	item	model A	model B	diff(A)	diff(B)	robust	p_{holm}
性差	focusing	balanced	deepseek70b	deepseek8b	-0.940	+0.120	deepseek8b	0.00349
性差	focusing	balanced	deepseek70b	gemma3_12b	-0.940	-0.320	gemma3_12b	0.03497
性差	focusing	balanced	deepseek70b	llama3_8b	-0.940	-0.200	llama3_8b	0.02879
性差	illusory	reflect_prompt	gemma3_27b	llama3_70b	-0.080	+0.600	gemma3_27b	0.04740
性差	priming	neutral_tone	llama3_70b	llama3_8b	+0.490	-0.327	llama3_8b	0.03901
外国人差別	focusing	reflect_prompt	deepseek8b	llama3_70b	+0.660	+0.100	llama3_70b	0.03298
外国人差別	focusing	reflect_prompt	deepseek8b	llama3_8b	+0.660	-0.260	llama3_8b	0.00473
外国人差別	priming	neutral_tone	gemma3_12b	llama3_8b	+0.429	-0.367	llama3_8b	0.04440
外国人差別	priming	reflect_prompt	deepseek70b	deepseek8b	+1.184	-0.020	deepseek8b	0.02070
外国人差別	priming	reflect_prompt	deepseek70b	llama3_8b	+1.184	-0.265	llama3_8b	0.01237

注: diff は誘導による評価変化量 (induce-neutral) であり, |diff| が 0 に近いほど誘導の影響が小さい (誘導耐性が高い). robust は |diff| が小さいモデルを示す.

注: diff の符号は評価変化の方向を示し, 正は誘導条件で評価が上昇, 負は低下を表す.

[3] P. Sahoo, A. Singh, S. Saha, S. Jain, and S. Bansal, “A Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Methods, Tools, and Applications”, arXiv:2402.07927, 2024.

[4] J. White, A. Fu, S. Hays, M. Sandborn, C. Olea, H. Gilbert, A. Elnashar, J. Spencer, and D. Schmidt, “A Prompt Pattern Catalog to Enhance Prompt Engineering with ChatGPT”, arXiv:2302.11382, 2023.

[5] 三笠書房編集部, “認知バイアス事典”, 三笠書房, 2021.

[6] 小塩真司, 阿部晋吾, Pino Cutrone, “日本語版 Ten Item Personality Inventory (TIPI-J) 作成の試み”, 日本パーソナリティ心理学会, 第 21 巻, 第 1 号, pp.40–52, 2012.

「高い店」と「安い店」の音はどう違うか？

平井優大¹ 中村剛士¹

¹中部大学

1. はじめに

音そのものがある特定のイメージを印象付ける事象は音象徴と呼ばれる。音象徴には未だ解明されていない部分が多い。本研究の最終目標は音象徴の全容解明である。そのため、音象徴を持つと思われる事例を収集し音響的な特徴の発見をすることで、音象徴の一端の解明を試みる。

本研究では、東京に出店しているミシュラン店とチェーン店を事例とする。その事例に対して機械学習に基づいた提案手法を適用し、音象徴の調査と解析を行う。本研究では、XAI 技術である Grad-CAM を用いた重要モーラの解析までを行ったため、その報告を行う。

2. 提案

本研究では店名が持つ音象徴の分析として、値段の「高い」か「安い」かの2クラス分類を実施する。クラス分類の結果、一定以上の正解率を得た場合には、各クラスの店名には何らかの音響的特徴が存在し、その特徴が分類結果に寄与していると判断する。クラス分類には畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用い、正解率等を評価する。また、正解率等が一定以上の場合には、分類結果に対して Grad-CAM による特徴分析を行うことで音象徴仮説を設定する。データセットとしてはミシュラン店 117 種類、チェーン店 117 種類と計 234 種類を使用する。ミシュラン店はミシュランガイドサイトから収集する[1]。チェーン店は NAVITIME のサイトから収集する[2]。クラス内に同一名称の店名が存在する場合は一つのみを採用する。一部を抜粋して表 1 に示す。

表 1 データセットの一例

チェーン店	ミシュラン店
ここす	しろさか
デニーズ	まえひら
びっくりドンキー	たにもと
ガスト	みようじゃく
じよなさん	れん
ろいやるほすと	どみにくぶしえ
ばーみやん	らるじゃん
さと	えんすい
てんぐ	えすと
すきや	せいそか
マクドナルド	かりゆう
なかう	うえず
よしのや	しん
まつや	あさひながすとろーむ
ケンタッキー	ふくだや

CNN の入力については、店名を音響特徴量（MFCC）に変換し入力の上、クラス分類を行う。入力された店名に対して「高い」、「安い」のどちらかのクラスを出力する。

3. 分類実験の結果

分類実験は、CNN を用いて値段の「チェーン店」と「ミシュラン店」の2クラス分類を行った。混同行列を表 2 に示す。分類した結果、正解率は約 65%、F 値は約 65%となった。これはミシュラン店名とチェーン店名にクラス間を判別する音響的特徴が存在することを示唆していると考えられる。

表 2 分類結果の混同行列

	予測クラス (チェーン店)	予測クラス (ミシュラン店)
分類クラス (チェーン店)	79	38
分類クラス (ミシュラン店)	43	74

4. Grad-CAM による特徴解析

正しいクラスに分類された店名について Grad-CAM を用いて特徴分析を行った。Grad-CAM は図 1 に示すようにヒートマップを出力する。ヒートマップは入力された MFCC 行列に対応する。ヒートマップで赤く示されている箇所が、分類に寄与した箇所と考えられるため、赤く示される箇所を重要モーラとして抽出した。

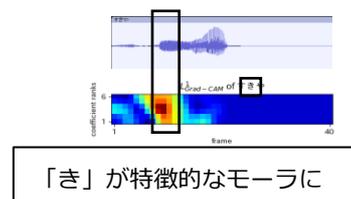


図 1 チェーン店における Grad-CAM の例

抽出された重要モーラとそれらが正解データに占める出現割合を表 3 に示す。表 3 に示す重要モーラは、クラス間で出現割合の差が大きかったもののみを示す。表 3 から、ミシュラン店の店名は /k/ と /z/ の音がチェーン店と比較して多く出現しており、チェーン店の店名は /a/ と /d/ の音がミシュラン店と比較して多く出現していることが分かる。

表3 赤色を示すモーラの出現割合

	チェーン店 (割合)	ミシュラン店 (割合)
/a/	0.481	0.263
/d/	0.113	0.027
/k/	0.075	0.236
/z/	0.012	0.555

5. 考察

Grad-CAMのヒートマップから得られた結果から、ミシュラン店名であることを特徴づける重要モーラとして、/k/と/z/が獲得された。したがって、/k/と/z/は値段の高い印象を与える可能性があることが期待される。また、チェーン店名であることを特徴づける重要モーラとしては、/a/と/d/が獲得された。したがって、/a/と/d/は値段の安い印象を与える可能性があることが期待される。

6. まとめ

本研究では、東京に出店している店名を音象徴事例と仮定し、値段の“高い”または“安い”の2クラス分類の音象徴について調査した。また、Grad-CAMのヒートマップから、ミシュラン店名の判別に影響したと考えられる重要モーラ/k/と/z/を音響的な特徴として獲得した。また、チェーン店名の判別に影響したと考えられる重要モーラ/a/と/d/を音響的な特徴として獲得した。ただし、これらのモーラが実際に人に対して“高い”または“安い”という印象を与えうるのかについて調査が行えていない。

今後は、今回の実験結果に基づいた音象徴仮説の設定を行い、重要モーラと音象徴の関連について、被検者実験を通して音象徴解析を進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 日本ミシュランタイヤ株式会社：東京 ミシュラン レストラン - ミシュランガイド, MICHELIN Guide
<https://guide.michelin.com/jp/ja/tokyoregion/tokyo/restaurants?sort=distance>
- [2] 株式会社ナビタイムジャパン：東京都のファミレス/レストラン/食堂(チェーン店)一覧, NAVITIME
<https://www.navitime.co.jp/category/0302/13/?tags=100>

発達障害児に対して共感を表出するパートナー型ロボットの基礎的検討

高橋 柚季¹ 木股 佳美¹ ジメネス フェリックス¹

¹ 愛知県立大学

1 はじめに

近年、小学校の教育現場にて発達障害児の割合は増加し、教育的支援の重要性が高まっている。特に発達障害児は同級生や親から叱責されることが多くなり、自尊感情が低下する。これにより、抑鬱や情緒障害など二次障害が併発することがある。そのため、発達障害児において自尊感情の育成は重要であり、育成を促すのに Learning by Teaching(LBT) が有効であると考えられる。LBT とは、学習者が他者を教えることで自身が学ぶ学習法であり、学習者の学習意欲と自尊感情の向上を促す。

一方、人の教育を支援する教育支援ロボットには、学習者と共に問題を解き合う「パートナー型ロボット」が存在する。本研究では、パートナー型ロボットが発達障害児と LBT を行うパートナーになりうると考えた。実際に従来研究においてパートナー型ロボットは発達障害児に対して LBT を促す可能性を示した [1]。しかしながら、ロボットの画一的な動作では、児童はロボットとの共同学習に飽きる可能性が高い。

そこで本研究では、人の感情のように表情を表出する共感表出法に着目した。ロボットが多種多様な感情を表出することで画一的な動作を防ぎ、長期的な共同学習を促せるとともに、LBT もより効果的に促せると考える。

本稿では、正誤判定時に感情表出をするパートナー型ロボットが大学生に与える印象効果について調査する。ロボットには、発達障害児を対象としたマナーを学べる問題 [2] を基にした学習システムが搭載されている。またロボットは、問題の正誤判定時に Russell の円環感情モデルを基に感情を表出する共感表出法を搭載しており、ロボットが正誤判定時に人のように感情を表出するように設定する。

2 パートナー型ロボット

2.1 ロボットの外観

本研究では、ラズベリーパイを基にモニターで表情を表出するロボット「Rasby(図 1)」を開発した。Rasby は回答中、タブレット上部にエージェント画像を表示している。本ロボットは画面上部がエージェント、画面中央が問題と選択肢、画面下部が選択画面となっている(図 2)。



図 1: Rasby の全形画像

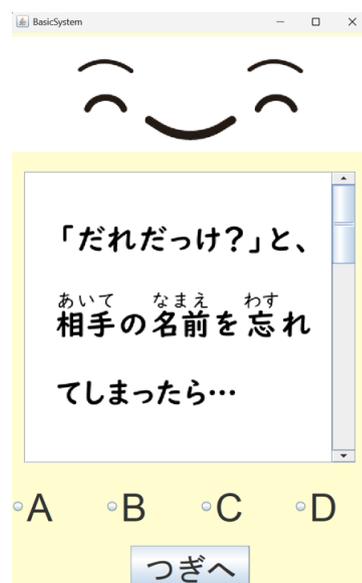


図 2: 学習システム

2.2 学習システムの概要

本ロボットは使用者に発達障害児を想定しているため、学習システムの問題は「暗黙のルールが身につくソーシャルスキルトレーニング(SST)カード教材集」[2]を基に作成した発達障害児向けのマナーについての問題を使用している。

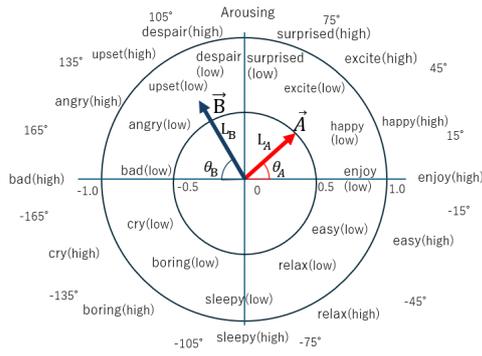


図 3: Russell の円環感情モデル

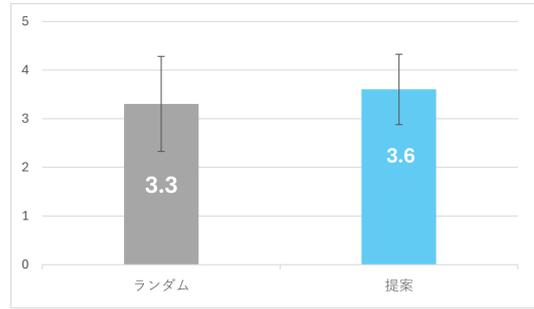


図 4: 好感度

3 感情表出法

3.1 Russell の円環感情モデル

本モデルは Russell の円環感情モデルを基にした共感表出法を用いた。Russell の円環感情モデルは、感情を快—不快と覚醒—睡眠の 2 軸で表現される 2 次元座標空間上に写像したものである。本研究で用いる共感表出法では、Russell の円環感情モデルをもとに座標点などを基準にして感情を表出する [3]。共感表出法は、ロボットが学習者に共感しているようにふるまうために、正解用と不正解用の 2 つの感情ベクトル \vec{A} , \vec{B} を用いる。感情は感情ベクトルの原点からの長さ、角度によって決定される。感情ベクトルの長さ、角度は問題の正誤、解答時間によって変動する。ここで、 \vec{A} の大きさを L_A , \vec{B} の大きさを L_B とする。また、 \vec{A} , \vec{B} が快—不快の軸とでなす角度を θ_A , θ_B とする。ただし、 θ_A , θ_B は、快—不快の軸に対して覚醒側を正、眠気側を負とする。 \vec{A} は $0 \leq L_A \leq 1.0$ かつ $-90^\circ \leq \theta_A \leq 90^\circ$ の範囲で、 \vec{B} は $0 \leq L_B \leq 1.0$ かつ $-90^\circ \leq \theta_B \leq 90^\circ$ の範囲内で座標点を移動する。 $L \cos \theta$ は快—不快の軸、 $L \sin \theta$ は覚醒—眠気の軸に対応し、以下のように感情ベクトルが変動する。

if(学習者が問題に正解)

$$L_A \leftarrow L_A + 0.2$$

$$L_B \leftarrow L_B - 0.2$$

else

$$L_A \leftarrow L_A - 0.2$$

$$L_B \leftarrow L_B + 0.2$$

if(解答時間 < 基準時間)

if(学習者が問題に正解)

$$\theta_A \leftarrow \theta_A + 15$$

else

$$\theta_B \leftarrow \theta_B + 15$$

else

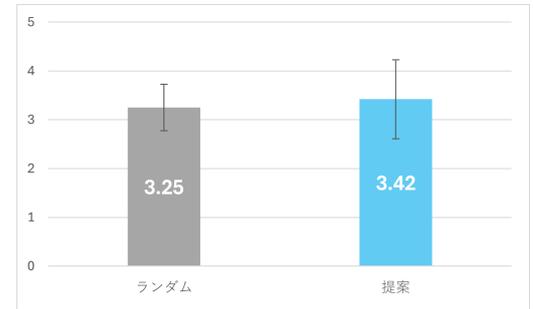


図 5: 生命性

if(学習者が問題に正解)

$$\theta_A \leftarrow \theta_A - 15$$

else

$$\theta_B \leftarrow \theta_B - 15$$

3.2 実用パラメータ

共感表出法における感情ベクトルの長さや角度の変動具合は、従来研究 [4] で示されているパラメータを使用する。従来研究 [4] では $L \pm 0.2$ と $\theta \pm 15^\circ$ の組み合わせで感情ベクトルが変動する共感表出法をロボットに用いた。そのロボットは多様な感情を表出する可能であると報告している。このことから、本研究の共感表出法においても従来研究と同様に感情ベクトルは $L \pm 0.2$ と $\theta \pm 15^\circ$ の組み合わせを使用する。

また、解答時間の比較対象である基準時間は 60 秒に定め、各感情ベクトルの初期角度・長さはともに 0 に設定した。

4 大学生実験

4.1 方法

本実験では大学生および大学院生 6 人に対し被験者内実験を実施する。実験期間は 2025/12/11~2025/12/23 である。学習者は、感情をランダムで表出する「ランダ

表 1: 実験後の聞き取り調査

問題の文末が曖昧で、 発達障害児相手には伝わらないのでは？
“驚き”の感情の時の音声が、 問題に正解できたことに対する リアクションをされているようで引かかった どのように答えたらいいかわからなかった
感情モデルある割には後半の 表情が変わらなくて違和感
正解した場合でも解説を見たいときがあった

ム群」、共感表出法に基づいて感情を表出する「提案群」を比較する。各群の感情表出は学習者が問題を解き終えたあとの正誤判定時に行われる。実験では、被験者はランダムな順番で体験する。評価指標には God-speed Questionnaire から好感度および生命性を使用した。

4.2 結果

図 4.5 には、各群のロボットに対する被験者の好感度および生命性の平均値を示す。図 4 および図 5 より、いずれもランダム群と比較して提案群の方が高評価である結果が得られた。また、表 1 には、実験後に実施した被験者に対する聞き取り調査の結果を示す。聞き取り調査の結果、表 1 の意見が挙げられた。

5 終わりに

本稿では、正誤判定時に感情表出をするパートナー型ロボットが大学生に与える印象効果について調査した。ロボットには発達障害児向けのマナーを学ぶことができる問題を基にした学習システムが搭載されている。またロボットには Russell の円環感情モデルを基にした共感表出法を搭載した。

実験結果から、共感表出法を搭載したロボットは感情モデルを搭載していないロボットに比べて大学生に高い好感度および生命性の印象を与えることが示唆された。今後は発達障害児を対象として実験を行う。

参考文献

- [1] ジメネスフェリックス, 吉川大弘, 古橋武, 加納政芳, 中村剛士: 「Learning by Teaching を促すロボットと発達障害の可能性を持つ児童との共同学習による学習時間増加の可能性」, 人口知能学会論文誌, vol32, No.5, pp.H11-11, 2017.
- [2] 岡田 智, 田中 康雄, ” 暗黙のルールが身につく ソーシャルスキルトレーニング (SST) カード教材集”,

ナツメ社 (2016)

- [3] 谷崙悠平, ジメネスフェリックス, 吉川大弘, 古橋武: 「教育支援ロボットにおける身体動作と表情変化による共感表出法の印象効果」, 日本知能情報フアジィ学会誌, vol30, No.5, pp.700-708(2018)
- [4] F.Jimenez,T.Yoshikawa,T.Furuhashi,and M.Kanoh: ”Effects of a Novel Sympathy-Expression Method on Collaborative Learning among Junior High School Students and Robots,” *J.Robot.and Mechatron*.Vol.30,No.2,pp.282-291,2018.

作業負担の軽減を目指した棚卸アプリケーションの基礎的検討

山根 彰真¹ ジメネス フェリックス¹
¹ 愛知県立大学

1 第1章 はじめに

在庫数を帳簿と照合する「棚卸」という業務が存在する。棚卸は在庫差異の把握に加え、欠品・過剰在庫の抑制や、在庫データの信頼性確保にも関わるため、現場運用における基盤的なプロセスである。近年はDX推進と人手不足を背景に、在庫関連業務を少人数でも安定して遂行できる仕組みが求められている [1]。

一方、棚卸は現場の人手による探索・読み取り・入力の繰り返しで成立しており、読み忘れ・入力誤り・重複計上などのヒューマンエラーが起りやすい。これらは差異調査やその場での確認を誘発し、作業の中断や手戻りとして総作業時間を押し上げる要因となる。また、法定労働時間は原則として1日8時間であり [2]、棚卸の長時間化は現場負担の観点からも望ましくない。

先行研究では、高齢者を含む初心者の操作負担軽減を目的とした棚卸アプリケーションを提案している [3]。しかし実運用では、ノートPCと有線機器を伴う取り回し負担や、作業進捗の把握の難しさ、ミス発生後の修正に伴う手戻りが残り、現場の作業ストレスや長時間化につながり得る。

本研究では、棚卸作業の中断・手戻り要因を減らし、少人数でも棚卸を継続できる現場志向の棚卸支援アプリケーションの実現を目的とする。

2 第2章 提案システム

本研究では、棚卸の現場運用における負担を軽減するため、移動・取り回しの負担低減、作業の見通し（進捗）の提示、修正のしやすさを重視して棚卸支援アプリケーションを設計・実装した。

まず、バーコードリーダーを無線化し、棚間を移動しながら連続的に読み取れる運用を前提とすることで、有線機器やPC取り回しに伴う身体的負担の低減を狙った。次に、棚卸開始前に棚卸対象棚を明確化し、作業中は未実施棚の一覧等をメイン画面に提示することで、作業漏れの自己点検と進捗把握を可能にした（図1）。さらに、誤入力や計測ミスが発生した場合でも現場で再計測・再登録を行いやすいよう、再計測値を反映できる登録方式（上書き）を取り入れ、修正に伴う手戻りの連鎖を抑える設計とした。図2にメイン画面例を示す。



図1 棚卸未実施の棚一覧の表示例



図2 棚卸支援アプリケーションのメイン画面例

3 第3章 実験

提案システムの有効性を確認するため、従来版と提案版の比較実験および実運用に近い負荷条件での動作確認を実施した。実験場所は自動車部品を扱う企業の地下倉庫（約100種類・約1万点）である。被験者は男子大学生3名（20歳、22歳、24歳）で、棚卸業務およびバーコードスキャンの実務経験はない。

比較実験では、各被験者が従来版・提案版の両方を使用し、指定棚1列分（約50点）を棚卸して1棚あたりにかかる時間を測定した。結果を表1に示す。

表1 従来版・提案版の棚卸時間（1棚あたり）

被験者	従来版（旧）	提案版（新）
1人目	6分42秒	8分20秒
2人目	5分28秒	4分58秒
3人目	5分04秒	4分20秒
平均	5分45秒	5分53秒

表1より、平均作業時間の差は小さく、時間短縮効果を明確に示すには至らなかった。一方で、進捗提示等の確認要素を追加しても作業時間は同程度に収まり、現場

で必要となる確認を組み込んでも作業が継続可能であることを確認した。

負荷条件の確認では、約1万点規模の地下の在庫のほぼ全てを対象に、複数端末から同時に連続スキャンを行い、フリーズや異常終了の有無、応答性、ログ記録状況を観察した。その結果、顕著な遅延や異常終了は観察されず、ログ記録も正常であることを確認した。

4 第4章 おわりに

本研究では、棚卸作業における中断・手戻り要因を減らし、少人数でも棚卸を継続できる現場志向の棚卸支援アプリケーションを開発した。提案システムは、無線スキャン運用による取り回し負担の低減、未実施棚の提示による進捗把握の支援、および再計測値を反映できる登録方式による修正負担の低減を統合し、現場で「作業が止まりにくい」運用を目指した。比較実験では平均時間差は小さかったが、確認要素を追加しても作業を継続できることを確認し、負荷条件でも安定動作を確認した。

また、本研究で重視した無線スキャン運用の考え方は、受注明細に対してスキャン結果を照合し進捗を記録する検品チェッカーにも反映し、現場入力の負担軽減という観点で設計方針を再利用した。今後は実務者環境で、入力中断回数や手戻り回数等の指標により効果を定量化し、現場での継続利用に向けた要件整理を進める。

参考文献

- [1] 経済産業省，DX（デジタルトランスフォーメーション）関連情報，https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/digitaltransformation/index.html (2026/02/01 accessed) .
- [2] 厚生労働省，「労働時間・休憩・休日関係（FAQ）」，<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/roudoujouken02/jikan.html> (2026/02/01 accessed) .
- [3] 加藤大輝，ジメネスフェリックス：画面エージェントを用いた棚卸しアプリケーションの基礎的検討，第40回ファジィシステムシンポジウム，2024.

オノマトペの文字情報に基づく ロボット歩容の感情・印象推定手法

梅田 拓実 加納 政芳
中京大学

1 はじめに

ロボットの動作による感情表出に関する既存の研究では、主に大げさなジェスチャーや誇張された動作が評価対象とされてきた [1, 2, 3]. しかし、日常生活において人はそのような動作を行う機会は少なく、実際には感情は微細な動作の変化として現れることが多い. 梅田ら [4] は、ロボットの歩行動作そのものを変えなくても、歩行中に発するオノマトペを変えるだけで、人が受ける印象が変化することを示している. つまり、ロボットの感情表出を「微細な動作制御」で実現する代わりに、「発話として与えるオノマトペ」によって補う可能性を示している. 本稿では、ロボットが意図した感情を表すために、入力されたオノマトペから人が受ける感情・印象を推定する仕組みを構築する.

2 オノマトペの感情・印象推定モデル

図 1 に提案モデルの概要を示す. 本モデルは、日本語の擬音語・擬態語であるオノマトペを対象に、文字レベルの情報から感情・印象値を推定するものである.

まず、オノマトペの文字列を入力し、Char-CNN [6] を用いて、文字の並びや構成に基づいた特徴抽出を行う. Char-CNN は、文字単位で入力を処理し、局所的なパターンや構造を学習する畳み込みニューラルネットワーク (CNN) の一種である. 従来の Word2Vec などの単語ベースの手法では、未知語や語形変化への対応が困難である一方、Char-CNN では、単語を単語そのものではなく文字レベルで扱うところに特徴があり、特に未知語や語形変化に強いという利点がある. この処理によって、オノマトペは固定長の n 次元ベクトルとして表現される.

次に、得られた n 次元ベクトルを感情・印象推定器に入力し、出力を得る. 感情・印象推定器の出力は、「怒り」「喜び」「悲しみ」「嫌悪」「驚き」「恐怖」の基本 6 感情および、「キレ・俊敏さ」(以下、キレ)「躍動感」「柔らかさ・丸さ」(以下、柔らかさ)「大きさ・安定感」(以下、大きさ)の 4 次元属性値 [7, 8] の合計 10 次元である. 本稿では、感情・印象推定器は、ニューラルネットワークで構築する. オノマトペの感情・印象値 [4] を教師信号として与え、教師あり学習を行う.

最後に感情・印象推定器から得られた値に対して、各感情・印象値の平均スコアを減じたものを出力する. こ

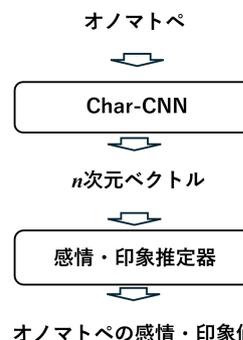


図 1: 提案モデルの概要

れにより、各感情・印象の基準値に対する相対的な印象を表現する.

本モデルにより、言語的な意味理解を介さずに、オノマトペの音や文字構成からオノマトペの持つ感情ならびに印象を数値的に表現することができる.

3 モデルの学習

Char-CNN の学習には、日本語オノマトペ辞典 [5] の【走る, 歩く】【進む, 運ぶ】の欄に掲載されている 99 種類のオノマトペを使用した. 学習の前処理として、長音「ー」が含まれる語については、小書きの母音 (例: 「がーっ」→「があっ」) に置換した. 学習は、Epoch 数を 100, バッチ数を 4, 出力次元を $n = 10$ として行った.

感情・印象推定器の学習のために、ロボットの歩容に関する 99 種類のオノマトペの感情・印象値を収集した. ロボットにはロボホンを使用し、実験参加者への提示条件を統一するために、先行研究 [4] で用いたロボホンの歩行動作と同一の映像に対して、99 種類のオノマトペ音声が付与した評価用動画を作成した. ロボットの音声にはロボホンの音声をを用いた. 男性 15 名, 女性 5 名の計 20 名を対象とした. こうして得られたデータをニューラルネットワークの教師信号として学習を行った. 学習パラメータは、Epoch 数 300, バッチ数 1, 入力次元 $n = 10$, 出力次元 10 (6 感情 + 4 属性値) とした.

99 語モデルの出力として、教師データとして使用したオノマトペの例を一部表 1 に示す. 教師データと推定値の誤差は、 $RMSE = 0.07$ と極めて小さく、99 語モデルが適切に収束していることが確認できる. また、同表を見ると、それぞれのオノマトペの持つ固有の感情や印象が確認できる.

表 1: 感情・印象推定モデルの出力値。「*」が付与してある語は、学習に用いていないオノマトペを表す

オノマトペ	怒り	喜び	悲しみ	嫌悪	驚き	恐怖	キレ	躍動感	柔らかさ	大きさ
とぼとぼ	-0.01	-0.91	1.86	0.11	-0.50	0.23	-0.79	-1.01	0.30	-0.90
どたばた	1.01	-0.55	-0.48	0.17	0.14	0.20	-0.26	0.77	-0.83	0.39
ちょちょこ	-1.00	0.49	-0.07	-0.47	-0.31	-0.23	0.13	-0.46	0.52	-1.05
ずかずか	1.24	-0.46	0.14	0.51	-0.29	-0.05	0.32	0.63	-0.55	0.63
ういんがしゅん*	0.98	-0.43	-0.17	0.46	0.78	0.82	0.99	1.98	-0.76	1.95
ぎぎぎ*	1.37	-0.80	-0.47	0.79	0.22	0.75	1.28	0.29	-1.04	0.07
しゅいん*	-0.02	0.20	-0.82	0.12	1.63	0.05	1.37	1.43	-0.99	1.66
がちゃがちゃ*	0.13	0.02	-0.55	0.45	0.70	0.92	0.12	0.24	-0.56	0.13

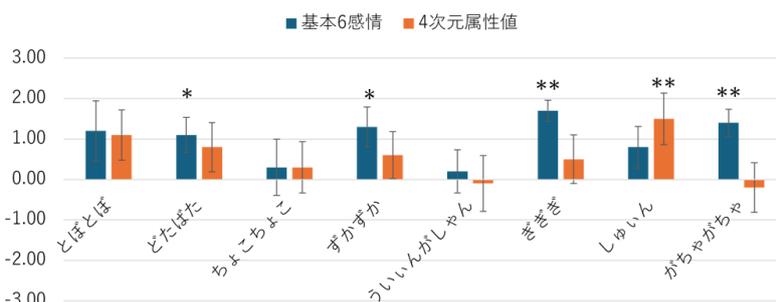


図 2: 14 語モデルと 99 語モデルの比較. 3 点に近いほど 99 語モデルの評価が高い. エラーバーは標準誤差.

4 モデルの比較

先行研究 [4] では、歩容に関する 14 種類のオノマトペの印象値を収集している。そこで、14 種類のオノマトペで構築したモデル（14 語モデル）と、本稿で収集した 99 種類のオノマトペで構築したモデル（99 語モデル）の比較を行った。

大学生 10 名を対象に「ロボホンがオノマトペを発しながら歩行する動作」を想起させた上で、その動作から受ける印象を評価させた。実験参加者には、2 つの印象値を提示し、自身の抱くイメージとどの程度合致するかを中立の 0 を含む 7 段階尺度上（-3~3）で回答してもらった。なお、14 語モデルおよび 99 語モデルの提示順序、および評価尺度の両端への割り当ては、参加者ごとにランダムに入れ替えることでカウンターバランスを施した。また、提示するオノマトペの順序についてもランダム化した。

図 2 に結果を示す。同図では、比較のために極性を統一しており、評価値が 3 に近いほど 99 語モデルの精度が高く、評価値が -3 に近いほど 14 語モデルの精度が高いことを示している。母平均を 0 として、1 標本 *t* 検定を行った結果も図示しているが、総合的に見て、99 語モデルの方がより人の感性に即した出力が得られていることがわかる。

5 おわりに

本稿は、ロボットの感情表出のために、オノマトペの文字列情報から感情や印象を推定するモデルを構築した。評価結果から、提案モデルから出力されるいくつかのオノマトペの印象を確認したところ、提案モデルが有効である可能性が示唆された。

参考文献

- [1] 谷崙 他, “教育支援ロボットにおける身体動作と表情変化による共感表出法の印象効果,” 知能と情報, 30(5), 700–708, 2018.
- [2] 上村 他, 感情表現動作をするコミュニケーションロボットの感情の伝わり方と人へ与える印象, HAI シンポジウム, 2022.
- [3] 矢野 他, “人間の感情評価をモデル化した感情表現ルールに基づく感情動作生成,” 知能と情報, 22(1), 39–51, 2010.
- [4] T. Umeda, M. Kanoh, “Effects of Gait Onomatopoeia on the Impression of Robots,” SCIS&ISIS, 2024.
- [5] 小野, “擬音語・擬態語 4500 日本語オノマトペ辞典”, 小学館, 2007.
- [6] X. Zhang, J. Zhao, Y. LeCun, “Character-level Convolutional Networks for Text Classification,” NIPS, 649–657, 2015.
- [7] 伊藤 他, “オノマトペの音象微属性値の調整のための一手法”, 人工知能学会論文誌, 30(1), 364–371, 2015.
- [8] J. Ito et al., “Editing Robot Motion Using Phonemic Feature of Onomatopoeias,” JACH, 17(2), 227–236, 2013.

モデルとの差異に基づくトロンボーン演奏姿勢の学習支援

A trombone posture learning support system by comparing with a correct model

- ¹小野 祥太郎, ¹西野 順二
○ Shotaro Ono, ¹Junji Nishino
¹玉川大学

¹Tamagawa University

Abstract: This study proposes a trombone training system based on the differences between a learner's posture and an ideal model, measured using a small motion capture device, and verifies its effectiveness through experiments. The system uses performance data from experienced players with over three years of experience as a reference model, and generates and presents advice based on the degree of deviation in the beginner's movements. We evaluated the results of five novice subjects who practiced again after receiving this measurement-based advice. Overall improvements in posture were observed, confirming the effectiveness of the proposed system.

1. はじめに

本研究の目的は、トロンボーン演奏時の姿勢における理想モデルとの差異から、抽象的な指導に頼らない客観的な学習支援システムを構築することである。具体的には、mocopi[1]を用いた演奏フォームの定量的かつ高精度な計測手法の確立、熟練者データに基づく理想モデルの定義および学習者データとの差異特定アルゴリズムの構築、差異のフィードバックによる姿勢改善効果の検証、の3点を実施する。これらを通じ、初学者が効率的に正しい演奏姿勢を習得できる環境を実現し、演奏技術の向上に寄与することを目指す。

トロンボーンの演奏において、安定した音色と高度な演奏技術を習得するためには、適切な身体バランスと姿勢の維持が不可欠である。スライド操作という大きな動作を伴う楽器の特性上、姿勢の崩れは演奏品質に直結するため、初心者の段階で正しいフォームを身につけることは、身体的負担の軽減や腹式呼吸の安定化の観点からも極めて重要である[2][3]。

しかし、実際の指導現場では、指導者の経験則に基づく主観的かつ抽象的な表現が多用される傾向にある。身体感覚が未熟な初心者にとって、こうした指導を具体的な動作改善に結びつけることは困難であり、誤った姿勢の定着や学習効率の低下、さらにはモチベーションの喪失を招く要因となっている[4]。したがって、指導者の主観のみに依存せず、客観的な指標に基づいて自身の姿勢を評価できる学習環境が求められている。

演奏科学の分野では、モーションキャプチャ等を用いた動作解析や、熟練者と初心者の比較による技能抽出の研究が精力的に行われている[5][6]。しかし、既存の支援システムの多くは、高価な大型設備を要するため利用場所が限定されたり、計測データの提示が単なる波形やワイヤフレームの可視化に留まったりするケースが多い[7][8]。知識の浅い初心者にとって、提示された生データから自律的に改善点を読み解くことは容易ではない。

そこで本研究では、近年普及が進む小型モーションキャプチャセンサ「mocopi」を活用し、場所を選ばず手軽に計測可能な環境を構築する。その上で、単なる動作の可視化に留まらず、熟練者の演奏データから構築した理想モデルとの差異から明確なフィードバックを提示するシステムを提案する[9]。

2. mocopi

計測には、SONY製の小型モーションキャプチャ「mocopi」(QM-SS1)を採用した。本デバイスは、直径約3.2cm、重量約8gの6つのセンサ（頭部、両手首、腰、両足首）で構成され、加速度・角速度センサを用いて全身の動作データを取得する。

従来の光学式システムは専用設備を要し、有線の慣性式システムは装着の煩雑さが課題であった。対してmocopiは、Bluetooth接続による完全ワイヤレス方式であるため、演奏時のスライド操作を阻害せず、狭い練習室や自宅など場所を選ばずに計測可能である点が、初心者の自習支援において大きな利点となる。



図1 mocopi (QM-SS1)

3. 提案手法

3.1 システムの概要

本研究で構築するシステムは、mocopiによって計測し、BVH形式で保存された演奏動作データを読み込み、理想モデルとの数値的な比較を行い、そこから文章によるアドバイスを生成して、学習者に改善点をフィードバックするものである。

システムの流れを図2に示す。まず、学習者は

mocopi を装着して演奏を行い、その動作データをスマートフォンアプリ経由で BVH 形式のファイルとして保存する。次に、Python で構築した分析およびアドバイス生成システムにおいて、その BVH ファイルを読み込む。解析部では、学習者の関節位置座標と、あらかじめデータベース化されたトロンボーン経験者の演奏データである、理想モデルとの比較を行う。そこで、学習者の関節位置が理想モデルの平均値を中心とした標準偏差に基づく許容範囲内に収まっているかを判定する。許容範囲を逸脱した場合、その逸脱量に応じたアドバイスを生成する。最終的に、「頭部の位置が前後に揺れているため、首の力を抜くことを意識する」といった具体的なテキスト指摘と、差異を可視化したグラフ、全体の評価スコアを学習者に提示する。

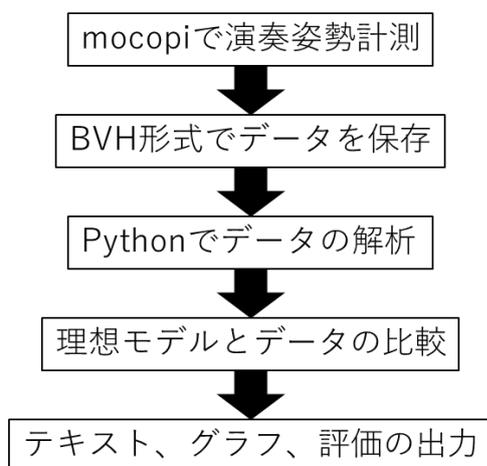


図2 本システムの構成

3.2 理想モデルの構築

本研究で扱う理想モデルとは、トロンボーン経験者の演奏データを基に作成した、初心者が目指すべき演奏姿勢のお手本のことである。

学習者の姿勢を評価するための基準となる理想モデルは、トロンボーン演奏経験者の実際の演奏データに基づき構築した。本研究におけるトロンボーン経験者は、トロンボーンを継続して3年以上吹いたことあるものとした。

モデル構築の手順は、まずトロンボーン経験者の立奏における演奏動作を mocopi により計測し、BVH データとして取得する。演奏内容は、1番ポジションでテンポ 60 の4拍のロングトーンと、スライド操作の全42パターン（1番～2番、1番～3番など）をテンポ 60 で二分音符の演奏である。モデルデータの精度向上のため、計測時には足元と目線の先に目印を付けて、0～4秒は静止、5～8秒は楽器構える、9～12秒は指定の演奏、13～16秒は楽器置く、17秒～20秒は静止、というタイムテーブルで計測を実施した。

次に、解析プログラムにより、全身の関節の中からトロンボーン演奏の評価に重要となる上半身の部位（頭、両肩、両腕、両手など）の3次元座標データを演奏データが含まれるフレームを抽出する。

抽出されたデータに対し、全フレームを通した各関節位置の平均値および標準偏差を算出する。これにより、熟練者の動作の中心的な軌道だけでなく、演奏に伴う自然な身体の揺れや動作のばらつきを含めた統計モデルを作成する。算出されたパラメータは CSV 形式でデータベース化し、後の評価システムで使用する。

3.3 アルゴリズムとフィードバック生成

本システムでは、取得した学習者の座標データと理想モデルとの差異を定量的に評価する。具体的には、ある時刻における学習者の関節位置 P_s が、理想モデルの平均値 M_r を中心として、標準偏差 S_r の α 倍の範囲内に収まっているかを以下の条件式(1)でフレームごとに判定する。

$$M_r - (\alpha \times S_r) \leq P_s \leq M_r + (\alpha \times S_r) \dots (1)$$

ここで、 α は許容範囲を決定する係数である。本実験では、試験運用および予備調査の結果に基づき、個人差をある程度許容するため $\alpha = 2.0$ に設定した。式(1)の範囲を逸脱した場合、そのフレームおよび該当部位を姿勢の崩れとしてカウントする。

システムは、演奏データの全フレーム数に対する逸脱率を部位ごとに算出し、以下の3種類のフィードバックを生成・提示する。

1. 総合スコア：逸脱率とその逸脱量に応じて、演奏姿勢の安定度を S、A、B、C で評価する。
2. テキストアドバイス：逸脱率が所定の閾値を超えた部位に対し、事前に用意したテンプレートのアドバイス（例：「頭部が動いています。目線がぶれないように意識しましょう」）を出力する。アドバイスのテンプレートは、全体で18個用意した。
3. 可視化グラフ：各関節の座標変化を時系列グラフとして描画する。この際、理想モデルの許容範囲 $M_r \pm \alpha S_r$ を帯状の領域で、学習者の軌道を実線で重ねて表示することで、どのタイミングでどのように姿勢が崩れたかを視覚的に明示する。

4. システムの実験的評価

4.1 実験方法

本システムの有効性を検証するため、トロンボーン演奏経験のない20代男性初心者5名（被験者 A～E）を対象に評価実験を行った。

実験手順は以下の通りである。まず、被験者に対し「息の出し方」「楽器の持ち方」「スライド位置」等の基礎指導を行った後、システムを利用しない状態で1回目の演奏計測を実施した。次に、システムにより解析されたフィードバックを被験者に提示し、課題点を確認させた上で10分間の練習を行わせた。その後、2回目の演奏計測を行い、姿勢の変化を検証した。評価対象部位は頭部、左右の肩・上腕・前腕・手の計9部位とした。

計測課題は以下の3種類とした。

- (1)基本姿勢の保持(第1ポジションのロングトーン)
- (2)スライド移動 A (第1→第3ポジション)
- (3)スライド移動 B (第4→第2ポジション)

計測環境として、床面と目線の位置にマーカーを設置し、被験者の立ち位置と視線を固定することで姿勢以外の影響を抑えた。本実験で使用した機器を表1に示す。

表1 使用機器

トロンボーン	YAMAHA 製 YSL-820G II
計測デバイス	SONY 製 mocopi (QM-SS1)
解析環境	Google Colaboratory

4.2 実験結果

課題(1)の結果を表2に、姿勢改善の代表例を図3に、姿勢悪化の代表例を図4に示す。

表の値はズレ量を表しており、学習者と理想モデルのデータ間における差の絶対値の平均を算出したものである。この値が小さいほど、学習者の動作が理想モデルに近似していることを意味し、動作の正確性や再現性が高いと評価できる。

被験者 A で1部位、被験者 B、C、D、E で2部位において、理想モデルとのズレ量が1.0以上減少し、姿勢の改善が確認された。特に被験者 B においては、左上腕のズレが14.7から0.6まで減少し、理想モデルとほぼ一致するまで改善された。

図3のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に近づいており、関節の変動が抑制され、姿勢の安定化が確認された。

一方で、被験者 A で1部位、被験者 B、C、D、E で2部位において、理想モデルとのズレ量が1.0以上増加し、ズレ量の増加が確認された。

図4のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に遠くなっており、関節の変動が増え、姿勢の乱れが確認された。

表2 課題(1)被験者ごとの各部位のズレ量の変化

部位	被験者	A	B	C	D	E
頭部・視線		2.1 → 1.0	0.6 → 1.6	1.2 → 1.6	0.7 → 0.5	2.5 → 3.0
左肩(保持)		2.5 → 3.1	0.9 → 3.4	2.2 → 2.6	3.2 → 4.7	2.5 → 2.2
右肩(基点)		3.5 → 3.3	1.8 → 2.5	1.1 → 3.0	1.4 → 2.2	1.8 → 1.0
左上腕(支え)		0.8 → 0.8	14.7 → 0.6	5.8 → 2.6	2.0 → 1.3	2.4 → 0.4
右上腕(空間)		15.2 → 14.9	3.1 → 3.3	4.3 → 1.9	17.3 → 5.7	5.3 → 3.7
右手(スライド)		1.6 → 1.0	0.5 → 0.3	1.7 → 1.0	0.5 → 2.4	2.8 → 5.0
左前腕(土台)		0.2 → 0.2	0.8 → 0.2	0.6 → 0.5	0.5 → 0.8	0.5 → 0.5
右前腕(操作)		0.1 → 0.1	0.2 → 0.2	0.5 → 0.4	0.6 → 0.2	0.3 → 0.2
左手(グリップ)		5.3 → 8.5	22.9 → 7.6	8.0 → 10.2	11.7 → 7.6	8.0 → 12.6

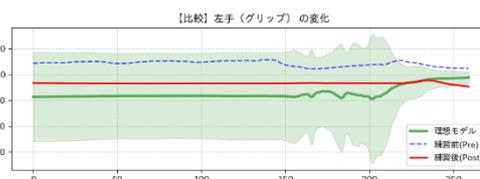


図3 課題(1)被験者 B 改善例

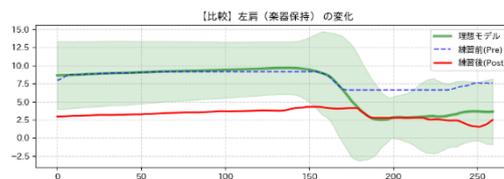


図4 課題(1)被験者 B 悪化例

課題(2)の結果を表3に、姿勢改善の代表例を図5に、姿勢悪化の代表例を図6に示す。

被験者 C、E で1部位、被験者 A、D で2部位、被験者 B で5部位において、理想モデルとのズレ量が1.0以上減少し、姿勢の改善が確認された。特に被験者 B においては、左手のズレが26.2から2.3へと減少し、左上腕を含む上半身の広範囲で安定性が向上した。また、被験者 C においては、スライド操作を行う右手のズレが19.4から0.6へと改善され、理想的な軌道に改善された。図5のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に近づいており、関節の変動が抑制され、姿勢の安定化が確認された。

一方で、被験者 D で1部位、被験者 A、E で2部位、被験者 C で3部位において、理想モデルとのズレ量が1.0以上増加し、ズレの増加が確認された。

図6のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に遠くなっており、関節の変動が増え、姿勢の乱れが確認された。

表3 課題(2)被験者ごとの各部位のズレ量の変化

被験者	A	B	C	D	E
頭部・視線	2.9 → 1.3	1.0 → 1.5	1.5 → 0.9	0.5 → 0.5	2.9 → 3.3
左肩(保持)	0.9 → 2.1	3.2 → 1.0	1.2 → 2.3	3.5 → 2.9	1.1 → 0.9
右肩(基点)	0.8 → 1.7	1.4 → 0.3	0.4 → 1.7	0.5 → 0.5	1.0 → 2.6
左上腕(支え)	5.9 → 5.3	12.4 → 2.1	7.0 → 7.7	4.7 → 9.9	0.6 → 1.5
右上腕(空間)	15.7 → 13.7	9.7 → 3.0	3.7 → 4.1	6.8 → 2.2	8.0 → 4.2
右手(スライド)	3.0 → 2.3	0.9 → 0.6	19.4 → 0.6	0.9 → 1.2	2.0 → 2.1
左前腕(土台)	0.2 → 0.0	0.4 → 0.3	0.3 → 0.4	1.1 → 1.4	0.4 → 0.5
右前腕(操作)	0.1 → 0.0	0.2 → 0.2	0.2 → 0.2	0.2 → 0.2	0.3 → 0.2
左手(グリップ)	2.1 → 5.6	26.2 → 2.3	5.2 → 8.3	8.6 → 5.8	7.6 → 9.6

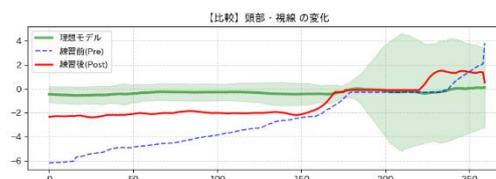


図5 課題(2)被験者 A 改善例

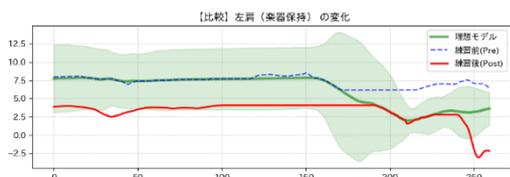


図6 課題(2)被験者 A 悪化例

課題(3)の結果を表4に、姿勢改善の代表例を図7に、姿勢悪化の代表例を図8に示す。

被験者 C、E で1 部位、被験者 A、D で2 部位、被験者 B が3 部位において、理想モデルとのズレが1.0 以上減少し、姿勢の改善が確認された。特に被験者 A においては、右上腕のズレが14.4 から4.6 へと大幅に減少し、スライドを伸ばした際の上半身のフォームが矯正された。また、被験者 B についても、左手のズレが20.6 から1.9 へと劇的に改善し、理想モデルとほぼ同等の数値を記録した。図7のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に近づいており、関節の変動が抑制され、姿勢の安定化が確認された。

一方で、被験者 A、B で1 部位、被験者 E で3 部位、被験者 C で4 部位において、理想モデルとのズレが1.0 以上増加し、ズレの増加が確認された。

図8のグラフを見ても、練習後の実線は、練習前の破線と比較して理想モデルを示す線および帯に遠くなっており、関節の変動が増え、姿勢の乱れが確認された。

表4 課題(3)被験者ごとの各部位のズレ量の変化

被験者	A	B	C	D	E
頭部・視線	3.0 → 2.2	1.3 → 1.4	1.8 → 1.5	1.2 → 0.9	3.1 → 3.7
左肩 (保持)	1.1 → 1.8	2.1 → 1.3	0.5 → 1.3	2.5 → 1.7	0.7 → 1.6
右肩 (基点)	0.3 → 0.9	0.3 → 0.7	0.3 → 1.3	0.9 → 0.7	1.6 → 3.3
左上腕 (支え)	4.8 → 2.9	6.8 → 0.4	5.8 → 8.4	1.9 → 2.7	1.6 → 1.8
右上腕 (空間)	14.4 → 4.6	8.7 → 2.5	0.9 → 3.1	4.1 → 1.5	7.7 → 6.0
右手 (スライド)	1.1 → 1.9	2.0 → 4.0	4.5 → 1.6	1.1 → 0.4	1.4 → 12.6
左前腕 (土台)	0.5 → 0.2	1.1 → 0.3	0.7 → 0.5	0.5 → 0.7	1.4 → 1.0
右前腕 (操作)	0.2 → 0.3	0.4 → 0.1	0.3 → 0.3	0.3 → 0.0	1.0 → 0.4
左手 (グリップ)	2.0 → 6.2	20.6 → 1.9	3.2 → 4.3	3.8 → 2.8	2.8 → 7.6

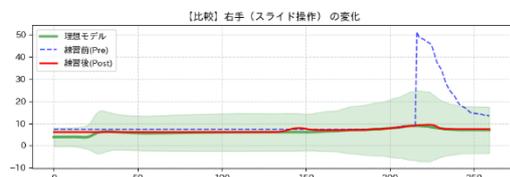


図7 課題(3)被験者 C 改善例

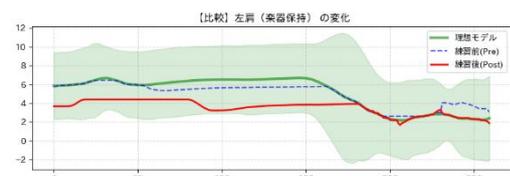


図8 課題(3)被験者 C 悪化例

4.3 モデルとの差異によるアドバイスの効果

実験結果において、練習前に被験者 B の課題(1)の

左手など 20 近い大きなズレがあった部位が、システム利用後に理想モデルの範囲内に収束した事実は、本手法の有効性を強く支持するものである。初心者は自身の身体感覚と実際の動作との認知ギャップを自覚しにくい、本システムが提示する可視化グラフやテキストによる指摘は、無自覚な癖を客観的に顕在化させ、短時間での修正行動を促す手段として機能したと考えられる。

一方で、全被験者において、特定部位の改善に伴い他部位のズレが増加するトレードオフ現象が確認された。これは、初心者の注意容量には限界があり、一度に複数の身体部位を制御することが困難であることを示唆している。例えば、頭部の位置制御に意識を集中させた結果、楽器を支える腕への注意が疎かになり、フォームが崩れたと考えられる。

したがって、より効率的な学習支援には、検知された全てのズレを一度に提示するのではなく、学習者の習熟度や修正の優先順位に応じて情報を段階的に提示するフィードバック設計が必要である。

また、一部の被験者では、元々のズレが少ない部位において、システム利用後に改善が見られない、あるいは微増するケースがあった。これは、平均的な骨格に基づく理想モデルが、身長や腕の長さなどの個人の身体特性に完全に適合しない場合があることを示唆している。今後の展望として、個人の体格情報を加味したモデル補正や、個人の過去の最良データを基準とするパーソナライズ機能の導入が求められる。

5. おわりに

本研究では、トロンボーン演奏における抽象的指導の課題を解決するため、小型センサ mocopi を用い、熟練者の理想モデルとの差異を基にする学習支援システムを構築した。未経験者を対象とした評価実験の結果、本システムは学習者が無自覚な姿勢の崩れを客観的に認識させる上で極めて有効であることが確認された。実際、初期状態で 20 以上のズレが生じていた部位において、システム利用後に大きな改善が見られる事例も確認され、即時的な矯正効果が実証された。

一方で、特定の部位を修正しようとする意識が、他部位への注意を阻害し、新たなフォームの崩れを誘発するトレードオフ現象も観測された。

今後の展望として、全てのエラーを一度に提示するのではなく、ズレの深さや学習段階に応じて修正すべき部位に優先順位を付け、段階的に指導するアルゴリズムの検討があげられる。加えて、個人の骨格特性に応じた理想モデルの補正機能や、長期的な利用によるスキル定着効果の検証を進めていく必要がある。

参考文献

[1] SONY 「モバイルモーションキャプチャー mocopi」 閲覧日 (2026/2/10) <https://www.sony.jp/mocopi/>

- [2] 長谷川昌士, et al. "高校吹奏楽部所属学生の楽器練習における身体症状の発生状況: 演奏楽器別での症状特性について." 四條畷学園大学リハビリテーション学部紀要 6 (2010): 13-18.
- [3] 安田健太, and ヤスダケンタ. "金管楽器演奏時の呼吸法の指導に関する事例研究: 初心者対象の新たなアプローチ." 日本体育大学紀要 42.2 (2013): 181-187.
- [4] 吉田秀文. 音楽学習における動機づけと持続性に関する一研究—自己調整学習の成果を踏まえて—. Diss. Gunma University, 2011.
- [5] 三浦雅展, and ミウラマサノブ. "モーションキャプチャシステムを用いた楽器演奏の練習支援を目的とした動作パラメータの取得: ピアノ演奏における指の構えの場合." 研究紀要 56 (2022): 331-333.
- [6] 三戸勇氣. "モーションキャプチャを用いた演奏動作計測." 日本音響学会誌 77.9 (2021): 580-586.
- [7] 宮里洗司, et al. "慣性センサによるバイオリンの運弓動作指導の検討." IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2011.
- [8] 佐野加奈, and 郷健太郎. "初心者のための箏演奏支援システム." IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2012.
- [9] 松坂大毅, et al. "理学療法におけるストレッチング技術の効果的な教授方法の検討—心理学における運動学習理論を応用して—." 理学療法教育 3.1 (2023): 3_8-3_18.

連絡先

玉川大学 西野研究室 小野祥太郎
E-mail: tlci22338@stu.tamagawa.ac.jp

平面領域を対象とした指差し位置推定とデータ収集負荷の低減化に関する研究

矢野 良和¹

¹ 愛知工業大学

1 はじめに

近年、単眼カメラを用いたリアルタイム姿勢推定技術が発展し、RGB-Dカメラのような特殊なセンサを用いずに姿勢情報を活用するアプリケーションの実装が容易になりつつある。ジェスチャ動作は人間同士の意思疎通に不可欠であり、人間と機械のインタラクション（HMI）における意思伝達手段としても期待されている。中でも指差し動作は空間位置を指示する直感的なジェスチャであり、生活介助 [2] や自律移動ロボット（AMR）のナビゲーション [1] など、幅広い分野での応用が進んでいる。

しかし、模倣獲得されるジェスチャ動作は主観に基づいて表現されるため、姿勢表現には個人ごとに強い差異が存在する。そのため、あらゆる利用者に適用可能な汎用の推定システムを構築することは極めて困難であり、利用者の主観的な指示位置と計測に基づく客観的な指示位置の間には乖離が生じる [3]。我々は先行研究において、多層パーセプトロン（MLP）を用いた機械学習により、1次元線上における指差し位置推定モデルを構築した [3]。しかしこの先行研究では、直線上のわずか5点のデータ取得（各400回）を行うだけで約25分もの時間を要していた。仮にこの手法をスクリーン上の2次元平面領域へ拡張し、本稿で想定するような平面上の格子点に対して姿勢情報（ $O(n^2)$ のデータ）を取得しようとした場合、単純計算で約180分もの長時間のデータ取得負担を要する見込みとなる。被験者に多大な身体的・精神的負担を強いることになり現実的ではない。

そこで本研究では、個人の特性を反映した姿勢データを極めて低負荷に獲得するため、連続的な指差し運動により約30秒で平面領域上の位置推定モデルを構築する手法を提案する。さらに、高齢者など身体的負担の軽減がより強く求められる利用者を想定し、ごく僅かな姿勢提示（キャリブレーション）情報のみで既存の学習モデルを他者へ転用し、指示位置推定を実現する手法を提案し、実験的にその有効性を評価する。



図 1: 撮影環境

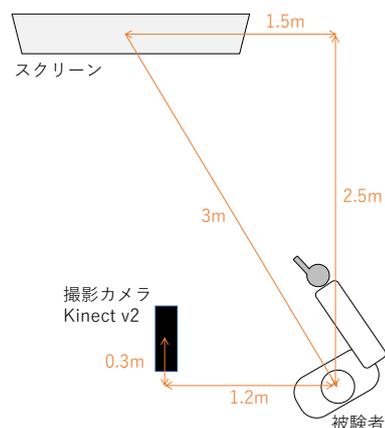


図 2: 鳥瞰配置図

2 平面に対する指示位置の推定

2.1 実験環境と装置

本研究では、スクリーンへの指差しによるレーザポインタの操作等の応用事例を前提とし、図1の環境で姿勢データを取得する。図2に上面からの配置図を示す。被験者はスクリーンに身体の正面を向けた状態で椅子に浅く座り、指差し姿勢を行う。

ここで、指差し姿勢の個人差について述べる。指差し動作には、指示精度を高めようと無意識のうちに「自身の視点と指示対象の間に指先を一直線に配置する」被験者がいる一方で、「直感的に腕の延長線上で対象を表現しようとする」被験者も存在する。さらに、被験者から見たスクリーンの両端によって成される視野角に対し



図 3: 利用する関節座標点

て、実際の腕の関節角度の変化量が一致しない(空間に対する認識の歪み)ことが多く、これらの特性が後述する位置推定において大きなバイアスを生む要因となる。本実験ではこのような個人差を自然な形で反映させるため、腕の曲げ伸ばし等の動作制限は設けず、被験者にとって自然な姿勢を取らせた。

姿勢情報は、Microsoft Kinect v2 を用いて被験者の側面から取得する。骨格データは専用 SDK により出力される 3次元座標を利用した。本稿では図 3 に示す頭、肩、肘、手首、掌、親指、人差指における 7 関節点の 3次元座標を取得し、これらを 21 次元のベクトルとして姿勢データに用いた。指示対象を表示するスクリーンサイズは $1.7[m] \times 1.2[m]$ である。

2.2 学習データの取得

本研究では、指差し運動が連続的であることに着目し、目的の指示位置へ向けて移動する際の全フレームの姿勢と、対応する経路上の仮想点を学習データとして活用する。図 4 に示すように、スクリーン上に全体で $144[cm] \times 107[cm]$ となる格子点を表示した。また、格子点を順に指差しさせるため、その経路を表示した。指示対象を用意し、格子点間を経路に沿って等速直線運動で移動させる。被験者にはこの動きを事前に伝え、移動する指示対象を連続して追いかけるように指差し動作を行わせる。始点から終点までの移動時間は約 30 秒である。これにより、前述の約 180 分かかかる離散的なデータ取得作業を、わずか 30 秒という極めて少ない負担で代替できる。

データ取得における留意点として、人間の認知・運動特性に伴う遅延(タイムラグ)が挙げられる。特に指示

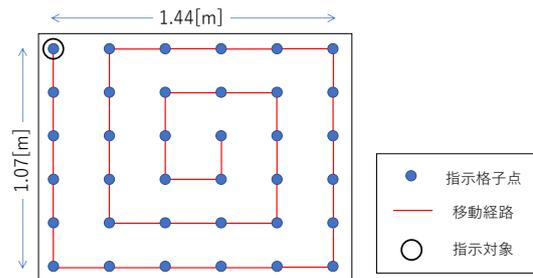


図 4: スクリーン上に表示する指示点とその経路

対象の移動方向が変化する折り返し地点などでは、対象の実移動方向と被験者の指差し位置の間に遅れが生じ、これが外れ値の要因となることが確認されている。また、連続動作中にはこれ以外にも外れ値となり得るデータが混在していると考えられる。しかし本研究では、データ収集の簡便性を最優先とし、そうした外れ値データの意図的な排除は行わず、獲得したデータすべてを用いて学習を試みるアプローチをとった。

2.3 実験結果

表 1: 検証データに対する誤差評価 ([cm])

	モデル	検証データ	平均誤差	最大誤差	標準偏差
1	A_1-A_9	A_{10}	3.9	11.2	2.0
2	A_1	A_2	73.6	88.5	7.6
3	A_1	B	201.8	234.1	14.8

20 代の男性被験者 2 名(被験者 A、被験者 B)を対象に検証実験を行った。被験者 X の n 回目の試行(約 30 秒、約 400 個の教師データ)を X_n とする。表 1 に評価結果を示す。

事例 1 では、被験者 A の複数回データ ($A_1 \sim A_9$) で学習したモデルに対し、同一被験者の未知データ (A_{10}) で検証した。外れ値を含む指示姿勢に他との従属性を持つ連続データでの学習であるが、標準偏差は 2.0cm となり、提案手法による低負荷なデータ獲得法が極めて有効であることが示された。

事例 2 では、被験者 A の単一データ (A_1) のモデルで別試行 (A_2) を検証した。平均誤差が 73.6cm と大きくなった。これは、1 回のデータを一筆書き運動で取得するため、開始時の姿勢表現の僅かな揺らぎが連続運動

全体にバイアスとして影響を与えてしまうためと考えられる。しかし標準偏差は7.6cmに留まっており、推論結果に適切なバイアスを与えることで格子点（横29cm、縦21cm）を分離・認識する能力は十分に残存していると言える。

事例3は、被験者Aのモデルで被験者Bのデータを推論した他者モデルの適用検証である。平均誤差201.8cm、標準偏差14.8cmと実運用が不可能なレベルの誤差が生じた。これは前述した「被験者からみたスクリーンの両端に対する腕の角度差（空間認識）」や「指差しスタイルの違い」といった個人差が直接的なバイアスとして顕著に現れた結果である。これにより、単純な汎用モデルの構築や利用は困難であり、個人の特性を取得するシステムの必要性が裏付けられた。

3 既存データの他者転用

第2章の提案により、個人の特性を取得するデータを被験者の負担を極めて少なく獲得できるようになった。しかし、システム利用にあたり30秒間の連続動作を強いることは依然として改善の余地がある。本章では、更に少ない姿勢提示数を目指し、既存の他者データセットを転用して指示位置推定を実現する手法を提案する。

3.1 最小二乗法によるアフィン変換補正

指差し運動の時系列的な推定軌跡を観察すると、コーナー部での角度変化や直線運動時の直線性など、相対的な幾何関係は他者のモデルであっても一定程度保持されていることが示唆された。そこで、推定結果に対して2次元のアフィン変換を適用し、ごく僅かな姿勢教示を用いたキャリブレーションにより変換パラメータを獲得する手法を提案する。

ある既存データ（被験者A）で構築した推定器を用いて、未知の被験者Bの姿勢から得られたスクリーン上の推定座標を $\mathbf{x} = (x, y)^T$ 、本来期待される目標座標を $\mathbf{y} = (x', y')^T$ とすると、アフィン変換行列 \mathbf{A} と並進ベクトル \mathbf{b} を用いて以下の関係式が成り立つ。

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b} \quad (1)$$

被験者には、図4に示した格子点の外周となる包絡長

方形の4頂点のみを指差しさせる。この4頂点を選択した理由は、空間全体のスケール（拡大・縮小）と回転情報を網羅的に取得するためである。この4点から得られる推定座標 $\hat{\mathbf{x}}_i$ と、実際の頂点座標 \mathbf{y}_i ($i = 1, 2, 3, 4$) に対し、以下の誤差関数 E を定義する。

$$E = \sum_{i=1}^4 \|\mathbf{y}_i - (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{b})\|^2 \quad (2)$$

この誤差 E （4頂点のズレ量）が最小となるようなパラメータ \mathbf{A} および \mathbf{b} を、最小二乗法によって算出する。これにより、利用者は4点を指差しするという姿勢提示を行うだけでキャリブレーションが完了する。

3.2 実験結果

表2: 他者転用による指示位置評価（[cm]）

	モデル	検証データ	平均誤差	最大誤差	標準偏差
2	A_1	A_2	73.6	88.5	7.6
3	A_1	B	201.8	234.1	14.8
4	A_1	B +補正	12.0	41.5	6.8

提案手法を検証するため、事例3（被験者Aのモデルで被験者Bを推定）に対し、4頂点を用いたキャリブレーション補正を適用したものを事例4とした（表2）。

包絡長方形の4頂点を用いて空間全体のスケールと位置関係を補正した結果、事例3と比較して平均誤差が12.0cm、標準偏差が6.8cmへと著しく改善した。標準偏差が格子点間隔（横29cm、縦21cm）に対して十分に小さくなったため、隣接する指示点の分離・認識において実用的な精度を確保できた。

一方で、補正後も一部の指示位置において最大誤差41.5cmなどの残存誤差が見られる。これは、被験者ごとの「スクリーン両端に対する腕の角度差」や「関節の使い方の癖」といった姿勢表現の個人差が空間的に非線形な歪みを持っており、線形変換であるアフィン変換では完全に吸収しきれないためであると考えられる。とはいえ、少ない姿勢提示で汎用モデルを実用レベルに引き上げる本手法の有用性は十分に示された。

4 まとめと今後の課題

本研究では、平面領域における指差し位置推定に関して、データ収集時の利用者の負担を低減する手法を提案した。従来法に則ると180分かかると推定されるデータ取得を、連続移動する指示対象を追従させることで約30秒に短縮し、人間の遅延による外れ値を含んだ状態でも実用に足るモデルが構築できることを確認した。個人ごとの姿勢特性を獲得する手法として極めて有効である。

さらに、既存の他者モデルを転用するため、包絡長方形の4頂点を利用した最小二乗法によるアフィン変換補正を提案した。結果として、4点というごく僅かな姿勢提示情報にもかかわらず、個人差による非線形な残存誤差は一部残るものの、格子点推定においては十分なレベルまで補正できることが実証された。

今後の課題として、残存誤差の要因である空間の非線形な歪みを吸収するための補正モデルの高度化を検討する。また、実際のアプリケーション環境下において被験者が試行錯誤なく直感的に目標を指示できるかどうかの実用性検証を進める予定である。

参考文献

- [1] T. Ikeda, T. Imamura, S. Ueki, and H. Yamada, “Gesture Interface with Pointing Direction Classification by Deep Learning Based on RGB Image of Fovea Camera”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.37 No.2, pp. 466-477, 2025.
- [2] G.Canal, S.Escalera, C.Angulo, “A real-time Human-Robot Interaction system based on gestures for assistive scenarios”, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.149, pp.65-77, 2016.
- [3] 山本龍平, 河合千春, 矢野良和, “機械学習による指差しの指示位置推定検証と内挿表現評価,” 第33回ファジィシステムシンポジウム, 2017.

P3-01 MLB トラッキングデータに基づく投手の連続した配球パターンと被安打リスクの関係

The Relationship Between Consecutive Pitch Sequences and Hit Risk for Pitchers Based on MLB Tracking Data

渋谷明翔 坂上雅道 西野順二
玉川大学

1. はじめに

1. 1 目的

本研究の目的は、MLB 公式のトラッキングデータ (Statcast) を用いた時系列データ解析により、配球パターンが被安打リスクに与える影響を明らかにすることである。

山本由伸投手(ロサンゼルス・ドジャース所属)の2025シーズンの全投球データを対象とし、彼の主要な決め球である Split-Finger (スプリット) が投じられるまでの配球遷移と被安打リスクの関係を、量的およびグラフィカルに分析する。さらに、同種の落ちる球である Forkball (フォーク) を決め球とする千賀滉大投手(ニューヨーク・メッツ所属)との比較分析を行う。両投手の安全なシーケンスにおけるセットアップ投球の高さについて Welch の t 検定によりその違いについて議論を行う。

これらにより配球パターンと被安打リスクについて検討を行う。

1. 2 背景

2015 年頃からメジャーリーグ (MLB) に高性能なトラッキングシステム Statcast の導入以来様々なスポーツでのデータ分析が急速に進展している。野球ではボールを追跡するレーダー技術と選手の動きを捉える映像解析技術の統合により、投球の球速、回転数、回転軸、変化量、リリースポイントといった極めて詳細な物理データの取得が可能となった[1]。こうした変化はデータ革命[2][3]と呼ばれている。

これまでの野球データ分析(例えばセイバーメトリクス)における先行研究や評価指標の多くは、主として投じられたボール単体の物理的特性と打撃結果、得点との相関を分析することに主眼が置かれている[4]。いっぽうで、現場の経験則として「緩急」や「高低の使い分け」の重要性が語られることが多い[5]。

このため、単一の球質評価に加え、連続する配球(シーケンス)という「時間的な流れ」を考慮した多次元的なリスク評価モデルの構築が望まれる。トラッキングデータを用いた時系列解析の手法を適用することで、投球の文脈が持つ戦術的価値を定量的に明らかにする検討が必要である。

1. 3 配球パターン分析

本研究では、連続した配球パターン(投球シーケンス)すなわち球種の流れの前後関係および高さや速度の変化が、被安打リスクと強い関係があると仮定した。以下ではこのような配球パターンと被安打リスクとの関係について検討する。

データ分析を個々の球種単位で行ない、特定の球種が痛打された原因を、単に「回転数が落ちた」「コースが甘かった」という物理的な失投としてしまうことは、打者がなぜその球を狙い打てたのかの原因の説明には不十分である。

たとえば、打者がスイング判断を行う低めのボールゾーン (Zone 13, 14) への投球に対し、直前 (n-1) および 2 球前 (n-2) に投じられた球種・コース・球速がいかなる遷移パターンを辿ったかを追跡し、カーネル密度推定[6]を用いたヒートマップによりその時空間分布をグラフィカルに可視化する。ここから被安打リスクが高い危険なシーケンスと、リスクを回避できた安全なシーケンスとの間に存在する差異を検討し、その配球パターンが適切であったかどうかを理解するためのデータ検証を試みる。

2. 提案手法

2. 1 データと分析環境

本研究では、MLB 公式トラッキングシステム Statcast によって取得された 2025 年シーズンの投球データを使用する。分析対象投手として、ロサンゼルス・ドジャース所属の山本由伸投手を選定し、比較対象としてニューヨーク・メッツ所属の千賀滉大投手のデータも用いる。ここでデータ数はそれぞれ、

2025 年レギュラーシーズン

山本由伸選手：3/1 ~ 11/19, 36 試合, 3318 球。

千賀滉大選手：3/1 ~ 12/11, 22 試合, 1908 球

である。

打席結果が確定した投球 (n) を抽出した上で、その直前の投球 (n-1) および 2 球前の投球 (n-2) の球種、コース (Plate X, Z)、球速を紐付け、一連の投球シーケンスとしてデータセットを構築した。

2. 2 分析アプローチ

山本由伸投手の主要な決め球である Split-Finger(低めボールゾーン: Zone13,14)に着目し、以下の手順で解析を行った。(図 1)

この条件で抽出された投球に対し、結果が「被安打(単打・長打含む)」となったケースを「高リスク群」、「アウト(三振・凡打など)」となったケースを「低リスク群(安全群)」として分類し、比較分析を行った。

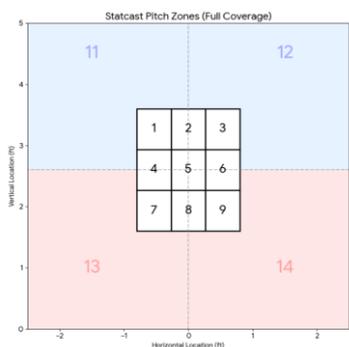


図1 ストライクゾーン、ボールゾーン番号

2. 3時空間分布の可視化

投球コースの傾向を視覚的に把握するため、カーネル密度推定を用いたヒートマップ作成を行う[7]。

従来の散布図による点位的な評価では、投球が密集している「ホットゾーン」の特定が困難であるため、ガウスカーネルを用いて確率密度関数を推定し、等高線として可視化することで、被安打リスクが高い(または低い)セットアップ投球の空間的特徴を抽出する

2. 4 リスク倍率の算出と統計的検証

抽出された投球パターンにおける被安打リスクを定量化するため、特定のセットアップ条件下での被安打率を算出し、全体の平均被安打率に対する比率を評価指標として定義する。

さらに、山本投手と千賀投手のセットアップ位置(高さ)の違いが、偶然の誤差ではなく戦略的な差異であることを証明するため、両者の安全なシーケンスにおける直前投球の高さ(Plate Z)の分布に対し、Welchのt検定を実施する。有意水準は5%($p < 0.05$)とし、両者の母平均に統計的な有意差が存在するかを検証する。

3. 投球パターンと被安打リスク

本章では、山本由伸投手の決め球であるスプリット(n)に対する、直前の投球(n-1)のコースが被安打リスクに与える影響を定量的に評価する。

3. 1 被安打リスクを高める配球パターン

スプリットが被安打となったケースにおける、直前の投球(n-1)の空間分布をKDEで可視化したヒートマップを図1に示す。

解析の結果、被安打リスクが顕著に高いパターンでは、直前のセットアップ投球がストライクゾーンの「真ん中から低め(Plate Z ≒ 2.3 ft 付近)」に集中していることが確認された。この「打者にとって打ちごろの甘い高さ」から次球にスプリットを投じた場合、被安打リスクは全体の平均と比較して約1.36倍に増大することが判明した。これは、直前の投球軌道が打者の目線に近い位置に留まることで、スプリット特有の鋭い変化に対する見極めが容易になってしまったためと考えられる。

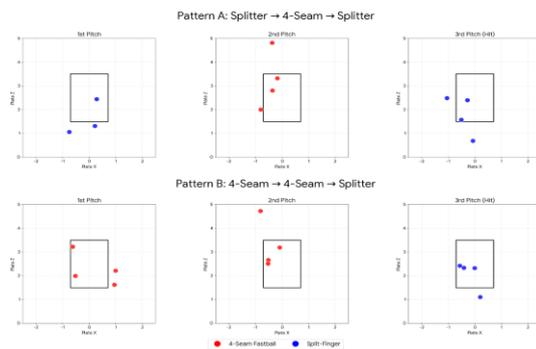


図2 被安打リスクの高いヒートマップ

3. 2 リスクを低減するパターンと高低差の効果

一方で、スプリットが凡打や空振り(安全な結果)に終わったパターンのヒートマップを図2に示す。図1とは対照的に、安全なパターンでは直前の投球がストライクゾーンの「高め(Plate Z > 2.8 ft)」に広く分布している傾向が確認された。

意図的に高めのコースをセットアップとして用いることで、次球である低めのスプリットとの間に大きな「高低差(空間的乖離)」が生まれる。この高低差が打者の目線を上下に大きく揺さぶり、スプリットの軌道を実際よりも鋭く錯覚させる効果を生んでいると考えられる。実際のデータ上においても、直前の投球が高めであった場合の被安打率は有意に低く推移しており、セットアップ投球における十分な高低差の確保が、スプリットの被安打リスクを回避する上で極めて重要なファクターであることが定量的に実証された。

高低差を確保した安全なシーケンスでは、単に被安打率が下がるだけでなく、打者のミートの正確性を著しく低下させる効果が確認された。実際に打球の質を評価したところ、直前が「低め(危険)」の場合、打球速度95マイル(約153km/h)以上の痛烈な打球の割合が全体の52.0%に達したのに対し、「高め(安全)」をセットアップとした場合は35.0%まで大幅に抑制されていた。同時に、平均打球速度も90.4 mphから88.9 mphへと低下している。

これは、高低差による視覚的な錯覚(目線の上下動)が打者の芯を外し、物理的にアウトになりやすい脆弱な打球を誘発していることを定量的に裏付けている[8]。

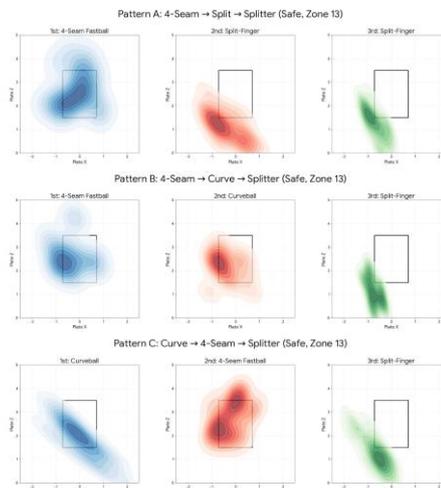


図3 最も打たれなかったパターン(山本由伸投手)

4. 緩急と他投手によるリスク低減効果

4. 1 速度差 (緩急) によるリスク低減効果

本研究では、空間的な高低差に加え、時間的な速度差 (緩急) が被安打リスクに与える影響を検証した。ここでは、打者のタイミングを多層的に揺さぶる典型的なパターンとして、直前および2球前の配球を含めた3球の連続シーケンス「ストレート (n-2) → カーブ (n-1) → スプリット (n)」に着目した。データ解析の結果、この配球パターンにおいては、まず平均 153.4 km/h のストレート (n-2) により打者の視線を速球に適合させた後、次球のカーブ (n-1) で平均 124.4 km/h へと一気に約 29.0 km/h の大幅な減速が行われている。この急激なブレーキにより、打者のスイング・テンポは一度完全にリセットされる。さらに、その直後に投げられる決め球のスプリット (n) は平均 146.7 km/h であり、カーブからは再び約 22.3 km/h の「再加速」が生じている。このように、極端な低速球 (カーブ) を中間に挟むことで、次に投げられるスプリットの体感速度を物理的な球速以上に高める「速度のコントラスト効果」が働いていると考えられる。打者は短時間の履歴効果に基づき、直前の緩慢なカーブの残像を基準として次球の到達時間を予測するため、この急加速を伴うスプリットに対しては、脳内の予測と実際の到達時間に大きな乖離が生じ、スイングの遅れを誘発する。実際に、この「大幅な減速からの再加速」を伴うシーケンスを抽出してリスク評価を行った結果、スプリットの被安打率は.111 (18 打数 2 安打) と、全スプリットの平均被安打率と比較しても極めて低い水準に抑え込まれていた。これは、打者が単にボールの軌道を予測するだけでなく、直前の球速に引きずられるという「時間的な履歴効果」を、投手が戦略的に利用してリスクの最小化に成功していることを実証している。

表 1 山本由伸のスプリットにおけるセットアップ条件別の被安打リスク比較

セットアップ条件	試行回数 (打数)	被安打数	被安打率	リスク倍率
真ん中～低め (Plate Z ≤ 2.8ft)	143	8	.056	1.36 倍
高め (Plate Z > 2.8ft)	97	4	.041	基準 (1.00)

4. 2 千賀滉大投手との比較分析

山本投手の「高低差」を利用したリスク管理戦略の特異性を浮き彫りにするため、本研究では同種の落ちる球 (Forkball/Slider) を主要な決め球とする千賀滉大投手 (ニューヨーク・メッツ) のデータを用いて比較分析を行った。

千賀投手が決め球で凡打や空振りを奪った「安全なシーケンス」における直前投球 (n-1) の空間分布を抽出した結果、図 5 に示す通り、山本投手とは対照的にストライクゾーンの「低め (Zone 13, 14 およびその周辺)」に高密度な集中が確認された。これは、千賀投手が「低めのストレートの軌道から、さらに低く落ちるフォーク」

という、ピッチトンネル (軌道の重ね合わせ) を重視した配球でリスクを抑制していることを示唆している。すなわち、千賀投手の戦略は、直前の投球と決め球の軌道を物理的に近接させることで打者の球種判別を困難にする「トンネル効果」に依拠していると言える。一方で、山本投手の戦略は、直前の投球をあえて高めに配置し、決め球との間に大きな空間的ギャップ (高低差) を生じさせるものである。この差異を考察する上で重要なのが、本分析において「高め」「低め」の境界として設定した Plate Z = 2.8 ft という閾値の解釈である。この数値は厳密な離散値ではなく、打者の体格や構え、さらには審判の判定傾向によって変動する連続的で曖昧な境界、いわゆる「ファジィ境界」としての性質を持つ。本研究で得られたヒートマップのグラデーションは、この「打ちごろの高さ」という主観的な概念から遠ざかるほど、被安打リスクが連続的かつ非線形に減少していくという、打者の認知における曖昧な知覚現象を定量的に表している。山本投手の場合、このファジィ境界を積極的に跨ぐ (高めから低めへ) 配球を行うことで、打者の視線を上下に大きく揺さぶり、知覚的な予測誤差を最大化させていると考えられる。このように、千賀投手が「軌道の類似性」を用いて打者の判断を遅らせるのに対し、山本投手は「軌道の乖離性」を用いて打者の感覚を狂わせるという、対照的なリスク管理モデルを構築していることが、データ解析および統計的検証 (図 6) の両面から明らかとなった。

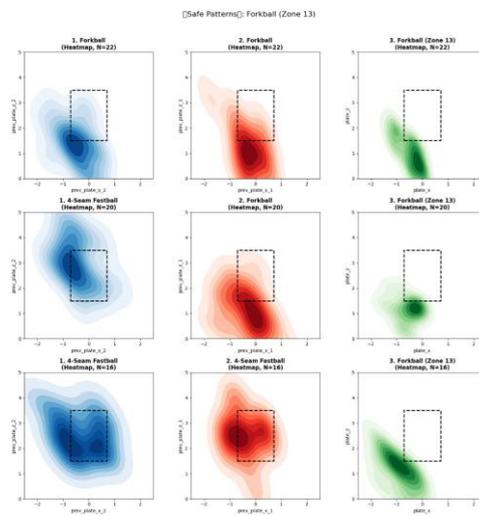


図 5 最も打たれなかったパターン (千賀滉大投手)

4. 3 セットアップ位置の統計的検証

両投手の戦略的差異を定量的に検証するため、安全なシーケンスにおけるセットアップ投球の高さ (Plate Z) について Welch の t 検定を実施した。

検定の結果、平均値は千賀投手が 1.92 ft (約 58.5 cm) であるのに対し、山本投手は 2.10 ft (約 64.0 cm) であり、有意水準 5%において統計的な有意差 (p = 0.017) が認められた。すなわち、山本投手は千賀投手よりも有意に高い位置からセットアップであることが明らかとなった。

5. 考察

本研究の分析結果から、連続した配球パターンにおける「空間的乖離（高低差）」と「時間的乖離（緩急）」が、単一の球種性能を超えたリスク管理において極めて重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

山本投手と千賀投手の比較から導き出されるのは、トップレベルの投手であっても、リスク管理の「最適解」は一様ではないという事実である。千賀投手のように、直前の球と軌道を徹底的に重ねることで打者の判断を遅らせるピッチトンネルの戦略が存在する一方で、山本投手のように、あえて直前の球を高く、あるいは遅く投じることで、次球との間に大きなギャップを生み出し、打者の予測誤差を誘発させる戦略も極めて有効である。

これらの結果は、特定の球種が打たれた原因を単なる「失投」として片付けるのではなく、直前の配球が打者の視線をどのように誘導しリスクを高めたかという文脈的な要因があることを示唆している。

6. おわりに

本研究では、MLB のトラッキングデータを用い、投手の連続した配球パターンが被安打リスクに与える影響を時系列データ解析によって定量的に評価した。その結果、山本由伸投手のスプリットに対する被安打リスクは、直前のセットアップ投球に高低差や緩急をつけることで有意に低減されることを示した。さらに、千賀滉大投手との比較により、物理的性能に依存しない配球構成力によるリスク管理戦略の多様性を統計的に明らかにした。

今後の展望として、本研究で行ったシーケンスの分析に、左右の打者の違い、ボールカウント、点差といった試合の状況的要因を追加することで、より最適な配球を算出する「次球種予測・推奨システム」の開発を目指す。

[参考文献]

- [1] MLB Advanced Media. "Statcast", MLB.com Glossary, 2024. (Available at: <https://www.mlb.com/glossary/statcast>, Accessed: 2025-12-22).
- [2] 総務省. 「東京2020大会のICTに関する取組」, 『令和2年版 情報通信白書』, 第1部第2章第2節, 2020. 閲覧日: 2026-01-13
- [3] 株式会社 DELTA. 「セイバーメトリクス」, 1.02 Essence of Baseball, 2024. (Available at: https://point02.jp/op/gnav/glossary/gls_explanation.aspx?eid=20011, Accessed: 2026-01-13).
- [4] Fagerstrom, A. "On Rotation, Part 2: The Effects of Spin on Pitch Outcomes", FanGraphs Community Research, 2016. (Available at: <https://blogs.fangraphs.com/on-rotation-part-2-the-effects-of-spin-on-pitch-outcomes/>, Accessed: 2025-12-17).
- [5] 野村克也. 『野村ノート』, 小学館, 2005.
- [6] Silverman, B. W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis, Chapman and Hall, 1986.
- [7] 平井有三, "パターン認識入門", 森北出版, 2012.
- [8] MLB Advanced Media. "Hard Hit Rate", MLB.com Glossary. (<https://www.mlb.com/glossary/statcast/hard-hit-rate>, 閲覧日: 2026-02-19)

連絡先

玉川大学 西野研究室 渋谷明翔

E-mail: tqb622338@stu.tamagawa.ac.jp

チェス接待 AI の悪手生成

小松原 舞¹ 高橋 里司¹ 西野 順二²

¹ 電気通信大学 ² 玉川大学

1 背景と目的

現在、Stockfish[1] のようなトッププレイヤーを凌駕する AI が開発されている。しかし、ゲーム AI は探索の時間や深さが人間とは異なるため、人間が対戦中に違和感や不快感を覚えることがある。本研究の目的は、人間と同じ判断基準を明示的に与えることで、納得感のある悪手を生成するモデルを構築し、検証することである。具体的には、オンラインチェスサイト lichess.org [2] より取得した中級者 (レート 1600-1699) の棋譜 378 試合を用いて、人間がどのような局面でどのようなミスをするかを分析し、その知見を指し手生成アルゴリズムに反映させることで指し手生成モデルの作成を行う。さらにチェスプレイヤーによる主観評価実験を行い、生成された悪手が人間にとってどの程度自然に認識されるかを検証する。これにより、指し手の選択理由が明快な人間らしい AI の実現を目指す。

2 ミスの種類と局面の特徴の分類

10 試合についてミスの原因を調査する。合法手の中で比較的悪い手を選択している局面や、評価値が大きく下がる局面、攻守が入れ替わる局面を抽出し、局面を目で見て確認することで、ミスの種類の項目と、ミスをしたときの局面の特徴の項目を手動で作成する。10 試合についてミスをしている局面を確認し、ミスの種類を 7 種、局面の特徴を 11 種に定める。中級者の棋譜 300 試合から抽出したミス局面を対象に、ミスの種類 (1~7) と局面の特徴 (a~k) のクロス集計を行う。集計結果に基づき、局面の特徴ごとに各ミスが発生する頻度を算出したものを表 1 に示す。

3 悪手の生成のための局面評価

t 手目終了後の盤面 s_t における合法手の集合を L_t 、各合法手 $m \in L_t$ に対してその手を指した後の評価値を $v_t(m)$ 、合法手の中での最大評価値および最小評価値をそれぞれ $v_t^{\max} = \max_{m \in L_t} v_t(m)$ 、 $v_t^{\min} = \min_{m \in L_t} v_t(m)$ とする。各合法手の正規化評価値を式 (1) で定義する。

$$\text{nEval}(s_t, m) = \frac{v_t(m) - v_t^{\min}}{v_t^{\max} - v_t^{\min}}. \quad (1)$$

各悪手 $m \in L_t^{\text{miss}}$ に対し、移動元、移動先、駒数等の情報からミスの種類 $i \in \{1, \dots, 7\}$ を判定する関数 $\text{MissType}_i(s_t, m) \in \{0, 1\}$ を適用する。また、局面 s_t が特徴 j を持つかを示す関数 $\text{Feature}_j(s_t) \in \{0, 1\}$ を用

いて、局面特徴とミスの共起頻度行列 $F_{j,i}$ を算出する。

$$F_{j,i} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{m \in L_t^{\text{miss}}} (\text{Feature}_j(s_t) \cdot \text{MissType}_i(s_t, m))}{\sum_{t=1}^T \text{Feature}_j(s_t)}.$$

任意の盤面 s が与えられた際、局面 s が持つ特徴の集合 $J = \{j \mid \text{Feature}_j(s) = 1\}$ に対し、頻度 $F_{j,i}$ が最大となるミスの種類を選出し、選出された中からランダムに一手を選択することで悪手を生成する。

4 生成した悪手に関する主観評価実験

構築した悪手生成モデルの有効性を検証するため、チェスプレイヤー 8 名を対象に主観評価実験を実施する。実験では、レート 1600 台の棋譜から実際の人間の指し手 (6 局面)、生成モデルの指し手 (6 局面)、ランダムに選択された指し手 (6 局面) の 3 種類の指し手 (計 18 局面) をランダムな順番で提示し、指し手について「人間が指したと仮定して違和感がないか」を評価基準として、「○ (違和感がない)」または「× (不自然、あるいはあからさまな手加減)」の二択で回答を求める。

各手法について、各局面における被験者 8 名の回答内訳を図 1、図 2、図 3 に示す。また各手法ごとの、「○ (人間らしい)」と判定された割合を表 2 に示す。

実験の結果、実際の人間の指し手が最も人間らしいと感じられ、次に生成モデルの指し手、最後にランダムな指し手という順位となった。ランダムな指し手については 1~2 手先で容易に予測可能な駒損を招くものが多く、プレイヤーにとって違和感に繋がったと考えられる。生成モデルの指し手はランダムに比べて「○」の回答が 3 倍多く、定義したミスの種類に基づいた生成が人間らしいミスの再現に寄与していることが確認された一方で、生成モデルの指し手に対する「○」の割合は、実際の人間の指し手と比較すると約 14% 低い。駒が衝突していない局面でミスを無理に適用したことや、人間の、注目する箇所には偏りがあるという特性をモデルが考慮できていないことが、違和感を生じさせた原因と考えられる。

本実験を通じて、人間らしさを決定づける要因は、悪手の内容だけでなく、その悪手が指されるタイミングや人間の注意が向いている場所であるか等の視覚的な要素にも依存することが示唆された。違和感のない悪手を生成するためには、局面の複雑さやその局面での心理的負荷を考慮し、局面毎に悪手の発生確率を制御するアルゴリズムが必要であると考えられる。

表 1: 局面の特徴毎の各ミスが起こる頻度

局面の特徴	ミスの種類と局面数	動かす駒が違う	移動先が違う	駒を取る手	逃げる手	攻める手	守る手	その他
(a) 不利な状態		0.02610	0.17945	0.13540	0.12724	0.16476	0.06688	0.30016
(b) 有利な状態		0.02381	0.22500	0.12262	0.13690	0.13810	0.05952	0.29405
(c) チェックされている		0.04800	0.46800	0.10400	0.16000	0.01600	0.04800	0.15600
(d) チェックする手		0.00000	0.17778	0.22222	0.04444	0.30000	0.11111	0.14444
(e) 大駒を取れる		0.03665	0.21466	0.18848	0.21990	0.07853	0.12042	0.14136
(f) 駒を狙われている局面		0.02361	0.20487	0.13938	0.14623	0.14395	0.07007	0.27190
(g) 大駒を狙われている局面		0.02027	0.26014	0.17230	0.13514	0.08784	0.11486	0.20946
(h) 駒を取られた直後の局面		0.04136	0.18248	0.18978	0.18248	0.11922	0.06083	0.22384
(i) 大駒を取られた直後の局面		0.05714	0.21429	0.22857	0.15714	0.04286	0.04286	0.25714
(j) 駒数の差が3以上		0.02174	0.26087	0.15217	0.19565	0.07609	0.06522	0.22826
(k) 駒数の差が1以下		0.02722	0.19238	0.12432	0.12704	0.17241	0.06171	0.29492

表 2: 指し手の生成手法ごとの○の回答数と割合

指し手の種類	○の数 (計 48)	割合 (%)
実際の人間の指し手	34	70.8%
生成モデルの指し手	27	56.2%
ランダムな指し手	9	18.8%

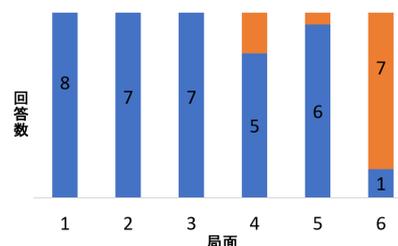


図 1: 実際の人間の指し手 (6局面) 青:○, 橙:×

5 結論

本研究では、チェス AI における人間らしい悪手の生成を目的とし、中級者の棋譜分析に基づく生成モデルの構築と評価を行った。主観評価実験では、生成モデルが生成した悪手が、ランダムな生成と比較して「人間らしさ」の評価を得ることを確認した。一方で、序盤戦や駒が衝突していない局面における生成において不自然さが残ることも確認した。

今後の展望として、ミスが起こるタイミングの制御が挙げられる。局面の心理的負荷や複雑度を数値化し、ミスの内容だけでなく発生確率を局面ごとに変化させることで、より高精度な人間らしさの再現が期待できる。

参考文献

[1] D. Yang. (2023, Jun.) stockfish16. [Online]. Available: <https://stockfishchess.org/> (Accessed on 2023-06-30)

[2] Lichess. (2023, Dec.) open database. [Online]. Available: <https://database.lichess.org/>

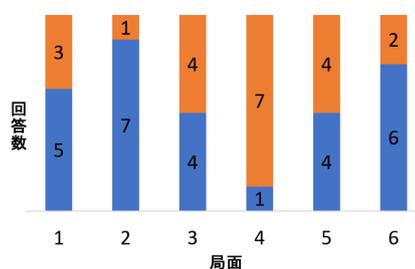


図 2: 生成モデルの指し手 (6局面) 青:○, 橙:×

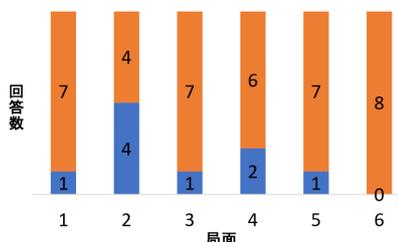


図 3: ランダムな指し手 (6局面) 青:○, 橙:×

ドライビングシミュレータ上での妨害運転が ドライバー心理に及ぼす影響

奥井 伶弥 加納 政芳
中京大学

1 はじめに

先行研究 [1] では、運転者があらかじめ怒りを誘発された状態で運転を行う際、運転走行中の音声介入によって怒りが低減し、交通事故や速度超過といった危険な運転行動が抑制されることが報告されている。しかし、運転中に誘発される怒りの緩和手法については十分に検討されていない。そこで本稿では、他車による妨害運転を再現したドライビングシミュレータ（以下、DS）を構築し、DS 下において運転者の怒り感情が誘発されるか検証する。

2 ドライビングシミュレータの概要

図 1 に設計したコースを示す。本コースは、市街地走行を想定したものであり、コース上で他車から次の妨害行為が行われる。

追従走行 運転者が操作する車両（以下、運転車両）と妨害車両との距離が一定値になるまで、前進および進行方向の修正を繰り返す。進行方向の修正には、両車両の差分ベクトルを用いて妨害車両が常に運転車両の方向を向くよう制御する。これにより、妨害車両が運転車両の後方を一定距離で追従し続ける走行状態を実現する。また、不規則な時間間隔および継続時間で警笛を吹鳴させる。

前方割り込み低速走行 まず、前方への運転車両の進行方向前方に複数の目標地点を設定する。妨害車両は、これらの目標地点に順次進行することで、運転車両の前方へ移動する。移動時は、目標地点と妨害車両の差分ベクトルを用いて車体の向きを制御する。最終的に、妨害車両が運転車両の前方位



図 1: 設計したコース



図 2: 実験環境

置に到達した時点で走行を停止し、突発的な割り込み状況を再現する。

次に、運転車両の前方で低速走行する。運転車両の進行方向前方に目標地点を設定し、その位置に向かって妨害車両を走行させる。妨害車両は、目標地点と自車両の差分ベクトルを用いて進行方向を制御しながら前進するが、走行速度は法令速度よりも低速に設定する。さらに、走行挙動に不規則性を持たせるため、不規則な時間間隔および継続時間で妨害車両を停止させる。

3 実験

約 10 分間の走行ルート内に、追従走行および、前方割り込み低速走行を各 2 分間実装し、運転者の怒り感情が誘発されるか検証する。

図 2 に実験環境を示す。実験参加者が没入感を感じ、実環境に近い運転状況で運転できるようにするために、3 面の液晶ディスプレイを採用した。操作デバイスには、Logicool 社製ステアリングコントローラ G29 Driving Force を使用した。

参加者は、普通自動車第一種運転免許を保有する大学生の 20 名（男性 20 名、平均 21.8 ± 1.13 歳）とした。先行研究 [2] において、男性は女性と比較して攻撃的運転傾向が一貫して高く、若年層は、頻繁な車線変更や追い越し、先行車に対する車間距離の短縮といった攻撃的運転行動を選択する割合が最も高い年齢層であることが報告されていることから、若年男性に限定した。

実験の流れは次のとおりである。まず、実験開始前に参加者に対し、直近 3 か月間の運転頻度および Big Five 尺度短縮版 [3] を用いて性格特性に関するアンケート調

表 1: STAXI

	F 値	p 値
群	6.668	0.018 *
運転前後	7.280	0.014 *
群 × 運転前後	6.281	0.022 *

表 2: PANAS(不快感情)

	F 値	p 値
群	4.577	0.046 *
運転前後	24.766	< 0.001 **
群 × 運転前後	4.366	0.051 †

査を実施した。運転頻度については、「ほとんどしていない」、「週1~2回」、「週3~4回」、「ほぼ毎日する」の4段階で回答を得た。これらの事前アンケート結果に基づき、群間で運転習慣や性格特性に有意な偏りが生じないよう配慮し、走行中に他車による妨害が行われる「妨害あり群」と、妨害が行われない「妨害なし群」の各群に10名ずつ割り付けた。

群への割り付け後、安静状態での脈拍数を測定した。続いて、事前の心理状態を把握するためのアンケート調査を行った。アンケートには、日本語版 STAXI (状態怒り尺度) [4]、および日本語版 PANAS (不快感情尺度及び快感情尺度) [5] を用いた。その後、DS の操作習熟を目的として練習走行を実施した。練習走行後、5分間の休憩の後、本番走行を行った。本番走行中は、脈拍数の計測を行い、走行中の生理的变化を記録した。本番走行終了直後、再度 STAXI および PANAS への回答を求めた。

3.1 結果・考察

3.1.1 STAXI

表1に STAXI について群 (妨害あり・なし) と運転前後 (運転前・運転後) を要因とする 2 要因分散分析 (ART 法) を行った結果を示す。その結果、群の主効果、運転前後の主効果、および群と運転前後の交互作用のすべてにおいて有意差が認められた。交互作用が有意であったため、単純主効果の検定を行った。図3にその結果を示す。

運転前後要因の単純主効果について、両群ともに運転前に比較して運転後に値が上昇する傾向が認められた (妨害あり群 $p = 0.087$, 妨害なし群 $p = 0.060$)。両群ともに運転に伴い怒りが上昇する傾向が確認されたことから、運転という行為自体が一定の苛立ちや怒り感情を誘発する可能性が示唆される。その一方で、交互作用も認められていることから、その上昇の程度は群によ

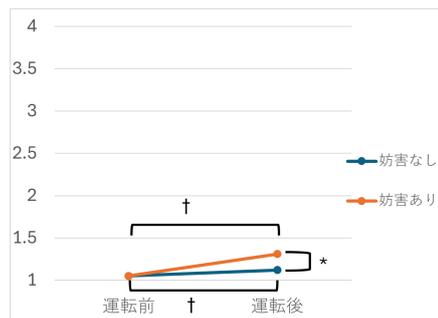


図 3: STAXI (状態怒り尺度) の変化

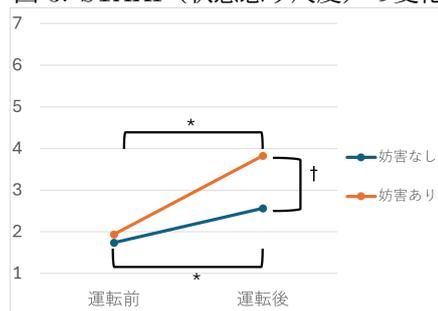


図 4: PANAS(不快感情) の変化

て異なることが分かる。

群要因の単純主効果について、安静時には有意な差は認められなかったものの、運転後において有意差が認められ、妨害あり群の方が有意に高い怒りの値を示した ($p = 0.037$)。このように、妨害あり群の運転後において有意に高い怒りの値ことを示したことは、他車からの妨害行為 (妨害刺激) が、ドライバーの怒り感情を顕著に増大させたことを示唆している。すなわち、単なる運転作業によるストレス以上に、妨害刺激がドライバーの攻撃的感情を誘発する直接的な要因となる可能性がある。

3.1.2 PANAS (不快感情)

表2に PANAS の不快感情について 2 要因分散分析 (ART 法) を行った結果を示す。その結果、群の主効果および運転前後の主効果において有意差が認められ、群と運転前後の交互作用には、有意傾向が認められた。交互作用に有意傾向が見られたため、単純主効果の検定を行った。図4にその結果を示す。

運転前後要因の単純主効果について、いずれの群においても、安静時と比較して運転後の不快感情が有意に上昇していた (妨害あり群 $p = 0.001$, 妨害なし群 $p = 0.005$)。両群において運転後に不快感情が有意に上昇したことは、妨害の有無にかかわらず、運転操作そのものが心理的な負荷の一因になることを示している。また、群

表 3: PANAS(快感情)

	F 値	p 値
群	1.390	0.253
運転前後	0.084	0.775
群 × 運転前後	4.160	0.056 †

表 4: 平均脈拍数

	F 値	p 値
群	0.009	0.927
測定場面	2.698	0.117
群 × 測定場面	1.682	0.211

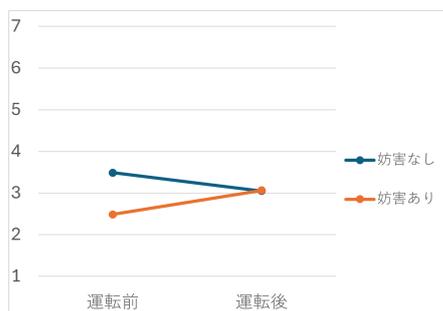


図 5: PANAS(快感情) の変化

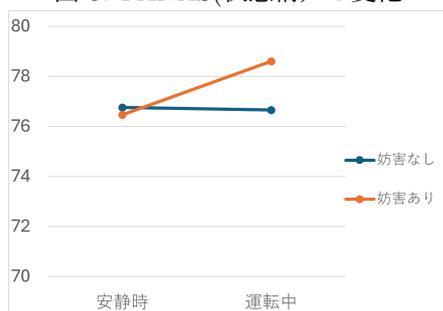


図 6: 脈拍数の変化

要因の単純主効果について、妨害あり群は運転後に有意に不快感情の値が高まる傾向が見られた ($p = 0.094$)。このように運転後の群間差における有意な傾向に加えて交互作用も認められていることから、本実験における運転自体によるストレスに加え、妨害刺激が不快感をさらに増幅させることを示唆している。

3.1.3 PANAS (快感情)

表 3 に PANAS の快感情について 2 要因分散分析 (ART 法) を行った結果を示す。その結果、群および運転前後の主効果はいずれも有意ではなかった一方、交互作用には有意傾向が認められた。交互作用に有意傾向が認められたため、単純主効果の検定を行った。図 5 にその結果を示す。図 5 に示すように、交互作用に有意

傾向がみられたものの、単純主効果には明確な差は認められなかった。したがって、運転操作および妨害刺激は、快感情に対しては決定的な影響を及ぼさなかったと考えられる。

3.1.4 平均脈拍数

表 4 に平均脈拍数について群 (妨害あり・なし) と測定場面 (安静時・運転中) を要因とする 2 要因分散分析 (ART 法) を行った結果を示す。その結果、群および測定場面の主効果、ならびに両者の交互作用、単純主効果のいずれにおいても、有意差は認められなかった (図 6)。このことは、本実験における運転および妨害刺激は、生理的な覚醒水準 (脈拍数の上昇) を生じさせるほどの身体的負荷を与えなかった可能性がある。

3.1.5 まとめ

本実験によって、運転操作そのものが怒りおよび不快感情を高めうる一方で、妨害刺激はその増加を主として「怒り」の側面で強める可能性が示された。また、快感情では主効果が認められず、平均脈拍数にも有意差が認められなかったことから、本実験条件における影響は、快感情の低下や、生理的な覚醒として表れるのではなく、主に否定的情動のうち怒り・不快といった主観的側面が表出された可能性がある。以上より、妨害刺激は運転に伴う一般的負荷全般を高めるというよりも、情動反応の質を「怒り」に偏らせる要因として作用することが示唆される。

4 おわりに

本研究では、他車による妨害行為を通じてドライバーの怒りを誘発するドライビングシミュレータ (DS) 環境を構築し、その有効性を検証した。

本研究は、科学研究費補助金 23K11291 の支援を受けた。

参考文献

- [1] M. Jeon et al.: The effects of social interactions with in-vehicle agents on a driver's anger level, driving performance, situation awareness, and perceived workload, *Applied Ergonomics*, 50(1), 185–199, 2015.
- [2] 藤田 他: 安全運転態度の枠組みからみた攻撃的運転行動、運転中の心理的負担感及び運転中のイライラ感、*応用心理学研究*, 24(1), 29–39, 1998.
- [3] 並川 他: Big Five 尺度短縮版の開発と信頼性と妥当性の検討、*心理学研究*, 83(2), 91–99, 2012.
- [4] 鈴木 他: 怒りと循環器系疾患の関連性の検討、*健康心理学研究*, 7(1), 1–13, 1994.
- [5] 佐藤 他: 日本語版 PANAS の作成、*性格心理学研究*, 9(2), 138–139, 2001.

数字当てゲームにおけるロボットとサーバー間の通信性能に関する 基礎的検討

姫野 祐輝¹ ジメネス フェリックス¹ 牧 翔吾²

Yuki Himeno¹ Jimenez Felix¹ Shogo Maki²

¹ 愛知県立大学

² 愛知県立大学大学院

¹Aichi Prefectural University ²Graduate School of Aichi Prefectural University

1 はじめに

近年、少子高齢化による労働力不足を背景に、サービス業や介護現場におけるコミュニケーションロボットの導入需要が増加傾向にある。矢野経済研究所の調査によると、業務用サービスロボットの市場規模は拡大を続けており、2025年度以降にも大きく伸長すると予測されている [1]。これらのロボットには、画像認識や音声対話、高度な推論といった AI 技術が求められるが、その計算量は年々増大している。

しかしながら、ロボット単体の処理能力には限界がある。筐体サイズやバッテリー消費、排熱の問題から、高性能な GPU や大型のプロセッサを搭載することは容易ではない。そのため、高度なアルゴリズムの実装は、応答遅延の発生や動作可能時間の短縮といった問題が発生し、円滑なロボットの動作を阻害する可能性がある。

前述した課題を解決する手段として、ロボットと外部の計算資源をネットワークで接続し、処理を分担するアプローチが有効であると考えられる。計算コストが大きい処理を高性能な外部サーバーへ委託することで、ロボット側の負荷を軽減しつつ、高度な知能処理を実現することが可能となる。実際に教育分野においてはネットワークを用いてデータベースサーバー、アプリケーションサーバーを使ったモデルが検討されている [2]。

本稿では、人間とロボットの対話的なゲーム応用の一例として「数字当てゲーム (Numer0n 等の論理パズル)」を取り上げる。このゲームにおいて、ロボットは相手の数字を予測するための論理演算を処理する必要がある。この処理をサーバー側で行うシステムを構築し、通信方法による処理時間の計測実験を実施する。

2 数字あてゲームの概要

本稿で題材とする「数字当てゲーム」は、一般に「Numer0n (ヌメロン)」として知られる対戦型の論理パズルである。本ゲームは、対戦者双方が設定した番号を互いに推測し、正解を目指す。番号は 0~9 までの数字の中から重複のない 3 桁 (あるいは 4 桁) を設定する。プレイヤーが相手の番号を予想してコール (宣言) すると、相手はそれに対して「EAT」および「BITE」とい

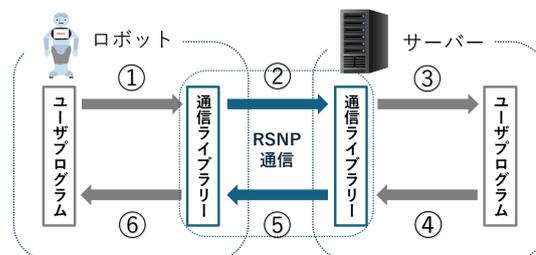


図 1: 本稿でロボットに搭載した通信システムの仕様

う 2 つの指標を用いて回答を行う。「EAT」は数字と位置の両方が完全に一致している数を示し、「BITE」は数字自体は含まれているものの位置が異なっている数を示す。例えば、相手の正解が「307」であるとき、プレイヤーが「374」とコールした場合、数字と位置が一致する「3」が 1EAT、数字のみが一致する「7」が 1BITE となり、判定結果は「1 EAT - 1 BITE」と示される。このゲームの目的は、限られたコール回数の中でこれらの判定結果を蓄積し、論理的な推論によって相手の番号を完全に特定 (3 EAT) することにある。

3 ネットワーク構成

3.1 本アプリケーションの通信方法

本アプリケーションは Robot Service Network Protocol (RSNP) を用いた通信を扱う (図 1)。RSNP とは Robot Service initiative が開発したロボット専用のプロトコルである [3]。ロボットやサーバーなど、ネットワークを構成する端末間のプロトコルとして RSNP を利用することで、同一の規格で通信が可能となる。[4]。本アプリケーションではロボット側のユーザプログラム (ここではロボット側で操作する GUI) からの要求時に、ロボット側の通信ライブラリを使用しサーバーに情報を送信する。サーバー側でも同様に通信ライブラリを使用して情報を受信し、内容に応じてユーザプログラム (ここでは Numer0n ゲームにおける数値処理のプログラム) を使用し、処理を拡張する。最終的に、処理の結果をユーザプログラムから、サーバー側通信ライブラリ、ロボット側通信ライブラリ、ロボット側ユーザプログラムへと順に通信することで処理を実現する (図 1)。

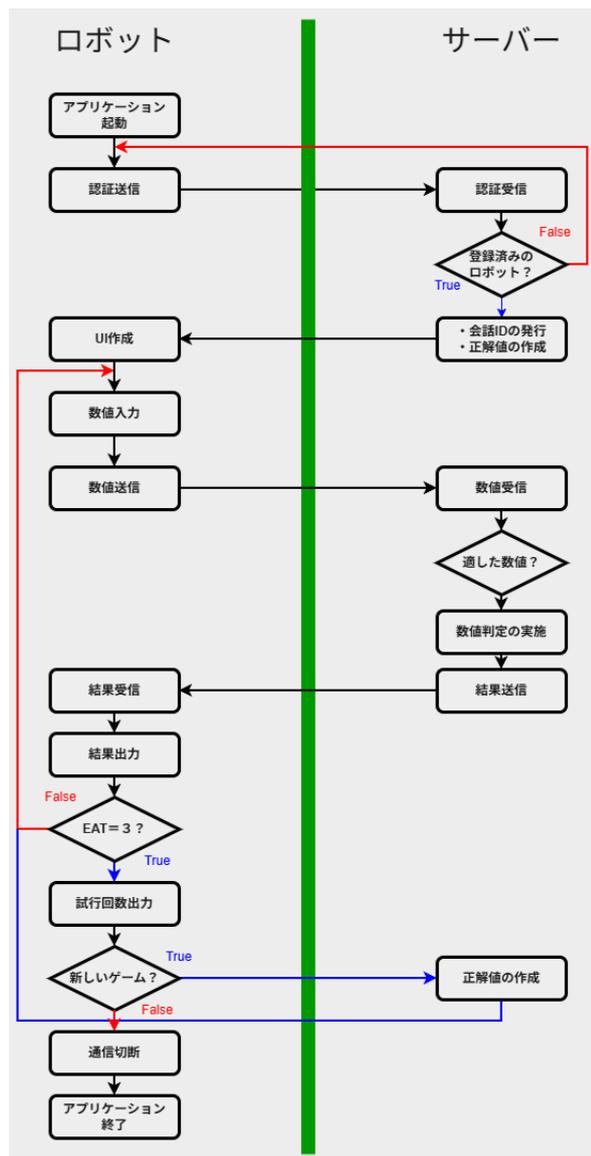


図 2: 本アプリケーションのアルゴリズム

3.2 本アプリケーションの概要

本アプリケーション（図 2）は「通信の開始」「数値入力および判定」、「結果の出力」と大きく 3 つに分かれている。

3.2.1 通信の開始

アプリケーションの起動後、通信に必要な情報を送受信する。サーバー側には事前にロボット ID とパスワードがセットになって登録されている。ロボット側でアプリケーション開始時に自分の ID とパスワードをサーバー側に送信することで認証を行う。認証が成功すると、サーバーでは一連のサービス終了時まで有効な会話 ID を発行しロボットに返却する。以降の通信では会話



図 3: 「数値入力および判定」の UI



図 4: 「結果の表示」の UI

ID を利用してロボットを判別する。

3.2.2 数値入力および判定

ユーザは図 3 に示す画面上部のテキストボックスに 3 桁の数字を入力する。数字の入力にはキーボードを利用し、入力後に「判定」ボタンを押下することでサーバーに送信する。サーバー側では数値の受信時に、「適切な 3 桁の数値を入力されているか？」の判定を行ったのち EAT, BITE の判定を行う。

3.2.3 結果の表示

入力値の判定を画面に表示する（図 4）。入力値が 3 桁の数字であれば EAT, BITE が表示され、3 桁の数字以外の場合は適切でない理由が別タブに出力される。例えば、3 桁の数字“312”が入力された場合、システムは 1EAT, 1BITE のように表示する。一方で、“hi”のように入力した場合は「数字以外が入力されています」と表示する。EAT, BITE については各入力回における入力値、EAT, BITE が履歴として一覧表示されており、その結果をもとに正解値を推論していく。EAT≠3 の場合、再度数値入力を求める。EAT = 3 となった場合は、別タブにて正解までの入力回数が画面に表示され、もう一度ゲームをするかを選ぶことができる。新しくゲームを行う場合はロボット側から新しい正解値の作成を

表 1: ロボットの仕様

OS	Windows 11 Home
CPU	AMD Ryzen 7 5825U (2.00 GHz)
RAM	16 GB
NIC	無線 (NDIS 6.30)

表 2: サーバーの仕様

OS	Windows Server 2025 Standard
CPU	Intel(R) Xeon(R) E-2314 CPU @ 2.80GHz
RAM	16 GB
NIC	有線 (Intel(R) I210 Gigabit)

サーバーに要求し、EAT, BITE の記録を画面から消去して、新たに数値を入力できる。

4 評価実験

4.1 目的

サーバー処理を含めた対話型システムにおいては、ユーザがサーバー処理の遅延に対して不快感や違和感を覚えないことが重要である。そこで本実験では、ロボット単体の処理とロボットとサーバーを組み合わせたシステムにおける処理時間の差の検証を目的とする。

4.2 環境

本実験で使用するロボット、サーバーのスペックを表 1, 2 に示す。サーバー処理を含めるシステムにおいては、物理的な通信路への依存を削減するため、同一の LAN 内に構築した。また、対話型システムには 3.2 節に示すアプリケーションを使用した。

4.3 方法

本実験では、アプリケーションの処理時間における比較実験を行った。比較のため、ロボット単体でのアプリケーション、同一 LAN 内にあるロボット&サーバーを用いるアプリケーションの 2 つの条件を用いた。また、計測区間は数値入力の判定開始から結果の表示までの処理時間である。計測のため、java の System.nanoTime() を計測区間の前後で使用し、その差分を処理時間とした。これにより、ロボット単体における判定処理と、サーバーを活用した通信処理に着目することが可能となる。また、計測回数は各条件において各 51 回とした。

4.4 結果

各条件における処理時間のヒストグラムと平均値、標準偏差を図 5, 6 および表 5 に示す。ロボット単体では処理時間は 0.1ms から 0.3ms までに集中している、一

表 3: ロボット単体の処理時間 (単位: ms)

2.344	0.2923	0.1826	0.1539	0.1449	0.1425
0.1871	0.1060	0.04793	0.1603	0.1286	0.1771
0.1652	0.1333	0.1731	0.2541	0.1305	0.1400
0.2966	0.3344	0.1521	0.1434	0.1364	0.1173
0.2875	0.1709	0.1685	0.2248	0.1430	0.1309
0.3230	0.1304	0.1012	0.1430	0.1304	0.3691
0.2501	0.1329	0.2869	0.1335	0.3085	0.1508
0.3941	0.5404	0.1528	0.2699	0.2631	0.1857
0.09675	0.1487	0.1724			

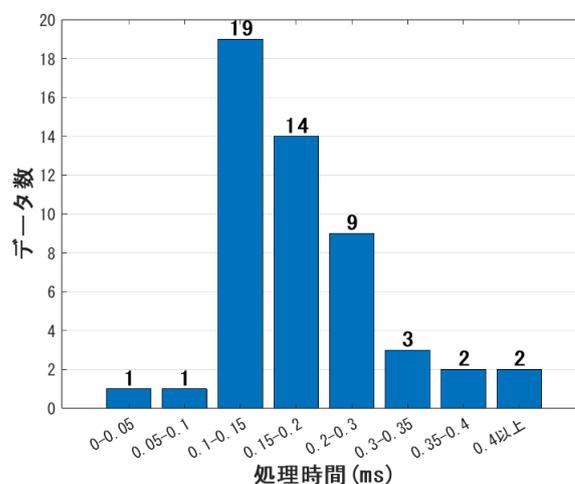


図 5: ロボット単体での処理時間のヒストグラム

回目の計測値以外は大きく外れた値はなかった。ロボット&サーバーでは 20ms から 50ms に集中している、おおく外れた値が散見された。

5 おわりに

本稿では数字当てゲームにおけるロボットとサーバー間の通信性能に関する基礎的検討としてヌメロンを活用した対話型システムを実装した。評価実験では、ロボット単体のシステムと、ロボットとサーバー処理で構成されたシステムによる比較実験を実施した。実験結果より、ロボットとサーバー処理で構成されたシステムで発生する処理時間は、マルチプレイヤーゲームで不快感が出るとされている遅延である 500ms よりも少なく [5]、使用した通信方法は本アプリケーションで使用するには有効であると考えられる。今後の課題としては (1) データベースの導入 (2) 更に計算コストが大きい処理を行う際の問題点の考察が挙げられる。(1) においては、対局データの蓄積および分析を可能にするデータ

表 4: ロボット&サーバーの処理時間 (単位: ms)

48.34	48.76	40.86	48.47	44.99	49.86
50.60	29.89	39.98	20.42	22.68	44.31
85.46	49.71	47.26	146.0	45.84	40.97
161.0	18.83	47.99	19.86	38.83	38.29
49.39	43.90	20.80	40.29	155.6	26.17
51.40	38.80	26.54	26.43	182.4	21.00
26.32	18.57	16.06	31.91	37.44	90.53
23.03	51.63	21.40	31.53	36.00	13.59
27.28	24.43	26.85			

表 5: 処理時間の平均値及び標準偏差

項目	時間 (ms)
ロボット単体	0.2367 ± 0.3145
ロボット&サーバー	46.83 ± 37.17

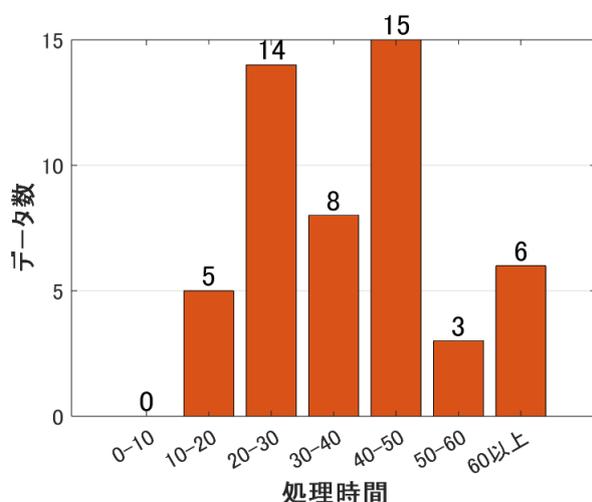


図 6: ロボット&サーバーの処理時間のヒストグラム

ベースの導入が必要であると考え、過去の対戦履歴や推論のプロセスを保存・学習することで、個々のユーザーに最適化した CPU、目標設定の導入や、ゲーム体験の向上が期待できる。(2)においては、(1)で触れた内容+大規模言語モデル (LLM) を用いた高度な推話など、さらに計算負荷の高い処理をサーバー側で行う際、ネットワークの帯域制限や通信遅延がロボットのリアルタイム性に及ぼす影響を詳細に考察する必要がある。

参考文献

[1] 株式会社矢野経済研究所:“サービスロボット世界市場に関する調査を実施 (2025 年),” https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3907 , 2025.[accessed Feb.10, 2026]

[2] Shogo Maki, Felix Jimenez, Hiroki Kaede, and Koki Sato:“Investigation of a Network Model for Educational-Support Robots Using RSNP”, 2025.

[3] 成田 雅彦, 村川 賀彦, 植木 美和, 中本 啓之, 日浦 亮太, 平野 線治, 蔵田 英之, 加藤 由花, “普及期のロボットサービス基盤を目指す RSNP (Robot Service Network Protocol) 2.0 の開発,” 日本ロボット学会誌, vol.27, no.8 pp.857-867, 2009.

[4] ロボットサービスイニシアチブ:“Robot Service Network Protocol 2.3 仕様” ,2010.[accessed Feb.10, 2026]

[5] Lothar Pantel, Lars C. Wolf:“On the Impact of Delay on Real-Time Multiplayer Games”, 2002.

Webサイトの月間収益を自動確認するアプリケーションの開発

塚本幹久¹ ジメネスフェリックス¹

¹ 愛知県立大学情報科学部

1 はじめに

近年、インターネット技術およびクラウドサービスの発展により、EC(Electronic Commerce)サイトは企業活動における重要な業務基盤として定着している [1]. 本研究におけるECサイトとは、インターネットを介して商品やサービスの売買を行う電子商取引を実施するWebサイトである [2]. 特にBtoB領域においてはECサイトを活用した受発注業務が広く普及しており、日本の電子取引市場規模は年々拡大している [2]. このような動向を背景に、企業規模を問わず、業務プロセスの効率化およびデータ活用の高度化が強く求められている. 中小企業においては、人手不足や業務の属人化といった課題への対応として、ITを活用した業務効率化が注目されている. 中小企業庁が公表している中小企業白書では、多くの中小企業がIT導入の必要性を認識している一方で、業務システムとの連携やデータ活用が十分に進んでいない実態が報告されている [3]. さらに、情報処理推進機構 (IPA) が実施した調査においても、中小企業では業務プロセスのデジタル化やシステム連携が進んでおらず、手作業によるデータ入力や帳票管理が依然として多く残っていると報告がある. [4].

Yahoo!ショッピング [5] などの外部のECサイトから送付される売上データと、社内で利用している基幹システム内の伝票データとの整合性確認は、企業にとって重要な業務である. 従来の整合性確認は、一部のECサイトを除き、担当者がECサイトから受け取った売上データを目視で確認し、基幹システム内の伝票データと照合することで実施されていた. しかしながら、手作業による方法は、人的ミスの発生に加え、作業時間の増大を招くという課題がある.

そこで本研究では、ECサイトの売上データと基幹システムの伝票データを自動で照合するアプリケーションを設計・開発する.

2 提案手法

本研究では、SQLサーバーを用いてECサイトの売上データと基幹システム内の伝票データを自動で照合するアプリケーションを提案する. 本システムはCSVファイルの読込部、データベース検索部、照合処理部、および結果入力部で構成される.

提案手法のシステム構成を図1に示す. まず、ECサイトから送付された売上データ (CSV) をアプリケーション内に読み込み、取引IDや決済金額などの必要な情報を抽出する. 次に社内SQLサーバーを用いて基幹システム内の伝票データを取引IDで検索し、該当する伝票を取得する. その後、売上データと取得した伝票をプログラム上で比較をし、金額の一致不一致を自動で判定す

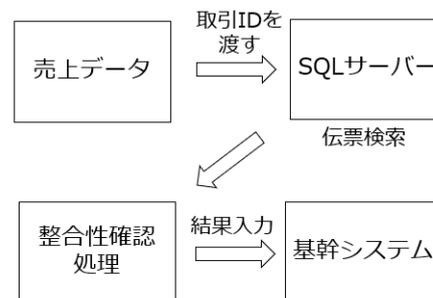


図1: 提案手法のシステム構成

る. 判定結果はそれぞれのデータごとにアプリケーションのGUIに出力される. すべての売上データに対して照合の処理が終わった後、結果を基幹システム内に入力する.

3 検証方法

本研究では、提案手法を搭載したアプリケーションの有効性を検証するため、従来の手作業と提案手法の作業時間を比較した. 具体的には、提携する企業の担当者1名を対象に従来の方法で整合性確認をした場合 (使用無群) と、アプリケーションを使用して整合性を確認をした場合 (使用有群) を比較する被験者内実験を実施した.

使用無群では担当者がCSVファイルをもとに対象伝票を一件ずつ確認し、目視による整合性確認を実施した. 一方、使用有群では担当者の手作業のうち各工程の簡単な作業以外をアプリケーションで自動化し、担当者はGUI上でボタンを押すことで全ての作業を実施した. 合計30個のデータセットのうち、同一の15データセットを両群で共通に使用し、使用無群および使用有群それぞれにおいて15回ずつ実験した. 評価指標には、各群15回分の平均作業時間を用いる.

4 検証結果

図2には、各群における1回目から15回目のそれぞれの作業時間、図3には各群の1回目から15回目の平均作業時間を示す. 図2, 3より、使用無群に比べて、使用有群では作業時間が大幅に短縮していることがわかる. また等分散性が認められなかったため、各群の平均値に対してWelchのt検定を実施したところ、有意差が認められた ($p = 0.000^*$). そのため、使用無群に比べて、使用有群は作業時間が有意に短いことが示された.

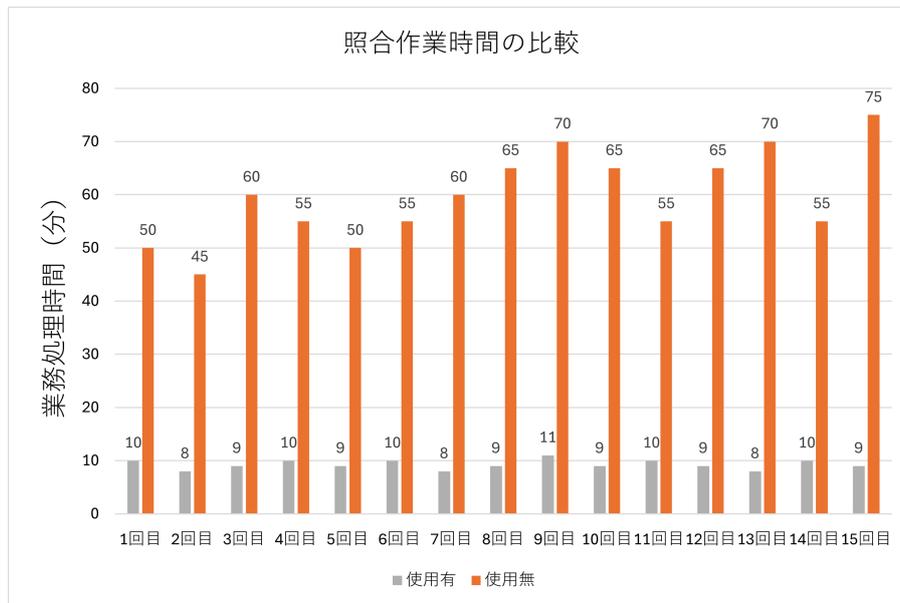


図 2: 従来手法と提案手法における作業時間の比較

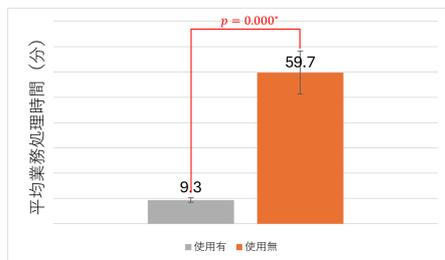


図 3: 従来手法と提案手法における作業時間の検定結果

5 おわりに

本研究では、EC サイトから送付される売上データと社内サーバーを自動で照合作業を行うアプリケーションを開発した。実験結果から、提案したアプリケーションによる照合作業は、従来の手作業による照合作業に比べて作業時間を大幅に削減できることが示唆された。

今後は、本研究で設計した検索、照合のフローの汎用化を進め、複数の EC サイトに対応可能なシステムへの拡張をしさらなる業務効率化を目指す。また、他の業務を自動化するようなアプリケーションも開発、改良し、業務全体の自動化を目指していきたいと考えている。

6 謝辞

本研究は、有限会社セントピアとの共同研究による支援を受けている。システムおよびアプリケーションの管理、監修は有限会社セントピアにて実施されている。

参考文献

[1] Turban, E., Outland, J., King, D., Lee, J. K., Liang, T. P., & Turban, D. C., *Electronic Commerce: A Managerial Perspective*, Springer, 2018, pp. 1-551.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-10091-3>

[2] 経済産業省, 「令和 6 年度 電子商取引に関する市場調査 報告書」, 2023, pp. 1-151.

<https://www.meti.go.jp/press/2025/08/20250826005/20250826005-a.pdf>

[3] 中小企業庁, 『2023 年版「中小企業白書」全文』, 2023, pp. 1-536.

<https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2023/PDF/chusho.html>

[4] 情報処理推進機構 (IPA), 「日本の中小企業の DX 推進についての考察」, 2023, pp. 1-20.

<https://www.ipa.go.jp/digital/chousa/discussion-paper/dxwp2023-sme.html>

[5] Yahoo!ショッピング, 「Yahoo!ショッピング」.

<https://shopping.yahoo.co.jp/>
(最終閲覧日: 2026 年 2 月 19 日)

連絡先

塚本 幹久
E-mail: is231059@cis.aichi-pu.ac.jp

注文情報の表示・転写を行うアプリケーションの改良検討

加藤 勇護¹, 牧 翔吾¹, 岡本 貫志², ジメネス フェリックス²

¹ 愛知県立大学大学院 ² 愛知県立大学

1 はじめに

近年, インターネット技術およびクラウドサービスの発展により, EC(Electronic Commerce) サイトは企業活動における重要な業務基盤として定着している. 電子商取引は当初, 主に BtoC 取引を対象として発展してきたが, 現在では BtoB 取引においても EC サイトを活用した受発注業務が広く行われている [1]. 経済産業省が実施した電子商取引に関する市場調査によれば, 日本国内における BtoB-EC 市場規模は年々拡大しており, 企業間取引におけるデジタル化の重要性が指摘されている [2]. このような動向は, 企業規模を問わず, 業務プロセスの効率化およびデータ活用の高度化が求められている. 特に中小企業においては, 人手不足や業務の属人化といった課題への対応として, IT を活用した業務効率化が重要な経営課題となっている. 中小企業庁が公表している中小企業白書では, 多くの中小企業が IT 導入の必要性を認識している一方で, 業務システムの連携やデータ活用が十分に進んでいない実態が報告されている [3]. さらに, 情報処理推進機構 (IPA) が実施した調査においても, 中小企業では業務プロセスのデジタル化やシステム連携が進んでおらず, 手作業によるデータ入力や帳票管理が依然として多く残っている [4].

また企業情報システムの観点からは, EC サイトと基幹業務システムを統合することにより, 業務効率の向上や経営判断の迅速化が期待される. Laudon らは, EC システムと基幹業務システムの統合が, 企業全体の情報活用能力を高めると述べている [5]. 先行研究においても, ERP(Enterprise Resource Planning) や EDI(Electronic Data Interchange) を中心に大規模企業を対象とした統合事例が報告されている [1]. しかし, 中小規模事業者における実運用を前提とした軽量の連携アプリケーションに関する研究は限定的である.

そこで本研究では, これらの課題を踏まえ, EC サイトと SQL Server を用いた業務データベース間で, 注文データおよび見積書・納品書データを双方向に送受信する複数アプリケーションの設計および実装を行う. ERP や EDI といった大規模統合システムを前提とせず, 中小規模事業者における実運用を想定した点に本研究の新規性がある. 本稿ではその中で, 収集された注文情報を表示・転写するアプリケーションについて検討する.

2 アプリケーションの概要

本アプリケーションは, 業務担当者が各々の端末で使用することを想定している. いずれかの EC サイトにて注文が入った場合, その情報は別アプリによって社内データベースに保存される. 本アプリはそのデータベースを参照して, 情報の表示や検索・処理を行う. また販売管理ソフトとの連携も行い, ソフトへの転写を自動で行う.

注文データ取得画面において, 画面左側に購入日や注文番号などといった情報をリスト表示している. このとき, 未取り込みか取り込み済みかといった条件によって背景色が変わる. この中から注文を選択しその行をクリックすることで, 画面右側に住所や金額・在庫状況といった詳細情報を表示する. 選択行をダブルクリックすると, 処理を行うために別の画面へ遷移する.

見積伝票作成画面において, 選択されている注文情報について販売管理ソフトを模した画面にプレビューを表示し, 問題がなければ転写が実行される.

3 使用実験

業務担当者に協力してもらい, 本アプリケーションの使用実験を実施した. 一つのサイトについて, 注文を一つ受けてから見積書伝票を作成するまでの時間を計測した. その結果を表 1 に示す.

表 1: 計測結果

ユーザ 1	使用有り(分)	使用無し(分)
1 回目	6	15
2 回目	9	20
3 回目	10	15
4 回目	9	16
5 回目	8	18
6 回目	9	19
7 回目	8	20
8 回目	7	18
9 回目	8	18
10 回目	9	17
11 回目	9	18
12 回目	6	19
13 回目	8	20
14 回目	6	20
15 回目	6	18

またこの結果に対して対応のある t 検定を実施したところ、図 1 の結果が得られた。

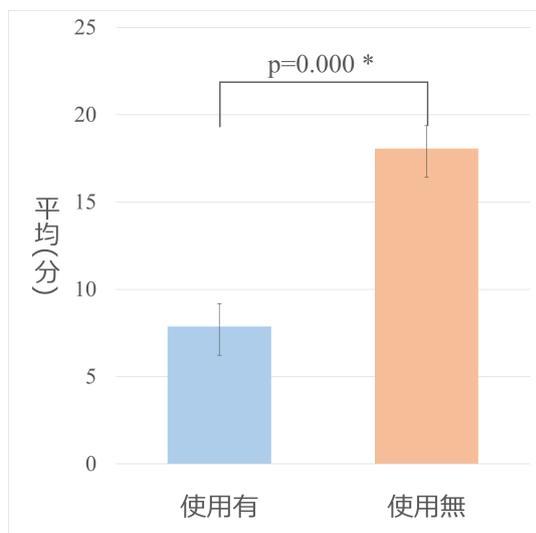


図 1: 検定結果

p 値が 0.000 であり、有意差が認められたため、本アプリケーションの使用によって注文処理を完了するまでの時間を短縮できると言える。

4 おわりに

本稿では、中小規模事業者を対象に業務プロセスの効率化およびデータ活用の高度化を目的として、収集された注文情報を表示・転写するアプリケーションを開発した。また使用実験を行い、処理時間を短縮できることを確認した。

今後の予定として、ユーザビリティ面の検証および改良を行う予定である。

謝辞

本研究は、有限会社セントピアとの共同研究による支援を受けている。システムおよびアプリケーションの管理・監修は有限会社セントピアにて実施されている。

参考文献

- [1] Efraim Turban, Jon Outland, David King, Jae Kyu Lee, Ting-peng Liang, Deborrah C. Turban: “Electronic Commerce 2018 A Managerial Perspective”, Springer, Ninth Edition, pp.1-551, 2018.
- [2] 経済産業省 商務情報政策局 情報経済課: “令和 6 年度 電子商取引に関する市場調査 報告書”, <https://www.meti.go.jp/press/2025/08/20250826005/20250826005-a.pdf>, 2025.

[3] 中小企業庁: “2023 年版「中小企業白書」全文”, <https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2023/PDF/chusho.html>, 2023.

[4] 情報処理推進機構 (IPA) 遠山 真: “日本の中小企業の DX 推進についての考察”, <https://www.ipa.go.jp/digital/chousa/discussion-paper/dxwp2023-sme.html>, 2023.

[5] Kenneth C. Laudon, Jane Price Laudon: “Management Information Systems”, Pearson, pp.1-640, 2020.

運転行動を教示するロボットに適用できる 共感表出法の基礎検討

成田琴美¹ ジメネスフェリックス² 吉川大弘³

¹愛知県立大学大学院 情報科学研究科 ²愛知県立大学 情報科学部

³鈴鹿医療科学大学 医用工学部

1. はじめに

近年、高齢ドライバーによる交通事故が社会的課題となっており、高齢者に対して安全な運転行動を教示するためのロボットの研究が進められている。例えば、実運転環境においてロボットがドライバーに言葉かけを行うことで、安全運転を促進する効果が報告されている[1]。さらに、危険運転映像を用いた学習環境においても、ロボットによる教示は、従来のシステムによる提示に比べて記憶定着に優れる可能性が示唆されている[2]。このように、ロボットとの共同学習は安全運転行動の習得に有効であることが明らかになりつつある。

一方で、既存の運転行動教示ロボットの多くは単発的なインタラクションを前提としており、学習者との長期的な関係性の構築を十分に考慮していない。安全運転行動の定着には継続的な学習が重要であり、高齢者が繰り返し利用したくなるような教育支援ロボットが求められる。そのためには、ロボットに対する親しみや信頼感といったユーザ印象の向上が重要であると考えられる。

ヒューマンエージェントインタラクション分野では、ロボットが感情を表出することで、ユーザの印象や親和性が向上することが報告されている[3]。特に、学習者に共感するような感情を表出する共感表出法は、ユーザの状態に寄り添った感情反応を生成できる手法として注目されるとともに、共感表出手法を搭載したロボットは長期的な共同学習の実現可能性を示している[4]。しかしながら、前述したようなロボットが感情を表出する手法を、運転行動教示ロボットへ適用した研究事例はない。

そこで本研究では、高齢ドライバーに安全な運転行動を教示するロボットの印象向上を目的として、運転行動を教示するロボット(運転行動教示ロボット)に適用できる共感表出法について検討する。本稿では、シミュレーション実験を通して、運転行動教示ロボットに適用できる共感表出法のパラメータを検討する。

2. 共感表出法

共感表出法は、人の感情変化を円環上のモデルにした Russell の感情円環モデルを基に構築されている。共感表出法は、学習者にロボットが共感していると感じさせるために、正解用感情ベクトル \vec{A} と不正解用感情ベクトル \vec{B} の二つを用いて、円環モデル上における感情を表出する(図1)。学習者が問

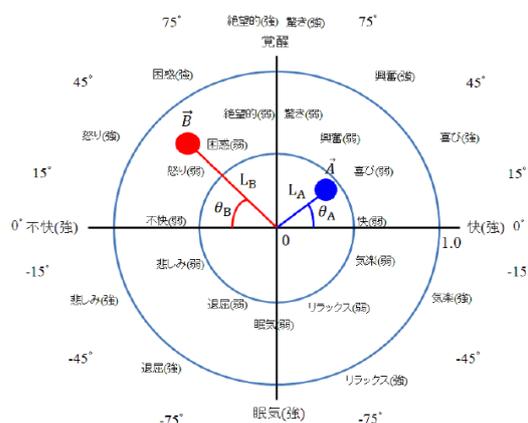


図1：共感表出法

題に正解した場合は \vec{A} 、不正解であった場合には \vec{B} を基準に感情を表出する。 \vec{A} は $0 \leq L_A \leq 1.0$ かつ $-90^\circ \leq \theta_A \leq 90^\circ$ 、 \vec{B} は $-1.0 \leq L_B \leq 0$ かつ $-90^\circ \leq \theta_B \leq 90^\circ$ の範囲内で座標点を移動する。横軸は快-不、縦軸は覚醒-眠気の軸に対応し、以下のように感情ベクトルが変動する。

if (学習者が問題に正解)

$$\begin{aligned} L_A &\leftarrow L_A + \alpha \\ L_B &\leftarrow L_B - \alpha \end{aligned}$$

else

$$\begin{aligned} L_A &\leftarrow L_A - \alpha \\ L_B &\leftarrow L_B + \alpha \end{aligned}$$

if (解答時間 < 基準時間)

if (学習者が問題に正解)

$$\theta_A \leftarrow \theta_A + \beta$$

else

$$\theta_B \leftarrow \theta_B + \beta$$

else

if (学習者が問題に正解)

$$\theta_A \leftarrow \theta_A - \beta$$

else

$$\theta_B \leftarrow \theta_B - \beta$$

なお、 α は長さの更新係数、 β は角度の更新係数である。本研究では、従来は固定値として扱われていた感情の変化量を変数化し、 α および β を導入することで更新式を汎用化した。ベクトル更新後、円環モデル上で対応する感情に基づき、表情・音声・動作を表出する。



図 2 : Tabot の外観

3. 運転行動教示ロボット

本研究で使用するロボットは、頭部にタブレットを搭載したタブレット型ロボット「Tabot」である。ロボットの外観を図 2 に示す。Tabot の画面は、上半分にエージェント、下半分に学習システムのインターフェースを表示する。

学習システムは、段階的コーチングである GROW モデルの枠組みを用いている[5]。スタート画面から危険運転動画の表示画面へ遷移し、動画を 1 周提示した後に選択肢を表示した後、学習者の回答に応じて正誤判定画面を表示する。正解の場合は解説を提示し、次の動画へ進む。不正解の場合は動画表示画面に戻り、同じ動画を再提示する。全ての危険運転動画について正しい選択肢を選び終えると最終確認画面へ遷移し、学習を終了する。危険運転動画は 10 本搭載されている。

4. シミュレーション実験

運転行動教示ロボットに共感表出法を搭載するにあたり、課題特性の違いに起因して既存手法のままでは不適切となり得る 2 点について、シミュレーション実験により決定した。シミュレーション実験の評価指標は、「表出感情数」と「感情変化数」を用いた。表出感情数は 1 回の学習（10 問）において表出された感情の種類数、感情変化数は連続する問題間で表出感情が変化した回数である。

1 点目は、基準時間の定義である。既存の共感表出法では基準時間を「学習者の一問前の問題における解答時間」としているが、本研究では「一問前までの解答時間の累積平均」とした。本課題は危険運転映像を見て危険箇所を選択肢で回答する形式であり、解答時間が 5～15 秒程度で推移するため、前問との単純比較では問題間の難易度差に起因するばらつきの影響を受けやすい。そこで、基準時間を累積平均とすることで比較値を平滑化し、角度更新の判定を安定させることを目的とした。大学生・大学院生 2 名のログを用いて前問と累積平均を比較した結果、累積平均は表出の多様性を損なわず、改善させる可能性を示した(表 1)。例えば、 $\alpha=0.20$ 、 $\beta=30^\circ$ では、被験者 1 で(6,9)から(7,8)へと表出感情数が増加し、被験者 2 では(8,10)で同程度であった。

2 点目は、感情変化量 α および β の設定である。探索候補を $\alpha \in \{0.10, 0.20, 0.30\}$ 、 $\beta \in \{20, 30, 40\}$

α (長さ)	$\beta [^\circ]$ (角度)	被験者1		被験者2	
		前問	累積平均	前問	累積平均
0.1	20	(5,7)	(6,9)	(6,8)	(6,8)
	30	(6,9)	(5,8)	(7,10)	(7,10)
	40	(6,9)	(5,7)	(8,10)	(8,10)
0.2	20	(5,7)	(7,8)	(6,8)	(6,8)
	30	(6,9)	(7,8)	(8,10)	(8,10)
0.3	40	(6,9)	(7,7)	(8,10)	(8,10)
	20	(4,7)	(6,8)	(6,7)	(6,7)
	30	(5,9)	(6,8)	(8,10)	(8,10)
	40	(5,9)	(6,7)	(7,10)	(7,10)

表 1 シミュレーション結果

とし、大学生・大学院生 2 名の被験者ログを入力として共感表出法を実行した。表 1 に示す $\alpha \cdot \beta$ 比較より、 $\alpha=0.20$ 、 $\beta=30^\circ$ は両被験者において高い値を示し、他条件と比べても安定して上位となることから、本研究では $\alpha=0.20$ 、 $\beta=30^\circ$ を採用した。

5. おわりに

本研究では、高齢ドライバーに対する安全運転行動の学習支援を目的として、運転行動教示ロボットに共感表出法を適用し、学習者の状態に寄り添った感情反応を表出するロボットを設計・実装した。

今後は、提案手法の有効性を検証するため、共感表出法を搭載していないロボットと、搭載したロボットを比較する被験者実験を行う。まずは大学生を対象として予備的に検証を行い、その知見を踏まえて、高齢者を対象とした評価へと段階的に展開する。これにより、共感表出法の適用が運転行動教示ロボットの印象向上に寄与するかを明らかにする。

参考文献

- [1] 藤掛和広, 田中貴紘, 吉原佑器, 米川隆, 稲上誠, 青木宏文, 金森等: “ドライバーエージェントの運転支援及び振り返り支援による運転行動改善の効果”, 自動車技術会論文集, vol.50, no.1, pp.134-141, 2019.
- [2] ジメネスフェリックス, 加納政芳, 早瀬光浩, 吉川大弘, 田中貴紘, 金森等: “危険運転動画を用いて運転行動を教示するロボットが与える効果”, 知能と情報, vol.33, no.4, pp.819-826, 2021.
- [3] Iolanda Leite, André Pereira, Samuel Mascarenhas, Carlos Martinho, Rui Prada, Ana Paiva: “The influence of empathy in human-robot relations”, International Journal of Human-Computer Studies, vol.71, pp.250-260, 2013.
- [4] Felix Jimenez, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi, Masayoshi Kanoh: “Effects of a Novel Sympathy-Expression Method on Collaborative Learning Among Junior High School Students and Robots”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.30, no.2, pp.282-291, 2018.
- [5] 杉田 渉, ジメネス フェリックス, 加納 政芳, 早瀬 光浩, 吉川 大弘: 「段階的コーチングによって運転行動教示ロボットが大学生に与える効果」, 第 40 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (FSS2024), pp.6-10, 2024.

エコーステートネットワークにおける悪性回路のセキュリティ評価

○野崎 佑典¹, 竹本 修², 吉川 雅弥³

○Yusuke Nozaki¹, Shu Takemoto², Masaya Yoshikawa³

^{1,2,3}名城大学

^{1,2,3}Meijo University

Abstract: エッジで活用する AI モデルとしてリザーバーコンピューティングが注目されている。一方で、AI デバイスにおける様々なセキュリティ脅威が報告されており、これらの脅威への対策技術の確立が求められているが、リザーバーコンピューティングに対するセキュリティ評価は十分に進んでいない。そこで本研究では、代表的なリザーバーコンピューティングのアーキテクチャであるエコーステートネットワークを対象としてセキュリティ評価を行う。具体的には、ハードウェアの悪性回路であるハードウェアトロイの脅威について検討する。評価実験では、エコーステートネットワークに対するハードウェアトロイを実装し、その脅威を示し、セキュリティ対策の必要性を明らかにした。

1. はじめに

エッジデバイスにおける AI 技術の活用が期待されており、様々な AI アーキテクチャが研究されている。ここで、深層学習に代表される AI モデルは大量のデータを用いた学習を行うため、豊富な計算資源と膨大な電力消費を必要とする。そのため近年、低計算コスト、低消費電力、高速に利用可能な AI モデルとしてリザーバーコンピューティングが注目されている [1]-[3]。

一方で、これらの AI 技術を安心・安全に活用するためにはセキュリティに関する評価が重要である。これまでにエッジ AI を対象に様々なセキュリティ脅威が報告されており、これらへの対策についても研究が進められている。AI 特有のセキュリティ脅威として、敵対的サンプル [4][5]やモデル抽出攻撃 [6][7]、モデル反転攻撃 [8]、モデルポイズニング攻撃 [9]が、ハードウェアを指向した脅威としてはハードウェアトロイが報告されている [10]-[12]。特にハードウェアトロイは、情報セキュリティの 3 脅威 CIA における、機密性、完全性、可用性を侵害する可能性があるため、非常に脅威である。

しかし、本研究で対象とするリザーバーコンピューティングに対するセキュリティ脅威に関する評価は十分実施されていない。そこで本研究では、代表的なリザーバーコンピューティングであるエコーステートネットワークを対象に代表的なセキュリティ脅威の一つであるハードウェアトロイについて評価する。

2. エコーステートネットワーク

リザーバーコンピューティングでは、ハイパーパラメータを多く設定し、学習パラメータを減らすことで、計算コストを大幅に削減している。代表的なリザーバーコンピューティングのアーキテクチャとして、エコーステートネットワークやリキッドステートマシンなどが知られている。本研究で対象とするエコーステートネットワークはリカレントニューラルネットワーク (RNN) の一種であり、RNN よりも学習パラメータを削減している。具体的には、エコーステートネットワークは入力層、リザーバー層、出力層で構成する。中間層にあたるリザーバー層内に再帰結合を持っており、時系列データの利用に活用され

る。エコーステートネットワークでは、入力層やリザーバー層の重みはランダムに固定されるため、学習パラメータは出力層の重みのみである。そのため、線形回帰などの簡単なアルゴリズムで学習することができ、計算コストを削減できる。

時刻 t における入力を $u(t)$ 、リザーバーの内部状態を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ としたとき、 $x(t)$ 、 $y(t)$ は以下の式で計算できる。

$$x(t) = f(W_{in} \cdot u(t) + W \cdot x(t-1)) \quad (1)$$

$$y(t) = W_{out} \cdot x(t) \quad (2)$$

ただし、 W_{in} 、 W 、 W_{out} は入力層、リザーバー層、出力層における結合重みを、 f は活性化関数を表している。エコーステートネットワークでは、 W_{in} 、 W はランダムに固定され、 W_{out} のみを学習パラメータとする。

3. 提案手法

本研究では、代表的なリザーバーコンピューティングの一つであるエコーステートネットワークに対するハードウェアトロイの脅威を評価する。提案手法の概要を図 1 に示す。エコーステートネットワークは入力層、リザーバー層、出力層で構成しており、ハードウェアトロイは入力層とリザーバー層の間に挿入する。そして、攻撃者のみが知る特定のトリガー信号が入力された際に、リザーバー層に与える入力を強制的に操作する。例えば、リザーバー層のニューロンを 0 に初期化することで出力値を操作できる。

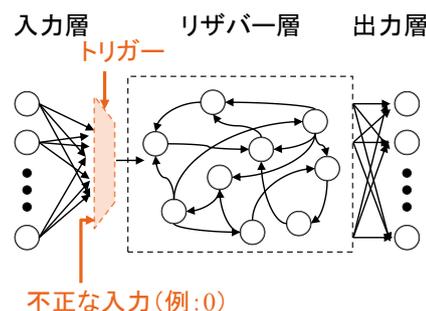


図 1 提案手法の概要

4. 評価実験

評価実験では、通常のエコーステートネットワークと提案ハードウェアトロイを組み込んだエコーステートネットワークを設計し、その動作を検証した。設計には、ハードウェア記述言語として Verilog HDL を使用して、設計ツールには Xilinx ISE Design Suite 14.7 を使用した。実験では、評価ボードとして SASEBO-GII ボードを使用し、SASEBO-GII 上の Field Programmable Gate Array (FPGA) を対象とした。ここで、対象の FPGA は、Xilinx Virtex5 XC5VVLX30 であり、エコーステートネットワークの単純なモデルを実装した。具体的には、入力データの変化の傾きを検知して、時系列の変化を予測するエコーステートネットワークを 8.8 固定小数点表現で実装している。

実験結果を図 2 に示す。図 2 は ISim の実行結果であり、in_float と out_float は入力データと出力データの実数値を示している。トリガー信号は 1.5 (16'h0180) であり、通常のエコーステートネットワークでは、入力データの傾向を正しく予測できていることが確認できる。一方で、提案手法ではトリガーが入力された際に出力が強制的に 0 に設定されていることが確認できる。このように、出力値が改ざんされており、ハードウェアトロイはエコーステートネットワークに対して脅威になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、セキュリティ評価のためにエコーステートネットワークのハードウェアトロイを提案した。そして、評価実験によってその脅威を確認した。

今後は、より複雑 AI モデルでの検証や対策技術に関する検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、名城大学総合研究所若手研究者支援事業費の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

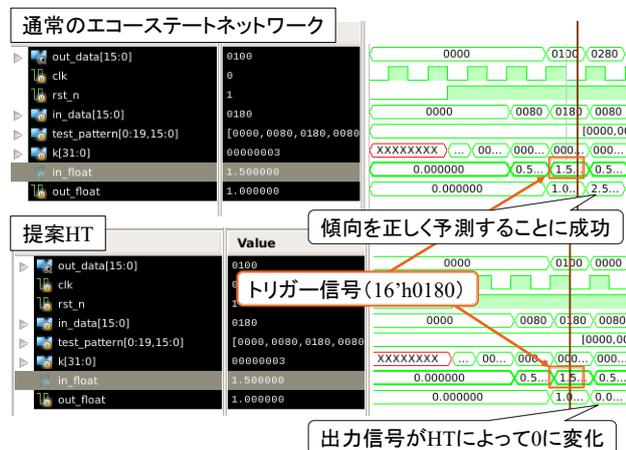


図 2 実験結果

参考文献

- [1] S. Matsumoto, Y. Ichikawa, N. Kajihara and, H. Tamukoh, “FPGA Implementation for Large Scale Reservoir Computing based on Chaotic Boltzmann Machine,” Proc. of IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1–5, May 2024.
- [2] H. Jaeger and H. Haas, “Harnessing Nonlinearity: Predicting Chaotic Systems and Saving Energy in Wireless Communication,” Science, vol. 304, no. 5667, pp. 78–80, 2004.
- [3] W. Maass, T. Natschläger, and H. Markram, “Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations,” Neural computation, vol. 14, no. 11, pp. 2531–2560, 2002.
- [4] I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szegedy, “Explaining and Harnessing Adversarial Examples,” Proc. of Int. Conf. on Learning Representations (ICLR), pp. 1–11, May 2015.
- [5] 野崎佑典, 吉川雅弥, “FPGA 向け AI 実装の回避攻撃対策の検討,” 第 57 回東海ファジィ研究会予稿集, no. P2-03, pp. 1–2, 2025.
- [6] F. Tramèr, F. Zhang, A. Juels, M. K. Reiter, and T. Ristenpart, “Stealing machine learning models via prediction APIs,” Proc. of the 25th USENIX Conf. on Security Symposium (SEC’16), pp. 601–618, Aug. 2016.
- [7] 野崎佑典, 吉川雅弥, “多層パーセプトロンへの電力サイドチャンネル対策の検討,” 第 50 回東海ファジィ研究会予稿集, no. 1, pp. 1–2, 2021.
- [8] M. Fredrikson, S. Jha, and T. Ristenpart, “Model Inversion Attacks that Exploit Confidence Information and Basic Countermeasures,” Proc. of 22nd ACM SIGSAC Conf. on Computer and Communications Security (CCS’15), pp. 1322–1333, Oct. 2015.
- [9] N. Papernot, P. McDaniel, S. Jha, M. Fredrikson, Z. B. Celik, and A. Swami, “The Limitations of Deep Learning in Adversarial Settings,” Proc. of IEEE European Symp. on Security and Privacy (EuroS&P), pp. 372–387, Mar. 2016.
- [10] J. Philomina, R. K. James, and D. M. Vishwanathan, “Stealthy Virtual Channel Blocking: A Hardware Trojan Attack on NoC in Tiled Chip Multicore Processors,” Proc. of 11th Int. Conf. on Smart Computing and Communications (ICSCC), pp. 1–5, Jul. 2025.
- [11] A. Jain and U. Guin, “A Novel Tampering Attack on AES Cores with Hardware Trojans,” Proc. of IEEE Int. Test Conf. in Asia (ITC-Asia), pp. 77–82, Sep. 2020.
- [12] 松久僚真, 吉川雅弥, “楢円曲線暗号に対するハードウェアトロイの考察,” 第 38 回東海ファジィ研究会予稿集, no. 24, pp. 1–4, 2015.
- [13] 岩瀬貴都, 吉川雅弥, “モデルの差異によるハードウェアトロイ検出率への影響評価,” 第 41 回東海ファジィ研究会予稿集, no. 8, pp. 1–4, 2016.

連絡先

野崎佑典

E-mail: 143430019@c alumni.meijo-u.ac.jp