

# 第53回 東海ファジィ研究会 in 日間賀島（ヒマ研2023） 予稿集



主催：日本知能情報ファジィ学会 東海支部  
協賛：IEEE名古屋支部  
日時：2023年2月16日（木）～ 2月17日（金）  
会場：日間賀島 公民館(日間賀島サービスセンター)

第53回東海ファジィ研究会（2023年2月16日～17日）プログラム

2月16日（木）

13:30-13:35	【開会挨拶】	研究会幹事 野崎佑典（名城大学）
13:35-15:20	セッション1	司会：中村剛士（中部大学）
P1-01*		高校生とプログラミング教育用ボードゲームを共に遊ぶパートナー型ロボットの印象の調査 井上智貴 ジメネスフェリックス 大貫守 春田登紀雄
P1-02*		複数タイトルに利用できるゲームBOT 望月亮佑 西野順二
P1-03*		ファジィモデリングにおける段階的前件部縮小の効果 張瑞敏 西野順二
P1-04*		超解像と3次元形状を用いたリンパ節の転移有無の分類精度改善 鈴木康介 岩堀祐之 舟橋健司 大内晶 清水泰博
P1-05*		観戦画面情報を用いたFPSゲームの勝敗予測 川口 蒼 西野 順二
P1-06*		ライブ配信の切り抜き動画の分析による切り抜き動画作成支援に関する研究 植田匠 橋山智訓
P1-07*		畳み込みニューラルネットワークにより抽出した地図画像の特徴量を用いた事故種別の分類 石田木斗巳 向直人 内種岳詞 岩田員典 伊藤暢浩
P1-08*		学習者の表情から困惑を推定する教育支援ロボットの実現可能性 大川航平 ジメネスフェリックス 秋月秀一 吉川大弘
P1-09*		遺伝的アルゴリズムを用いた棒倒し法原理に基づく迷路生成手法 鶴田 勇志 加納 政芳
P1-10*		スパイキングニューラルネットワークの応答関数近似による学習精度の変化に関する一考察 安井雅哉 高瀬治彦 北英彦
P1-11		キャラクタ外見の印象にユーザの認知バイアスが与える影響 中根駿太 早瀬光浩
P1-12		3次元画像処理の実績紹介 水野昌次郎 大西勇多
P1-13		仮想環境を用いた情報ネットワーク教育における方法と効果 三好哲也
15:20-15:40	休憩	
15:40-16:40	招待講演	司会：加納政芳（中京大学）
	題名	人間知能と人工知能の共存を目指す人間共生システム研究
	講演者	前田陽一郎（東京都立大学 教授）

18:30-21:30	懇親会	司会：吉川大弘（鈴鹿医療科学大学）
21:30-23:30	ナイトセッション	司会：吉川大弘（鈴鹿医療科学大学）

2月17日（金）

9:30-11:00	セッション2	司会：高瀬晴彦（三重大学）
P2-01*		Dynamic AI Difficulty in Unsolved Abstract Strategy Games テケリアニル 西野順二
P2-02*		不確実性を有するデータ分類に向けたミンガン型ファジィ分類子システムのルール表現適応 白石洋輝 速水陽平 橋山智訓
P2-03*		本棚メタファを用いて幅広い論文サーベイを支援する論文検索システムの提案 小林稜 橋山智訓
P2-04*		学習スタイルに着目した適応的な情報提示システムのボードゲーム説明書への応用と検証 永井美央花 橋山智訓
P2-05*		顔合わせ時において適切な心理的距離を把握する支援システムの提案 後藤匠 橋山智訓
P2-06*		複数の模倣AIの切り替えによるプレイヤーとの協力プレイの提案 東川由憲 橋山智訓
P2-07*		ポケモンの音象徴について 山口郁弥 中村剛士
P2-08*		モンスターハンターの音象徴について 渡邊紫花 中村剛士
P2-09*		Grad-CAMを用いた"ジョジョの奇妙な冒険"の音象徴的特徴の発見 吉兼利浩 中村剛士
P2-10*		e-Paper 上の可変格子状マーカの撮影による魚眼レンズ校正システムの構築 福井阜河 矢野良和
P2-11		FCR法における矛盾度の定義についての一考察 山田洋巳 福澤和久 小田 哲久
P2-12		TWINEに対するハミング重みを利用した故障利用解析の検討 野崎佑典 吉川雅弥
11:00-11:10	【閉会挨拶】	東海ファジィ研究会・支部長 川中普晴（三重大学）

\* は優秀発表賞の投票対象

# 高校生とプログラミング教育用ボードゲームを共に遊ぶ パートナー型ロボットの印象の調査

Impression Effect of Robot that Learns Programming  
with High School Learners while playing board games

○<sup>1</sup> 井上智貴, <sup>1</sup> ジメネスフェリックス, <sup>2</sup> 大貫 守 <sup>3</sup> 春田 登紀雄  
○<sup>1</sup> Tomoki Inoue, <sup>1</sup> Jimenez Felix <sup>2</sup> Mamoru Onuki, <sup>3</sup> Tokio Haruta  
<sup>1</sup> 愛知県立大学情報科学部 <sup>2</sup> 愛知県立大学教育福祉学部  
<sup>3</sup> 愛知県立芸術大学美術部

<sup>1</sup>Aichi Prefectural University, School of Information Science and Technology

<sup>2</sup>Aichi Prefectural University, School of Education and Welfare

<sup>3</sup>Aichi University of the Arts, Faculty of Art

**Abstract:** In recent years, Programming education has become active in public schools. Moreover, the programming education is becoming compulsory. Therefore, board games that learners can enjoy learning programming are being used in educational field. However, having a partner to play board games at home is not always feasible. We think that the robots can replace the partner who plays board games together. If it can be realized, the possibilities of board games for programming education would expand. Thus, this paper investigate the impression that the robot gives to high school learners and examine the effectiveness of robots in board games for programming education.

## 1 はじめに

近年、文部科学省による学習指導要領改訂により、プログラミング教育が必修化しつつある[1]。小学校では2020年度よりプログラミングが必修化され、プログラミング教育が各教科等の特質に合わせて計画的に実施されるようになった。実践事例として、杉並区立西田小学校では算数の時間においてビジュアル言語「Scratch」を用いて正多角形を描画するプログラムを作成した。[2] また、横浜市立白幡小学校は理科の時間においてビジュアル言語「MakeCode」を用いて電気を無駄なく使うため、明るさセンサーを活用して暗いときのみ照明をつけるといった工夫を施したプログラムを作成した。[3] 中学校では2021年度より技術・家庭科目「情報の技術」においてプログラミング学習の内容が強化された。実践事例として、日本語プログラミング言語「ドリトル」を用いて音楽データをほかのパソコンに共有できるようなプログラムを作成するなどの取り組みが行われている。[4] 高等学校においては2022年度より共通必修科目「情報Ⅰ」を新設しさらにその発展的な選択科目として「情報Ⅱ」が新設された。実践事例として、埼玉県立川越南高等学校ではプログラミング言語「Java」を用いて与えられた3日分の気温データから最高気温を算出するプログラムを作成した。[5]

その中でも「プログラミング的思考」を学べるボードゲームが様々な教育機関で活用されている。たとえば開智望小学校ではプログラミング教育用ボードゲームを用いたワークショップが開催され[6]、志知小学校や津島市立南小学校ではプログラミング教育用ボードゲームを用いた授業が行われた[7][8]。ボードゲームを活用する利点

として、プログラミング初学者が楽しみながら遊ぶことでストレスなく順次実行や繰り返し処理などの「プログラミング的思考」を学ぶことができることが挙げられる。「小学校段階における論理的思考力や創造性、問題解決能力等の育成とプログラミング教育に関する有識者会議（議論の取りまとめ）」[9]によると「プログラミング的思考」とは、「自分が意図する一連の活動を実現するために、どのような動きの組合せが必要であり、一つ一つの動きに対応した記号を、どのように組み合わせたらいいのか、記号の組合せをどのように改善していけば、より意図した活動に近づくのか、といったことを論理的に考えていく力」と説明されている。

しかしながら、家庭において常にとともに遊ぶパートナーが存在するとは限らない。さらにコロナ禍において友人同士で対面で遊ぶ機会も減少していることが考えられる。プログラミング教育用ボードゲームは複数人で遊ぶことを想定して制作されており、パートナーと遊ぶことによって学習者のモチベーションが向上し、学習を続けたいとなると考える。一方、単独でボードゲームを遊んでいる場合は、作業となり、学習に対するモチベーションも減少するだろう。

そこで教育支援ロボットが学習者と共にボードゲームを遊ぶパートナーになりうると考えた。人の教育を支援する教育支援ロボットは教師の役割を想定した「教師型ロボット」と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に注目する。パートナー型ロボットに関する従来研究において中学生と共に問題を解き合うパートナー型ロボット[10]や、子供から教わるパートナー型ロボット

[11]の研究事例が報告されている。また、画面上のエージェントに比べて、実世界に存在するロボットのアドバイスは優位に働くことも報告されている [12]。そのため、パートナー型ロボットは、プログラミングボードゲームでも有効に働くと考えられる。しかしながら、従来研究では数学や英語などの中学校における主教科が多くプログラミング学習などの学習支援に使用された報告は極めて少ない。そのためロボットがプログラミング教育を目的とするボードゲームを学習者と共に遊ぶことで学習者に与える印象は検証されていない。

本研究では既存のプログラミング教育用ボードゲームによる学習アプリケーションを搭載したパートナー型ロボットを開発し、ロボットが高校生に与える印象について検証する。

## 2 プログラミングボードゲーム対戦型ロボット

プログラミング教育用ボードゲームを共に対戦するパートナー型ロボットについて説明する。

### 2.1 プログラミングボードゲームの概要

ボードゲームは「STEMON」[13] から発売されているプログラミング教育用ボードゲーム「COOL PROGRAMMING」[14] を用いる。「COOLPROGRAMMING」はプレイ人数 1~4 人であり対象年齢が 6 歳以上の対戦型のボードゲームである。

#### 2.1.1 ボードゲームの選定理由

プログラミング教育用ボードゲームとして「COOL PROGRAMMING」以外にも「ALGOGLA」や「Robot Turtles」など数多くのボードゲームが存在する。「COOL PROGRAMMING」を選定した理由としては Amazon でのレビューを参照したところ、「覚えてしまえばルールが簡単」、「楽しみながら学べる」など肯定的な意見が多かったからである。

#### 2.1.2 ボードゲームの内容物

主な内容物は以下である。

- (i) ペンギンコマ (3 個)(図 1(a))
- (ii) マップ (30 ステージ)(図 1(b))
- (iii) コマンドカード (8 種類)(図 4)

マップは 001 から 030 の 30 面あり難易度が 5 段階で分かれている。コマンドカードは矢印カード 4 種類、繰り返しカード 2 種、交代カード、キャッチカードの計 8 種類である。

#### 2.1.3 ボードゲームの準備

- (i) 主役のペンギンと友達のペンギンを決める。

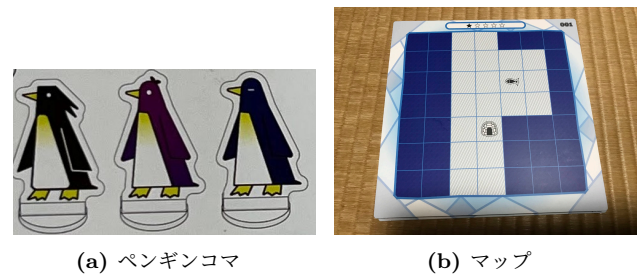


図 1: ボードゲームの内容物

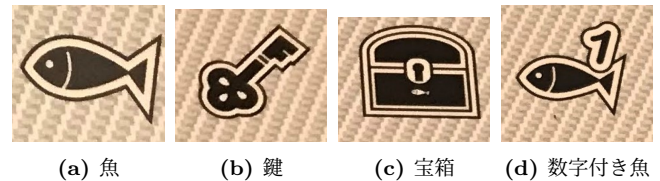


図 2: アイテム

- (ii) 各プレイヤーは矢印カード 4 種各 4 枚、繰り返しカード 2 種各 2 枚、キャッチカード 4 枚を受け取る。
- (iii) マップを選びスタートマスに主役のペンギンを置く。
- (iv) 友達ペンギンのマスが存在する場合友達のペンギンコマを友達ペンギンのマスに置く。

#### 2.1.4 ボードゲームのルール

ゲーム開始と共に各プレイヤーは公開されたマップを見て全員同時にコマンドカードを並べ始める。主役ペンギンはコマンドカードの並びにしたがってマップ上を移動する。コマンドカードを並べ終わったプレイヤーはコマンドカードの並び通りにマップ上のペンギンコマを動かす。一番初めにマップ上すべてのアイテム (図 2) をキャッチできたプレイヤーが勝者となる。

ただし、カギ (図 2(b)) と宝箱 (図 2(c)) のアイテムが存在する場合は鍵を先にキャッチしなければならない。また、魚アイテムに数字がついている場合 (図 2(d)) 数字の少ない順にキャッチしなければならない。

#### 2.1.5 マップ上のマスの説明

##### 雪マス (図 3(a))

ペンギンコマはマスを 1 つずつ進む

##### 海マス (図 3(b))

海マスは行き止まりのマスであり中に入ることはいできない。

##### 氷マス (図 3(c))

ペンギンコマはマスをの上を壁、海またはペンギンコマに衝突するまで進み続ける。





図 3: マス

#### 矢印マス (図 3(d))

ペンギンコマが矢印マスの上を通る場合、ペンギンコマは矢印マスの示す向きへすすむ。矢印マスの上ではペンギンコマは止まることはできない。

#### スタートマス (図 3(e))

主役ペンギンはスタートマスを初期位置として配置される。

#### 友達ペンギンのマス (図 3(f))

友達ペンギンのマスがマップ上に存在する場合は友達ペンギンのコマをこのマスに配置する。

### 2.1.6 各カードの説明

#### 矢印カード (4 種) (図 4(a),4(b),4(c),4(d))

マップ上のペンギンコマを矢印の方向へうごかす。

#### 繰り返しカード (始, 終) (図 4(e),4(f))

繰り返しカード (始) と繰り返しカード (終) で挟まれたカードは繰り返し実行される。繰り返しカードの中に繰り返しカードを用いることも可能。

#### 交代カード (図 4(g))

交代カードを使うことで操作対象のペンギンコマを主役ペンギンから友達ペンギンに交代する。もう一度交代カードを使うことで操作対象のペンギンコマを主役ペンギンに戻すことができる。

#### キャッチカード (図 4(h))

主役ペンギンがアイテムの上で止まっている場合に使うことでマップ上のアイテムをキャッチすることができる。

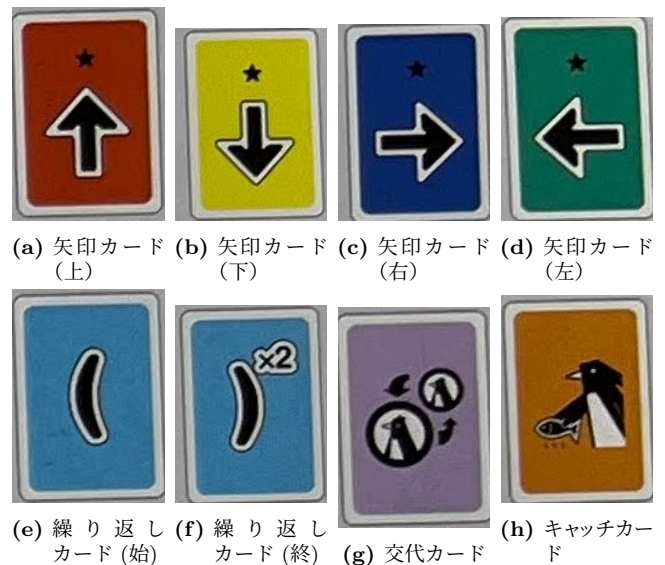


図 4: コマンドカード

## 2.2 プログラミングボードゲームアプリケーションの概要

「COOL PROGRAMMING」をもとにプログラミングボードゲームアプリケーションを開発した。本アプリケーションは Windows 用アプリケーションとしてプログラミング言語 C# で作成した。本アプリケーションは「スタート画面」、「チュートリアルモード」、「対戦モード」、「GOAL 画面」、「FINISH 画面」の 5 つの画面を推移しながらゲームが進んでいく。各画面の上部にはエージェントの表情が描画されている。

### 2.2.1 各画面の説明

#### スタート画面 (図 5)

アプリケーションが起動するとまずスタート画面から始まる。スタート画面では「チュートリアルモード」か「対戦モード」どちらに遷移するか選ぶことができる。アプリケーションを初めて操作する場合は「あそびかたボタン」を押すと「チュートリアルモード」に遷移する。「スタートボタン」を押すと「対戦モード」画面に遷移する。

#### チュートリアルモード (図 6)

「スタート画面」で「あそびかたボタン」をおした場合「チュートリアルモード」に遷移する。チュートリアルモードではゲームの遊びかたを実際にマウスを操作しながら学ぶことができる。チュートリアルを終えると「スタート画面」に戻る。

#### 対戦モード (図 7)



図 5: スタート画面

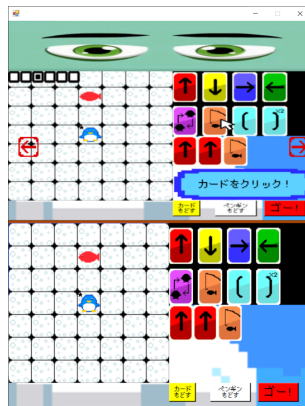


図 6: チュートリアル画面



図 9: フィニッシュ画面

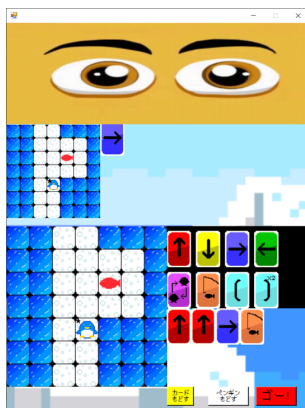


図 7: 対戦モード



図 8: ゴール画面

「スタート画面」で「スタートボタン」を押すと対戦モードに遷移する。対戦モードでは上画面に描画されているエージェントと1対1で対戦する。ステージは5ステージ搭載されており、各難易度ごとに1ステージ存在する。対戦モードは全体で5~10分程度を要する。「対戦モード」では上画面がエージェントの操作する画面、下画面がプレイヤーの操作する画面となっておりプレイヤーは下画面のカードを選択しながら対戦を進める。エージェントは対戦が始まると自動でカードを並べ出し学習者と対戦する。学習者もしくはエージェントがゴールするとゲームは中断され、「GOAL」画面に遷移する。

#### ゴール画面 (図 8)

「対戦モード」で学習者かエージェントがゴールすると「GOAL画面」に遷移する。「GOAL」画面では学習者、エージェントのどちらが勝利したかの表示を行う。「つぎのステージ」ボタンをおすことで「対戦モード」に戻り次のステージを開始する。「つぎのステージ」ボタン押下時、5ステージ目であるならば、

「FINISH画面」に遷移する。「GOAL画面」では勝敗を計算し、その時点でエージェントの勝利数が学習者より多いならエージェントの待ち時間、カードを並べる速さ、ペンギンが動く速さを長くし、エージェントの勝利数が学習者より少ないなら短くしている。

#### FINISH画面 (図 9)

5ステージ終了後の「GOAL画面」で「つぎのステージ」ボタンをおすと「FINISH」画面に遷移する。「FINISH画面」ではエージェントと学習者の得点とどちらが勝利したかが表示される。

#### 2.2.2 エージェントの表情

エージェントは状況に応じて多様な表情変化を行う (図 10)。ゲーム開始時は図 10(a), GOAL画面移行時、Tabotが勝利した場合は図 10(c), プレイヤーが勝利した場合は図 10(b)の表情が表示される。「次のステージ」押下時、Tabotの勝利数がプレイヤーに比べて高い場合は図 10(e), Tabotの勝利数がプレイヤーに比べて低い場合は図 10(d), Tabotとプレイヤーの勝利数が同等である場合は図 10(a)の表情が表示される。FINISH画面移行時、Tabotの勝利数がプレイヤーに比べて高い場合は図 10(g), Tabotの勝利数がプレイヤーに比べて低い場合は図 10(f)の表情が表示される。

#### 2.2.3 エージェントの発話内容

エージェントは状況に応じて様々な発話を行う。その内容を表 1 に示す。

#### 2.3 ロボットの概要

実験には頭部がタブレットであるタブレット型ロボット「Tabot」(図 11)を用いた。Tabotは頭部のタブレットにエージェントを表示することで多様な表情変化を行うことができる。また、Tabotの体部分は首の自由度が

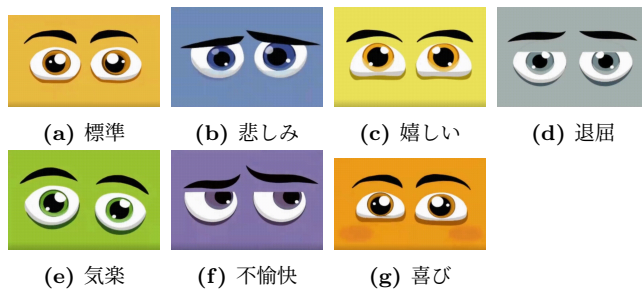


図 10: エージェントの表情

表 1: エージェントの発話内容

発話タイミング	発話内容
チュートリアル終了時	おつかれさま. ゲームをスタートして ぼくとしょうぶだ
各ステージ開始時 1	よーし
各ステージ開始時 2	しょうぶだ
ゲーム中 1	うーん
ゲーム中 2	えーと
ゲーム中 3	えー
ゲーム中 4	ちがうなあ
ゲーム中 5	きたきた
ゲーム中 6	わかったぞ
ゲーム中 7	これで終わり
GOAL 画面移行時 1	まけたー
GOAL 画面移行時 2	かったー
FIBISH 画面移行時 1	うわー, ぼくのまけだー
FIBISH 画面移行時 2	やったー, ぼくのかちだ

3, 片腕の自由度が5, 足部の自由度が1であり合計14の自由度を持つため多様な身体動作を行うことができる。Tabot はフィニッシュ画面遷移時, 勝敗に応じて異なる動きをする。Tabot が負けた場合は悔しそうな動作をし, Tabot が勝利した場合は嬉しそうな動作をする。

### 3 被験者実験

#### 3.1 方法

本実験では高校生28人に対して被験者内実験を行った。実験日は2022/10/21である。学習者はボードゲーム群, ロボット群の2つの群をランダムな順番で実施する。

##### 3.1.1 ロボット群

ロボット群では, 被験者はボードゲームアプリケーションを搭載したロボットと共にボードゲームを遊ぶ。



図 11: タボット

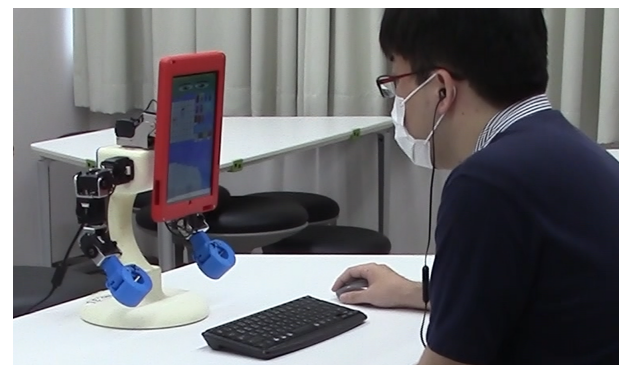


図 12: ロボット群

#### 3.1.2 ボードゲーム群

ボードゲーム群では4人の被験者同士でボードゲームを対戦する。ゲームマスターは実験実施者が担当し, 被験者がカードを組み終わると, ゲームマスターがカードのとおりにペンギンコマを動かし, 勝敗を決定する。

各群で出題されるステージはランダムとなる。

#### 3.2 評価指標

本実験では「楽しさ」にまつわる10個の形容詞対を用意し, 5段階尺度のSD法により各群競技後にアンケートを行った。各質問内容は5段階尺度とし, ポジティブな内容のほうが高くなるように1から5までで数値化した。質問項目は以下の10項目である(図2)。検定は10項目それぞれに対し, データの等分散性を確認したのち等分散である場合スチューデントのt検定, 等分散でない場合はウェルチのt検定を用いた。10項目に対し検定を実施するため, 合計10回の検定を実施する。そのため, 多重比較の問題を考慮し, ボンフェローニの方法で有意水



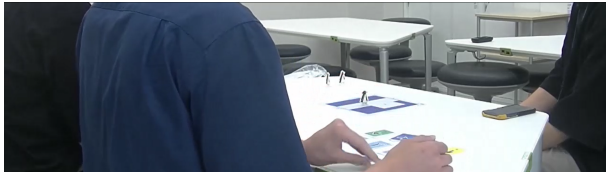


図 13: ボードゲーム群

表 2: 楽しさにまつわる形容詞対

ポジティブ	ネガティブ
すきな	きらいな
むちゅうな	むしんな
ゆかいな	ふゆかいな
まんぞくした	ものたりない
たんじゅんな	ふくざつな
わかりやすい	むずかしい
よい	わるい
おもしろい	つまらない
いよくてきな	むきりよくな
じゅうじつした	くうきよな

準を 0.005 へ調整した。

### 3.3 結果

まず質問 10 項目それぞれの等分散性を確認した (表 3)。分散の水準を 0.2 とし水準を超えた場合は等分散とみなす。おもしろい/つまらない, むちゅうな/むしんなの 2 項目は水準を下回ったので等分散ではない。よっておもしろい/つまらない, むちゅうな/むしんなの 2 項目はウェルチの t 検定, その他の 8 項目にはステューデントの t 検定を用いて検定を行った。

アンケートの平均と検定の結果を図 14 に示す。

検定の結果すべての項目に有意差が認められなかった。よって楽しさに関してボードゲームとロボット群は同程度であるといえる。

## 4 考察

すべての楽しさにまつわる項目に対し検定を行った結果, ボードゲーム群とロボット群で有意差が認められなかった。このことから, ボードゲームを人と対戦する場合とロボットと対戦する場合のたのしさは同程度であると考えられる。しかしたんじゅんな/ふくざつな, わかりやすい/むずかしいの 2 項目をのぞいた 8 項目はロボット群がボードゲーム群を下回る結果となった。これらの項目はステージの難易度によって下回ったのだと考えられる。ボードゲーム群ではステージがランダムに出されていた。実

表 3: 質問 10 項目の等分散性

質問項目	p 値
すきな/きらいな	0.88
むちゅうな/むしんな	0.11
ゆかいな/ふゆかいな	0.51
まんぞくした/ものたりない	0.92
たんじゅんな/ふくざつな	0.22
わかりやすい/むずかしい	0.51
よい/わるい	0.67
おもしろい/つまらない	0.10
いよくてきな/むきりよくな	0.56
じゅうじつした/くうきよな	0.83

験で出題されたステージの平均を算出したところロボット群が 3 であったのに対しボードゲーム群は 2.2 であった。またロボット群のアンケートでの自由記述欄には「ステージが進むにつれて正解できなくなった」などの感想が多く集まった。よって難易度の平均が異なることでこのような差が生じてしまったと考える。反対にたんじゅんな/ふくざつな, わかりやすい/むずかしいの 2 項目はロボット群がボードゲーム群を上回る結果となった。これはロボットでのマウス操作によって現実の操作より操作が単純になったり, わかりやすくなった結果であると考えられる。

## 5 終わりに

### 5.1 まとめ

本稿では既存のプログラミング教育用ボードゲームによる学習ソフトウェアを搭載したロボットが高校生に与える印象効果について検証した。実験結果からボードゲーム群と, ロボット群は学習者に与える印象効果に差がないと示された。そのため, ロボットは, プログラミング教育用ボードゲームのパートナーとして活用できる可能性があると考えられる。

### 5.2 今後の展望

文部科学省による「日本語指導が必要な児童生徒の受入状況等に関する調査 (令和 3 年度)」[16] によると日本語指導が必要な外国籍児童の数は年々増加傾向にある。よって日本人児童だけではなく外国人児童にも支援をしていく必要がある。そこで今後は, 外国人児童と共にプログラミングを学ぶパートナー型ロボットを開発する。

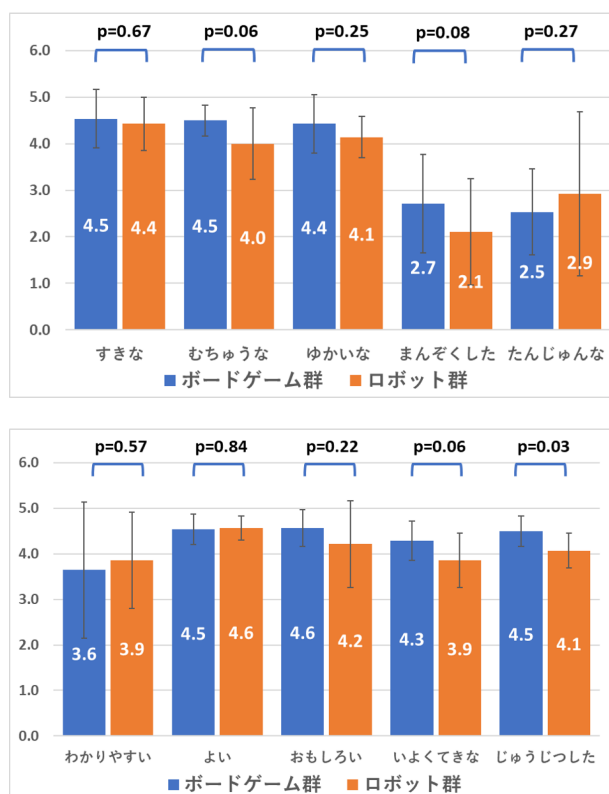


図 14: 質問 10 項目の平均及び p 値

## 謝辞

本研究は、愛知県立大学学長特別研究費 (2022 年度) の補助を得て遂行された。そして、本研究のために、被験者実験にご協力いただいたみなさまに、心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 文部科学省, "平成 29・30・31 年改訂学習指導要領 (本文、解説)" [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/1384661.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/1384661.htm), 2022.
- [2] 小学校を中心としたプログラミング教育ポータル, "正多角形をプログラムを使って書こう (杉並区立西田小学校)" <https://miraino-manabi.mext.go.jp/content/111>
- [3] 小学校を中心としたプログラミング教育ポータル, "電気を無駄なく使うための工夫を考えよう (横浜市立白幡小学校)" <https://miraino-manabi.mext.go.jp/content/481>
- [4] 文部科学省, "中学校技術・家庭科 (技術分野) におけるプログラミング教育実践事例集②"

[https://www.mext.go.jp/content/20200403-mxt\\_jogai01-000006333\\_002.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20200403-mxt_jogai01-000006333_002.pdf)

- [5] 文部科学省, "基本的なアルゴリズムの学習 (高等学校 3 年生: 情報)" [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/zyouhou/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2018/08/09/1408013\\_04.pdf](https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyouhou/detail/_icsFiles/afieldfile/2018/08/09/1408013_04.pdf)
- [6] Wantedly Inc., "COOL PROGRAMMING が、小学校のプログラミングワークショップにて使用されました!", [https://www.wantedly.com/companies/nicofca/post\\_articles/197961?utm\\_source=t.co&utm\\_medium=share&lang=ja](https://www.wantedly.com/companies/nicofca/post_articles/197961?utm_source=t.co&utm_medium=share&lang=ja)
- [7] こどもあんしんネット, "3・4・6 年 プログラミング教育の授業", <https://www.aw-ansin.net/8210/article/detail/13341>
- [8] 津島市立南小学校, "【6 年生】プログラミング出前授業", <https://minami-e.tsushima-schoolnet.jp/?p=17156>
- [9] 文部科学省, "小学校段階におけるプログラミング教育の在り方について (議論の取りまとめ)", [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shotou/122/attach/1372525.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shotou/122/attach/1372525.htm)
- [10] 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, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.30, no.2, pp.282-291, 2018.
- [11] 松添静子, 田中文英: 教育支援ロボットの賢さの違いが子どもの英単語学習に及ぼす影響, *人工知能学会論文誌*, vol.28, no.2, pp.170-178, 2013.
- [12] M. Fridin and M. Belokopytov: Embodied Robot versus Virtual Agent: Involvement of Preschool Children in Motor Task Performance, *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol.30, no.6, pp.459-469, 2014.
- [13] STEMON, "ステモンとは" <https://www.stemon.net/about/>
- [14] 株式会社ヴィリング, "COOL PROGRAMMING", <https://prtmes.jp/main/html/rd/p/000000015.000024064.html>

- [15] 向後千春・鈴木克明, ” ARCS 動機づけモデルに基づく授業・教材用評価シートの試作”, 『日本教育工学会第 14 回全国大会講演論文集』 577-578
- [16] 文部科学省, ” 「日本語指導が必要な児童生徒の受入状況等に関する調査（令和 3 年度） 」の結果（速報）について ” , `chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.mext.go.jp/content/20220324-mxt_kyokoku-000021406_01.pdf`

連絡先

E-mail: `is191009@cis.aichi-pu.ac.jp`



# 複数タイトルに利用できるゲーム BOT

The game BOT available for multiple titles

○<sup>1</sup> 望月 亮佑, <sup>1</sup> 西野 順二  
○<sup>1</sup> Ryosuke Mochizuki, <sup>1</sup> Junji Nishino  
<sup>1</sup> 電気通信大学大学院

<sup>1</sup>The University of Electro-Communications Graduate School

**Abstract:** The purpose of this study is to examine a method for extending the game BOT target from a single game title to multiple targets. Game BOTs do not work well with different screen representations, even if the games have similar content. We proposed a symbolization model with meta-modules and unique modules, a symbolization that standardizes different screen representations for each game title and treats elements that perform the same function as the same. The MiniGrid environment showed the effectiveness of using unique modules. In the Atari2600 environment, the use of learned weights was found to be advantageous for learning. The performance was similar when the study was conducted under a different title. It was shown that appearance does not affect gameplay as long as elemental information is retained, and that learning is possible even without detailed location information.

## 1 はじめに

本研究はゲーム BOT の対象を単一のゲームタイトルから複数の対象へと拡張することを目的とし、メタモジュールと固有モジュールを持つ記号化モデルを提案する。ゲーム BOT は単一の対象に対する性能を追求されることが多く、複数の対象に対する汎用性についてはあまり議論されていない。画面をオブジェクトに基づいて再構成することで状態を規格化し、類似したゲーム間で同一状態の出現率を高くすることを狙う。

現在ゲーム BOT は開発時の調整における定量評価や実際のゲーム内でプレイヤーの対戦相手として利用されている。開発は人手や学習によって行われているが、対象が単一である場合目的とするタイトル毎に作成する必要がある。獲得する知識を類似環境に利用しやすい形にすることで個別開発における負担を軽減することを目指す。

### 1.1 関連技術

転移学習は既存の知識を別環境に利用する学習である。転移学習では事前に学習した重みの層を一部凍結することで汎用性や再学習時の性能が変化する。[1]

メタ学習は learning to learn と呼ばれ学習する方法を学習する。現在の対象に限定した行動を学習するのではなく、周辺状況も考慮して行動を決定する。メタ学習の一つである MLSH[2] は現在の状況进行评估する上位ネットワークと状況に合わせた行動列を選択する下位ネットワークで構成される。状況判断と行動選択を区別することによってメタな視点を利用する。

ゲームはジャンルによって大別され類似したゲー

ムが含まれることがある。同ジャンルのゲームであれば内容が類似している可能性が高い。ジャンル分類を対象学習によって行うことも研究されている。[3]

## 2 メタモジュールと固有モジュールを持つ記号化モデル

本研究の記号化とは、画面上のオブジェクトの位置情報を基に画面をグリッド分割して再構成し、オブジェクトの位置情報に規格化することである。強化学習ではゲーム内容が類似していても外見情報が異なっていると上手く知識を利用出来ない。見た目だけが異なっているゲームや画面を構成する要素が類似したゲームを規格化することで強化学習において同一の状態であるとみなした学習が可能になる。

記号化ではゲーム画面を構成する要素を複数のタイトルで共通に出現する要素と特定のタイトルに限定して出現する要素に区別する。共通する要素によって規格化した画面を作成し類似した複数の環境で適用できるメタな行動を出力し、固有の要素を学習してメタな行動を調整してより適した行動を生成する。それぞれを処理するため、メタな行動を出力するメタモジュール、固有の知識を学習する固有モジュールを用いる。

### 2.1 記号化による状態の規格化

複数タイトルに共通して出現する要素の位置情報を基に記号化する。図 1 は Atari2600 のタイトルである Assault と DemonAttack を記号化したイメージ図である。記号化することによって背景やキャラクターのデザインといったゲームに直接影響のない要素を排除し、グリッド分割して配置することで細

かな位置情報を無視する。Atari2600 の表現を排除して簡易的なシミュレーション環境を作成しても学習性能に影響はないことを、Young らは確かめた [4]。

図 1 ではプレイヤー、敵、それぞれの攻撃を共通した要素として記号化している。スコア、残機、敵の生成場所のような情報も画面から取得可能だが、大きくゲームに影響する要素ではないため観測対象外とした。Assault の画面右下にプレイヤーの攻撃頻度を抑制するためのゲージが存在するが、DemonAttack にはない固有の要素であるため規格化した画面とは切り離して扱う。

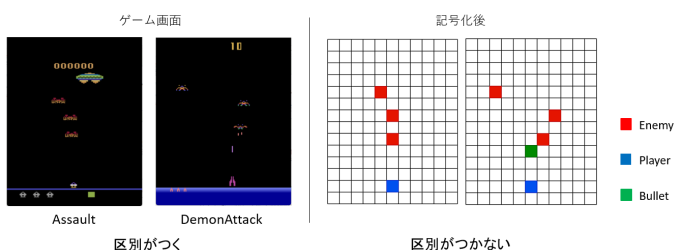


図 1: 記号化前後の画面区別

個別環境への対応は固有モジュールで行う。図 3 の例では A,B,C という 3 つの環境からの入力に対し、3 つの固有モジュールを利用している。C という入力に対して一番下の固有モジュールを利用して行動を出力する。新規に D という環境を追加したい場合は固有モジュールを追加する。

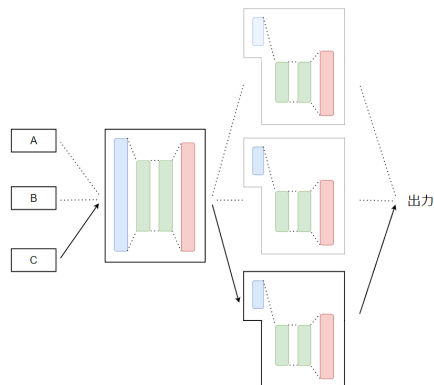


図 3: 環境と固有モジュールの対応

## 2.2 記号化モデル

記号化モデルはメタモジュールと固有モジュールによって構成される。メタモジュールは複数タイトルに共通する要素を入力としてメタな行動を出力する。固有モジュールはタイトル固有の要素とメタな行動を入力として個別の対象に調整した行動を出力する。メタモジュールが十分に学習されている場合、新規の対象を追加するには固有モジュールのみの学習で対応する。

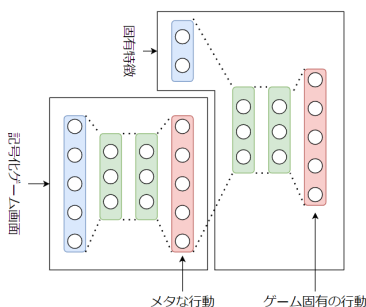


図 2: メタモジュールと固有モジュールを持つ記号化モデル

## 3 MiniGrid 環境における記号化

シンプルな迷路探索環境である MiniGrid[5] において各モジュールの有無や利用条件による影響を確認した。簡単な環境で記号化モデルの性能を検証することが目的である。図 4 のような障害物のない Empty 環境と接触でゲームオーバーとなる溶岩タイルを追加した LavaGaps6 環境で行った。学習は DDQN[6] で行った。

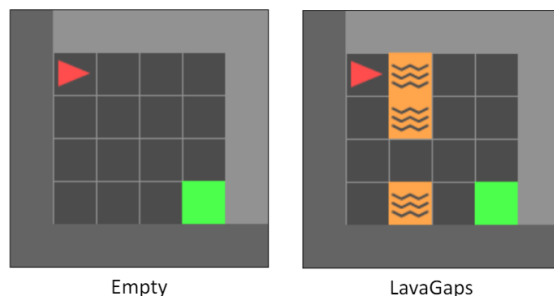


図 4: MiniGrid 環境

図5はMiniGridのLavaGapS6環境においてメタモジュールのみの場合と固有モジュールも利用した場合の学習の比較である。横軸はエピソード、縦軸は直近100エピソードの平均報酬、metaはメタモジュールのみの結果、featureはメタモジュールと固有モジュールの両方を利用した結果である。また、scratchは事前学習なし、learnedは事前学習ありで書き換え可、freezeは事前学習ありで書き換え不可の3つを比較した。

### 3.1 固有モジュールの有無による影響

固有モジュールの有無による性能変化を確認した。LavaGapS6環境では固有モジュールを追加した学習が高い性能を示した。どちらも観測範囲は同じだが、両方のモジュールを利用した際の明示的な階層入力に着目したい特徴を強調出来たと考える。

### 3.2 ネットワークサイズによる比較

固有モジュールも利用する場合メタモジュールのみの学習と比較してネットワークサイズが大きくなる。性能の変化が構造によるものか表現力の増加によるものかを確認した。meta largeはメタモジュールの中間層を固有モジュール利用時と同等にして表現力を大きくしたものである。元サイズのmeta scratchと大きな変化はないため、3.1での変化は構造によるものである。

### 3.3 固有モジュールの利用方法による比較

固有モジュールの学習において事前知識の利用方法を検討した。学習の安定性は学習不可のfreezeが一番高く、scratchとlearnedは学習時の曲線が上下している。freezeではメタモジュールの重み変更されないため、固有モジュールの入力が安定した。scratchとlearnedではscratchの方が性能が高く、Empty環境での知識が負に働いたと考える。ゴールまでの最短を目指すことを学習しているため溶岩タイルを無視した行動が発生した可能性がある。

## 4 Atari2600環境における記号化

Atari2600環境であるDemonAttackにおいて事前知識の影響を確認した。学習はDDQN[6]で行った。

### 4.1 メタモジュールのグリッドサイズの変更

図6はDemonAttackにおいてメタモジュールのグリッドサイズを変更した学習結果である。メタモ

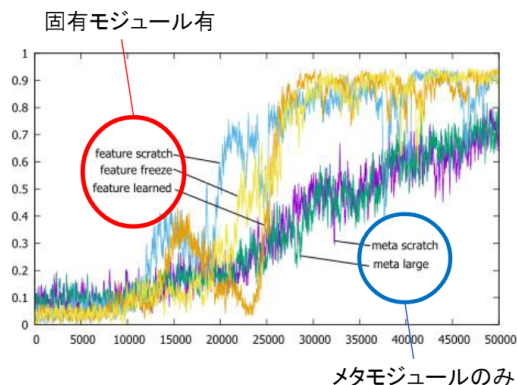


図5: 各モジュールの学習

ジュールでは記号化によって再構成した画面を利用しており、配置用のグリッドサイズが性能に及ぼす影響を確認した。グリッド分割数は画面の解像度となるため細かい方が情報量が大きくなると考えた。グリッドサイズ28x28と56x56の2通りで学習を行った。28x28では5000エピソードで約40、56x56では約17のスコアに到達した。ランダムエージェントによる平均スコアと比較してもグリッドサイズを少なくした方が良い性能を示した。今回のようなシューティングゲームではグリッドサイズが大きくなることで回避の行動を大きく取る必要が発生しスコアの向上につながったと考える。

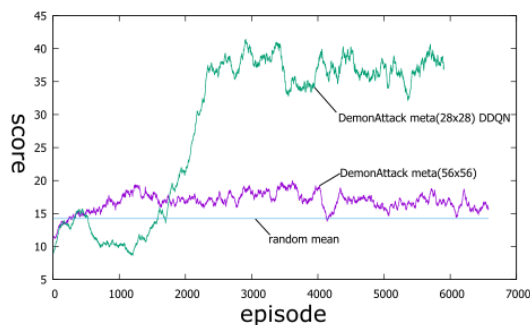


図6: グリッドサイズによる変化

### 4.2 事前学習による影響

図7はDemonAttackにおいてメタモジュールにDemonAttackとAssaultでの事前学習を利用した結果である。横軸はエピソード、縦軸は直近100エピソードの平均報酬、useDemonはDemonAttackで

の事前学習、useAssault は Assault での事前学習を行っている。どちらの事前学習を利用してスクラッチからの学習よりは早くスコアが向上している。別環境での事前学習でも基本的な行動は共通して有効である。

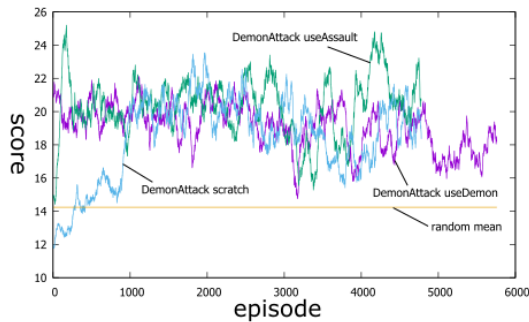


図 7: 事前学習メタモジュールによる変化

## 5 結論

画面をオブジェクトの位置に基づいて記号化するメタモジュールと固有モジュールを持つ記号化モデルを提案した。MiniGrid 環境における実験では記号化モデルの階層的な入力の有効性を示した。メタモジュールに利用する事前学習の条件を比較することで学習の安定性や性能の変化を確認した。Atari2600 環境ではメタモジュールに利用するグリッド分割数の変化での性能の違いや別環境の事前学習でも有効に働くことを示した。3 タイトル以上での比較が今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Jason Yosinski, Jeff Clune, Yoshua Bengio, and Hod Lipson. How transferable are features in deep neural networks? *CoRR*, Vol. abs/1411.1792, , 2014.
- [2] Kevin Frans, Jonathan Ho, Xi Chen, Pieter Abbeel, and John Schulman. Meta learning shared hierarchies. *CoRR*, Vol. abs/1710.09767, , 2017.
- [3] Chintan Trivedi, Antonios Liapis, and Georgios N. Yannakakis. Contrastive learning of generalized game representations. *CoRR*, Vol. abs/2106.10060, , 2021.

- [4] Kenny Young and Tian Tian. Minatar: An atari-inspired testbed for more efficient reinforcement learning experiments. *CoRR*, Vol. abs/1903.03176, , 2019.
- [5] Maxime Chevalier-Boisvert, Lucas Willems, and Suman Pal. Minimalistic gridworld environment for gymnasium. <https://github.com/Farama-Foundation/MiniGrid>, 2018.
- [6] Hado van Hasselt, Arthur Guez, and David Silver. Deep reinforcement learning with double q-learning. *CoRR*, Vol. abs/1509.06461, , 2015.

## 連絡先

〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

電気通信大学大学院

情報・工学ネットワーク専攻

望月亮佑

E-mail: m2131157@edu.cc.uec.ac.jp

# ファジィモデリングにおける段階的前件部縮小の効果

## Effects of Stepwise Precedent Narrowing in Fuzzy Modelling

○ <sup>1</sup>張 瑞飡, <sup>1</sup>西野 順二  
○ <sup>1</sup>Zhang Ruirui, <sup>1</sup>Nishino Junji  
<sup>1</sup>電気通信大学

<sup>1</sup>The University of Electro-Communications

**Abstract:** In this research, we improve the iterative rule generation mechanism for fuzzy modeling. First we develop an precedent narrowing algorithm to get a more accurate model. And next, we also introduce a random sampling method to obtain errors of each candidate models to make modeling faster. According to the results of simulations, these methods work effective enough.

### 1 はじめに

本研究の目的は大規模データを対象として逐次的にルールを生成するファジィモデリングの改良である。

ニューラルネットワークを用いた AI は学習結果を人間が理解することが難しい。これに対して、ファジィ理論に基づくファジィモデリングはこの問題を解消する方法のひとつである。最近の AI は大規模なデータとその学習を前提としている。しかし、ファジィ理論、特にファジィモデリングに関する研究には大規模データを扱うものが少ない。

本研究はファジィモデリングを利用した AI の作成に向けて、大規模データを扱う。逐次法によるファジィモデリング [1] について検討し、[2][3] を参考にルールの追加に前件部の探索（縮小）やランダムサンプリングによってモデルの誤差評価を高速化する手法を追加することで、その改良を試みた。

### 2 ファジィモデル

ファジィモデルは入力を受け、モデル内のルールを利用して推論し、結果を出力するシステムである。ファジィモデルは複数のファジィルールによって構成される。

#### 2.1 ファジィ集合、メンバーシップ関数

要素  $x$  がファジィ集合  $A$  に属する度合いを帰属度と呼び、帰属度をメンバーシップ関数  $\mu_A(x) \in [0, 1]$  を用いて表す。また、本研究ではメンバーシップ関数の形を図 1 のような左右対称な三角形に設定する。このメンバーシップ関数  $\mu(x)$  を式 (1) で与える。ここで、 $d = m_3 - m_2 = m_2 - m_1$ ,  $d > 0, d \in \mathbb{R}$ 。本研究では図 1 と式 (1) の  $m_2$  を前件部の中心、 $d$  を前件部の幅とする。

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - m_1}{d} & (m_1 < x \leq m_2) \\ 1 - \frac{m_3 - x}{d} & (m_2 < x < m_3) \\ 0 & (x \leq m_1, m_3 \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

#### 2.2 ファジィルール、ファジィ推論、ファジィモデル

「 $x$  is  $A$ 」というようなファジィ集合の言語的な表現による命題はファジィ述語といい、これの真理値はメン

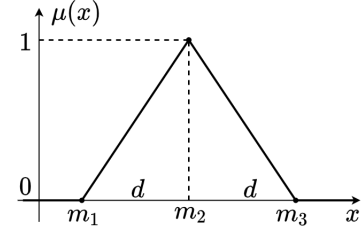


図 1: 対称な三角形のメンバーシップ関数

バーシップ関数  $\mu_A(x)$  によって与える。ファジィルールは「IF...THEN...」のように記述されるファジィ述語によって構成される [4]。ファジィルールの「IF...」の部分の前件部、「THEN...」の部分を後件部という。本研究では、後件部のファジィ集合を  $c_k$  実数一点とした簡略化ファジィ推論法を用いる。よって、ファジィルール  $R_k$  は式 (2) のようになる。式 (2) における  $m$  は  $R_k$  が扱える入力の次元数である。

$$R_k : \text{IF } x_k^1 \text{ is } A_k^1 \text{ and } \cdots \text{ and } x_k^m \text{ is } A_k^m \text{ THEN } y \text{ is } c_k \quad (2)$$

ファジィルールを利用してファジィ推論ができる。入力  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$  が与えられたとき、ファジィルール  $R_k$  (の後件部) が採択される度合いを適合度  $w_k(\mathbf{x})$  と呼び、式 (3) によって与える。

$$w_k(\mathbf{x}) = \min(\mu_{A_k^i}(x_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$r$  個のファジィルール  $R_i (i = 1, \dots, r)$  を持つファジィモデルを  $F$  として、入力  $\mathbf{x}$  に対して  $F$  の推論結果  $F(\mathbf{x})$  は式 (4) によって与える [5]。

$$F(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x}) c_i}{\sum_{i=1}^r w_i(\mathbf{x})} \quad (4)$$

### 3 逐次法の改良案

逐次法はモデルの誤差が改善されなくなるまでルールを逐次的に追加するファジィモデリング法である。

追加するルールの前件部のファジィ集合の幅が常に一定な逐次法では、柔軟性に欠けて、モデリングの精度に

### Algorithm 1 改良した逐次法によるファジィモデリング

- 1: 誤差が最も大きい  $(x_1, \dots, x_m)$  を見つけ、次のルールの前件部の中心とする
- 2: 誤差が一番小さくなるような後件部の値  $c_k'$  を見つけ、次のルールの後件部の値とする
- 3: 前件部を縮小する条件に当てはまるとき、前件部を縮小して、後件部を探索する
- 4: 誤差の改善率が最も良いルールをモデルに追加する
- 5: 誤差が改善されなくなる、または追加したルール数が一定数になるまで 1.2.3.4. を繰り返す

も上限がある。これは異なる場合でモデルの精度を高めるには、幅が異なるルールが必要になるからである。これを改善するため、提案手法では前件部を予め大きく設定し、その後段階的に縮小するステップを追加した。改良したアルゴリズムを Algorithm1 に示す。

モデルの誤差を全数計算によって獲得する場合、入力データの数  $N$ 、入力の次元数を  $m$ 、後件部の探索回数を  $t$ 、ファジィルールの数を  $r$ 、前件部の範囲を連続で縮小できる最大回数を  $l$  として、改良した逐次法によるファジィモデリングの計算量は  $O(r^2 N m t l)$  である。 $N$  は実質誤差を計算するとき計算される入力データの数であるため、誤差の計算方法を改良すれば計算量も減らすことができる。

## 4 実験

### 4.1 改良手法の性能の確認

本研究の逐次法の終了条件は、ルール数が設定値 50 に達したときとした。

本実験では  $f(x) = x^2$  と  $f(x) = \sin x$  を目標関数としてモデリングし、改良手法の性能向上を確認した。図 2 と図 3 に、それぞれ元の手法と改良手法による  $f(x) = \sin x$  のモデリング結果を示す。改良手法と元の手法の違いを確認するため、 $f(x) = \sin x$  のモデリングにおけるそれぞれのモデルがルールの追加に連れて全数誤差（以下は総誤差と呼ぶ）がどのように変化するかを確認し、その結果を図 4 に示す。比較の結果、改良手法はモデリングの前半で元の手法より素早く誤差を改良できなかったが、後半では元の手法がそれ以上誤差を改善できないのと違って更にモデルの精度を上げていた。この結果から、追加するルールの数が一定の場合、改良手法の方がより精度の良いモデルを獲得することができることが分かった。

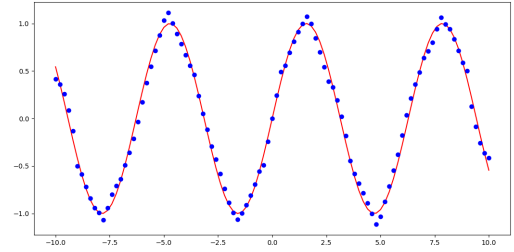


図 2: 元の手法による  $f(x) = \sin x$  のモデリング結果

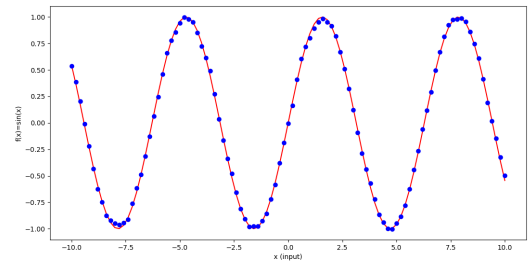


図 3: 改良手法による  $f(x) = \sin x$  のモデリング結果

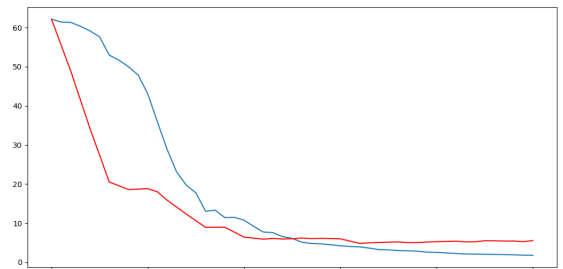


図 4:  $f(x) = \sin x$  の違うモデリング中の総誤差の変化の比較図（青：改良手法、赤：元の逐次法）

### 4.2 複雑な関数への対応の確認

実験は六つの二変数関数を目標関数としてモデリングした（訓練データ数  $N = 10201$ ）。それらのモデリング結果とモデルの前件部範囲図をそれぞれ図 5 と図 6、図 7、図 8、図 9、図 10 に示す。結果から、改良手法による複雑な関数のモデリングができ、モデルの誤差も許容範囲内であるといえる。

ただし、検討しなければならないところがある。図 6 の  $f_2(x)$  のような周期的な関数に対して、周期的なルールやメンバーシップ関数を採用した方が明らかに効率が高いが、本手法は毎回新しいルールを追加する形になっており、効率が比較的劣ってしまう。図 7 の  $f_3(x)$  のような関数に対して、範囲が小さいが高く尖っている部



分は誤差が高いため、アルゴリズムは最初にここを中心  
にルールを追加していく。その誤差が減っていったら、  
もう一方の低く尖っているが範囲が大きい部分を中心  
にルールを追加していく。先に範囲の小さい部分に適応  
する為にルールの前件部の範囲が縮小されているため、範  
囲の大きい部分の誤差を修正する効率が低くなってしま  
う。この問題について、前件部の縮小だけでなく、適切  
な時に前件部を拡大する必要もあると考えられる。図 10  
の  $f_6(x)$  のような、 $x_1$  方向では狭く、 $x_2$  方向では広い  
ようなルールやメンバーシップ関数があった方が、ルール  
の効率が良い場合に対して、本手法の効率も比較的に低  
いと思われる。この問題を解消するために各次元ごとに  
縮小を行う手法が考えられるが、次元数の増加に連れて  
計算量が急増することが予想されるため、計算量と精度  
のバランスを慎重に考慮して改良する必要があると思う。

もう一つ、モデリングにかかった計算時間が長いとい  
う問題に対して、高速化の方法が求められる。

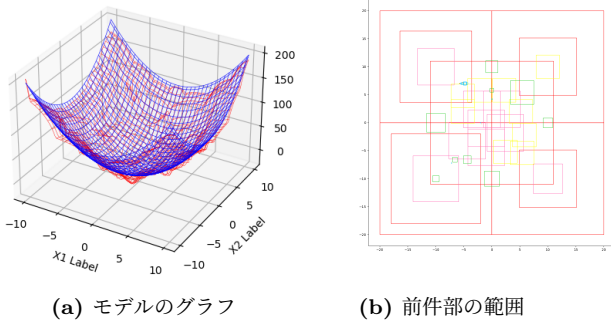


図 5:  $f_1(x) = x_1^2 + x_2^2$  のモデリング結果

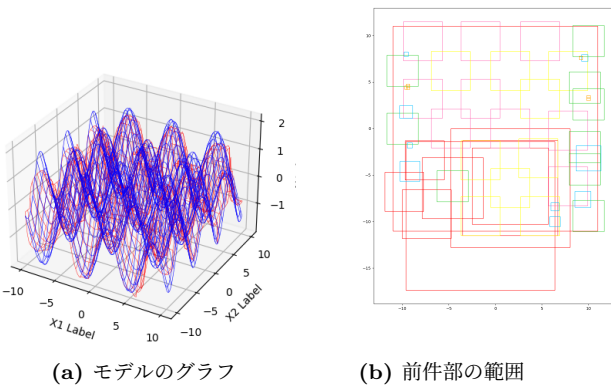


図 6:  $f_2(x) = \sin x_1 + 2 \cos x_2$  のモデリング結果

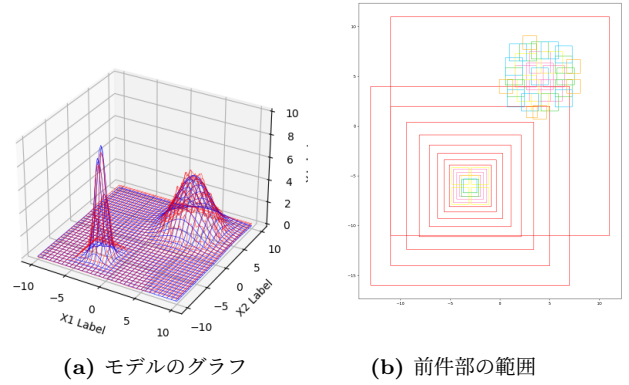


図 7:  $f_3(x) = 10e^{-(x_1+3)^2-(x_2+6)^2} + 5e^{-(x_1-4)^2-(x_2-5)^2}$  の  
モデリング結果

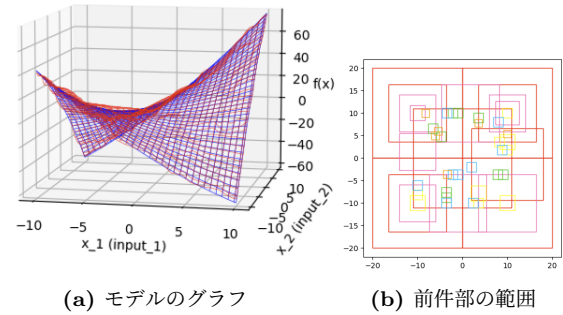


図 8:  $f_4(x) = (x_1^2 - x_2^2 + 6x_1x_2 + 8x_1 + 9x_2) * 0.1$  のモデ  
リング結果

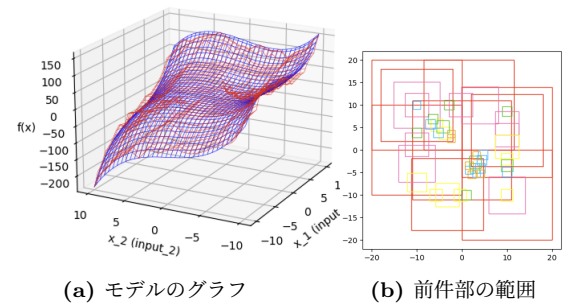


図 9:  $f_5(x) = (x_1^3 - x_2^3 + 4x_1x_2 + 8x_1 + 9x_2) * 0.1$  のモデ  
リング結果

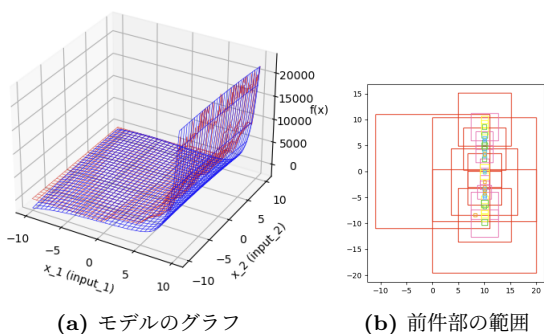


図 10:  $f_6(\mathbf{x}) = x_1^3 - 4x_2^2 - 8x_1x_2 + 5 \sin(x_1 + x_2^2) + e^x$  のモデリング結果

### 4.3 ランダムサンプリングによる高速化

計算の高速化のため、総誤差の代わりに、ランダムサンプリングによって誤差を計算する方法を採用して、比較した。本実験は、サンプリング数を  $N/10 = 1020$  として、ランダムサンプリングを行った。また、 $f(\mathbf{x}) = x^2$  を目標関数とする。ランダム誤差で 20 回モデリングし、それらの結果と総誤差の結果と比較した。実験の結果を表 1 に示す。

表 1: ランダムサンプリングによってモデリングの実行結果

番号 $i$	モデリング時間 (秒)	誤差 $e_i$
0	16055	59465
1	766	131984
2	847	69829
3	795	122137
4	753	209270
5	879	83206
6	795	230490
7	789	229427
8	718	178322
9	913	133914
10	877	307658
11	819	331421
12	759	332729
13	820	157810
14	843	246656
15	915	221882
16	792	314993
17	791	120403
18	854	79580
19	869	96206
20	951	82008

実験の結果から、総誤差を利用した方のモデルの最終総誤差  $e_0$  に対して、ランダム誤差の方は 20 回の中、4 回の結果の最終総誤差が  $e_0$  の 1.5 倍以下であった。ランダム誤差の方のモデリングに掛かった平均計算時間が 827 秒であるため、およそ  $827 \times 20/4 = 4135$  秒で比較的に良いモデルを獲得できることが望まれる。これは総誤差の方の計算時間が 16000 秒に比べると、約 4 倍速くなっている。よって、ランダムサンプリングを利用することにより、アルゴリズムの高速化が可能であると考えられる。

## 5 おわりに

本研究は将来 AI の作成にファジィ理論を利用するため、大規模データを扱う逐次法によるファジィモデリングについて検討し、改良した。段階的に前件部を縮小する逐次法はより高い精度のモデルを獲得できることを確認し、複雑な関数についてのモデリングもできることを示した。ランダムサンプリングによる高速化改良アルゴリズムを実装し、実験により 4 倍速いことを確認した。

今後の課題として、更に複雑な関数への対応の確認とビッグデータに対応できるようにすることを目指す。

## 参考文献

- [1] 大海哲平. 大規模データからのファジィモデルの獲得アルゴリズム. 電気通信大学修士卒論, 2020.
- [2] 市橋秀友, 本多克宏, 野津亮. ファジィ c-平均識別器の訓練時間の改善. 知能と情報, Vol. 23, No. 5, pp. 783–793, 2011.
- [3] 石岩, 水本雅晴, 湯場崎直養, 大谷正幸. 最急降下法によるファジィ規則の自動チューニング一手法. 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 4, pp. 757–767, 1996.
- [4] 水本雅晴. ファジィ推論 (1)(ファジィ理論入門 (8)). 日本ファジィ学会誌, Vol. 4, No. 2, pp. 256–264, 1992.
- [5] Tomohiro Takagi and Michio Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, No. 1, pp. 116–132, 1985.

## 連絡先

張 瑞叡

電気通信大学 情報・ネットワーク工学専攻 西野研究室

E-mail: c2231092@edu.cc.uec.ac.jp

# 超解像と3次元形状を用いたリンパ節の転移有無の分類精度改善

Improvement of Classification Accuracy for Metastasis of Lymph-node using Super-Resolution and 3D Shape

○<sup>1</sup> 鈴木 康介, <sup>2</sup> 岩堀 祐之, <sup>1</sup> 舟橋 健司, <sup>3</sup> 大内 晶, <sup>3</sup> 清水 泰博

<sup>1</sup>Kosuke Suzuki, <sup>2</sup>Yuji Iwahori, <sup>1</sup>Kenji Funahashi, <sup>3</sup>Akira Ouchi, <sup>3</sup>Yasuhiro Shimizu

<sup>1</sup> 名古屋工業大学

<sup>2</sup> 中部大学

<sup>3</sup> 愛知県がんセンター

<sup>1</sup>Nagoya Institute of Technology

<sup>2</sup>Chubu University

<sup>3</sup>Aichi Cancer Center

**Abstract:** Diagnosis of cancer metastasis to the lymph-node using an AI-based approach has been important these days in the medical field. However, it generally requires a large datasets. In this study, we propose to improve the accuracy of classification of cancer metastasis with small datasets in lymph-node by performing super-resolution preprocessing of CT images and using the 3D shapes of lymph-node.

## 1 はじめに

がんの病期診断では、リンパ節へのがん転移の有無が重要であるとされている。そして、医師の負担軽減や経験量の差による診断のばらつきを抑えるため、機械学習の導入が重要視されている。機械学習を用いたがん転移診断のための先行研究として、3DCNNを用いたリンパ節検出手法[1]等が提案されている。しかし、CT画像を学習に使用するには、患者の同意や医師によるアノテーション作業が必要であり、大量のデータセットを準備するのは一般に困難である。そのため、本研究では少量のデータセットからでも学習を十分に進めるために、前処理としてCT画像の超解像を行い、さらに学習にリンパ節の3次元形状を使用することで、リンパ節のがん転移有無の分類精度向上を試みた。

## 2 提案手法

本研究では愛知県がんセンターから提供されたデータセットを使用した。このデータセットは医師によって患者51人分のCT画像に、転移なしリンパ節596個、転移ありリンパ節43個の位置がアノテーションされている。このデータセットに対し、超解像と3次元形状化を行うことで、追加のデータを必要とせずに分類精度向上を行う手法を提案する。

### 2.1 超解像手法

超解像にはSRCNN[2]を用いる。SRCNNには、事前にCT画像の背景以外の部分から $64 \times 64$ ピクセルでクロップした画像を正解データ、それらを $32 \times 32$ ピクセル相当に低解像度化した画像を入力データとするデータセットを使用し、CT画像の超解像タスクを学習させた。その際、データ拡張として上下・左右反転およびCutBlur[3]を行った。分類を行う際は、前処理として各リンパ節周辺を $64 \times 64$ ピクセルにクロップした画像を前述のSRCNNに入力し、 $128 \times 128$ ピクセルに超解像された画像を得て、それを分類を行うモデルに入力する。SRCNNを用いた超解像の例を図1に示す。



(a) 入力

(b) 出力

図1: SRCNNの実行例

### 2.2 リンパ節の3次元形状化手法

リンパ節の3次元形状の取得には画像処理ソフトウェア3D Slicer[4](<https://www.slicer.org/>)のGrow from seed セグメンテーション機能を用いる。これは、CT画像に対してマスキングしたい部位の一部に印をつけると、印を元に自動で部位全体を3Dマスキングする機能である。本研究のデータセットはリンパ節の位置情報が含まれているため、それを元に印をつけることで、自動でリンパ節の3次元形状データを生成することができる。この手順で生成した3次元形状の例を図2に示す。生成した3次元形状はリンパ節部分を1、リンパ節でない部分を0とする $64 \times 64 \times 16$ のボクセルデータとして出力し、超解像後のCT画像とサイズを合わせるため $128 \times 128 \times 16$ に拡大したのち、分類を行うモデルに入力する。

## 3 実験

提案手法の有効性を確認するため、超解像による前処理や3次元形状を用いない場合との比較実験を行った。

### 3.1 手順

提案手法で使用する3D CNNモデルを図3に示す。超解像後の $128 \times 128$ ピクセル $\times 16$ スライス of CT画像と、 $128 \times 128 \times 16$ の3次元形状の2つの入力を持ち、それぞれに対して3次元畳み込みと3次元プーリングを行う。その後2つの行列同士を乗算し、3次元畳み込みと3次元プーリングを2回行う。最後に全結合

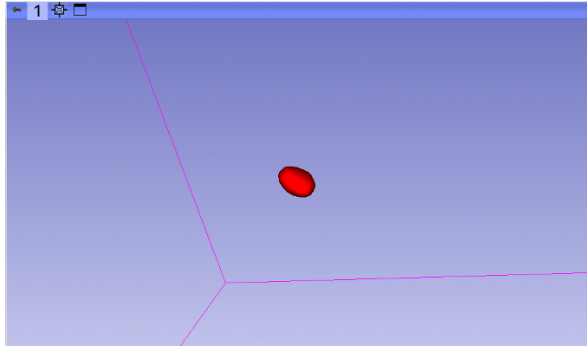


図 2: 3D Slicer で生成した 3 次元形状の例

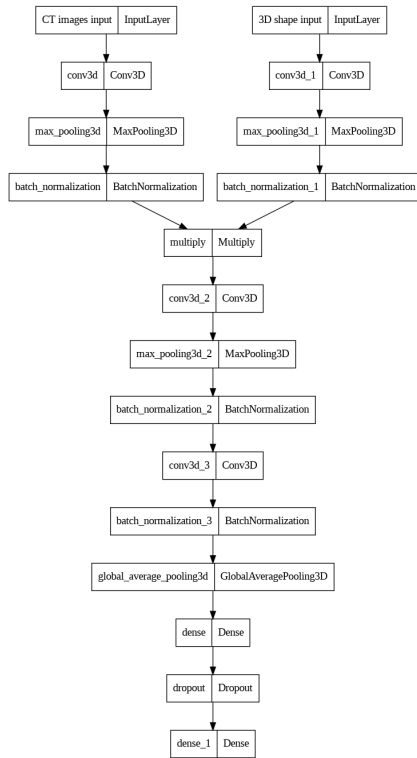


図 3: 3D CNN モデル

層によりリンパ節が転移ありである確率を出力する。比較対象として、従来手法では  $64 \times 64$  ピクセル  $\times$  16 スライス の CT 画像を入力した。拡大のみを行う場合は  $128 \times 128$  ピクセル  $\times$  16 スライス へ単に拡大した CT 画像を入力した。また、3 次元形状を用いない場合は、図 3 の 3D shape input 層から multiply 層までを削除したモデルを使用した。データ拡張として  $-10^\circ$  から  $10^\circ$  のランダム回転を行ない、その際にクラスの不均衡の解決のため、転移ありデータのオーバーサンプリングを行った。各手法において 4 分割交差検定を行った。

### 3.2 結果

実験により得られた各評価指標の平均値を表 1 に示す。超解像のみの場合と、従来手法および拡大のみの場合の比較から、超解像の効果が確認できた。一般的な CT 機器の解像度は  $512 \times 512$  であり、その制限によって失われた詳細な情報を超解像により復元できたこと

表 1: 実験結果

手法	Acc.	Pre.	Rec.	F 値
従来手法	0.910	0.941	0.884	0.912
拡大のみ	0.893	0.913	0.877	0.895
超解像のみ	0.962	<b>0.993</b>	0.931	0.961
提案手法	<b>0.968</b>	0.973	<b>0.964</b>	<b>0.968</b>

で、精度の向上が認められた。また、超解像のみの場合と提案手法の比較から、3 次元形状の効果も確認できた。3 次元形状は、画像内のどこがリンパ節であることを表すデータであり、分類を学習する際の情報量が増加したことで、精度の向上が認められた。

これらの結果から、提案手法が最も F 値が高く、総合的に分類精度が向上していることがわかる。特に、がん転移分類において重要視される Recall が向上しており、提案手法の有効性が確認できた。

## 4 むすび

本研究では、SRCNN での超解像と 3D Slicer で生成したリンパ節の 3 次元形状を利用することで、少量のデータセットでもがん転移有無の分類精度が向上することを確認できた。提案手法では追加のデータが必要ないため、大量のデータの入手が困難な分類タスクの精度向上に効果的である。今後の課題として、より高精度な超解像を実現する手法を用いて、さらに正確な 3 次元形状を取得することが挙げられる。

## 謝辞

本研究は科研費基盤 (C)(20K11873) および中部大学研究費の支援による。ここに感謝申し上げる。

## 参考文献

- [1] A.-I. Iuga, et al., “Automated detection and segmentation of thoracic lymph nodes from ct using 3d foveal fully convolutional neural networks,” BMC Medical Imaging, vol.21, no.1, pp.1–12, 2021.
- [2] C. Dong, et al., “Image super-resolution using deep convolutional networks,” IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol.38, no.2, pp.295–307, 2015.
- [3] J. Yoo, et al., “Rethinking data augmentation for image super-resolution: A comprehensive analysis and a new strategy,” Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.8375–8384, 2020.
- [4] A. Fedorov, et al., “3d slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network,” Magnetic resonance imaging, vol.30, no.9, pp.1323–1341, 2012.

# 観戦画面情報を用いたFPSゲームの勝敗予測

Predicting winners in FPS games using information from spectator screen

○<sup>1</sup> 川口 蒼,                      <sup>1</sup> 西野 順二  
○<sup>1</sup> Sou Kawaguchi,              <sup>1</sup> Junji Nishino  
<sup>1</sup> 電気通信大学

<sup>1</sup>The University of Electro-Communications

**Abstract:** Predictions of game winners were made based on the position and survival status of characters acquired from the spectator screen. Five different prediction models were created, and their accuracy was compared. The prediction by random forest was the most accurate. A video visualizing the battle situation based on the predicted win rate was also created.

## 1 はじめに

本研究の目的は、FPS ゲームの VALORANT を題材に、観戦画面から取得したキャラクターの位置や生存状況などの情報を用いてラウンドの勝敗を予測し表示することで、観戦者に対するゲーム状況理解の支援である。将棋などの中継で行われるような、試合動画に勝敗の予測状況を重ねて表示することで、より理解しやすいシステムを構築する。また、複数種類の予測モデルを作成し、その予測精度を比較検討する。

観戦画面から情報を取得する理由は、情報取得元の入手のしやすさである。本研究はできるだけ多くの人が使えそうなシステムを目指している。そのため、情報取得のしやすさが重要な点であると考えた。本研究では、実際に行われたプロプレイヤーによる試合動画を使用しているため、試合の動画をダウンロードするだけで利用が可能となる。

国内eスポーツ大会配信のスケジュール情報サイト「TAIYORO」によると、2022年4月から6月末までの国内におけるeスポーツ大会の累計視聴時間はおよそ14.6億分で、前年と比べて70%増加したことが明らかとなり、より一層の盛り上がりが確認できる[2]。一方、eスポーツとして人気の高いゲームは競技性が高く、初めてeスポーツを観戦する人は試合状況を一目では理解しにくいという欠点があると考ええる。

現在、将棋などの中継放送では観戦画面上にAIの勝敗予測が表示されることがあり、将棋をよく知らない人でも簡単に戦局を掴める。同様にeスポーツの分野においても勝敗予測を画面に表示することで、ゲームを深く知らない視聴者にも内容がわかりやすくなり、誰でも気軽に観戦できるようになると考えた。

VALORANT を本研究の題材に選んだ理由は大きく2つある。1つ目は、試合進行中のデータである位

置情報のトラッキングデータなどを用いた勝敗予測研究などが確認できなかったこと。2つ目はデータが取りやすいことである。選手の各視点以外に、観戦画面上には常にミニマップやキル情報などが流れているため、画面内で多くの情報を取得でき、本研究の目的に当てはまっていることから本研究の題材に選んだ。

## 2 方法と手順

本研究で提案するアルゴリズムは、以下の手順により構成される。

- (i) ゲームの観戦画面から各キャラクターの位置情報や各チームの生存状況を取得する
- (ii) 取得した各キャラクターの位置情報をもとに各チームの重心座標を計算する
- (iii) 以上のデータを入力とした複数の予測モデルで勝敗を予測し精度を比較する
- (iv) 線形モデルの予測値を用いて戦況を可視化する動画を作成する

なお、本研究におけるデータ取得のための素材は、2種類のマップを対象に、VALORANTの世界大会及びその予選であるVCT Champions Tour [3]の試合動画30本を用いた。そのうち26本をモデルの学習に使用し、4本をテストデータとして使用した。

## 3 観戦画面からのデータ取得

本研究ではOpenCV [4]のテンプレートマッチングを利用して、観戦画面から各キャラクターの位置情報、各チームの生存状況、現在のラウンド状況という3種類のデータを8フレームごとに取得する。本研究では30本の試合動画を用いて、3種類のデータをそれぞれ555,280個取得し、位置情報の平均検出率は約70.2%だった。図1にVALORANTにおける観戦画面の一例と画面構成を示す。

観戦画面左上のミニマップから、プレイヤーが操作





図 1: VALORANT の観戦画面の一例と画面構成

するキャラクターの位置情報を取得する。ミニマップ上の各キャラクターのアイコンを検出のテンプレートとして使用し、最も類似度が高かった走査位置を各キャラクターの位置情報とする。各チームの位置情報の平均値を計算し各チームの重心とした。

画面右に表示されるキルログから各チームの生存状況を取得する。キルログとは、キルイベントに対する更新ログを表す。キルログ上の各キャラクターのアイコンを検出のテンプレートとして用いた。二進数を用いて各チームの生存状況を数値化することで位置情報との連携を可能にした。

ラウンド状況の取得では、各ラウンドの残り時間上部に表示されるラウンド数をテンプレートとして検出した。次のラウンドに移行した時、キルログからの情報取得により減少した各チームの生存人数と生存状況を初期状態に戻す。

#### 4 ラウンドの勝敗予測

本研究では、観戦画面から取得した 10 人分のキャラクターの位置情報  $(x,y)$ 、2 チームの重心  $(x,y)$ 、2 チームの生存人数の合計 26 次元のデータを使用して複数の予測モデルを作成する。表 1 に予測モデルで使用する具体的な特徴量を示す。

表 1: 勝敗予測に用いた特徴量

概要	次元
2 チームの生存人数	2
10 キャラクターの位置情報 $(x,y)$	20
チームごとの位置情報の平均 $(x,y)$	4

##### 4.1 評価値付与方法の検討

ある時刻  $t$  における 26 次元の状態ベクトル  $x(t)$  からの勝率をの予測値を求めるためのモデルを作る。

試合の勝敗ログデータに勝利可能性の評価値を付与しこれを教師データとする。ここでは、この状態に対する評価値の付与方法を説明する。

本研究では、次の 3 種類の評価値付与方法を比較する。各付与方法で線形モデルを作成し、その予測精度を比較した。試合経過時間  $t[s]$  における評価値  $W_t$  とする。評価値は赤色で表示されるチームの勝敗によって  $[-1,1]$  の範囲で付与する。赤色で表示されるチームが勝利した場合は最終的に 1、敗北した場合は最終的に -1 を付与する。

- (i) ラウンド序盤の評価値に重みをつける。
- (ii) 初項 0 公差  $\pm 0.2$  で評価値をつける。
- (iii) 初項  $\pm 0.1$  公比 1.58 で評価値をつける。

(i) では、 $t \leq 30$  の時  $W_t = \pm 0.1$  とする。また、 $30 < t \leq 40$  では評価値を  $W_t = \pm 0.2$  とする。それ以降は、1 もしくは -1 をつける。

評価値付与方法の (ii) と (iii) では、各試合について、試合時間を 6 等分し、それぞれの時間区間の状態に 0.0 から 1.0 までの 5 段階の評価値を与える。5 段階評価のため、(ii) の等差法では  $1.0/5=0.2$  の公差とし、(iii) の等比法では 10 の 5 乗根で 1.58 を公比とした。(ii) では、初項 0 公差  $\pm 0.2$  で評価値をつける。(ii) における  $W_{t+1}$  は (1) 式のとおりである。

$$W_{t+1} = W_t \pm 0.2 \quad (1)$$

$$W_0 = 0 \quad (2)$$

(iii) は、初項  $\pm 0.1$  公比 1.58 で評価値をつける。(iii) における  $W_{t+1}$  は (3) 式のとおりである。

$$W_{t+1} = 1.58W_t \quad (3)$$

$$W_0 = \pm 0.1 \quad (4)$$

評価値のつけ方と線形モデルで検討した場合の予測精度を表 3 にまとめる。

表 2: 勝敗評価値のつけ方と線形予測精度

評価値のつけ方	平均予測精度
(i)	75.24%
(ii)	76.43%
(iii)	76.43%



#### 4.2 複数の予測モデルを用いた勝敗予測精度の比較

サポートベクターマシン, 決定木, ランダムフォレスト, XGBoost の 4 種類の予測モデルを作成し, 予測精度を比較した. 評価値のつけ方には, 線形モデルでより高い精度を得た等差数列を採用した.

4 種類の予測モデルの予測精度を表 4 に示す.

表 3: 作成した予測モデルの予測精度比較

予測モデル	平均予測精度
サポートベクターマシン	82.86%
決定木	82.86%
ランダムフォレスト	84.05%
XGBoost	75.24%

#### 4.3 SVM と決定木におけるパラメータチューニング

SVM と決定木による予測ではパラメータのチューニングを行った. SVM ではソフトマージンの厳しさを表すパラメータ  $C$  をチューニングした.  $C$  の初期値は 1.0 である. チューニングした  $C$  の値とその予測精度の比較を表 5 に示す. 決定木では, 決定木の最大の深さをチューニングした. 決定木の最大の深さに初期はなく, ノードを分割するために必要な最小サンプルサイズ未満になるまで分岐が続く. チューニングした決定木の最大の深さとその予測精度の比較を表 6 に示す.

表 4: SVM におけるパラメータ  $C$  と予測精度の比較

$C$	予測精度
1.0	78.57%
0.5	83.33%
0.1	85.71%
0.05	83.33%
0.01	85.71%
0.001	73.81%

#### 4.4 線形モデルの予測値を利用した戦況の可視化

線形モデルによって計算された予測値を利用して, 観戦画面に重ねて戦況を可視化した動画を作成した. 動画の作成には観戦画面から取得したラウンド状況のデータを使用することでゲームの進行状況を観測し, ゲーム中断中に予測の可視化を行わないようにした. 作成した動画の様子を図 2 に示す.

表 5: 決定木の最大深度と予測精度の比較

最大深度	予測精度
2	63.33%
3	63.33%
4	82.86%
5	75.48%



図 2: 予測値の動画を重ねた観戦画面

## 5 まとめ

### 5.1 結論

本研究では, テンプレートマッチングを用いて観戦画面からゲーム上のキャラクターの位置と生存状況, ラウンドの情報を取得し, そのデータを利用した勝敗予測モデルを作成した. また, 3 種類の評価値付与方法について検討した.

その結果, 時系列で評価値が徐々に大きくなるような評価値付与方法がより高い精度を示した.

また, 線形モデルにおいて平均 76.43% の予測精度を得た. また, 線形モデルを用いて予測した値を用いて, 戦況を可視化する動画を作成した. 複数の予測モデルを作成し, SVM による予測では平均 82.86% の予測精度を得た. 決定木による予測では平均 82.86% の予測精度を得た. ランダムフォレストによる予測では平均 84.05% の予測精度を得た. 最後に, XGBoost による予測では平均 75.24% の予測精度を得た.

予測精度を比較した結果, ランダムフォレストが最も高い予測精度を得た.

SVM と決定木による予測ではパラメータのチューニングを行った. SVM ではソフトマージンの厳しさを表すパラメータ  $C$ , 決定木では最大の深さをチューニングした. その結果, 本研究において, SVM では  $C=0.1, 0.01$  の場合が予測精度 85.71% と最も高精度となり, 決定木では最大の深さを 4 にした場合が予

測精度 82.86%と最も精度の高いモデルとなった。

## 5.2 今後の課題

今後の課題として、位置情報取得の精度を上げる必要がある。現状、位置情報の平均取得精度は約 70.2%にとどまっている。様々なパターンマッチングの技術を利用し、より正確な位置情報を取得することが本システムの信頼につながる。

また、より正確な予測モデルを作成するには、ゲーム特有の特徴を考える必要がある。VALORANT の勝利条件として、爆弾の設置と解除がある。本研究では、爆弾設置は観戦画面から取得できるが、解除は状態が複数種類あり、正確な検出が難しいと考えたため、爆弾のイベントを考慮しなかった。しかし、実際のゲームでは重要なイベントであり、爆弾設置前後でプレイヤーの動きが変わる場合があるため、考慮することでより精度の高い予測モデルが得られると考える。

## 参考文献

- [1] e スポーツとは — 一般社団法人日本 e スポーツ連合オフィシャルサイト  
[https://jesu.or.jp/contents/about\\_esports/](https://jesu.or.jp/contents/about_esports/)
- [2] 2022 年 4-6 月 国内における e スポーツ大会の累計視聴時間は前年比 70%増を記録。配信された大会日程は 350 件以上（データソース：TAIYORO）  
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000022.000045650.html>
- [3] ライアットゲームズ, 2022 VALORANT CHAMPIONS TOUR,  
<https://valorantesports.tokyo/>
- [4] OpenCV. <https://opencv.org/>
- [5] 栗田多喜夫, サポートベクターマシン入門.  
<https://home.hiroshima-u.ac.jp/tkurita/lecture/svm.pdf>
- [6] Leo Breiman, Random Forests, Machine Learning 45, 5-32 (2001).  
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [7] Tianqi Chen, Carlos Guestrin, XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, p785-794, 2016-08-13.  
<https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>

## 連絡先

〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1  
電気通信大学  
I 類コンピュータサイエンスプログラム  
川口蒼  
E-mail: [k1810187@edu.cc.uec.ac.jp](mailto:k1810187@edu.cc.uec.ac.jp)

# ライブ配信の切り抜き動画の分析による 切り抜き動画作成支援に関する研究

## Analyzing “Kirinuki” Videos of a Live Streaming to Support Video Edit

○<sup>1</sup>植田 匠, <sup>1</sup>橋山 智訓  
○<sup>1</sup>Takumi Ueda, <sup>1</sup>Tomonori Hashiyama  
<sup>1</sup>電気通信大学大学院 情報理工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Informatics and Engineering,  
The University of Electro-Communications

**Abstract:** In this study, the author collected and analyzed “kirinuki” videos from YouTube live streaming. “Kirinuki” video is a short video which summarizes a long streaming video. The purpose of this study is to find out the features and requirements of “kirinuki” video. Findings will help us to set the guidelines to reduce the burden on those who edit “kirinuki” videos. This paper describes the results of the regression and clustering analyses.

### 1. はじめに

近年、YouTube などでのライブ配信が増加している。ライブ配信とは、YouTube などのライブ配信プラットフォーム上でゲーム実況を行う配信や雑談を行う配信などを指しており、本研究では特にゲーム実況配信に焦点を当てている。ゲーム実況とは、ゲームをプレイしながらそのプレイや状況について話したり、ゲーム内の出来事に対してリアクションしている様子を配信することである。

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の拡大により、ライブ配信の需要は高まっている。日本におけるライブ配信の視聴時間は、COVID-19 が厚生省指定感染症と告知されてから、2 ヶ月ほどで視聴時間が約 44 % (1100000 時間) 上昇している。COVID-19 の拡大により増加した在宅時間を利用してライブ配信の視聴を行う人が増えた結果だと考えられる。

配信やその視聴時間が増加するに伴って切り抜き動画の数も増えている。切り抜き動画とは、オリジナルのライブ配信動画から、一部のシーンを切り抜き、編集してつなぎ合わせた動画のことである。一部のシーンとは、見所となる盛り上がった場面を指している。ゲーム配信であれば、上手いプレイや珍しい現象が起きた時、雑談配信であれば、面白い話題や驚くべき話題が出た時などが該当する。

近年 e スポーツの視聴時間が増加しており、さらに、切り抜き動画の視聴習慣があることも分かっている[2]。調査対象の約 80% の人が切り抜き動画を視聴したことがあると回答している。週に 1 回以上見る人が全体の約 70% を占めており、オリジナルのライブ配信動画ではなく、切り抜き動画を視聴する理由としては、「プロレベルのプレイを気軽に視聴したいため」、「大会や配信者の面白い部分だけ視聴したいため」などの理由が多い。

切り抜き動画を作成する手順は以下の通りである。

1. 切り抜きたい配信者と元となるライブ配信を決める
2. そのライブ配信を実際に視聴し、切り抜きたい箇所を決める

3. 切り抜きたい箇所のみをつなぎ合わせ、字幕を入れるなどの編集を施す

切り抜き動画を作成するためには、配信を実際に視聴して切り抜きたい箇所を決め、編集を施す必要があり、元となるライブ配信の時間が長いほど、切り抜き動画作成の負担は大きいものとなる。

配信者は数多く存在する上に、配信者によって配信時間は異なり、中には 10 時間以上ものライブ配信も存在する。視聴者が視聴したい配信をすべて視聴しようとするとは非常に多くの時間を必要とする。切り抜き動画を作成する人にとっても、数多く存在する配信者の長時間のライブ配信に全て目を通し、見所を見つけて編集するという作業は非常に時間がかかってしまう。これらのことから切り抜き動画は、ライブ配信中の面白かった部分やプロレベルのプレイなどのハイライトのみを手軽に見たいという視聴者にとっての需要はあるが、切り抜きを行う人にとって切り抜き動画を作成することは大きい負担になってしまう。

映画[3]やスポーツ[4]など、ハイライト抽出、動画要約に関する研究は広く行われており、自動要約も試みられている。しかし、YouTube などで個人が行うライブ配信の切り抜き動画に関する研究は、自動での切り抜き以前に、手動で行う切り抜きに関しても十分に行われていない。

そこで、切り抜き箇所の決定や編集による切り抜きを行う人の負担を軽減するためのガイドライン作成の足掛かりとすることを目的として、切り抜き動画の収集、分析を行う。

### 2. 関連研究

#### 2.1. 映画の要約

Evangelopoulos ら[3]は、映像と音声、字幕を用いて映画の要約を行っており、この手法は情報提供性と楽しさの観点から動画の要約に有用であると明らかにしている。

字幕は切り抜き動画に付与されていることが多い。分析を行うにあたり、人が見て収集できる字幕は切り抜き動画の特徴量として有用であると考え、分析に用いた。

## 2.2. スポーツの要約

ゴルフやテニスでは、歓声の音量やトーンの変化、選手の表情、得点などに基づいてハイライトの抽出を行っている[4]。これらの手法を利用して自動でハイライトを抽出できるようになったことで、それまで人力で行っていたハイライト動画の作成を、簡単に、迅速に行うことが可能になった。

切り抜き動画では、声の大きさやトーンの変化を字幕のフォントや大きさ、動きによって強調して表現することがある。そのため、強調された字幕は人が見て収集できる切り抜き動画の特徴量として有用であると考え、分析に用いた。

## 2.3. e スポーツの要約

Sanjeewa[5]は、歓声や解説の声、ゲーム内イベントを検出することでゲーム「Dota 2」のプレイ映像の要約を行っている。キルイベントの検出精度や映像の長さを YouTube の公式チャンネルで公開されている動画と比較するなどの方法で評価した。

e スポーツ(ゲーム)の動画要約に関する研究は行われているものの、対象が大会の動画となっており、YouTube などで行われる個人のライブ配信のゲームのプレイ動画とは異なる。そのため、これらの研究とは別に、個人のライブ配信の動画要約に関する研究が必要であると考え、ゲーム内のキルイベントを要約に用いていたことから、敵を倒す要素がある類似した対戦ゲームであれば、同様にキルを特徴量に使用できると考え、分析に用いた。また、動画の長さは、人が見て収集できる切り抜き動画の特徴量として有用であると考え、分析に用いた。

## 3. 動画データ

### 3.1. 動画

本研究で用いたデータは、YouTube の切り抜き動画から収集したものである。検索クエリには「にじさんじ APEX 切り抜き」を用いた。

にじさんじとは、Vtuber(Virtual YouTuber)グループの1つである。ライブ配信を中心として活動しており、内容は雑談やゲーム実況など様々なものがある。150人以上のVtuberが所属している大規模で人気のあるグループであり、ライブ配信の切り抜きも多く行われている。APEX(APEX LEGENDS)とは、3人1組でチームを組み、合計60人20チームで落ちている武器やアイテムを拾って敵と戦い、最後の1チームに残ると勝利となる一人称視点のシューティングゲームである。データ取得のエラーがあった2021年9月を除いて、2020年4月から2022年12月まで配信視聴時間が長いゲームTOP3に常に入っている人気のあるゲームである。人気のある大規模なグループの配信者が、人気のあるゲームをプレイしている配信の切り抜き動画であれば、切り抜き動画としての需要が高く、多くの切り抜き動画が作られる。多くの切り抜き動画が作られることで、様々な配信者の、様々な場面、編集、再生数の動画を得ることができる。これらから、どのような切り抜き動画が存在し、どのような切り抜き動画が求め

られているかを調べるのに適していると考え、この検索クエリを選択した。

## 3.2. 特徴量

収集した特徴量は、A:敵をダウン(キル)させた回数、B:敵部隊を全滅させた回数、C:自身がダウン(デス)した回数、D:自身の部隊が全滅した回数、E:字幕の回数、F:強調字幕の回数、G:動画の長さ、H:切り抜きチャンネルの登録者数、I:元配信のチャンネル登録者数、J:再生数の10項目である。元配信とは、切り抜かれた動画の元となったライブ配信を指している。実際に YouTube にアップロードされている切り抜き動画に含まれている場面や編集の仕方、各チャンネルの人気度合いなど、どのような切り抜き動画が存在しているかを表せていると考え、これらの特徴量を選択した。

A と G に関して、キルイベントと動画の長さは Sanjeewa[5]が用いていた項目であり、E に関して、は Evangelopoulos ら[3]が用いていた項目である。B~D は A に関連して、戦闘に関する項目として収集した。F は声の大きさやトーンの変化を表していると考え、E に関連して字幕に関する項目として収集した。また、人気のある配信者・切り抜きチャンネルであるかという情報が、どのような(誰の)切り抜き動画が存在しているのか、そして求められているのかを調べるために必要であると考え、H と I を収集した。J は切り抜き動画が求められている度合いを調べるために必要であると考え、収集した。

## 4. 結果

### 4.1. クラスタリング分析

実際に YouTube にアップロードされている切り抜き動画に含まれている場面や編集の仕方など、どのようなものが存在していて、どのような切り抜きが求められているかを調べることを目的として、クラスタリングによる分析を行なった。

収集したデータの特徴量ごとに標準化し、K-means を用いてクラスタリングを行った。その際、K-means の損失関数の減少量が急激に小さくなったクラスタ数を最適とするエルボー法により、クラスタ数を4、6と決定した。

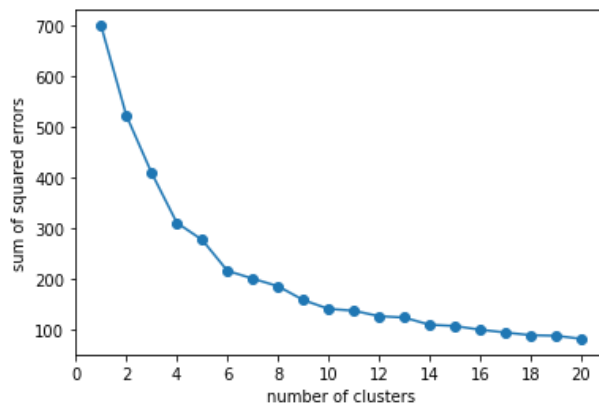


図1. A~GのみでのK-meansの損失関数  
クラスタ数4と6それぞれについて動画そのものの  
特徴量(A~G)のみでクラスタリングを行った。結果  
は表1、表2のようになった。表は、クラスタごと



の各特徴量の平均値とクラスタに属する動画の数を表している。

表 2. A~G のみでのクラスタリング(クラスタ数 4)

cluster No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	動画数
cluster 0	8.95	3.47	2.42	1.00	13.3	2.11	719	29600	975000	546000	19
cluster 1	2.85	1.60	1.60	1.30	187	42.7	660	34700	868000	859000	20
cluster 2	0.870	0.380	0.270	0.180	37.8	7.20	251	37600	793000	494000	60
cluster 3	36.0	13.0	11.0	11.0	88.0	4.00	976	57000	1460000	1550000	1

表 2. A~G のみでのクラスタリング(クラスタ数 6)

cluster No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	動画数
cluster 0	0.940	0.360	0.25	0.17	39.3	7.85	189	36800	783000	499000	53
cluster 1	1.95	1.05	1.65	1.30	183	39.9	629	35800	851000	862000	20
cluster 2	2.79	1.71	1.14	0.640	7.64	2.14	718	35600	1000000	682000	14
cluster 3	19.7	7.71	1.00	0.860	57.6	11.6	664	39200	924000	452000	7
cluster 4	2.60	0.600	5.00	1.20	0.00	0.00	929	15200	889000	162000	5
cluster 5	36.0	13.0	11.0	11.0	88.0	4.00	976	57000	1460000	1550000	1

#### 4.2. 回帰分析

切り抜き動画を作成する人の目的としては、自分の好きな配信者をもっと多くの人に知ってもらいたい、収益をあげたい、ということが考えられる。どちらの目的を達成するためにも、切り抜き動画の再生数を伸ばす必要がある。そのため、再生数(J)と強く関連している切り抜き動画の特徴量を分析することで、ガイドラインの作成につながると考えた。そこで、再生数以外の特徴量(A~I)のうち再生数に関連している特徴量を分析することを目的として、収集した特徴量のうち、再生数以外の特徴量を標準化したものを説明変数、再生数を目的変数として、回帰分析を行なった。

再生数以外の特徴量全てを説明変数として、重回帰分析を行った結果を以下の表 3、表 4 に示す。表 3 の自由度調整済み決定係数とは、回帰モデルの精度を表す指標でありこの値が 1 に近いほどこの回帰モデルの精度が高い。有意 F とは、回帰モデルの有意性を表す指標であり、この値が 5%未満であれば、回帰モデルに有意性があると言える。表 4 の t 値は、説明変数の影響度を表し、この絶対値が大きいほど影響が強いことを意味する。絶対値が 2 未満であれば、その説明変数は目的変数に影響しないと判断できる。P 値は得られた回帰モデルの係数の有意性を表す値で、5%未満であればその説明変数は目的変数に関係していると判断できる。

表 3. 回帰モデルの精度と有意性

自由度調整済み決定係数	有意 F
0.0741	0.0649

表 4. 説明変数の影響度合いと有意性

説明変数	t 値	P 値
A	-0.419	0.676
B	0.421	0.675
C	-0.441	0.660
D	0.0145	0.988
E	1.09	0.280
F	-0.221	0.825
G	0.832	0.407
H	1.59	0.115
I	2.65	0.00956

表 3 の各値から、得られた回帰モデルの精度、有意性はともに低いことがわかった。また、表 4 から、t=2.65、P=0.00956 である配信者のチャンネ

ル登録者数(I)のみが、再生数と有意に関係性があり影響を与えることがわかった。

次に、多重共線性の問題を排除するため、相関係数の確認を行った。各説明変数に対して、相関係数をヒートマップで表したものを図 2 に示す。

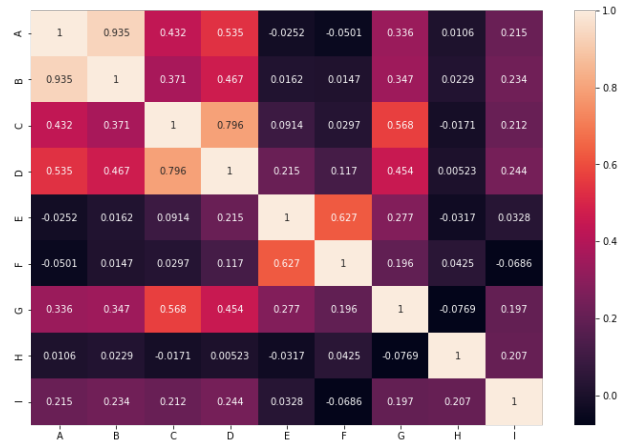


図 2. 説明変数の相関係数

図 2 から、敵をダウン(キル)させた回数(A)と敵部隊を全滅させた回数(B)、自身がダウン(デス)した回数(C)と自身の部隊が全滅した回数(D)に強い相関があることがわかった。また、表 4 の結果から、A と B では B が、C と D では C が、より再生数に影響を与えていると言える。そこで、それぞれについて影響の少ない A と D を除いて、もう一度重回帰分析を行なった結果を表 5、表 6 に示す。

表 5. 回帰モデルの精度と有意性(説明変数削減後)

自由度調整済み決定係数	有意 F
0.0924	0.0244

表 6. 説明変数の影響度合いと有意性(説明変数削減後)

説明変数	t 値	P 値
B	0.0696	0.945
C	-0.763	0.447
E	1.14	0.259
F	-0.167	0.868
G	0.876	0.383
H	1.61	0.110
I	2.72	0.00784

表 5 から、F=0.0244 であり、この回帰モデルは有意なモデルであるものの、自由度調整済み決定係数は小さいため、精度が低いことがわかった。表 6 から、t=2.72、P=0.00784 である I のみが、再生数と有意に関連があり、影響を与えることがわかった。

最後に、説明変数を I のみとして、単回帰分析を行い、その結果を表 7、表 8 に示した。

表 7. 回帰モデルの精度と有意性(I のみ)

自由度調整済み決定係数	有意 F
0.0956	0.00102

表 8. 説明変数の影響度合いと有意性(I のみ)

説明変数	t 値	P 値
I	3.39	0.00102

## 5. 考察

### 5.1. クラスタリング分析

どちらのクラスタリングでも字幕(E、F)が他と比べて非常に多く、戦闘に関する項目(A~D)が少ないクラスタが存在している。表1のcluster1と表2のcluster1が該当する。どちらのクラスタでも再生数は、1つの動画のみで構成される表1のcluster3と表2のcluster5を除けば再生数(J)が最も多くなっている。字幕が多く、戦闘に関する項目が少ない、かつ再生数が多いということから、配信者のトークや配信者同士のやり取りを求めて切り抜き動画を視聴している層が多く存在していることが考えられる。このことから、にじさんじのAPEXの切り抜き動画を視聴する人は、戦闘シーンよりも、配信者のトークや配信者同士のやり取りを求めて視聴している人が多いと考える。

また、表1のcluster2と表2のcluster0はともに戦闘に関する項目と動画の長さ(G)が最も小さく、字幕も他クラスタと比較して少ない。このことから、このクラスタに属する切り抜き動画は、見所をいくつもつなぎ合わせた長い切り抜き動画でなく、見所を少なく絞ってその分短い時間で視聴できるようにした切り抜き動画であると言える。また、このクラスタの再生数は、他のクラスタと比較しても多くはないため、このような短い切り抜き動画よりも、多くの見所を含む長い動画の方が求められていると考えられる。

### 5.2. 回帰分析

説明変数削減前(A~J)の回帰モデルは $F > 0.05$ であり有意なモデルではなかったが、説明変数削減後(A、D除外)は $F < 0.05$ となっており、有意な回帰モデルを得ることができたと言える。また、単回帰分析(I)結果のt値とP値は説明変数削減後に行なった重回帰分析結果のt値とP値と比較して、t値はさらに大きく、P値はさらに小さくなっており、より有意に再生数と関連があり、影響を与えるという結果になっている。ただし、多重共線性の問題を排除した回帰モデルにおいても、再生数に与える影響の小さい変数(A~H)を削減した今回の回帰モデルにおいても精度が低くなったことから、新しい説明変数追加の検討が必要であることが示唆された。また、Iが再生数に与える影響が大きいということから、にじさんじのAPEXの切り抜き動画は配信者のチャンネル登録者数が多い、つまり人気のある配信者の動画がよく見られる傾向にあることが示唆された。

## 6. まとめと今後の展望

切り抜き箇所の決定や編集による切り抜きを行う人の負担は軽減するためのガイドライン作成の足掛かりとすることを目的として、切り抜き動画の収集、分析を行った。

実際にYouTubeにアップロードされている切り抜き動画に含まれている場面や編集の仕方など、どのようなものが存在していて、どのような切り抜きが求められているかを調べることを目的として、クラスタリングによる分析を行った。また、再生数と

強く関連している切り抜き動画の特徴量を分析することで、ガイドラインの作成につながると考え回帰分析を行った。

分析の結果は以下のようにまとめられる。

- 視聴者は戦闘シーンよりも配信者のトークや配信者同士のやり取りを求めている
- 見所の少ない短い切り抜き動画よりも見所を多く含む長めの切り抜き動画を求めている
- また、元配信のチャンネル登録者数(I)が再生数(J)に大きな影響を与えている

しかし、データを収集、分析して、切り抜きを行うためのガイドライン作成の足掛かりとするという本研究の目的は達成できていない。そのため、様々な配信者やゲーム、さらに別のジャンルのライブ配信の分析を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 配信技研. 配信技研 news : 「COVID-19 vs. ライブ配信」レポート(2023年1月21日閲覧), 2020. <https://www.giken.tv/news>
- [2] 株式会社 NTT ドコモ. この数年で e スポーツの動画視聴時間は増加傾向「切り抜き動画」が e スポーツ観戦の新たなトレンドへ(2023年1月22日閲覧), 2022. <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000001.000098560.html>
- [3] Georgios Evangelopoulos, Athanasia Zlatintsi, Georgios Skoumas, Konstantinos Rapantzikos, Alexandros Potamianos, Petros Maragos, and Yannis Avrithis. Video event detection and summarization using audio, visual and text saliency. In 2009 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing, pp. 3553–3556. IEEE, 2009.
- [4] 望月 貴裕. 映像自動要約技術の最新動向 NHK 技研 RD 2020 年夏号(2023年1月29日閲覧), 2020. <https://www.nhk.or.jp/str/publica/rd/182/2.html>
- [5] KWCK Sanjeewa. Automated Highlights Generator for DOTA 2 Game Using Audio-Visual Framework. PhD thesis, 2022.

## 連絡先

植田 匠

E-mail: u2130009@edu.cc.uec.ac.jp



# 畳み込みニューラルネットワークにより抽出した 地図画像の特徴量を用いた事故種別の分類

Classification of Accident Types using Features of Map Images  
extracted by Convolutional Neural Networks

○<sup>1</sup> 石田 木斗巳,      <sup>1</sup> 向 直人,      <sup>2</sup> 内種 岳詞,      <sup>3</sup> 岩田 員典,      <sup>2</sup> 伊藤 暢浩  
○<sup>1</sup> Kotomi Ishida,    <sup>1</sup> Naoto Mukai,    <sup>2</sup> Takeshi Uchitane,    <sup>3</sup> Kazunori Iwata,    <sup>2</sup> Nobuhiro Ito  
<sup>1</sup> 梶山女学園大学                      <sup>2</sup> 愛知工業大学                      <sup>3</sup> 愛知大学

<sup>1</sup>Sugiyama Jogakuen University    <sup>2</sup>Aichi Institute of Technology    <sup>3</sup>Aichi University  
**Abstract** The number of fatalities due to traffic accidents in Aichi Prefecture is on the increase. Since about half of the fatalities are elderly people, it needs to consider appropriate factors according to the characteristics and situations of drivers to prevent accidents. In this paper, we consider a CNN as a feature extractor and propose a prediction method using the output of the CNN trained by accident map images. Experimental results show that the proposed method can classify accident types with high accuracy.

## 1 はじめに

愛知県警察の交通統計<sup>1</sup>によると、愛知県における人身事故件数は年々減少を続け、令和4年には23,825件と前年比で360件が減少した。一方で、交通事故による死者数は137人であり、前年比で20人の増加となっている。この死者数は、都道府県別ランキングで、大阪に続きワースト2位であり、改善が必要な状況である。特に死者数に占める65歳以上の高齢者の割合は、約47% (64/137) となっており、ドライバの特性や状況に応じた適切な支援が望まれる。本研究では、愛知県警察から提供された過去の交通事故データを利用して、ドライバの属性情報 (年齢や性別など) と位置情報から、生じやすい事故種別 (追突や出会い頭など) を予測することを目的とする。高精度な事故種別の予測が実現できれば、運転中のドライバに対し、適切な支援が可能になる。

我々は、これまでに画像の学習に適した畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を利用して、地図画像から生じやすい事故種別を予測する手法を提案した [1, 2]。過去の交通事故データを基に、事故発生地点の緯度・経度に対応する地図画像を生成し、地図画像と事故種別との対応をCNNに学習させる。この手法では、「直線的な道路では追突が発生しやすい」など、地図画像に含まれる道路や建物などの地理的な特徴量と事故種別の関係性を利用している。しかし、ドライバの年齢や性別などの属性情報を、CNNに直接的に学習させることは困難であった。

そこで、本稿では、CNNを特徴量抽出器とみなし、CNNの途中出力を地図画像の特徴量として用いることで、ドライバの属性情報と組み合わせた予測手法を提案する。これまで主に医療分野においてCNNを特徴量抽出器として用いた研究が報告されている。岡本らは、大腸内視鏡

画像から病理タイプを診断するシステムを構築するために、畳み込みニューラルネットワークであるAlexNet[3]を利用して1000次元の特徴量を抽出し、サポートベクタマシン (Support Vector Machine: SVM) に学習させた [4]。同様に、大下らは、CT画像から肺がん患者の予後を予測するために、ResNet[5]を利用して、2048次元の特徴量を抽出した [6]。分類器として、ナীবベイズ (naive Bayes) とニューラルネットワークを採用した。いずれの研究においても、80%以上の分類精度を達成しており、CNNで抽出された特徴量が分類に効果的であることが示されている。我々は、事故発生地点の地図画像を学習させたCNNから128次元の特徴量を抽出する。これに、ドライバの属性や道路形状など19次元の情報を加え、ロジスティック回帰により学習・分類させるを試みる。実験では、CNNで地図画像から抽出した特徴量の有無が、事故種別の分類に与える影響を比較する。

## 2 愛知県の交通事故データ

愛知県警察から提供された2013年から2018年の交通事故データから、事故種別が追突、出会い頭、右左折時に該当する $N = 9,000$ 件のデータを無作為に抽出する。8割の7,200件を学習用データセット、2割の1,800件を評価用データセットとして用いる。いずれのデータセットも3種類の事故種別が均等に含まれる。データセットには、性別 (第1当事者)、年齢 (第1当事者)、時間帯、道路形状が含まれる。時間帯は、日の出と日の入りの時刻を基に、1日を6分割した連続値である。道路形状は、愛知県警察が定める表1に示す17種類の道路形状である。ここで、道路の幅員は、大 (13.0メートル以上)、中 (5.5メートル以上, 13.0メートル未満)、小 (5.5メートル未満) で定義される。例えば「中中交差点内」とは、第1当事者の進入路の幅員が中、第2当事者も同様に幅員が中であることを表す。道路形状は17種類の離散値であることから、16次元のダミー変数に変換して用いる。

<sup>1</sup>愛知県警察 交通統計 <https://www.pref.aichi.jp/police/koutsu/jiko/koutsu-s/toukei.html>

表 1: 道路形状

No.	道路形状	No.	道路形状
1	単路その他	10	小交差点付近
2	中中交差点内	11	小中交差点内
3	小小交差点内	12	中小交差点内
4	中交差点付近	13	小大交差点内
5	大大交差点内	14	大小交差点内
6	その他広場等	15	橋
7	大交差点付近	16	カーブ・屈折
8	大中交差点内	17	トンネル
9	中大交差点内		

性別・年齢と事故件数の関係について考察する。図 1 は、男女別の事故件数を表している。男性は 5,792 件、女性は 3,089 件であり、男性の方が多くの事故を起こしている（性別が不明の 119 件を除く）。また、男性は追突の割合が高く、出会頭の割合は低い傾向がある。女性は出会頭の割合が高く、追突の割合は低い傾向がある。性別に応じて、生じやすい事故種別が異なることがわかる。

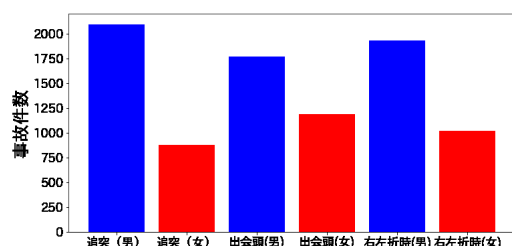


図 1: 男女別の事故件数

図 2 は、年齢別の事故件数を表している。20 代前半の若い世代に追突が多いことがわかる。また、出会頭は広い年齢層に分布しているが、特に 10 代で多いことがわかる。10 代の事故の多くは、バイクまたは自転車の乗車時に生じた事故であると推察される。性別と同様に、年齢に応じて、生じやすい事故種別が異なることがわかる。

次に道路形状と事故種別の関係について考察する。表 2 は、追突が生じた道路形状のトップ 3 である。「単路その他」が圧倒的に多いことがわかる。追突は直線的な道路において生じることが理由と考えられる。表 3 は、出会頭が生じた道路形状のトップ 3 である。いずれも幅員が小・中の交差点内で発生していることがわかる。出会頭は幅員の狭い路地において生じることが理由と考えられる。表 4 は、右左折時が生じた道路形状のトップ 3 である。出会頭と同様に交差点内が多くを占めるが、幅員

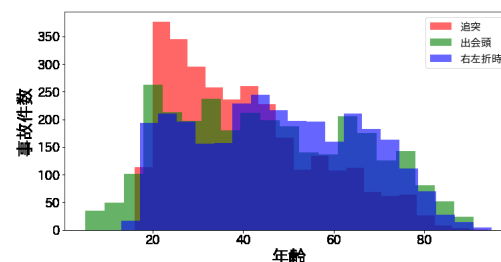


図 2: 年齢別の事故件数

が大においても発生していることがわかる。このように、愛知県警察が定める道路形状は、事故種別に大きく関係していることがわかる。

表 2: 追突が生じやすい道路形状

順位	道路形状
1	単路その他 (2176 件)
2	中交差点付近 (355 件)
3	大交差点付近 (173 件)

表 3: 出会頭が生じやすい道路形状

順位	道路形状
1	中中交差点内 (1471 件)
2	小小交差点内 (539 件)
3	小中交差点内 (420 件)

### 3 CNN による地図画像の特徴抽出

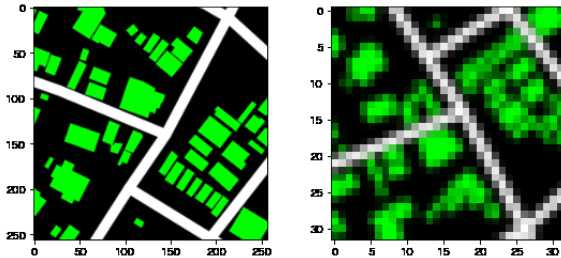
上述した道路形状は愛知県警の判断で定める分類であり、道路構造の詳細や建物の配置などの情報が失われている。そこで、事故発生地点に対応する地図画像を生成し、CNN を利用して特徴量を抽出する。地図画像の生成には、地図開発プラットフォームの MapBox<sup>2</sup>を採用した。地図画像のサンプルを図 3 に示す。地図画像のサイズは 256 × 256 ピクセル、倍率（ズームレベル）は 17 であり、地図画像の一辺の長さは約 117 メートルである。また、地図画像は 3 色で構成されており、白は道路、黒は背景、緑は建物を表している。この地図画像を、32 × 32 ピクセルに縮小し、ランダムに上下左右を反転させて、図 4 に示す独自に設計した CNN に入力として与える。この CNN

<sup>2</sup>MapBox <https://www.mapbox.jp/>

表 4: 右左折時が生じやすい道路形状

順位	道路形状
1	中中交差点内 (1522 件)
2	大大交差点内 (480 件)
3	単路その他 (337 件)

は、2つの畳み込み層と、2つの結合層で構成されており、3種類の事故種別を出力することから、出力層は3次元である。出力層の直前の128次元の中間出力を抽出し、地図画像の特徴量として用いる。入力時の地図画像が持つ  $32 \times 32 \times 3(\text{色}) = 1,072$  次元の情報が、128次元の情報に圧縮されたとみなすことができる。



(a) Mapbox で生成した画像 (b) CNN に入力する画像

図 3: 地図画像のサンプル

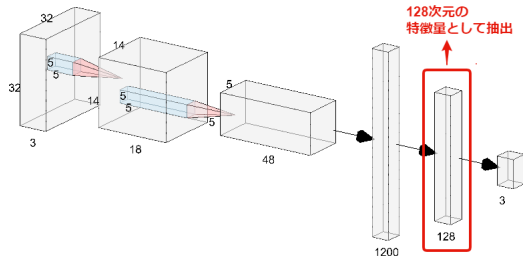


図 4: 地図画像の特徴量を抽出するための CNN のモデル

#### 4 ロジスティック回帰による事故種別の分類

事故種別の分類には、ロジスティック回帰を採用する。地図画像から抽出した特徴量の有効性を確かめるため、2つの分類モデルを構築する。1つ目は道路形状を学習したモデルであり、性別(1次元)、年齢(1次元)、時間帯(1次元)、道路形状(16次元)を組み合わせた19次元の特徴量を説明変数とする。2つ目はCNNの特徴量を加えて学習したモデルであり、上記の19次元の特徴量に、地図画

像から抽出した128次元の特徴量を組み合わせた147次元のデータを説明変数とする。目的変数は3種類の事故種別(追突, 出会頭, 右左折時)であるが、ロジスティック回帰は2クラス分類が基本であり、そのまま適用することができない。そこで、One Vs Rest (OVR) を採用して、3クラスの分類を実現する。図5に、OVRの概念図を示す。OVRでは、追突とその他、出会頭とその他、右左折時とその他、进行分类する3つのモデルを生成する。各モデルで対応する事故種別が生じる確率を算出し、最も大きな確率を示した事故種別を採択する。

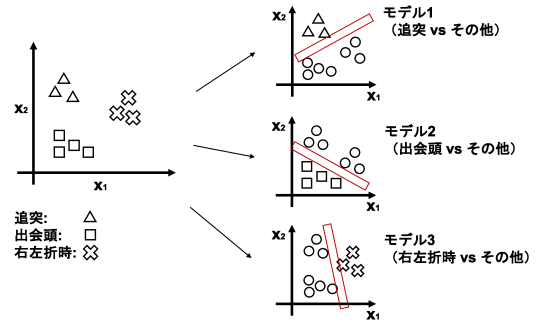


図 5: One Vs Rest の概念図

#### 5 実験

道路形状を学習したモデルと、CNNの特徴量を加えて学習したモデルを比較する。  $N = 7,200$  の学習用データセットでモデルを構築し、  $N = 1,800$  の評価用データセットでモデルの性能を評価した。

道路形状を学習したモデルの正解率は68.5%であった。混同行列を表5、適合率・再現率を表6に示す。追突は、出会頭・右左折時に比べ、高い正解率を示していることがわかる。特に再現率は90%を超える値を示した。これは、追突が「単路その他」での発生頻度が高く、出会頭や右左折時とは異なる道路形状で発生することが大きく影響していると考えられる。一方で、出会頭と右左折時の適合率と再現率は6割弱にとどまっている。これは、愛知県警察が定めた道路形状だけでは、出会頭と右左折時の区別が困難であること示している。

CNNの特徴量を加えて学習したモデルの正解率は75.9%であった。道路形状のみを学習したモデルに比べ、7.4ポイントの改善が確認できた。混同行列を表7、適合率・再現率を表8に示す。追突の適合率・再現率は、道路形状のみを学習したモデルと大差がなかった。一方で、出会頭と右左折時に関しては、適合率・再現率ともに10%以上の改善が確認できた。上述したように出会頭は幅員

表 5: 道路形状を学習したモデルの混同行列

	予測			
		追突	出会頭	右左折時
正解	追突	556	26	18
	出会頭	55	357	188
	右左折時	80	200	320

表 6: 道路形状を学習したモデルの適合率と再現率

	追突	出会頭	右左折時
適合率	80.5%	61.2%	60.8%
再現率	92.7%	59.5%	53.3%

が小・中の交差点、右左折時は幅員が中・大の交差点で生じやすい。これに加え、出会頭は見通しの悪い交差点において生じることが予想される。地図画像には建物が含まれており、交差点付近の見通しに関する情報が特徴量に含まれていたことが改善に寄与したと考えられる。

表 7: CNN の特徴量を学習したモデルの混同行列

	予測			
		追突	出会頭	右左折時
正解	追突	550	16	34
	出会頭	51	433	116
	右左折時	79	138	383

## 6 まとめ

本研究では、ドライバの属性情報と位置情報から事故種別を予測することを目的とした。愛知県警察が定義する道路形状に、CNN を利用して地図画像から抽出した特徴量を加えることで、7.4 ポイントの正解率の改善が確認できた。地図画像の特徴量は、特に出会頭と右左折時の分類に寄与していることも示された。今後の課題は、対象とする事故種別を増やすことに加え、事故種別の分類に寄与する地理的な特徴量（信号の有無など）を考慮することである。

## 謝辞

本研究は名古屋大学未来社会創造機構 HMI・人間特性研究部門の「エージェントを介した運転支援研究プロジェ

表 8: CNN の特徴量を学習したモデルの適合率と再現率

	追突	出会頭	右左折時
適合率	80.9%	73.8%	71.9%
再現率	91.7%	72.2%	63.8%

クト」の助成を受けている。また、本研究に必要不可欠な交通データをご提供頂いた愛知県警察に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] 向直人, 内種岳詞, 岩田員典, 伊藤暢浩. 愛知県の交通事故データを利用した地図画像からの事故種別の分類. 第 18 回 ITS シンポジウム, 2020.
- [2] 向直人, 内種岳詞, 岩田員典, 蔣湧, 伊藤暢浩. Alexnet を用いた交通事故種別の分類における地図データセットのズームレベルの評価. 情報処理学会 第 84 回全国大会, 2E-04, 2022.
- [3] Krizhevsky, Alex, Sutskever, Ilya, Hinton, and Geoffrey E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In F. Pereira, C.J. Burges, L. Bottou, and K.Q. Weinberger, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 25. Curran Associates, Inc., 2012.
- [4] 岡本拓巳, 小出哲士, 玉木徹, Bisser Raytchev, 金田和文, 吉田成人, 三重野寛, 田中信治. リアルタイム大腸内視鏡画像診断支援システムのための cnn 特徴と svm 分類を用いた識別手法. DA シンポジウム 2017 論文集, Vol. 2017, pp. 27–32, 08 2017.
- [5] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun. Deep residual learning for image recognition. *CoRR*, Vol. abs/1512.03385, , 2015.
- [6] 大下悠樹, 竹内野々子, 寺本篤司, 近藤征史, 今泉和良, 齋藤邦明, 藤田広志. Ct 画像を用いた肺がん患者の予後予測: 畳み込みニューラルネットワークによる特徴量抽出と機械学習法による予測. 日本放射線技術学会雑誌, Vol. 78, No. 8, pp. 829–837, 2022.

## 連絡先

石田 木斗巳 (ika20da008@g.sugiyama-u.ac.jp)

# 学習者の困惑に応じて自律的に学習支援を提供する教育支援ロボットの実現可能性

Feasibility of an Educational Support Robot that Provides Autonomous Learning Support in Response to The Learner's Perplexion

○<sup>1</sup> 大川 航平,

<sup>2</sup> ジメネス フェリックス,

<sup>3</sup> 秋月 秀一,

<sup>4</sup> 吉川 大弘

○<sup>1</sup> Kohei Okawa,

<sup>2</sup> Felix Jimenez,

<sup>3</sup> Shuichi Akizuki,

<sup>4</sup> Tomohiro Yoshikawa

<sup>1</sup> 愛知県立大学大学院

<sup>2</sup> 愛知県立大学

<sup>3</sup> 中京大学

<sup>4</sup> 鈴鹿医療科学大学

<sup>1</sup> Graduate School of Aichi Prefectural University <sup>2</sup> Aichi Prefectural University

<sup>3</sup> Chukyo University

<sup>4</sup> Suzuka University of Medical Science

**Abstract:** Recently, with the development of robot technology, educational robots that support learning have been attracting attention. In this study, we focus on teacher-type robots that teach learners how to solve problems. In previous studies, teacher-type robots provide learning support by having the learner press a button. However, in actual educational settings, there are many situations in which a teacher senses that a learner is perplexed and calls out to the learner to provide learning support. We believe that a teacher-type robot can realize a human-like learning environment by estimating the learner's perplexion and providing learning support autonomously. In this study, we developed a method for estimating the learner's state of perplexion based on the learner's facial expression, and developed a supervised robot that provides learning support autonomously. In this study, we define the perplexion as a state in which the learner is unable to solve a problem and asks for learning support. Facial expressions of the learner due to the perplexed state were collected through learning using a learning system with a hint button. In previous studies on emotion classification by human facial expressions, the emotion of perplexion has not been addressed. Therefore, we constructed a method for estimating eight emotions by learning the learner's state of perplexion from the seven basic emotions (anger, disgust, fear, happy, sad, surprise, and neutral) of the conventional method. However, since other emotions are also estimated, the accuracy of the estimation of the state of perplexion itself is considered to be low. Therefore, in this paper, we propose a method for estimating the learner's state of confusion (hereinafter referred to as the "perplexion estimation method") so that learning support can be provided to autonomous enemies based on the learner's state of perplexion for a teacher-type robot in problem learning. The results of the subject experiments indicate that the robot equipped with the perplexion estimation method is optimal in terms of the timing of assistance. From these results, we believe that robots equipped with the perplexion estimation method can be introduced into educational settings to realize a learning environment similar to that of human interaction.

## 1 はじめに

近年、教育現場において ICT 教育の導入が活発化している。「誰一人残すことのない、公正に個別最適化された学び」の実現に向けて、ここの学習状況などを収集した教育ビッグデータを用いた ICT 教育の導入が進められている [1]。その ICT 教育の中でも、人の学習を支援する教育支援ロボットの研究開発が注目されている [2]。教育支援ロボットには、教師のように学習者に対して教示する「教師型ロボット」が存在する。従来研究における教育支援ロボット（以下、従来ロボット）は、学習者のボタン操作によって学習支援を提供する仕組みとなっている。そのため、学習者は学習支援が欲しいと思うたびに、自身でロボット内のボタンを押さなければいけない。それにより、学習者はボタン押下が面倒だと感じ、教師型ロボットへの印象が低下する可能性が高い。この問題を解決するためには、学習者のボタン押下により学習支援を提供するのではなく、学習者が問題を解答できずに困っ

ている状態／学習支援を求めている状態（以下、困惑状態）をロボットが推定し、自律的に最適なタイミングで学習支援を提供することが有効であると考え、これにより円滑なインタラクションが実現でき、教師型ロボットが学習者に与える効果を向上できると考える。

本研究では最初に、深層学習に基づいて学習者の困惑状態を推定するために、従来の表情認識から基本七感情（怒り、嫌悪、恐怖、幸福、悲しみ、驚き、無表情）を分類する感情認識モデル [3] に困惑表情データを学習させた八感情推定手法（再現率 67%）を構築した。そして、八感情推定手法を搭載した教師型ロボット（以下、八感情ロボット）が与える印象効果についての被験者実験を実施したところ、従来ロボットと同程度の印象を与えるという結果が得られた [4]。一方で、アンケートにて「支援タイミングが早い」、「何度も発話をしてきてうるさい」との意見も得られた。その問題を解決するためには、搭載手法の推定精度改善であると考え、転移学習を利用し



て精度を改善した困惑推定手法 (改) を構築した (再現率 86%)。しかしながら、困惑推定手法 (改) を搭載した教師型ロボットと八感情ロボット間において印象および支援タイミングについて比較調査ができてない。

そこで本研究では、困惑推定手法 (改) を活用し、教師型ロボットに搭載するために特化した、学習者の困惑状態を推定する困惑推定手法を構築した。本稿では、本手法を搭載した自律的に学習支援を提供する教師型ロボット (以下、提案ロボット) との共同学習が大学生に与える印象効果と支援タイミングについて検証する。

## 2 従来手法 (八感情推定手法)

表情認識では Ekman ら [5] による基本七感情が扱われる。西銘ら [6] の研究においても基本七感情の分類に焦点が当てられている。しかしながら、問題学習において、学習者が表出する表情は、問題の回答に困っている困惑状態であり、基本七感情に当てはめられない。本研究では O.Arriaga らが構築した七感情推定手法 [3] に困惑状態を追加した八感情推定手法を構築した。八感情推定手法は、基本的には O.Arriaga の手法と同等である。そこで本研究では八感情推定手法を従来手法と位置付ける。

### 2.1 困惑状態データの収集方法

本論文では、学習者が問題を解答できなく困っている状態／学習支援を求めている状態を困惑状態と定義する。困惑状態データは、学習者が IT パスポート試験に関する学習ソフトウェア、または数学の図形問題と、日本エス・エイチ・エル社が提供する CAB[8] の規則性に関する学習ソフトウェアを用いて学習している表情を、RGB カメラ (1920 × 1080px, 30fps) で撮影することで取得した。本論文では、大学生を対象とした困惑状態データを収集した。そのため、前述したような大学生に対して、問題レベルが難し過ぎず、大学講義および高校数学の知識で、熟考すれば解答できる問題を学習ソフトウェアへ搭載した。学習ソフトウェアには、問題とその下にヒントが得られるボタンが表示される。被験者には、ボタンは何度でも押下可能であり、ボタンを押下することでヒントがもらえることを伝えた。これにより、困惑状態における表情データにラベル付けすることが可能となる。

本論文では、学習ソフトウェアを用いた学習における  $i$  回目のボタン押下時 ( $n_i$  フレーム目) の 1 秒前 (30fps で撮影するため、 $n_i - 29$  フレーム目) までの表情データを困惑状態とし、それ以外の表情データを非困惑状態データと定義した (図 1)。非困惑状態は、 $i$  回目のボタン押下時における困惑状態の最後の 1 つ次のフレーム ( $n_i + 1$  フレーム目) から ( $i + 1$ ) 回目のボタン押下時における

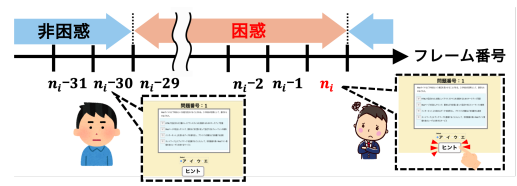


図 1: 困惑状態の定義

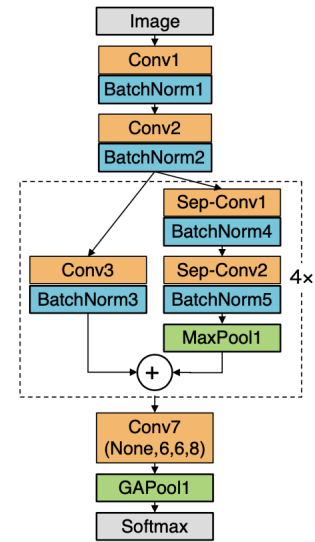


図 2: CNN モデルの構成

困惑状態の最初の一つ前のフレーム ( $n_{i+1} - 30$  フレーム目) のデータとした。これにより、全 52 名のデータを収集し、モデル構築に使用した。

### 2.2 学習

学習画像には、基本七感情の顔画像は Facial Expression Recognition 2013(FER-2013) データセット [9] を使用した。FER2013 データセットには、七感情ごとの人間の顔画像があり、それぞれグレースケール化されており、サイズは 48 × 48 に揃えられたデータセットである。また、学習中の学習者の表情は無表情と考えられるため、図 1 に定義された非困惑状態の顔画像は、無表情として学習させた。困惑状態は、2.1 節に従って取得した顔画像の内、10 名を学習させた。

CNN モデルの重みパラメータ  $W$  を、8 感情いずれかのラベルが付与された  $M$  個の学習用顔画像  $I_{train} = I_1, I_2, \dots, I_M$  を用いて最適化する。モデルの最終的な出力は各クラスの確率  $y_c$  ( $c = 1, 2, \dots, 8$ ) であるため、損失関数  $E$  には交差エントロピー誤差を用いる。ここで、 $c$  に対応する感情をそれぞれ「怒り、嫌悪、恐怖、幸福、悲しみ、驚き、無表情 (非困惑)、困惑」とする。この時、

ある学習用顔画像  $I_m$  の交差エントロピー誤差  $E$  は,

$$E = - \sum_{c=1}^8 T_c \log y_c \quad (1)$$

のように求めることができる．ここで  $T_c$  は  $I_m$  の真値を表しており，実際の感情（付与されているラベル）に対応したインデックスのみ 1 で，それ以外は 0 の one-hot 表現となっている．最適化手法は Adam[7] を用いる．

### 2.3 困惑状態推定

困惑状態は，推定する顔画像  $I$  を構成・学習させたモデルに入力することで推定する．モデルの出力  $y_c$  は各クラスの確率であり， $c$  には前述した感情が対応している．そのため，

$$\arg \max_{1 \leq c \leq 8} y_c = 8 \quad (2)$$

となった場合を困惑状態とし，それ以外の場合は対応するクラスの感情とする．

## 3 困惑推定手法

八感情推定手法は，基本七感情と困惑状態を推定する手法である．困惑状態以外の感情推定もあるため，困惑状態そのものの推定精度は低いと考えられる．本章では，困惑状態と非困惑状態のみを推定するために転移学習を活用して困惑推定手法を構築した．

### 3.1 転移学習による構築

深層学習において，所持しているデータセット数が少ない場合，他のモデルが学習している特徴量の抽出過程を利用する転移学習 [10] が用いられる．学習済みの特徴量の抽出過程を利用するため，学習させるデータセット数が少なくても高い性能を示すことができる．困惑状態と非困惑状態という微細な表情変化をとらえるために，転移学習を行うにあたり，ベースモデルを図 2 の構成で FER2013 データセットを用いて構築した基本七感情推定モデルとして，困惑推定手法を構築した．ベースモデルの特徴量が表情に特化しているため，困惑の推定精度が向上すると考える．また，困惑推定手法では困惑か非困惑かという二感情分類として構築した．

### 3.2 学習

困惑推定手法を構築するために使用した困惑・非困惑の学習データは，2.1 節にて収集した 52 名分の内，36 名の顔画像を使用した．また，本手法では困惑・非困惑の 2 値で分類を行うため，非困惑のデータにはその他の感情として，FER2013 データセットのデータを含めた（表 1）．以上のデータセットを用いて学習した際のデータ数は表 2 に示す．

表 1: モデルのクラスごとによる学習データ振り分け方法

	内訳
困惑	収集した困惑データ
非困惑	FER-2013 から基本 7 感情 収集した非困惑データ

表 2: 学習データの構成とデータ数

データ名	データ取得元	データ数
怒り	FER-2013	1997
嫌悪	FER-2013	218
恐怖	FER-2013	2048
幸福	FER-2013	3607
悲しみ	FER-2013	2415
驚き	FER-2013	1585
無表情	FER-2013	2482
非困惑	表情取得実験	3504
困惑	表情取得実験	3475

### 3.3 困惑状態推定

困惑状態は，推定する顔画像  $I$  を構成・学習させたモデルに入力することで推定する．モデルの出力  $y_c$  は各クラスの確率であり， $c$  は困惑・非困惑状態が対応している．そのため，

$$\arg \max_{1 \leq c \leq 2} y_c = 2 \quad (3)$$

となった場合を困惑状態とし，それ以外の場合は非困惑状態とする．

困惑状態の推定（以下，困惑状態推定）は学習者がヒントを要求するまでの平均時間  $x$  後に開始する．これは，最初に問題を目にした時，問題を理解するまでの表情で誤認識してしまう状況を未然に防ぐためである．例えば，平均時間が 30 秒である場合には，30 秒後から困惑状態推定を開始する．

## 4 被験者実験

### 4.1 ロボットの概要

実験には，頭部がタブレットであるタブレット型ロボット「Tabot（図 3）」を用いた．Tabot は，頭部のタブレットにエージェントを表示することで，多様な表情変化を行うことができる．また，Tabot の体部分は，首の自由度が 3，片腕の自由度が 5，脚部の自由度が 1 であり，合計 14 の自由度を持つため，多様な身体動作を行うことができる．問題の正誤判定時にロボットが学習者に共感するような感情を表出することで，学習者に好印象を与え



図 3: Tabot とカメラ

ることができる」と報告されている [11]. そこで、正解時に喜びの感情を、不正解時に悲しみの感情を表出する表情と身体動作を、従来研究 [12] を参考にそれぞれロボットに設定した (図 4, 図 5)。

本実験では図 3 に示すように、学習中の表情を取得するため、頭部にカメラを設置した。設置したカメラから、学習者が学習している際にタブレットの画面を見ている表情を取得する。カメラは、処理用 PC により制御・データ処理を行う。取得した表情データから困惑状態が推定された場合は、LAN 通信により Tabot に命令を送る。カメラは、解像度が  $640 \times 480$ 、フレームレートが 30fps のものを用いた。

#### 4.2 学習ソフトウェア

被験者は Tabot のタブレット下部に表示される、学習ソフトウェアを用いて学習する。学習ソフトウェアには、よりパズル的な要素や閃きが必要と考えられる、そこで、数学の図形問題と、日本エス・エイチ・エル社が提供する CAB[8] の問題を搭載し、学習ソフトウェアを開発した。図形問題は補助線を引くことにより簡単に解くことで

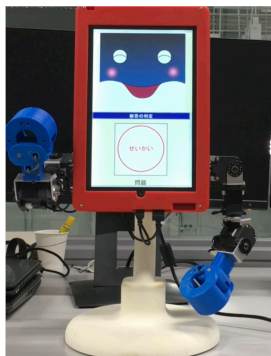


図 4: 正解時の Tabot の様子

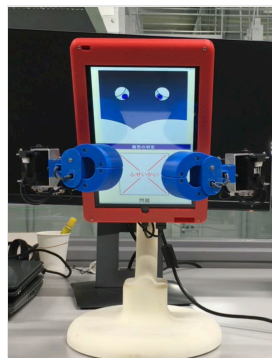


図 5: 不正解時の Tabot の様子

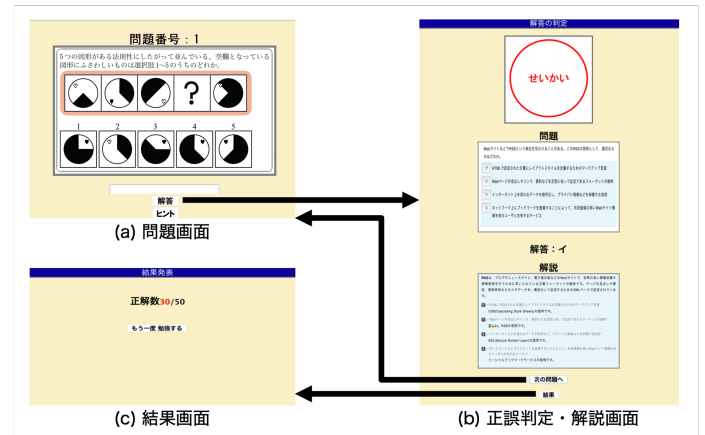


図 6: 学習ソフトウェア

きる問題を出題し、CAB では規則性の問題を用いた。これらのような、閃きを要する問題とパズル的な要素が強い問題を出題することで、被験者に対して困惑状態が発生しやすい環境を整えた。

#### 4.3 方法

大学生・大学院生 67 名を対象とし、大学生・大学院生とロボットが共に学習する実験を実施した。実験期間は 2020 年 9 月 14 日～11 月 30 日、2021 年 5 月 6 日～6 月 30 日、2022 年 2 月 17 日～3 月 17 日である。被験者は 1 回の学習において 20 問の問題をロボットと共に解く。ロボットには、問題を解くためのヒントを提供する行動と搭載した。なお、ヒントを提供する条件は、各群に応じて異なる (表 3)。1 回の学習における学習時間は最大 60 分間とし、問題を全て解き終わったら、学習を終了とする。問題構成は各 10 問となる。

ロボットとの共同学習の前に、ロボットとの共同学習と同様の問題で構成されている事前学習を、表情取得のために実施した。事前学習における学習ソフトウェアには、問題下部にヒントボタンが表示され、学習者がヒントボタンを押下することで画面にヒントが表示される。なお、事前学習では問題に回答しても、正誤判定並びに解説画面 (図 6(b)) には遷移せず、そのまま次の問題画面に遷移する。これは、事前学習によって知識を得ることで、ロボットとの共同学習時に表情表出が小さくなることを防ぐためである。

以下に実験手順を示す。

**Step1** 被験者は学習ソフトウェア (Tabot と同様のもの) 単体で学習する。

**Step2** 被験者は事前学習のヒント押下回数を基にして各群に振り分けられる。各群のロボットと共同学習を

表 3: 各群のヒント提供条件

群	ヒント ボタン	ヒント提供条件
八感情群	無	困惑状態を推定する度何度でも
一定時間群	無	事前学習時の ヒント要求時間に 1 度だけ
従来群	有	ボタンが押下される度何度でも
提案群	無	困惑状態を推定した 2 回まで

行う。各群の説明については表 3 に示す。

**Step3** 被験者はロボットとの共同学習後に、アンケートへ回答する。

本実験では、被験者 72 名を 4 種類の群に男女比および事前学習のヒント押下回数になるべく均等になるよう振り分けた。1 つ目が八感情推定手法を搭載したロボットと共に学習する「八感情群」、2 つ目は事前学習のヒント要求時間に基づき、ヒントを自動的に提供するロボットと共に学習する「一定時間群」、3 つ目は従来ロボットと共に学習する「従来群」、4 つ目は困惑推定手法を搭載したロボットと共に学習する「提案群」である。一定時間群は、事前学習におけるヒント要求時間が、学習者にとって最適な支援提供タイミングと推測したため群を設けた。各群におけるロボットのヒント提供条件を表 3 に示す。提案群の事前学習において、学習者がヒントを要求する平均時間が 106 秒であったため、困惑状態推定の開始時間をこの値に設定した。また、ヒント制限回数を、問題数と解答時間から 1 問にかかる平均時間が 3 分であることから、2 回とした。これは、2 回目の推定開始までは学習者に試行時間を与えるために、2 倍である 212 秒後と設定したからである。

#### 4.4 評価指標

本実験では、ヒューマンロボットインタラクションにおける主観評価のためのアンケート手法である「Godspeed Questionnaire[13][14]」を用いた。本実験ではアンケート手法における「好ましさ」を評価する項目を使用した。また、ロボットの支援提供タイミングをアンケートにて収集した。好ましさのようなロボットに対する肯定的な印象はインタラクションの継続に重要であると考え、好ましさの各形容詞対を表 4 に示す。各形容詞対は 5 段階尺度であるため、ポジティブな形容詞側が高くなるように 1 から 5 までで数値化し、好ましさの 5 項目の平均点を「好ましさ」と定義し、各群ごとで比較した。支援提供タイミングに関するアンケートを表 7 に示す。

評価結果に対する検定では、好ましさに対しては分散

表 4: 好ましさの各形容詞対

ポジティブ	ネガティブ
好き	嫌い
親しみやすい	親しみにくい
親切な	不親切な
愉快的	不愉快的
良い	ひどい

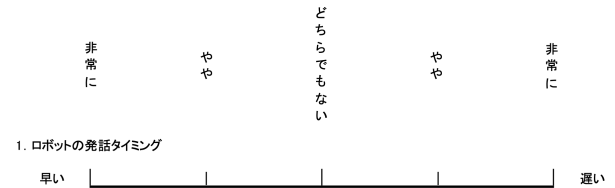


図 7: 支援提供タイミングに関するアンケート

分析を、支援タイミングに対しては「どちらでもない」の「3」を最適なタイミング基準として、母分散が未知の場合の母平均の検定を実施した [15]。第一種過誤を考慮し、BH 法 [16] により有意水準を調整した。具体的には、最も高い  $p$  値に対して  $p < 0.05$ 、認められなかった場合は、次に高い  $p$  値に対して  $p < 0.025$  と、有意差が認められない場合に限り順に  $p < 0.05$ ,  $p < 0.025$ , ...,  $p < 0.05/n$  ( $n$  は算出された  $p$  値の個数) を適用し、有意差が認められるか検証した。

#### 4.5 結果

##### 4.5.1 Godspeed による好ましさ

図 8 に各群の好ましさの平均点数を、図 9 に好ましさの各項目の平均点数を示す。一定時間の点数が最も高く、その次に八感情群、従来群、提案群の順で点数は高かった。検定を実施したところ、いずれの群間においても有意差は認められなかった。以上のことから、被験者がロボットに対して感じた好ましさは、各群のロボットにおいて同等であると示唆された。つまり、ロボットのヒントボタンを削除しても、学習者に与える好印象に変化がないことが示された。

##### 4.5.2 支援提供タイミング

図 10 に各群の支援提供タイミングの平均評点を示す。検定を実施したところ、最適な「3」というタイミングに対して有意差が認められた群は、八感情群と一定時間群だった。従来群と提案群において、有意差は認められなかった。以上のことから、有意差が認められた八感情群は支援提供タイミングが早い、一定時間群は遅いと学習者に感じさせたと示唆された。一方、有意差の認められ

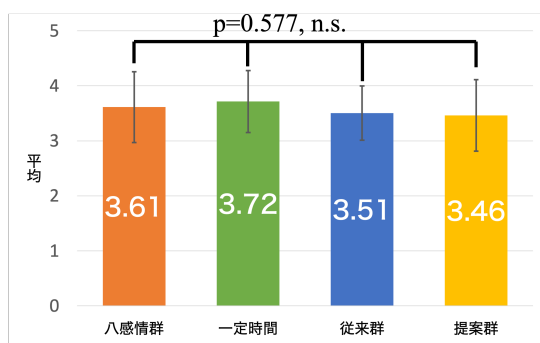


図 8: 各群における好ましさの結果

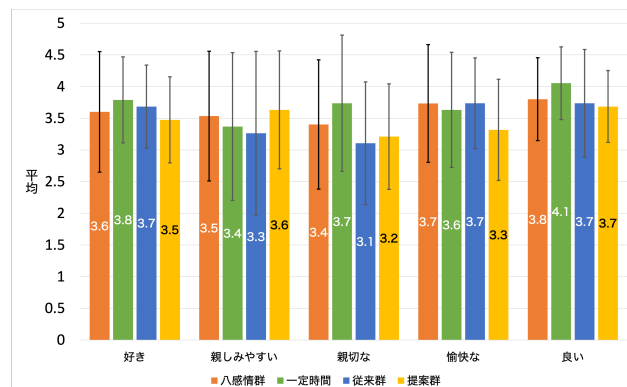


図 9: 好ましさの各項目の結果

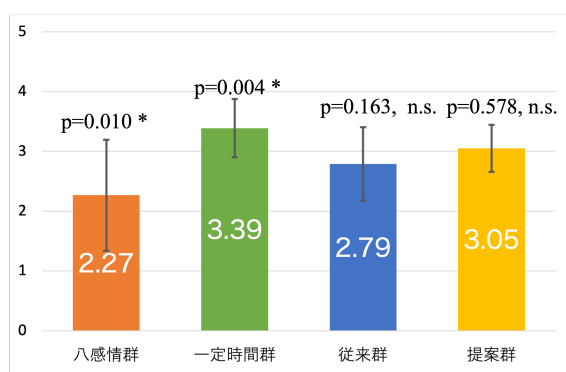


図 10: 各群における支援提供タイミングの結果

なかった従来群と提案群は、支援提供タイミングが最適であると示された。

## 5 考察

実験結果から、好ましさについて、いずれも有意差が認められなかったため、学習者に与える印象に違いはないことが示された。一方、支援提供タイミングでは、八感情群と一定時間群において有意差が認められた。それぞれについて、各アンケートとともに考察していく。

好ましさの平均では、提案群が最も低い結果であった。この原因として考えられる項目は「愉快的」が低いことである(図9)。「愉快的」が低くなった要因として、発話時の学習者の状態が考えられる。提案群は困惑推定手法を搭載しており、学習者の困惑状態を76%で推定することができる。つまり、何度も繰り返し発話する八感情群や、事前学習の支援要求時間と同じタイミングで発話する一定時間群と異なり、最も問題に対して悩んでいる瞬間に発話すると考えられる。問題に対して最も悩んでいる状況は、集中が高まり、その問題にのみ意識を向けていると推測できる。そのため、その状態時にいきなりロ

ボットが発話しても、「急に喋り始めた」と思わせてしまい、支援内容をうまく届けることができない。その影響から、「愉快的」、同様の理由で「親切的」が低くなってしまったと考える。一方で、「親しみやすい」は最も高い結果となっている(図9)。これはボタンを有さない群がいずれもボタンを有す従来群より高い結果となっている。つまり、従来群のようにボタン押下による学習支援提供は、学習者に煩わしさを与えており、ロボットへの印象低下につながっていたと考察できる。その改善として、ボタンのインタラクションを必要としない、自律的に支援を提供する手段は有効であると言える。特に、提案群は図10に示されたように支援提供タイミングも最適と考えられる「3」と変わらないことから、最適なタイミングで支援提供できていると考えられる。

教師型ロボットが自律的に支援を提供する上で、重要な要素は支援提供タイミングである。このタイミングが早くても遅くても被験者がロボットへ抱く印象を低下させる一因となる。八感情群と一定時間群の支援提供タイミングに注目すると、どちらも理想的なタイミング「3」に対して、どちらも有意差が認められた。八感情群では早い、理想と推測した一定時間群では遅いと示唆された。一方で、従来群のように学習者が支援が欲しいタイミングでボタン押下により支援を要求するロボットはもちろんのこと、困惑推定手法による支援提供を行う提案群は理想的なタイミングで支援提供できていると示唆された。しかし、提案群は支援提供タイミングが理想的であると示唆されたにもかかわらず、好ましさの平均点は最も低い結果となっている。これは、前述したように、学習者が困惑状態となっている理想的なタイミングで支援できているが故に、最も集中している状態であるため、学習者が驚いてしまうからだと考える。理由として、アンケートの記述欄にも「ロボットがいきなり話しかけてきたか



ら、聞き取れなかった」との回答があった。その反面、支援提供が遅いとされた一定時間群では好ましさは高い結果となっている。これは、少しタイミングがずらされたことにより、学習者の集中が少し途切れ、提案群とは異なりヒントを聞く余裕があるからだと考えられる。提案群の改善として、困惑推定手法による支援提供を行う際には、ヒントを発話する前に、ロボットが「悩んでいるからヒントを出すね。」というような、学習者にヒントを聞く状態を作り出す枕詞を発話することが挙げられる。

## 6 おわりに

本論文では、深層学習 (CNN) に基づいて学習者の困惑状態を推定する困惑推定手法を提案した。また、提案手法を搭載したロボットと、八感情推定手法を搭載したロボット、事前学習でヒントを要求した時間と同じタイミングでヒントを提供するロボット、さらにボタン押下によりヒントを提供するロボットとの比較実験を実施した。

被験者実験の結果から、好ましさはいずれの群間においても有意差は認められず、学習者に従来ロボットと同様の印象を与えることが示唆された。また、支援提供タイミングにおいては提案手法を搭載したロボットが最適なタイミングで支援提供できていることが示唆された。つまり、ロボットにおけるボタンを削除し、教員と学習者による人同士の共同学習のような環境を、ロボットと学習者間でも実現できる可能性を示したと考える。

今後は、実際の学習現場を想定し、中学生や高校生を対象とし、提案ロボットが学習者に与える印象、また教育支援ロボットの本来の目的である学習効果に関する被験者実験を行う予定である。

## 7 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費 (若手研究 20K19909) の補助を得て遂行された。

## 参考文献

- [1] 文部科学省, “新時代の学びを支える先端技術活用推進方策 (最終まとめ)” について”, [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/other/1411332.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/other/1411332.htm), (2019)
- [2] T. Belpaeme, J. Kennedy, A. Ramachandran, B. Scassellati, F. Tanaka, “Social robots for education: A review,” *Science Robotics*, Vol.3, eaat5954, (2018)
- [3] O.Arriaga, P.G.Ploger, M.Valdenegro, “Realtime Convolutional Neural Networks for Emotion and Gender Classification”, <https://arxiv.org/abs/1710.07557>, (2017)
- [4] 大川航平, ジメネスフェリックス, 村上和人, 秋月秀一, 吉川大弘, “学習者の困惑を推定する教育支援ロボットとの共同学習に関する印象調査”, 第 37 回フアイジシステムシンポジウム, (2021)
- [5] P.Ekman, W.V.Friesen, “工藤力 (訳) 表情分析 入門”, 誠信書房 (1987)
- [6] 西銘大喜, 遠藤聡志, 當間愛晃, 山田孝治, 赤嶺有平, “畳み込みニューラルネットワークを用いた表情表現の獲得と顔特徴量の分析”, *人工知能学会論文誌*, vol.32, no.5, pp.1-8, (2017)
- [7] D.P.Kingma, J.L.Ba, “ADAM: A Method for Stochastic Optimization”, <https://arxiv.org/abs/1412.6980>, 2017
- [8] 日本エス・エイチ・エルの商品 - 日本エス・エイチ・エルの商品, <http://www2.shl.ne.jp/product/index.asp?view=recruit>, (2020/12/06 accessed)
- [9] I.J.Goodfellow, D.Erhan, A.Courville, et al, “Challenges in representation learning: A report on three machine learning contests”, *International Conference on Neural Information Processing*, Springer Berlin Heidelberg (2013)
- [10] A.Gulli, S.Pal, 大串正矢, 久保隆宏, 中山光樹, “直感 Deep Learning -Python×Keras でアイデアを形にするレシピ”, p97-103, 2018
- [11] F.Jimenez, T.Yoshikawa, T.Furuhashi, M.Kanoh, “An Emotional Expression Model for Educational-Support Robots”, *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, vol.5, no.1, pp.51-57, (2015)
- [12] 谷寄悠平, 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”, *知能と情報*, vol.30, no.5, pp.700-708, (2018)
- [13] C.Bartneck, D.Kulic, E.Croft, S.Zoghbi, “Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived, Intelligence, and Perceived Safety of Robots”, *International Journal of Social Robotics*, vol.1, pp.71-81, (2009)

- [14] 野村竜也, “Human-Agent Interaction(HAI)における人の主観評価”, Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence, vol.31, no.2, pp.224-229, (2016)
- [15] 古橋 武, ”統計・多変量解析とソフトコンピューティング 改訂版—超多自由度系解析を目指して—”, 共立出版, (2014)
- [16] Y.Benjamini, Y.Hochberg, ”Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing”, J. R. Statist. Soc. ser.B, 57(1), 298-300, (1995)

# 遺伝的アルゴリズムを用いた棒倒し法原理に基づく迷路生成手法

A Maze Generation Method Based on Stick-Fall Method Using Genetic Algorithm

鶴田 勇志, 加納 政芳  
Yuji Tsuruta, Masayoshi Kanoh  
中京大学  
Chukyo University

## 1 はじめに

プロシージャル技術とは、ゲームのストーリーやダンジョン、フィールド、モーションなどのコンテンツを自動的に生成するものであり、人的コストや制作コストを抑えられることから注目されている。本研究では、ダンジョンの典型的コンテンツの一つである迷路に注目する。迷路の生成手法については、様々な手法が提案されている [2-5] が、迷路の難易度に関する報告は数多くされているものの人にとっての面白さに関する報告は少ない。そこで本稿では、誰もが楽しむことができる迷路を生成するために、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた迷路自動生成手法を提案する。

## 2 遺伝的アルゴリズムによる迷路自動生成

GA とは、生物の進化を模した最適化アルゴリズムの一種であり、準最適解を導き出す手法である。先行研究 [5] では、難易度に影響する「正解経路の長さ」「行き止まりの数」を評価する GA を用いてセル・オートマトンのルールを進化させ、迷路を自動生成する手法を提案している。このように、GA を用いることによって、正解経路や偽経路の単純化を防ぐだけでなく、任意の特徴を持った迷路の生成が可能と考える。本研究では、適応度を構成する下位の目的関数 (下位関数) として迷路の面白さに関係すると考えられる要素を与え、それらの重み付き和を適応度として GA を進化させることで、面白い迷路を自動生成する。

### 2.1 個体の設定

棒倒し法 [6] とは、外周を壁とする迷路  $x_{\max} \times y_{\max}$  :  $x \in [0, x_{\max} - 1], y \in [0, y_{\max} - 1]$  において、 $x$  座標もしくは  $y$  座標が偶数となるマスに基準となる壁を配置し、そこから規則に従って上下左右の任意の方向に壁を 1 つ作ることによって迷路を生成する手法である。提案手法は、棒倒し法において棒を倒す方向を GA によって決定するものである。各遺伝子座には { 上, 下, 左, 右 } の 4 つの対立遺伝子を配置する。したがって、遺伝子長は基準となる壁の数と等しくなる。なお、本手法では、交叉 (後述) の際に迷路の構造が破壊されないようにするために、 $x_{\max} = y_{\max} = 8n + 3$  となる値を使用する。この際の遺伝子長は、 $16n^2 = (4n)^2$  となる。

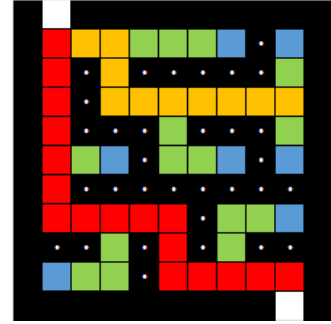


図 1: 下位関数の設定

### 2.2 適応度関数の設定

迷路の面白さを評価するために、本手法では、適応度を構成する 5 つの下位関数として、1) 正解経路の長さ ( $L$ )*length*, 2) 行き止まりの数 ( $E$ )*nd*, 3) 最終分岐の長さ ( $B$ )*ranch*, 4) 幹分岐の長さ ( $T$ )*runk*, 5) 壁マスの数 ( $W$ )*all* を用いる。図 1 に各下位関数によって評価されるマスを示す。1) は、赤で示した部分のように、スタート地点からゴール地点まで最短でたどり着く経路上のマスの数とする。2) は、青で示した部分のように、行き止まりとなる地点のマスの数とする。これは分岐経路の数と等しくなる。3) は、緑で示した部分のように、行き止まり地点から分岐点までのマスの数とする。4) は、黄で示した部分のように、すべての経路から 1), 2), 3) を除いた数とする。5) は、白点付きの壁マスのように、外壁を除いたすべての壁マスの数とする。

適応度  $F$  は、 $L$ ,  $E$ ,  $B$ ,  $T$  および  $W$  の重み付き和として与えられる。

$$F = \alpha_0 L + \alpha_1 E + \alpha_2 B + \alpha_3 T + \alpha_4 W \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_i$  は重みパラメータである。

### 2.3 遺伝的操作

図 2 に選択の手続きを示す。具体的な手順は次の通りである。まず、すべての個体を適応度の降順で並べる。次に、上位 50% のエリート選択を行い、次世代の個体の半数を決定する。最後に、上位 50% の個体から適応度の高いものから順に 2 個体選び、それらを交叉・突然変異させ、残りの次世代個体を補充する。この手続きのように、上位 50% の個体をそのまま次世代に残すことで、迷路の

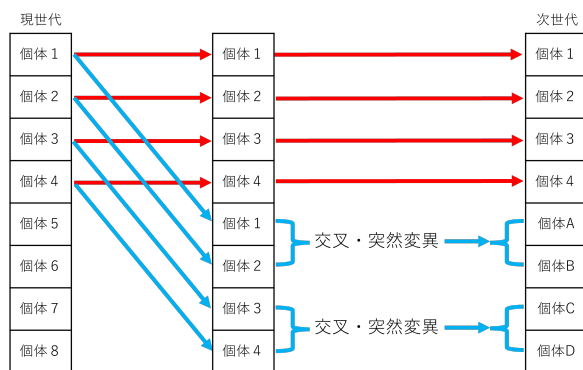


図 2: 選択の概要

多様性の維持と早期収束を防ぐ。

交叉には、遺伝子配列を 3 点で等間隔に区切り、2 個体の同区間の配列を 50% の確率で入れ替える 3 点確率交叉を用いる。正方形型の迷路において、遺伝子長を 4 の倍数の 2 乗に設定することで、迷路構造を破壊せずに交叉が行える。

### 3 実験

提案手法の有効性を確認するために、棒倒し法で生成された迷路との比較を行い、主観的ならびに客観的な観点から評価を行う。

迷路サイズを  $43 \times 43$  マスとし、提案手法で生成した 4 つの迷路（図 3）と、棒倒し法で生成した 4 つの迷路（図 4）を用いて実験を行う。提案手法のパラメータは、1 世代 100 個体、 $\alpha_i = \{0.4, 0.5, 0.5, 0.4, 1.0\}$  とし、1800 世代まで繰り返すものとした。なお、棒倒し法には、棒倒しを開始する列に関して制約が存在するため、それを考慮して迷路を生成していることに注意されたい（図 4 参照）。大学生・大学院生 20 名を被験者として、以下の手順で実験を進めた。まず、8 つの迷路をランダムな順序で解いてもらう。その際、各迷路の解答に要した時間（経過時間）を計測する。各迷路を解き終えた後、迷路の印象評価アンケートを行う。印象評価アンケートでは、迷路の難しさ・面白さ・複雑さについて 7 段階の SD 法を用いて評価する。そして、すべての迷路の解答が終了した後、最終アンケートを行う。最終アンケートでは、一番面白いと感じた迷路を 1 つ選択してもらう。

### 4 結果・考察

図 5 に学習の推移を示す。同図から、徐々に迷路が形成されていることがわかる。また、同図下部に示した迷路はその世代における一例であり、スタート地点からゴール地点まで到達可能な経路を黄色で示している。同図より、1800 世代ではゴールに到達可能な経路が、1 つになっ

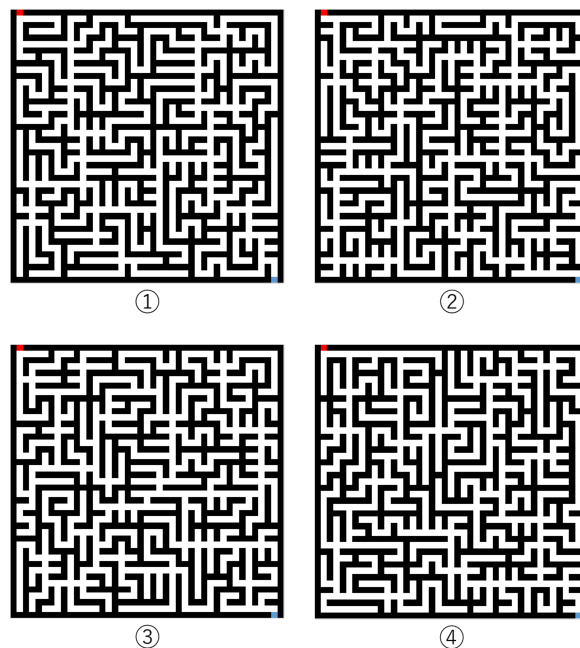


図 3: 提案手法による迷路

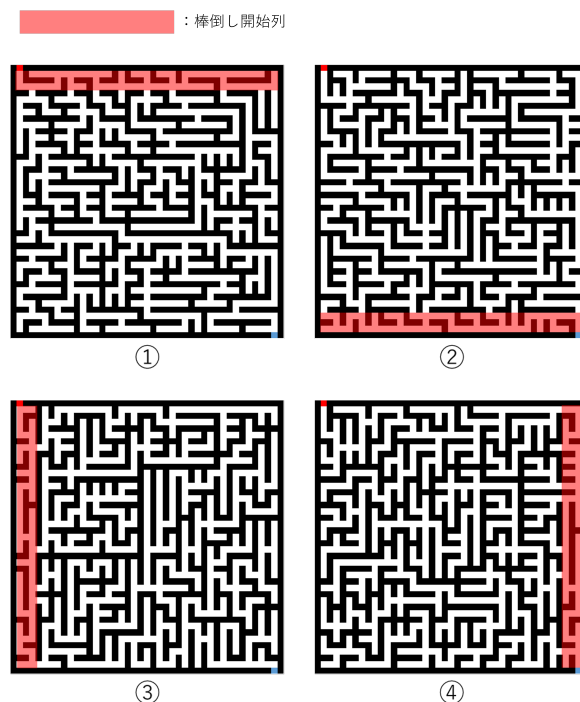


図 4: 棒倒し法による迷路

ていることが見て取れる。

まず、経過時間ならびに印象評価アンケートについて見ていく。検定にはウィルコクソンの符号順位検定を用いる。図 6 に経過時間ならびに印象評価アンケートの結

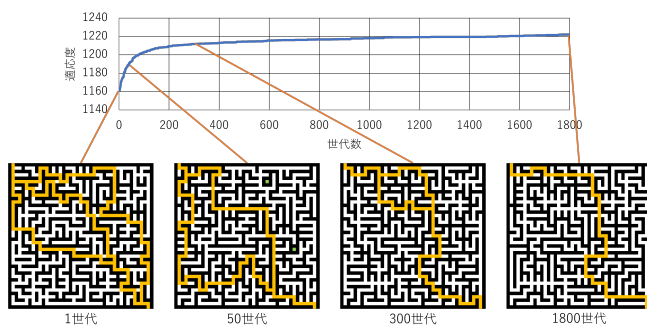


図 5: 学習の様子

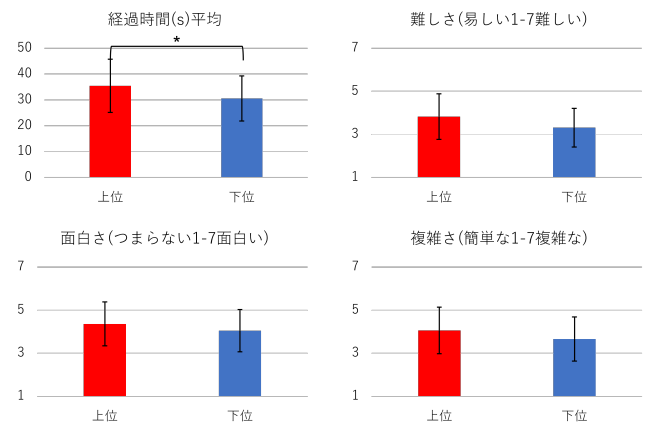


図 7: 「正解経路の長さ」による比較

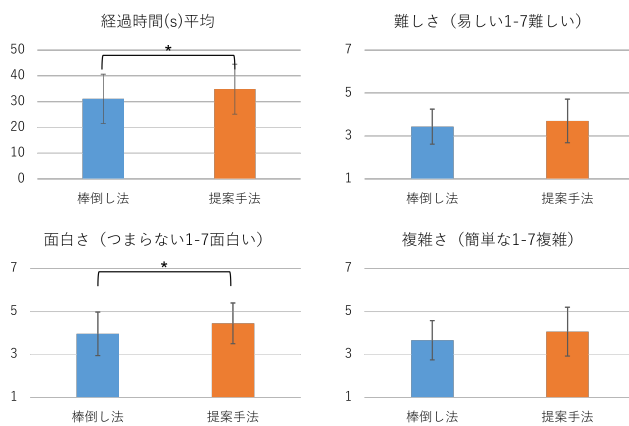


図 6: 経過時間・アンケート結果

果を示す。同図より、経過時間 ( $p = 0.044$ ) ならびに面白さの項目 ( $p = 0.009$ ) で有意差が認められていることが見て取れる。つまり、提案手法の迷路は、棒倒し法の迷路よりも面白く、解答時間が増加している。この結果は、GA を用いることで、棒倒し法の制約にとらわれずに面白い迷路を生成できることを示唆している。

次に、各下位関数が迷路の評価に与える影響を確認する。ここでは、各下位関数によって得られる値で 8 つの迷路を降順に並び替え、上位 4 つと下位 4 つの平均経過時間・平均評価値によって上位・下位迷路の特徴を比較する。検定にはウィルコクソンの符号順位検定を用いる。図 7 に下位関数「正解経路の長さ」の結果を示す。同図より、経過時間に有意差が認められる ( $p = 0.025$ )。このことは、正解経路が長いほど解答時間が増加することを示している。図 8 に「最終分岐の長さ」の結果を示す。同図より、面白さ ( $p = 0.009$ ) ならびに経過時間 ( $p = 0.044$ ) の各項目で有意差が認められる。このことから、最終分岐が長いほど面白さが増し、解答時間が増加することがわかる。

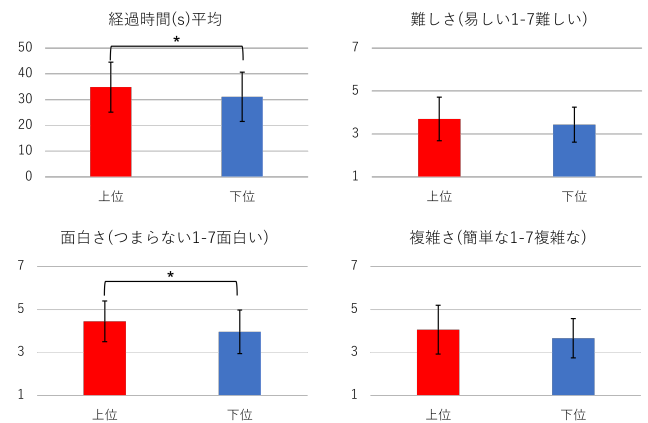


図 8: 「最終分岐の長さ」による比較

図 9, 10 に「行き止まりの数」「幹分岐の長さ」の結果を示す。同図より、「最終分岐の長さ」とは逆に、行き止まりの数が少なく幹分岐の長さが短いほど、面白さならびに解答時間が増加することがわかる。これらの結果から、「正解経路の長さ」が長いほど偽経路への試行を促し、難度を上昇させる可能性があること、過去の研究では検討されていなかった評価項目「最終分岐の長さ」「幹分岐の長さ」が面白さに影響を与えることに加え、偽経路の複雑性を上昇させる可能性があるといえる。

最後に最終アンケート結果について述べる。提案手法の迷路と棒倒し法の迷路の選択者数を合計し、適合度の検定を行った。その結果、提案手法と棒倒し法の間に有意差は認められなかった。この理由としては、被験者が比較的少数であったことに加え、解き終えた迷路を提示したため、被験者本人が正解経路を含む迷路の構造を見



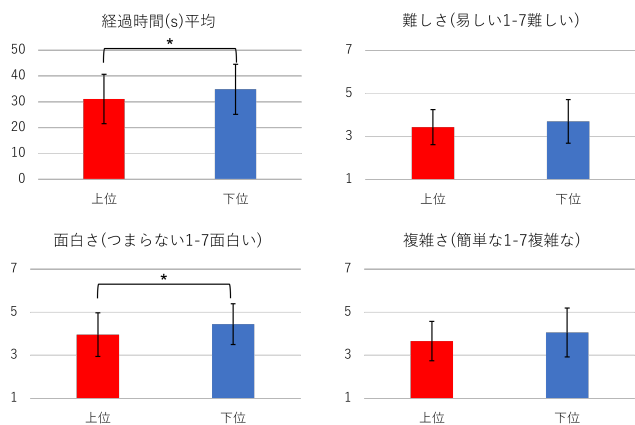


図 9: 「行き止まりの数」による比較

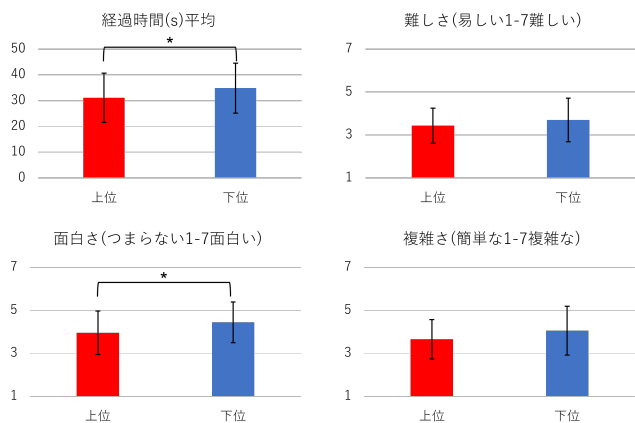


図 10: 「幹分岐の長さ」による比較

ることができた。それが結果に影響した可能性がある。

## 5 おわりに

本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いて、棒倒し法原理に基づいた面白い迷路を自動生成する手法の開発を試みた。適応度を構成する下位の目的関数として、「正解経路の長さ」「行き止まりの数」「最終分岐の長さ」「幹分岐の数」「壁の数」を設定し迷路の自動生成を行った。提案手法と棒倒し法で生成した迷路の印象評価比較を行った結果、提案手法は棒倒し法よりも面白い迷路を生成することがわかった。また、下位の目的関数の値を基に比較した結果、「最終分岐の長さ」が増加すること、「行き止まりの数」が少ないこと、「幹分岐の長さ」が短いことが面白さを向上させることがわかった。

## 参考文献

- [1] C. Adams, H. Parekh, S. J. Louis: Procedural level design using an interactive cellular automata genetic algorithm, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, pp.85–86, 2017.
- [2] 横田 和幸, 船瀬 新王, 藤原 清悦, 内匠 逸: ヒトを対象とした迷路課題の難易度を定量的に決定するパラメータの検討, 生体医工学, Vol.57 No.2-3, pp.58-67, 2019.
- [3] J. Kwiecie'n: A swarm-based approach to generate challenging mazes, Entropy, Vol.20, No.10, 2018.
- [4] 吉田 喜峰廣, 小泉 康一, 大槻 正伸: 難しい迷路の条件に関する研究, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-GI-37 No.6, 2017.
- [5] C. Adams, S. J. Louis: Procedural maze level generation with evolutionary cellular automata, IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, pp.1-8, 2017.
- [6] Algoful, 迷路生成 (棒倒し法): <https://algoful.com/Archive/Algorithm/MazeBar>

# スパイキングニューラルネットワークの応答関数近似による 学習精度の変化に関する一考察

<sup>1</sup> 安井 雅哉, <sup>2</sup> 高瀬 治彦, <sup>2</sup> 北 英彦  
<sup>1</sup> 三重大学大学院地域イノベーション学研究所 <sup>2</sup> 三重大学大学院工学研究所

## 1 はじめに

スパイキングニューラルネットワーク (SNN) は、スパイク (パルス) を入出力の信号として用いるニューラルネットワーク (NN) である。ネットワークを構成するユニットは、それらの間の信号伝達にスパイク信号を用いる。そのため、ユニット自身が時系列情報を取り扱う能力を有し、複雑な時系列信号処理への適用が期待される。加えて、イベント駆動型処理による実装が可能であり、チップ化への親和性が高く、省力化や小型化に有利であるとされている [1] しかし、ユニットの動作が複雑であるため、ネットワークの大規模化が非スパイキング型の NN と比べ困難である。実際、非スパイキング型の NN のユニットは多入力一出力の関数として動作するのに対し、SNN のユニットの動作は内部電位の時間変化に基づきスパイクの発火判定を繰り返す。

このような状況の中で、SNN の大規模化に対応した学習法の提案、動作の高速化が試みられてきた。非スパイキング型の NN でも、大規模化に伴い学習法の工夫・並列化による高速化が試みられてきた。それに加えて、ネットワークモデルの見直しも行われてきた。非スパイキング型 NN のユニットが、その出力を決定するための関数 (活性化関数) を、生体由来のシグモイド関数などではなく、大規模ネットワークに適した ReLU [2] などに変更することで、動作の高速化・大規模ネットワークでの学習性能改善を行った。それにならい、本稿では SNN における活性化関数に相当する関数の簡略化の効果について、学習性能の観点から議論する。

我々は以前、スパイキングニューラルネットワークのユニットの内部状態を決定するための関数を近似することで、ネットワークの動作の高速化について報告した [3]。本稿では、この近似が、非スパイキング型 NN における ReLU の導入の効果と同様に、この近似が動作の高速化以外にも学習性能の改善をもたらすかどうかを検討する。

## 2 SNN の動作と学習

ここでは、文献 [4] に基づき、SNN の動作と学習法について概説する。

### 2.1 SNN の動作

SNN で信号伝達に使用されるスパイク列は、次式のよう

$i$  番目のスパイクの時刻である。

$$s(t) = \sum \delta(t - t^{(i)}) \quad (1)$$

各ユニットは多入力一出力であり、 $i$  番目の入力として  $s_i(t)$  を受け取り、これを応答に変換する  $\epsilon(\cdot)$  により変換後、重み  $w_i$  により重みづけされる。以降、 $\epsilon(\cdot)$  を SRK (Spike Response Kernel) と呼ぶ。また、連続した発火を防ぐため、自身の出力スパイク列に対して、内部電位を抑制する応答を生成する。この応答を生成する関数  $\nu(\cdot)$  を RK (Refractory Kernel) と呼ぶ。これらをまとめると、ユニットの内部状態  $u(t)$  は、畳み込み演算  $(*)$  を用いて、次のように表される。

$$u(t) = \sum w_i (\epsilon * s_i)(t) + (\nu * s)(t) \quad (2)$$

各ユニットは、この内部電位があらかじめ定められたしきい値  $\theta$  を越えたときに発火し、スパイクを出力する。このように内部電位からスパイク列への変換を行う関数を  $f_s(\cdot)$  とする。一般に、ユニット間の信号伝達には時間遅れが生じる。そこで、式 (2) の  $\epsilon(t)$  は、時間遅れ  $d$  を含んだ  $\epsilon_d(t) = \epsilon(t - d)$  を用いる。

多層 SNN において、第  $l$  層のユニット数を  $N_l$  個、第  $l$  層から第  $(l+1)$  層への結合の重みを  $\mathbf{W}^{(l)} \in \mathbb{R}^{N_{l+1} \times N_l}$  とすると、ネットワークの 1 層分の動作は次式のように表される。

$$a^{(l)}(t) = (\epsilon_d * s^{(l)})(t) \quad (3)$$

$$u^{(l+1)}(t) = \mathbf{W}^{(l)} a^{(l)}(t) + (\nu * s^{(l+1)})(t) \quad (4)$$

$$s^{(l+1)}(t) = f_s(u^{(l+1)}(t)) \quad (5)$$

### 2.2 SNN の学習法

Slayer の学習は、以下の式に従い行う。

$$e^l = \begin{cases} \frac{\partial L(t)}{\partial a^{(n_l)}} & \text{if } l = n_l \\ (\mathbf{W}^{(l)})^\top \delta^{(l+1)}(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho(t) = \frac{1}{\alpha} \exp(-\beta |u(t) - \theta|) \quad (7)$$

$$\delta^{(l)}(t) = \rho^{(l)}(t) \cdot (\epsilon_d \odot e^{(l)})(t) \quad (8)$$

$$\nabla_{\mathbf{W}^{(l)}} E = \int_0^T \delta^{(l+1)}(t) \left( a^{(l)}(t) \right)^\top dt \quad (9)$$

$$\nabla_{a^{(l)}} E = - \int_0^T \dot{a}^{(l)}(t) \cdot e^{(l)}(t) dt \quad (10)$$

ここで、 $L(t)$  は時刻  $t$  における誤差を、演算子  $\odot$  は時間方向における要素毎の相関演算を、 $\alpha, \beta$  は内部状態としきい値の差が学習に与える影響の大きさを調整する定数を意味する。

### 3 SRF の変更

文献 [4] の実験では、 $\text{SRK}(\epsilon(t))$  には以下のものを用いていた。

$$\epsilon(t) = \begin{cases} \frac{t}{\tau_s} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_s}\right) & \text{if } t \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

これは、式 (3) においてスパイク 1 個に対して 1 個ずつ現れ、時々刻々と計算される。SRK は計算負荷の大きい指数関数を含んでおり、これらを参照するたびに値を計算すると、計算コストが高くなる。また、内部状態の計算に時間における畳み込み演算を利用する場合は、ルックアップテーブルとして事前にこれらを計算しておくことで、計算コストを軽減できる。

我々は以前に、指数関数を用いた SRK は、時間の経過により 0 に漸近する性質のため、ルックアップテーブルを用いた場合でも多項式による近似を行うことで高速化ができることを示した。その際に、SRK の近似により SNN の動作が高速化するだけでなく、学習性能が向上する実験結果を得た。次の章で、SRK の単純化による学習性能の変化について、簡単な実験をつうじ検討する。

SRK は、以下の 4 種類について検討する。 $\tau_s = 1.0$ ,  $K = 4$  の場合の概形を図 1 に示す。

- 式 (11) に従うもの (orig)

$$\epsilon_{\text{orig}}(t) = \epsilon(t) \quad (12)$$

- orig において、極大以降 0 としたもの (orig0)

$$\epsilon_{\text{orig0}}(t) = \begin{cases} \epsilon_{\text{orig}}(t) & \text{if } t \leq \tau_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

- orig を直線で近似したもの (linear)

$$\epsilon_{\text{linear}}(t) = \begin{cases} \frac{t}{\tau_s} & \text{if } 0 < t \leq \tau_s \\ \frac{\tau_s + K - t}{K} & \text{if } \tau_s < t \leq K + \tau_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

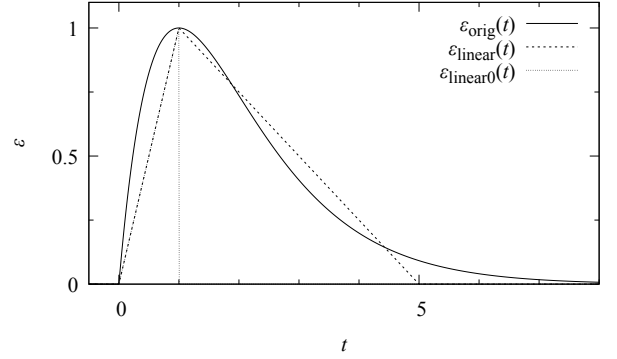


図 1: 検討対象の SRK

- orig を直線で近似し、orig の極大以降 0 としたもの (linear0)

$$\epsilon_{\text{linear0}}(t) = \begin{cases} \epsilon_{\text{linear}}(t) & \text{if } t \leq \tau_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$\epsilon_{\text{linear}}(t)$  は、SRK が従来用いられてきた指数関数を用いたものである必要性を検討するため、検討対象とする。加えて、ネットワークの対規模化に向けた計算負荷の軽減も考慮し、線形関数を組み合わせたものとした。また、文献 [3] で、SRK がいったん極大に達した後、0 に減衰するまでの時間は計算時間の軽減に寄与するだけでなく、学習精度の向上にもつながるという結果を示していた。そこで、0 に減衰するまでの時間を 0 にした  $\epsilon_{\text{orig0}}(t)$  および  $\epsilon_{\text{linear0}}(t)$  も検討対象に加える。

## 4 実験

この章では、さまざまな SRK を用いた SNN についてその学習性能を調査し、学習性能が高くなる SRK の種類について検討する。

### 4.1 実験条件

実験では、文献 [4] の実験でも用いられていた MNIST を学習させる。MNIST は、もともとは手書き文字認識の問題である。34 × 34 の画素により描かれた文字を Dynamic Vision Sensor により撮影したものを、画素毎に出現・消失の入力を用意し、該当する時刻にスパイクを入力する。図 2 は “5” を入力した際の、ある時刻における入力層への入力の例である。赤色が出現・青色が消失・黒が無入力に対応している。出力は、300ms の入力期間に対して、当該文字種の出力ユニットは 60 個のスパイクを出力し、それ以外の出力ユニットは 10 個のスパイクを出力するように学習する。

実験に用いたネットワークは、10 層のネットワークを

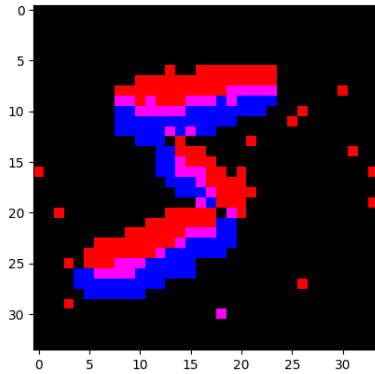


図 2: MNIST の入力例

用い、中間層のユニット数はいずれも 512 個のユニットにより構成され、各層間は全結合したものを用いた。また、ネットワークのパラメータは、文献 [4] の MNIST の実験に準じた。SRK は、前章で示した 4 種類を用い、それぞれ実験を行った。

#### 4.2 結果

図 3, 4 に SRK に  $\epsilon_{\text{orig}}(t)$ ,  $\epsilon_{\text{linear}}(t)$  を用いた場合の学習結果をそれぞれ示す。また、図 5, 6 に SRK に  $\epsilon_{\text{orig0}}(t)$ ,  $\epsilon_{\text{linear0}}(t)$  を用いた場合の学習結果をそれぞれ示す。これらの図は、横軸の学習 epoch 数に対して、上が学習時の Loss を下がり認識精度を示す。また、実線で示されたものが学習用データに、点線で示されたものが評価用データにより求めた Loss, 認識精度を示す。  $\epsilon_{\text{linear}}(t)$ ,  $\epsilon_{\text{linear0}}(t)$

まず、Loss の変化に着目する。いずれの SRK を用いた場合も、Loss は、学習用データに対しては順調に減少している。評価用データに対する Loss を比べると、 $\epsilon_{\text{orig}}(t)$  を用いた場合は、他の SRK では学習の進行が多少遅いが、大きな差異は無い。これらの結果より、SRK として、単峰性の関数を用いればその具体的な表式の違いは、大きな学習速度の違いを生まないといえる。

次に、認識精度に着目する。学習用データに対する認識精度は、いずれの SRK でも最終的にはほぼ 100% に達している。しかし、評価用データに対する認識精度は、 $\epsilon_{\text{orig}}(t)$  を用いた場合が最も低く、 $\epsilon_{\text{linear0}}(t)$  を用いた場合が最も高かった。これらの結果は、SRK を線形な関数の組み合わせにすることは、ネットワークの汎化能力の向上につながる可能性を示している。また、SRK の増加区間は発火を維持するために必要であるが、減少区間はなめらかに減衰させず不連続・急速に 0 にすることで、汎化能力が向上することを意味する。

これらをまとめると、線形関数により構成され、減衰部分を省略した SRK が、計算時間のみならず、学習性能についても効果があることが示されたといえる。ただし、この結果は特定の問題に対するものであり、幅広い検証が必要である。

#### 5 まとめ

本稿では、SNN のスパイク応答関数の簡略化が、ネットワークの学習精度に与える影響について議論した。簡単な実験をつうじ、指数関数を用いた単峰性の非線形関数として記述されていた従来のスパイク応答関数に対して、それを複数の直線で近似したものをを用いることで、計算時間の短縮だけでなく、学習精度の向上がもたらされることを示した。

このような簡略化による学習精度の向上は、非スパイク型の NN における ReLU などの導入でももたらされていた。今後は、広範な検証を続けると共に、ReLU 等との関連についても検討してゆく。

#### 参考文献

- [1] M. Pfeiffer and T. Pfeil: “Deep learning with spiking neurons: Opportunities and challenges”, *Frontiers in Neuroscience*, Vol.12, (2018).
- [2] X. Glorot, A. Bordes and Y. Bengio: “Deep sparse rectifier neural networks”, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, Vol. 15, pp. 315–323 (2011).
- [3] 尾崎, 高瀬, 北: “スパイクニューラルネットワークの応答関数近似による高速化 —複数スパイク出力時の検証—”, *東海ファジィ研究会予稿集*, pp. S2–2–1 – S2–2–4 (2022).
- [4] S. B. Shrestha and G. Orchard: “Slayer: Spike layer error reassignment in time”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 31, pp. 1419–1428 (2018).

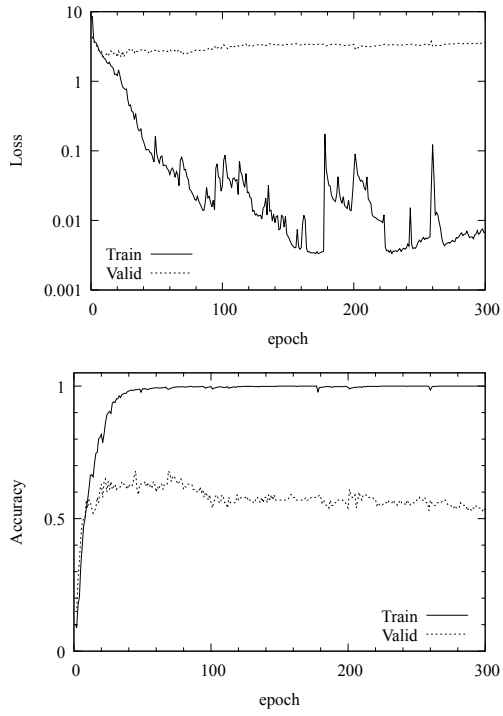


図 3: SRK に  $\epsilon_{\text{orig}}(t)$  を用いた場合の学習結果

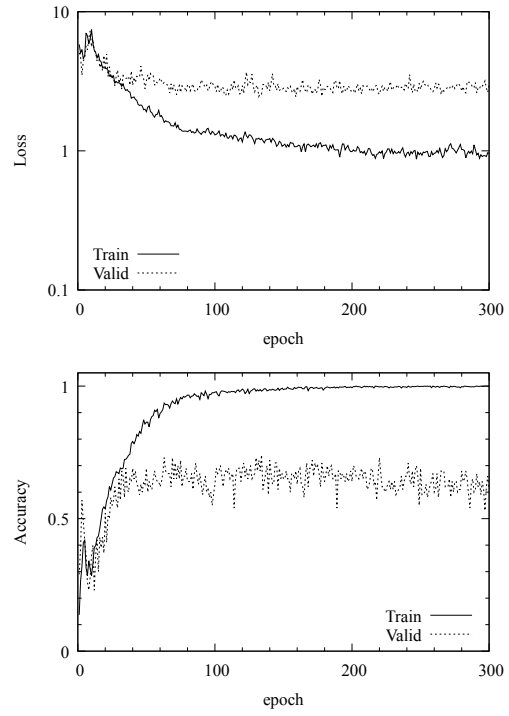


図 5: SRK に  $\epsilon_{\text{orig}0}(t)$  を用いた場合の学習結果

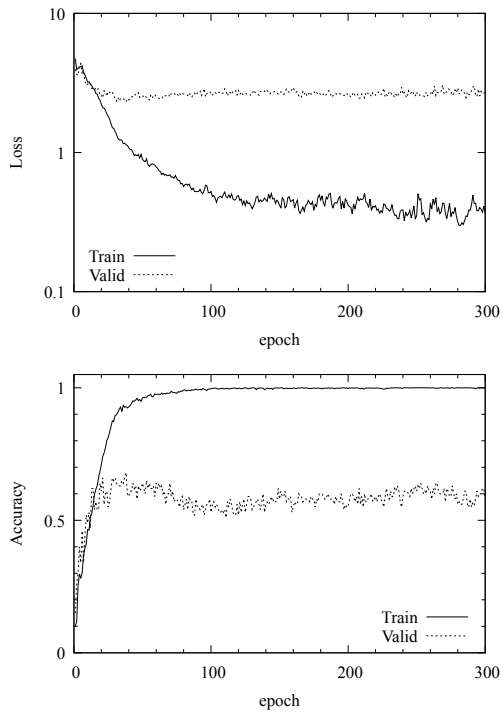


図 4: SRK に  $\epsilon_{\text{linear}}(t)$  を用いた場合の学習結果

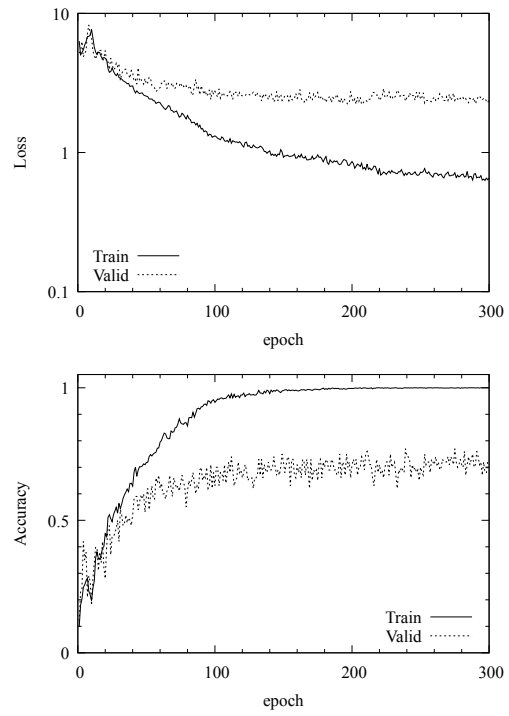


図 6: SRK に  $\epsilon_{\text{linear}0}(t)$  を用いた場合の学習結果



# キャラクタ外見の印象にユーザの認知バイアスを与える影響

Effect of Cognitive Biases for Jobs on Character Appearance Impressions.

<sup>1</sup> 中根 駿太,

<sup>1</sup>Shunta Nakanem,

<sup>1</sup> 豊橋創造大学

<sup>2</sup> 早瀬 光浩

<sup>2</sup>Mitsuhiro Hayase

<sup>2</sup> 相山女学園大学

<sup>1</sup>Toyohashi Sozo University <sup>2</sup>Sugiyama Jogakuen University

**Abstract:** In recent years, we see digital information boards in our daily lives. Most of the characters used in digital billboards are young women, and characters of other ages, genders, and characters are rarely seen. It is thought that the appearance of characters may be determined by the cognitive biases of their creators and users. In this study, we clarify how users' cognitive biases affect their impressions of a character's appearance.

## 1 はじめに

近年、駅や大規模商業施設でデジタル案内板を見かけるようになった。デジタル案内板は通行人または入場客に対して片方向あるいは双方向での音声案内を行うことを目的としている。

しかし、これらのデジタル案内板で使用されるキャラクタ外見は成人女性であることが多く、他の年代や性別、人物以外の外見を持つキャラクタは少ない。このことから、キャラクタの制作者やデジタル案内板の使用者のバイアスによりキャラクタ外見が決められている可能性があると考えられる。ユーザの認知バイアスの影響下でキャラクタ外見が異なる場合、想定とは異なる印象を与える可能性があると考えられる。例えば、ホテルの受付案内板に使用されるキャラクタ外見により印象に差異が生じると考える。

そこで本研究では、ユーザの認知バイアスがキャラクタ外見の印象にどのような影響を与えているのかを明らかにする。

## 2 キャラクタ外見に関する研究

キャラクタの外見に関する研究は古くからなされており数多く存在する。例えば、擬人化された対話型エージェントの外見の違いによるコミュニケーションの感情的な心理特性 [1] や、擬人化されたエージェントの外見についての印象評価 [2]、アバターとして使われる 3DCG キャラクタの分類 [3] 等である。

このように様々な研究がなされているが、ユーザの認知バイアスとキャラクタの外見の関係性に関する研究はない。

## 3 キャラクタの外見と制作

キャラクタの外見は、先行研究 [3] の分類法を参考に、人間型と非人間型に分類する。人間型は老年型、青年型、少年型、デフォルメ型、非人間型は動物型、無機物型の計 6 種類に分類する。また、人間型は男性、女性の 2 種類、計 10 種類に分類する。

キャラクタの制作は Stable Diffusion[6] を使用する。



図 1: 生成したキャラクタ

Stable Diffusion とはテキストから画像を生成する AI モデルである。共通で使用する生成に関するパラメータは、Width と Height は 512, sampling method は Euler a, CFG Scale は 7 とする。プロンプトおよびネガティブプロンプト, steps, seed は生成するキャラクタごとに設定を行う。

本研究では「ホテルの受付案内キャラクタ」と設定しキャラクタを生成する。図 1 に生成したキャラクタを示す。

## 4 調査

### 4.1 調査方法

調査方法は、被験者にキャラクタを提示しキャラクタへの印象をアンケートにて行う。質問項目は、エージェントが持つ性質 [4] と、Godspeed[5] を参考に 7 項目について作成する。作成した質問項目を表 2 に示す。各項目は、5 段階のリッカート尺度（「5. 思う」「4. やや思う」「3. どちらともいえない」「2. あまり思わない」「1. 思わない」）を採用する。背景による影響を除くために、生成されたキャラクタ画像に対し背景除去の加工を行う。また、認知バイアスに関する調査も行う。キャラクタの設定に合

設問 1. 優しいだと思いますか？

設問 2. 会話したら楽しそうだと思いますか？

設問 3. 親しみを感じますか？

設問 4. 会話したらリラックスできそうだと思いますか？

設問 5. ホテルについて豊富な知識を有していると思いますか？

設問 6. 正しい案内を行えると思いますか？

設問 7. このキャラクタのデジタル受付案内を利用したいと思いますか？

図 2: 質問項目

わせ、ユーザが想定するホテルの受付案内係の年代と性別を質問する。提示する順序は、Google Form のランダム機能を利用し、被験者ごとに異なる。

#### 4.2 結果

アンケート調査には、Yahoo!クラウドソーシングを利用し 1 週間実施した。回答は 481 人から得た。

##### 4.2.1 認知バイアスに関する結果

ユーザが想定するホテルの受付案内係の年代と性別の集計結果を図 3 に示す。それぞれに対し、コクランの Q 検定を行った結果、どちらも有意な差が見られた。このことから、多くの人がホテルの受付案内係は「30 代」「女性」を想定していると考えられる。

##### 4.2.2 キャラクタ外見の印象に関する結果

図 4 に、各質問項目の結果を示す。一元配置分散分析の結果、全ての項目で有意差があったため、Tukey による多重比較を行った。その結果、どの質問項目でも、ほぼすべての群間で有意差が見られた。

図 4(a) で最も平均が高かったキャラクタは少年型・女性で、少年型・女性－デフォルメ型・女性間 ( $p = 0.5960$ ) と少年型・女性－動物型間 ( $p = 0.2386$ ) で有意差がなかった。このことから、可愛い見えた目が「優しい」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(b) で最も平均が高かったキャラクタは少年型・女性で、少年型・女性－デフォルメ型・女性間 ( $p = 0.0798$ ) と少年型・女性－動物型間 ( $p = 0.9616$ ) で有意差がなかった。このことから、可愛い見えた目が「会話をしたら楽しい」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(c) で最も平均が高かったキャラクタは動物型で、少年型・女性－動物型間 ( $p = 0.9846$ ) で有意差がなかった。

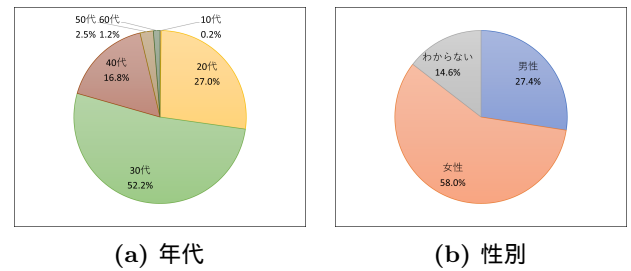


図 3: ホテルの受付案内係で想定する年代と性別

た。このことから、可愛い見えた目が「親しみを与える」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(d) で最も平均が高かったキャラクタは少年型・女性で、少年型・女性－デフォルメ型・女性間 ( $p = 0.7944$ ) と少年型・女性－動物型間 ( $p = 0.9959$ ) で有意差がなかった。このことから、可愛い見えた目が「会話したらリラックスできる」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(e) で最も平均が高かったキャラクタは青年型・男性で、青年型・男性－老年型・男性間 ( $p = 0.1516$ ) で有意差がなかった。このことから、年齢を重ねた知的な見た目が「豊富な知識を有している」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(f) で最も平均が高かったキャラクタは青年型・男性で、どのキャラクタとも有意差があった。このことから、ホテルマンらしさを備えた見た目が「正しい案内を行える」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

図 4(g) で最も平均が高かったキャラクタは少年型・女性で、少年型・女性－デフォルメ型・女性間 ( $p = 0.0676$ ) と少年型・女性－動物型間 ( $p = 0.5770$ ) で有意差がなかった。このことから、可愛い見えた目が「利用したい」印象を与えた可能性が高いと考えられる。

#### 4.3 考察

認知バイアスに関する設問で、多くの人がホテルの受付案内係は「30 代」「女性」であるとバイアスがあることがわかった。このことから、キャラクタの場合も「青年型」あるいは「少年型」の「女性」が好まれる傾向が高いと考えられる。

各設問は、参考文献 [4] の分類によると、設問 1 と 2, 4 が「感情想起性」、設問 3 が「親和性」、設問 5 が「知識豊富性」、設問 6 が「信頼性」にあたる。感情想起性、親和性では、少年型・女性のキャラクタに対して好印象を抱き、知識豊富性、信頼性では青年型・男性に対して好印象を抱いた。このことから、単純に会話するだけならば見た目が可愛いらしいキャラクタに対して好印象を

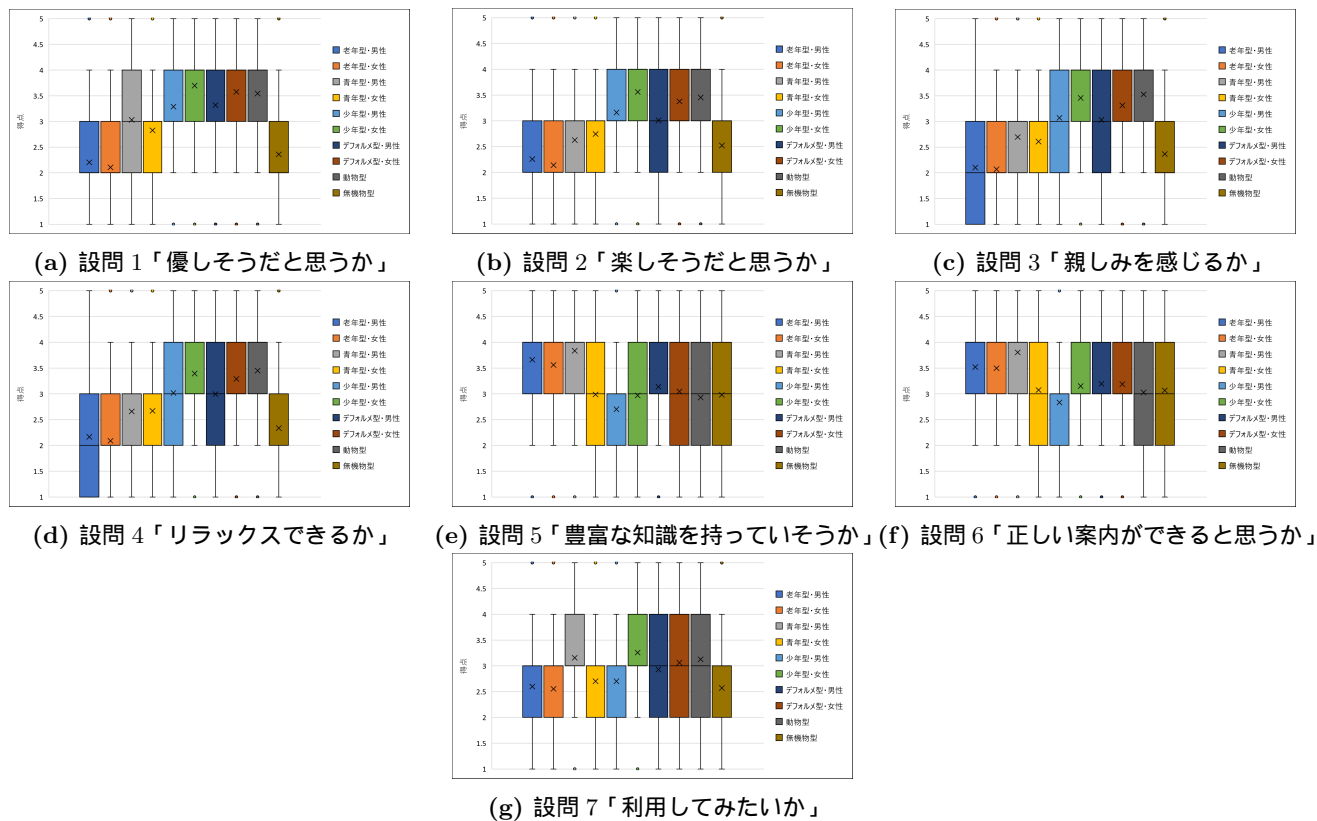


図 4: アンケート結果

抱き，知的な場面では信頼がおけるような見た目のキャラクターに対して好印象を抱くと考えられる．

また，認知バイアスの結果と各設問の結果から，ユーザの認知バイアスは感情想起性，親和性に対して影響を与えている可能性が示唆された．

## 5 おわりに

本研究では，ユーザの認知バイアスがキャラクタ外見にどのような影響を与えるか調査した．調査の結果，ユーザの認知バイアスは感情想起性，親和性に対して影響を与えることが示唆された．今後は，写実的なキャラクタの場合や被験者の年齢による違いなどを調査する．

## 参考文献

- [1] 林 勇吾, クーパー エリック, クリサノフ ピクター, 浦尾 彰, 小川 均: 対話エージェントとのコミュニケーションにおける心理特性, 日本感性工学会論文誌, Vol. 11, No. 3, pp. 459-467, 2012.
- [2] 松井 哲也, 山田 誠二: 擬人化エージェントの外見がユーザに与える印象, 第 31 回人工知能学会全国大会, 2017.
- [3] 清水 千夏, 渡邊 慎二: アバターの外見と動きとその印象に関する研究, 日本デザイン学会研究発表大会, 2021.
- [4] Tetsuya Matsui, Seiji Yamada: Building trust in PRVAs by user inner state transition through agent state transition, HAI2016, 2016.
- [5] Christoph Bartneck, Dana Kuli, Elizabeth Croft and Susana Zoghbi: Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots, International Journal of Social Robotics, Vol. 1, No. 1, pp. 71-81, 2009.
- [6] Robin Rombach, Andreas Blattmann, Dominik Lorenz, Patrick Esser, Björn Ommer: High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models, CVPR, 2022.

連絡先

早瀬光浩

E-mail: mhayase@sugiyama-u.ac.jp

# 仮想環境を用いた情報ネットワーク教育における方法と効果

○三好哲也

○Tetsuya Miyoshi

阪南大学 Hannan University

## 1. はじめに

情報通信サービスの普及によって、サービスの大きな割合が情報通信網を介して提供されるようになっており、さらに増加する傾向にある。そのことを踏まえると、ビジネスの展開方法も、情報通信サービスなくしては成り立たない状況といえる。そのため、ビジネスやサービスを担うあらゆる担当者が情報通信の仕組みを理解することで新しいサービスの立案や企画の幅が広がるとともに効率的な協議を進めやすくなる。このようなことを考慮すると情報通信ネットワークの原理や仕組みを理解することは、情報通信社会が進展する中で、エンジニアに限らず多くの社会人に有用であるといえる。

また、個人においても、個人の情報通信環境設定についてマニュアルに従って盲目的に行っている状況ではあるが、情報通信網の機能やプロトコルの基礎知識を習得することによって、トラブルシューティングを行いやすくなるなどのメリットがある。生活者の視点を考慮しても、情報通信ネットワークの仕組みの理解は、情報リテラシーの一領域として学習を進める必要がある。

情報リテラシーに関する教育は、知識と情報処理技術を一体として学習することが効果的であると考えられており、演習を中心とした教育が展開されている。このことが「情報処理技術への習熟によって理論や仕組みの理解を促進させる」ことを示している。情報通信ネットワークを支える技術や規則は、多数の情報通信プロトコルで規定され、それがソフトウェアによって実装されている。そのため、情報通信ネットワークの理論の学習においては、実際に送受信される情報を視覚的に確認することによって、その通信手順や通信プロトコルの理解が促進されると報告されている[例えば、1,2,3,4]。さらに、高校生などの情報通信に関する知識がほとんどない学習者に対して、役割分担して情報通信の様子をロールプレイさせる演習を通して、通信原理を理解させる教育効果も議論されている [19,29]。

このように演習を通して教育を展開することの効果認識される中、技術者教育に重点を置く大規模大学や工学系の情報ネットワーク教育は、ルータやスイッチングハブなどの情報通信機器を実際に配置した学習環境の下で展開されている。しかし多くの教育機関では、予算や場所の制約から教室内に情報通信を実現する機器を整備しにくい事情がある。実運用されているネットワークに対するモニタリングもセキュリティの観点から大幅に制限されるため、学習者が情報通信の様子を確認できる情報ネットワークは容易に準備できない。また、文科系学生に対

するネットワーク教育の在り方の検討も必要である。

以上のように実機を用いたネットワーク教育における課題を仮想化技術に基づく環境で解決する方法が多数報告されている。ネットワーク教育において、仮想空間やシミュレータを演習に用いる利点のうち、運営側の視点としては、

- ・実機環境に比較して、予算を低廉化しやすい。
- ・実機台数による受講者数の制約を緩和できる。
- ・実機による演習の場合とは異なり、他のコンピュータ演習と同等の演習スペースがあれば実施可能である。
- ・不慣れな学習者の場合に生じやすいケーブルの抜き差しや移動による故障のリスクを小さくできる。また修理にかかる費用を低廉化できる。
- ・設定のリセットや事前設定などの授業準備に労力を小さくできる。

一方、学習者の視点としては、

- ・場所や時間に制約されず学習が可能である。
- ・配線などもシミュレートできるようになっている場合もあるが、通信原理やプロトコルの学習に集中しやすい。

などがある。

このような運営側や受講者のメリットを実現するために、ネットワーク上で送受信されるデータの可視化やネットワーク構築演習が行えるシミュレータが提供されている。代表的なネットワークシミュレータとして、Cisco 社が提供している Packet Tracer[30]やオープンソースである GNS3[31]などがあるが、それらの機能比較が報告されている[13]。シミュレータの性能評価として、実機の機能がすべて実装されているわけではなくシミュレータにおけるネットワーク機器の機能が制約されるとの指摘もあるが、シミュレータも改善が進められている。また、教育対象や目的によっては、利用する機能は大きく異なり、例えば初学者が学習に利用する機能は限定的である。シミュレータにおいて一部の機能が制約されていたとしても、可視化やネットワーク構築ができるシミュレータはネットワーク教育において効果があると評価されている[7,11,13,21]。報告[21]によると受講者の評価として、Packet Tracerを用いた演習において、配線ミスや機器の不具合によるトラブルシューティングが必要なく、学習した知識を機器設定に集中できるという面で演習環境として好ましいと受講生に評価されていることが報告されている。Cisco システムズのカリキュラム（シスコネットワークアカデミー、CNA）を取り入れた大学や専門学校では、実機を用いた演習が義務付けられており、その前段階の演習として Packet Tracer

を用いた演習が実施されている。

近年、仮想化技術が比較的容易に利用できる環境が整いつつある。無償利用できる OS である Linux においては、Namespace (名前空間) というカーネルの機能がある。これは、Namespace で割り当てられるプロセスがそれぞれ、カーネルリソースを分割して利用する機能である。また、User-Mode Linux (UML) は、Linux 上のひとつのプロセスとして動作する Linux OS であり、Linux 環境を仮想的に構成できるソフトウェアである。この機能を利用すると容易に 1 台の PC 上で、仮想的なネットワークを構築できる。このことを踏まえて、情報ネットワーク演習を PC 上の仮想ネットワーク空間で行う教育環境についての研究が発表されている[例えば 8,10,13,33,34]。これらの多くは、仮想空間に配置したネットワーク機器や端末から構成されるネットワークにおいて、通信される情報の可視化によってプロトコル理解の支援を行ったり、受講者自身がネットワーク構築演習を行うシナリオ(課題)を与えて演習を行っている。また、この機能を利用して情報通信ネットワークの教育システムを構築し、その教育効果の評価に関する研究が多数報告されている。これらの報告においては、

- ・教育環境が容易に構築できること
- ・情報通信ネットワーク上の通信を視覚的に提示することで、プロトコルの理解を促進できることが報告されている。

一方で、情報ネットワークなどの情報基盤において、サーバやソフトウェアをすべて自社で提供するオンプレミス方式の情報処理システムでは、その維持管理費用が高額になるため、仮想化技術を用いたクラウドサービスを利用する情報システムの構築が広がっている。Amazon Web Service (AWS) やサクラインターネットなどの仮想システムを基盤としたクラウドサービスベンダーでは、利用者や利用検討者向けに、ネットワークシステム構築のためのオンデマンドセミナーを無料で提供している。特に、様々な状況を想定してネットワークインフラを構築する演習(ハンズオン)も提供されている。これらを教育に活用することにより、より実務に即したネットワーク構築の学習の可能性が考えられる。大学1年生にクラウドサービスを体験させるために、AWS 上でサーバを構築する演習を大学1年生の授業で行い、その教育効果と課題について報告されている[24]。

本報告では、情報通信ネットワークの基礎的な教育を展開するにあたってのネットワーク演習方法の検討のために、これまでのネットワーク演習に関する研究発表に対して調査し、その集約結果を報告する。先行研究に対する調査においては、実機を用いる場合も含めて調査を行ったが、研究報告の殆どは、無料で提供されるネットワークシミュレータや仮想空間上で構築されるネットワーク上で実施する演習に関する研究報告であった。これらを教育に用いるための方法論とその効果について集約し、今後の教育に展開する場合についての考察を報告する。

## 2. 演習を伴う情報通信ネットワーク教育

### 2.1 情報通信を視覚化する初学者向け教材開発

中学校や高等学校での情報科目の中で、情報通信技術の基礎を教育する際に、通信状況の物理的可視化と物理的直接操作の有用性が報告されている[17, 18]。香山らは、高等学校の情報科目における情報通信に関する教育が十分展開されていない状況に対して、高等学校教育における情報科目の取り扱い内容の整理とデータリンク層におけるビット同期、キャラクター同期、エラー検出と同定の仕組みの可視化する教材を提案している。ビット同期、キャラクター同期、エラー検出教材は共にワンボード組み込み PC である Arduino 上で Processing を稼働して、通信状況を視覚化するシステムを提案し、その教育効果を考察している[17]。また、吉原らは、IP アドレスの設定と Ping による導通確認を複数のワンボードコンピュータで構成されたネットワーク上で行う演習を提案している。提案の演習方法で、初学者への興味喚起や演習を通じた実体験による知識の定着の効果が報告されている[18]。

情報通信についての初学者、特に中高生など通信の原理に接したことがほとんどない対象に対しては、機器やシミュレータを用いないアンプラグドな教育方法がネットワーク教育において有効であるとの報告がされている[19]。データの伝送路とルータの役割を生徒が演じるロールプレイを基に教授する教育方法が考察されている。演習では、回線交換モデルとパケット交換モデルのそれぞれのデータ通信方式を模倣して、手を使ってデータを伝送する実験を行う参加型シミュレーションを行わせている。そのうえで、通信性能の良否について考察させる演習となっている[29]。

### 2.2 ネットワークシミュレータを用いた教育

シスコシステムズ社は、将来のネットワーク技術者の養成を目的としてシスコ ネットワーキング アカデミー (Cisco Networking Academy, CNA) という教育プログラムを世界中で展開している[32]。日本でも大学や専門学校など 175 校 (2023 年 2 月 5 日現在) の教育機関等が参加、運営している。CNA では、情報ネットワークに関する知識とそれを実現する機器操作に関する技術の教育を提供している。ネットワーク機器操作の演習授業がカリキュラムに組み込まれているため、学習用のレイヤー3 スイッチ (L3SW)、レイヤー2 スイッチ (L2SW)、ルータ、端末など多数のネットワーク機器を配置して、実機によるネットワーク構築演習を行っている。しかし、CNA 以外の教育機関においては、それら機器を維持することや、複雑なネットワーク構築演習を行うために必要な機器を受講生数に合わせて準備することが容易ではない。

また、実機を用いる場合は、演習場所が学校などに限定されるため、学生に対して課外時間に学習機会を十分に提供できないことが生じる。このような



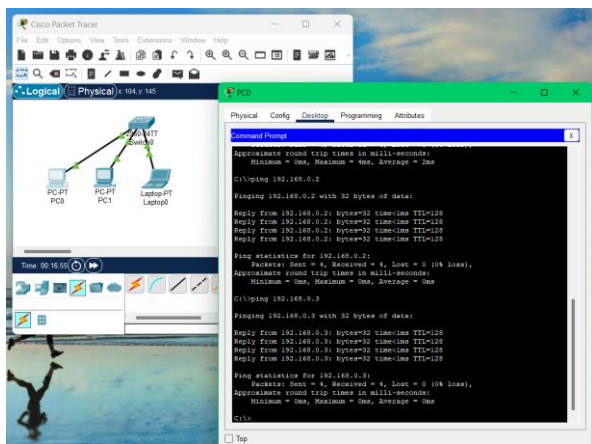


図1 Packet Tracer の画面キャプチャー例

状況を解消するために、シスコシステムズ社がネットワーク構築できるシミュレータとして Cisco Packet Tracer を提供している[30]。Cisco Packet Tracer では、まず、ネットワークトポロジを踏まえてネットワーク機器や端末を配置して、機器を適切なケーブルで接続する。そして、ネットワーク機器、端末のネットワーク環境を設定し、通信が可能かどうかの確認作業を行う。ネットワーク機器や端末ではそれぞれのOSのイメージが再現されるので、実機を設定するかのようにネットワーク設定を進めることができる。図1に Packet Tracer 上で構築したネットワークトポロジとその設定によって確認できる情報を表した画面キャプチャーを例示する。

例えば、L2SW を介して3台の端末を接続する演習では、L2SW と端末を適切にストレートケーブルで接続し、端末のIPアドレスなどを設定すると、Pingなどで導通確認が可能となっている。

Packet Tracer では、通信のパケットをモニターするシミュレーションモードという機能も実装されており、端末やネットワーク機器で送受信されるパケットが視覚化されるとともに、通信の可否、パケットの内容などを表示することができる。情報ネットワークの学習者にとっては、ネットワーク機器で制御しているデータ（パケット）の内容が確認できるので、通信プロトコルの理解を深めることができるようになっている。

Packet Tracer の顕著な特徴は、物理的な機器配置と論理的な配置を視覚的に確認することができ、その中でネットワーク機器や端末の通信設定を行えるところである。また、通信環境を設定した後に通信制御の要件を満たしているかのテストが容易におこなえるように、パケットジェネレータによる通信テストや多数のパケットが発生して対象のパケットを把握しづらいときに利用できるフィルタリング機能が付加されており、現実的なテストと優れた操作性を持っている。

既存研究の一覧表である表1の「利用ソフト」の項目に Packet Tracer と記されている研究は、ネット

ワーク演習に Packet Tracer を用いて教育効果を評価した研究である[7,11,13,21]。オープンソースであるネットワークシミュレータである GNS3 を使った報告は、参考文献[27]のみで、Packet Tracer に関する研究に比較して少なくなっている。それぞれの研究数は、調査範囲に依存することではあるが、GNS3 では、ネットワーク機器の OS を自前で用意する必要があるが、Packet Tracer は、実機に比較して機能は制限されるが、プレイインストールされているため、利用者の準備が容易であり採用割合が高いと推察される。また、国外でも Packet Tracer を用いた演習方法に関する研究報告もされている[7,11,13]。

### 2.3. 仮想空間を用いたネットワーク教育ソフト

コンピュータの高機能化に伴って、ハードウェアを効率的に利用する一つの方法として仮想化技術が広く利用されている。仮想化技術は、ホスト型、ハイパーバイザ型、コンテナ型に分類できる。ホスト型のうち無料で利用できる Virtual Box (Oracle 社提供) は、既存の OS 上で、別の OS を実行するのに使う仮想環境（仮想マシン）を構築するためのオープンソースウェアである。Linux OS には、OS をプロセスとして起動できる User-Mode Linux (UML) がある。仮想化空間上にネットワークを構成してそれをネットワーク教育のプラットフォームとして積極的に利用されているが、上記の仮想化技術を用いてネットワーク演習を行う教育方法の効果測定をする研究や、新しい教育環境を提案する研究が発表されているが、これらの研究においては、国内、国外ともに UML を利用する研究が多く報告されている[例えば、8,10,13,33,34]。ここでは、UML を用いたネットワーク教育のプラットフォームに関する研究を紹介する。UML を用いたネットワーク演習環境構築に関する研究は、調査した範囲では、2007 年以降に研究発表がなされており、立岩らの研究グループと井口らの研究グループが精力的に研究開発している。

立岩らの研究グループ[8,25,26,38]は、LAN 構築を想定して、ネットワークを構成するルータ、スイッチングハブ、サーバやクライアントを表すコンピュータを UML で代替し、1 台のホストコンピュータ上に仮想的なネットワークを構築するシステムを提案している。ネットワークに含まれる機器は、10～20 台として、システムが設計されている。また、UML の操作を簡便にして、TCP/IP の理論学習に集中できるように、機器の配置やネットワーク環境構築が GUI で設定できる工夫がなされている。また、パケットの伝送状況を視覚的に表現し、TCP/IP で規定されるプロトコルを理解できるように工夫がされている。近年は、これまで構築してきたシステムを改変し、DoS/DDoS 攻撃、パスワードクラッキング、パケットスニフィング、バックドア、バッファオーバーフローなどの攻撃に対するセキュリティ対策の演習も実施している報告がなされている[25,38]。

井口らの研究グループ[33,34,26,27,28]は、ルータやスイッチの設定を行う演習のために、立岩らの研究と同様に UML によってネットワーク機器や端末を代替し演習のプラットフォームを提供する方法を提案、評価している。RIP をはじめとする複数のルーティングプロトコルを UML 上に実装している。ネットワーク構築演習における GUIの実装や設定したネットワーク環境の保存と保存データからの再構成機能も実装されている。開発したネットワーク演習プラットフォーム上で、DoS/DDoS 攻撃など攻撃に対するセキュリティ対策の演習も実施している[27]。

また、国外においても UML を用いた演習 (Laboratory) の開発に関する研究報告が同時期に行われている[39,14]。国内外を問わずネットワークに係る学習において、通信実態の視覚化やネットワーク構築演習の重要性が認識されるとともに、仮想化技術を用いた演習環境の構築が研究報告されている。

## 2.4 仮想化ミドルウェアを用いた仮想空間上での演習教育

仮想化を実現するソフトウェアはホスト型、ハイパーバイザ型、コンテナ型があるが、ホスト型の VMware (VMware inc.提供) およびハイパーバイザ型の Hyper-V (マイクロソフト社提供) を用いたネットワーク演習環境開発についての報告がなされている。VMware を用いた研究では[6]、比較的少人数 (20 人程度) で行う演習を想定した方法である。ネットワーク上の機器を VMware のゲストマシンとして稼働させるため、単一組織のネットワークしか構築できない問題があり、xtreme 製レイヤー3 スwitchにて構築し、グループごとに WAN や独立した組織ネットワークを構築することができるよう工夫されている。提案のネットワーク演習環境においては、大学のファイアウォール内に仮想的に構築できるため、インターネットとの接続を確保できるが外部からの攻撃のリスクは比較的小さい特徴がある。

Hyper-V を用いた演習環境構築に関する研究として、コンピュータ演習室で比較的小規模な受講者数 (16 名) が、サーバ構築を行う演習環境の自動構築についての研究が報告されている[15]。1 台のホスト PC (CPU : i7-3930K, 主記憶装置 : 16GB, OS : Windows8.1) に 17 のゲスト OS (CentOS6.4) を起動しても、ホスト PC の CPU 使用率は、起動後で数%であり、演習中の 20%を超えることはないと報告されている。CUI を基本とした演習であったためと推察される。

実際に授業で利用されているかは明確ではなく、研究発表数との相関の有無も明らかではないが、調査した範囲の研究発表では、仮想化ミドルウェアを利用した演習環境の構築例はこの 2 例しか見当たらなかった。サーバ構築のみならずネットワークを仮想空間で構築する演習を想定する場合は、文献[6]で言及されているように、レイヤースイッチ3を用い

たセグメント分割するなどの方法を別途検討する必要がある。

## 2.5 商用のクラウドサービスネットワークを用いた教育

### 2.5.1 AWS の教育利用制度

クラウド利用したシステム開発が広く浸透する中で、クラウド技術を持った人材に対する要請が大きくなっている。このことを踏まえてクラウドサービスを展開する Amazon 社では、パッケージ化されたクラウドコンピューティング学習カリキュラムを高等教育機関向けに無償で提供する AWS Academy を運営している。教育目的とした AWS の利用を無償化する AWS Education も展開している。これらの比較を参考文献[36]より表 2 に転載する。AWS の教育利用は広がっているが、本稿のテーマである仮想ネットワーク上でのネットワーク演習に関しては、ほとんど研究報告が見られず、継続した調査が今後の課題である。以下に、大学初年次生を対象に行われた演習と、著者の大学で行った演習について紹介する。

### 2.5.2 AWS 上のサーバ構築演習の評価

Amazon Web Services (AWS) をはじめとしてクラウドサービスを利用したシステム開発が増加してい

表 2 AWS Education と AWS Academy の比較  
文献[36]スライド 28 より転載

	AWS Education	AWS Academy
目的	クラウドの学習環境とそれに紐づく求人情報へのアクセス環境を学生に提供する。	クラウドの学習コースを教育機関のカリキュラムに組み込み、クラウドについての理解促進と、生徒の認定取得を目指す。
学生(生徒)の対象年齢と対象	14歳以上で、なんらかの教育機関で学習をする生徒であればどなたでも (社会人教育も含む)	高校卒業以上で、Academy プログラムで講師認定を受けた教員が指導をするクラスがあるAcademy加盟校の学生
学習形態	オンライントレーニング (自習)、または教員が運営する独自のクラスの中で提供されるクレジットを利用しAWSを使用することも可能。学生、教員が自由に活用できる。	学校で実施される目標とする資格取得のためにデザインされたクラスへの出席、オンライントレーニング、またはそれらの組み合わせ。
参加方法	学生、教員との個別に申し込みと利用開始が自由に可能。登録機関の学生・教員はクレジットが増えます。	機関登録、教員のトレーニングと講師認定が完了後、クラスが始まり学生が受講できるようになります。
費用	学生、教員、機関、企業のリクルータの登録料、会費などは一切無い無償のプログラムです。	登録、教員のトレーニング、学習リソースは無料で提供され、認定試験は教員、学生ともに50%割引で受験可能になります。

る。クラウドサービスにおける IaaS, PaaS の仕組みやシステム開発環境への理解を深めるために、大学 1 年生を対象とした教育実践が報告されている[24]。情報処理技術の初学者を対象に AWS での Web サーバ構築演習を 1 年後期の 3 回の講義で実施し、その教育効果を議論している。サーバ構築に対する深い理解の促進には課題は残るが、クラウドに関する興味喚起の効果が確認されるとともに、演習実施に向けての課題が整理されている。

大学 1 年生の初学者にも関わらず、Apache Web サーバ構築完了まで 65%の受講者が完了できており、初学者の演習課題として十分成り立つと報告している。課題を理解し応用できる知識として修得するための課題としては、IP アドレス、DNS などのインターネットの基礎的知識を先行して学習する必要性とまとめられている。また、操作に関しては CUI への不慣れや PC 上のファイル管理などコンピュータを利用する際の基礎的スキルの不足が挙げられている。

### 2.5.3 AWS を用いた授業展開のための予備授業

クラウドサービスの利用が拡大している背景を考慮して、クラウド上にネットワークシステムを構築することの意義や方法の理解を目的に、AWS 上でサーバ構築演習と AWS 上にプライベートネットワーク空間の構築演習をそれぞれ 3 回、合計 6 回の講義・演習で行った。講義は、TCP/IP やセキュリティの内容を含む 2 科目を学部生時代に履修した阪南大学大学院学生 4 名を対象に学部教育展開の準備として 2021 年前期に行った。すべての受講生は、これまでにネットワーク構築やクラウド利用の経験はなく、今回の演習が初めてのクラウド利用であった。学生自らが実施内容をチェックできるように、AWS で用意されたハンズオンに関するビデオを参照して実施できる演習とした。演習における CUI の操作方法やネットワークに関する知識不足をビデオ参照することで自らのペースで学習できる様にした。

受講者が大学院生でもあり、情報系就職を希望していることもあり、実践的な内容に対する知識習得意欲を持っていることもあり、課外での利用を通して、学生が持つ以下のような学習課題を配布資料やネット学習によって克服しながら演習課題に取り組んだ結果、全員、課題をなし終えた。

- ・Linux における CUI 操作への不慣れ
- ・TCP/IP の理論に対する知識不足
  - IP アドレスは知っているが、クラスレス IP アドレスの概念を理解していない
  - トランスポート層 (TCP/UDP) の機能を理解していない
  - NAT/NAPT におけるローカル IP・グローバル IP の変換機能を理解していない
- ・クラウドサービスにおける仮想ネットワーク構築の概念が理解できない。

なお、以上の学習上の課題は、学生からの質問内容や口頭の QA により収集した事項をまとめたもの

である。

これらの学習課題から、学部での授業展開をするための課題として以下のことが考えられる。これらの課題の対策を踏まえて講義計画が必要であることが明らかになった。学部での教育展開に際しては、ネットワーク演習の前段階の演習の設計や、演習処理中のヒント提供などの工夫が必要あるといえる。

- (1) Linux における CUI へ習熟させる
- (2) 演習に係る TCP/IP の関連事項の事前学習
- (3) クラウドサービスにおける全体的な操作方法

### 3. ネットワーク教育における演習方法とその効果に関する考察

情報教育における演習が知識の修得とその応用性を高めることが認められている。情報ネットワーク論の教育においても、演習の重要性が認識され、演習環境の整備、演習を含めた教授方法、学習環境の自動化など多面的な研究成果が国内外で報告されている。本節では、本報告で調査した既存研究の概要をまとめた表 1 に基づき、演習環境の時間的進化について考察する。

#### 3.1 TCP/IP のプロトコル理解のための可視化

表 1 にまとめられたネットワーク演習に関する研究の経過を見ると、2000 年代前半においては、ルータやスイッチから構成されるネットワーク上で転送されるパケットやフレームのヘッダ情報を学習者の操作によって可視化して学習者に提示するシステムの提案や教育上の効果をもが評価されている[2,3,4]。

例えば荒井らは、SMTP, POP, HTTP のアプリケーションプロトコルごとにデータ構造と通信手順を学習するツールを開発した。提案の学習サポートシステムでは、Ethernet, IP, TCP それぞれのヘッダ情報を区切って提示することにより、PDU (Protocol Data Unit) に各層で規定されるプロトコルに従ったヘッダ情報が付加・除去されカプセル化・非カプセル化される様子を可視化している。また、TCP の 3 ハンドシェイクなどの様子を可視化して示し、TCP に関する通信規約を理解できるようにしている。

国外の研究発表では、2.2 で述べたように Packet Tracer 等のネットワークシミュレータ上で通信内容を確認する演習を設定し学生の理解を導いている。

#### 3.2 ネットワーク構築演習を通しての学習支援

今回の調査の範囲では、2003 年以降仮想化技術を用いたネットワーク演習環境の開発が報告されている[5,8,33,34]。特に UML によりネットワークを構成する機器を表現する方法は、国内外でも 2007 年以降に発表されている。仮想空間上に配置する機器をそれぞれ UML のゲスト OS 上で模擬するため、配置する機器が多数の大規模なネットワークの構築には、ハードウェア上の制限が生じることが予想される。しかし、いずれの研究においても 20 台程度までで構成される LAN においては、演習室に配置されている PC で運用できると報告されている。UML ではなく、VMware を用いた演習環境においても、レイヤースイッチ 3 とくみあわせることで複数のセグメン

トを持つネットワーク演習が可能なシステムも提案されている[6].

### 3.3 演習システムのユーザインターフェース

ネットワーク演習を設計するときの重要な点の一つとして、学習者のスキルに沿った演習課題の設定が挙げられる。サーバ周りの通信状況をモニターする場合、通常はtcpdumpなどのコマンドを用いてモニターをする場合が多いが、Linux コマンドに不慣れな学習者の場合、主たる演習課題を開始できないこと生じる。このようなことがないように初学者にも操作が容易なように、GUI インタフェースを準備する演習システムが発表されている[8,33,34]。特に、ネットワーク構築演習においては、ネットワークを構成するルータやスイッチ及び端末をマウス操作で設定できるようになっており、スムーズに演習を実施できるような工夫がなされている。

### 3.4 教育対象者のレベルに合わせた演習コンテンツ

今回の調査対象であるネットワーク教育における演習方法や演習環境に係る研究において対象とする学習者は以下の3段階に分類できる。

- 1) 中高生など情報通信に関する教育に初めて接するような対象者
- 2) 大学レベルで情報通信の理論を学んでいる対象者
- 3) CNA や工学部などでみられるネットワーク技術者を目指す対象者

これらの3つの対象に対して、学習者の知識レベルが異なるため、提供する教育内容も異なることは当然であるが、要約すると以下のような目標設定になっている。

- 1) 身の回りの情報通信への興味喚起、その結果としての情報通信に係る知識、技術学習への意欲を向上させる。
- 2) 理論の理解：TCP/IP などの情報通信における規則や制御方式の理解できることを目指し、その理解を補助するために実際の情報通信におけるパケットやセグメントの内容を学習者に提供する。
- 3) 理論の適用：通信上の実際の制御において、TCP/IP の実装状況の理解

指定された仕様の設定、

以上の能力に加えて、実務的には要求仕様にあったネットワークを知識と技術を総合的に活用して、設計・実装できることが目指されている。調査対象の研究の殆どは、上記2, 3に対応できるようなシステムである。しかしながら、仮想化空間におけるネットワーク演習環境の構築は、自動化も可能であり学習者の学習環境をダイナミックに形成することも可能である。表1における環境自動化にチェックのある研究[8,10,15,20]も進められており、学習者のレベルが混在するような演習であっても、学習者に対してカスタマイズした学習環境の提供の可能性が示唆されている。

### 4. おわりに

本研究では、情報通信ネットワーク教育の充実の

ために演習教育の必要性に着目し、シミュレータの利用や仮想空間上での演習環境に関する既存研究の整理分類を行い、教育方法の時代変化や学習者のレベルに応じて実装が求められる仕様や演習課題の設定方法について考察した。シミュレータや仮想空間上で、現実のネットワーク通信を正確に模擬できる環境が整備されており、TCP/IP の理解のための演習にとどまらず、ネットワーク構築、セキュリティに関し脆弱性の検証など、情報通信ネットワークで理解すべき内容についての演習方法が検証されていることが明らかになった。一方、演習の準備に要する多大な人的コストの低減に、演習用環境構築の研究も行われている。Amazon Web Sservice (AWS)では、教育利用の無償などが展開されており、実務的にも有用なクラウドサービス上でのネットワークシステムの構築のための演習の在り方の検討が引き続き検討する必要があるといえる。

### 参考文献

- [1] 山根 健一, 矢吹 道郎, TCP セッションを考慮したパケットモニタリングツール, 情報処理学会 第 47 回全国大会講演論文集, 1994
- [2] 市村洋, 誤り検出の目視検証システムの試作, 電子通信情報学会技術研究報告, ET94-52, pp.55-62, 1994
- [3] 荒井正之, 田村尚也, 渡辺博芳, 小木曾千秋, 武井恵雄, TCP/IP プロトコル学習ツールの開発と評価, 情報処理学会論文誌, 44, 3242-3251, 2003
- [4] 早川正昭, LAN 構築シミュレータの開発と教育手法の改善, 教育システム情報学会全国大会講演論文集, Feb. 2001 26 367-368, 2001
- [5] 木村昌史, 精嶋幹人, 教育向けネットワークシミュレータの開発, 情報処理学会 第 65 回全国大会講演論文集, 2003
- [6] 中川泰宏, 須田宇宙, 浮貝雅裕, 三井田惇郎, VMware を利用したネットワーク管理者教育の試み, 情報処理学会第 65 回全国大会講演論文集, 2003
- [7] Cecil Goldstein, Susanna Leisten, Karen Stark, and Alan Tickle, Using a Network Simulation Tool to engage students in Active Learning enhances their understanding of complex data communications concepts, Proc. On the Australasian Computing Education Conference 2005
- [8] 立岩佑一郎, 安田孝美, 横井茂樹, 仮想環境ソフトウェアに基づく LAN 構築技能と TCP/IP 理論の関連付け学習のためのネットワーク動作可視化システムの開発, 情報処理学会論文誌. 48-4, pp.1684 - 1694, 2007
- [9] C. E. Caicedo and W. Cerroni, Design of a computer networking laboratory for efficient manageability and effective teaching, Proc. On Frontiers in Education Conference, 2009. FIE'09. 39th IEEE, 2009.
- [10] 川西千晶, 今井慈郎, ネットワーク学習支援のための経路制御可視化アプリケーション開発, 電子情報通信学会技術研究報告, 第 110 巻, 第 453 号, pp.181-186, 2011
- [11] Zhang, Yongbin & Liang, Ronghua & Ma, Huiling, Teaching Innovation in Computer Network Course for Undergraduate Students with Packet Tracer., IERI Procedia. 2, pp.504-510.10.1016/j.ieri.2012.06.124.,

- [12] 牛込翔平, アサノ デービッド, 鈴木 彦文, 仮想プラットフォームを用いたネットワーク演習環境開発に関する研究において実現した IP ルーティング演習環境開発とその評価, 教育システム情報学会研究報告, 27 (2), 131-136, 2012
- [13] Liangxu, Sun & Wu, liansheng & Zhang, Yujun & Yin, Hang., Comparison between physical devices and simulator software for Cisco network technology teaching., 1357-1360. 10.1109/ICCSE.2013.6554134.
- [14] A. Ruiz-Martinez, F. Pereniguez-Garcia, R. Marin-Lopez, P. M. Ruiz Martinez, and A. F. Skarmeta -Gomez, Teaching Advanced Concepts in Computer Networks: VNUML-UM Virtualization Tool, IEEE Trans. on Learning Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 85-96, Jan. 2013.
- [15] 丁亜希, 山守一徳, ネットワーク演習のための仮想サーバ構築, 三重大大学教育学部附属教育実践総合センター紀要, 第 34 号, pp.13-18, 2014
- [16] Miguel Bazdresch, A small network simulator for learning routing fundamentals, Proc. on 2018 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), San Jose, CA, USA, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/FIE.2018.8658996.
- [17] 香山瑞恵, 箕浦航, 山本翔, 不破泰, 橋本昌巳, 情報通信ネットワークにおけるプロトコルの基本概念理解のためのハンズオン教材, 教育システム情報学会研究報告, 27 (2), 131-136, 2012 情報学会誌, 35-2, pp. 163-174, 2018
- [18] 吉原和明, 井口信和, 渡辺健, 物理的可視化と物理的直接操作による IP アドレスの仕組みを学習するための教材の開発と評価, 日本産業技術教育学会誌, 60-2, pp.73-80, 2018
- [19] 鈴木大助, 通信の仕組みを理解するためのロールプレイ演習の開発と実践, 情報処理学会研究報告 (Web) 2017(CE-140) Vol.2017 - CE - 140, No.10, 1 - 7 (WEB ONLY) 2017 年 7 月 1 日
- [20] eville Palmer, Warren Earle, & Jomo Batola, Automating the Configuration Management and Assessment of Practical Outcomes in Computer Networking Laboratories, Intelligent Computing, 2019, Volume 857, pp 307-318
- [21] 鈴木大助, コンピュータネットワーク構築の学習における学習者から見た実機演習とシミュレータ演習の比較, 情報処理学会研究報告, 2019-CE-149, no.11, 2019
- [22] 鈴木大助, TCP/IP ネットワークの理解を促進する無線パケットキャプチャ演習の開発と実践, 教育シンポジウム予稿集, 2019
- [23] D.Bjelobrk Knežević, V.Tadić and Ž. Širanović, Flipped Classroom Model for Advanced Networking Courses, 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2019, pp. 600-604, doi: 10.23919/MIPRO.2019.8756854.
- [24] 鈴木 大助, 一般情報教育における Amazon Web Services を利用したサーバ構築演習, 研究報告コンピュータと教育 (CE), 2020-CE-153, 2020
- [25] 立岩佑一郎, ネットワークセキュリティ演習のための直感的でシームレスな操作性と軽快な応答性を旨としたウェブ型演習システムの評

- 価, 電子情報通信学会教育工学研究会信学技法 121(294), pp. 1-6, 2021
- [26] 立岩佑一郎, 井口信和, 仮想化技術を用いたネットワーク演習環境, 電子情報通信学会誌, 104-8, pp.872-877, 2021
- [27] 眞鍋督, 井口信和, 柏崎礼生, 岸本和理, DDoS 攻撃対策演習を可能とするネットワークセキュリティ学習支援システム, 情報処理学会第 83 回全国大会講演論文集 2021 (1), 483-484, 2021-03-04, 2021
- [28] 藤井 勝央, 井口 信和, ネットワーク機器の内部処理の可視化を可能とする QoS 制御学習支援システム, 情報処理学会第 84 回全国大会, 2022
- [29] 大石 智広, 望月 俊男, データ通信方式の特徴を科学的に理解する探究型の授業実践, 日本教育工学論文誌 /44 巻 (2020) 3 号, pp.335-349, 2020, <https://doi.org/10.15077/jjet.44039>
- [30] Cisco Packet Tracer, <https://www.netacad.com/ja/courses/packet-tracer> (2023/02/01 閲覧)
- [31] GNS3 (General Network Simulator-3), <https://gns3.com/> (2023/02/01 閲覧)
- [32] Cisco Network Academy (CNA), <https://www.netacad.com/courses/networking/ccna-introduction-networks> (2023/02/01 閲覧)
- [33] 西嶋崇, 井口 信和, 仮想 Linux 環境を活用したネットワーク構築演習システムへの実ネットワークとの通信機能の開発, 情報通信学会全国大会講演論文集 第 72 回 (コンピュータと人間社会), 675-676, 2010
- [34] 井口信和, 仮想ルータを活用したネットワーク構築演習支援システムの開発, 情報処理学会論文誌, 52-3, pp.1412-1423, 2011
- [35] Amazon Educate, <https://aws.amazon.com/jp/education/awseducate/> (2023/02/01 閲覧)
- [36] アマゾン ウェブ サービス ジャパン株式会社パブリックセクター編, AWS Educate と AWS Academy の比較, [https://d1.awsstatic.com/webinars/jp/pdf/services/20190724\\_PubSec\\_Education\\_webinar.pdf](https://d1.awsstatic.com/webinars/jp/pdf/services/20190724_PubSec_Education_webinar.pdf) (2023/02/01 閲覧), スライド 28
- [37] 鈴木 大助, パケットキャプチャ演習が通信の仕組みの理解にもたらす効果, 情報教育シンポジウム論文集 2018 (11), 76-83, 2018
- [38] Yuichiro TATEIWA, LiNeS Cloud: A Web-Based Hands-On System for Network Security Classes with Intuitive and Seamless Operability and Light-Weight Responsiveness, IEICE Transactions on Information and Systems E105.D(9) 1557-1567 2022
- [39] F. Gala'n, D. Fernandez, W. Fuertes, M. Go'mez, and J.E.L. de Vergara, Scenario-Based Virtual Network Infrastructure Management in Research and Educational Testbeds with VNUML, Annals of Telecomm. - Annales Des Tcommunications, 64-5/6, pp. 305-323, <http://dx.doi.org/10.1007/s12243-009-0104-3>, 2009.

## 連絡先

三好哲也 阪南大学経営情報学部  
E-mail : miyoshi@hannan-u.ac.jp



表1 既存研究の研究目的, 評価対象などの比較

文献番号	題目	発表年	利用ソフト	教育対象	の 機 可 視 化	能 理 解 の た め の 情 報	習 ( 自 作 以 外 ) の シ ミュ レー タ に よ る 実	実 習 環 境 の 提 供	比 較 な ど 効 果 の 検 証	授 業 環 境 設 定 の 自 動 化	成 績 評 価 の 自 動 化	教 授 方 法 の 改 善
[1]	TCPセッションを考慮したパケットモニタリングツール	1994	自主開発 機能：可視化		○							
[2]	誤り検出の目視検証システムの試作	1994	自主開発 機能：可視化	大学生などの初 学者	○							
[3]	TCP/IP プロトコル学習ツールの開発と評価	2003	自主開発 機能：可視化	大学生117名	○							
[4]	LAN構築シミュレータの開発と教育手法の改善	2001	自主開発	大学生などの初 学者	○							
[5]	教育向けネットワークシミュレータの開発	2003	自主開発					○				
[6]	Vmwareを利用したネットワーク管理者教育の試み	2003	Vmware	大学生3年生				○				
[7]	Using a Network Simulation Tool to engage students in Active Learning enhances their understanding of complex data communications concepts	2005	packet tracer	大学生66人			○					
[8]	仮想環境ソフトウェアに基づくLAN構築技能とTCP/IP理論の関連付け学習のためのネットワーク動作可視化システムの開発	2007.4	UMLを利用して 自主開発	大学生			○	○		○		
[9]	Design of a computer networking laboratory for efficient manageability and effective teaching	2009	なし	大学生					○			
[10]	ネットワーク学習支援のための経路制御可視化アプリケーション開発	2011	自主開発	大学生			○	○	○	○		
[11]	Teaching Innovation in Computer Network Course for Undergraduate Students with Packet Tracer.	2012	packet tracer	学部生			○					
[12]	仮想プラットフォームを用いたネットワーク実習環境開発に関する研究において実現したIPルーティング実習環境開発とその評価	2012	自主開発	高専4年生				○				
[13]	Comparison between physical devices and simulator software for Cisco network technology teaching.	2013	packet tracer	大学生			○		○			
[14]	Teaching Advanced Concepts in Computer Networks: VNUML-UM Virtualization Tool	2013	UMLを利用して 自主開発				○	○				
[15]	ネットワーク演習ための仮想サーバ構築	2014	Hyper-Vと自主 開発	大学生				○		○		
[16]	A small network simulator for learning routing fundamentals	2018	自主開発		○	○						
[17]	情報通信ネットワークにおけるプロトコルの基本概念理解のためのハンズオン教材	2018	ハードウェアも 含めたシステム の自主開発	高校生	○							
[18]	物理的可視化と物理的直接操作によるIPアドレスの仕組みを学習するための教材の開発と評価	2018	ハードウェアも 含めたシステム の自主開発		○							
[19]	通信の仕組みを理解するためのロールプレイ演習の開発と実践	2018	ロールプレイ・ アンブラグド学 習									○
[20]	Automating the Configuration Management and Assessment of Practical Outcomes in Computer Networking Laboratories	2018	自主開発					○		○	○	
[21]	コンピュータネットワーク構築の学習における学習者から見た実機演習とシミュレータ演習の比較	2019	packet tracer	大学生			○		○			
[22]	TCP/IP ネットワークの理解を促進する無線パケットキャプチャ演習の開発と実践	2019	Wiresharkを用 いた演習		○							
[23]	Flipped Classroom Model for Advanced Networking Courses	2019	packet tracer & 反転授業				○					○
[24]	一般情報教育におけるAmazon Web Servicesを利用したサーバ構築演習	2020	クラウド	大学生			○					
[25]	ネットワークセキュリティ演習のための直感的でシームレスな操作性と軽快な応答性を目指したウェブ型演習システムの評価	2021	UMLを用いた自 主開発	大学生			○	○				
[26]	仮想化技術を用いたネットワーク演習環境	2021	UMLを用いた自 主開発	大学生			○	○				
[27]	DDoS攻撃対策演習を可能とするネットワークセキュリティ学習支援システム	2021	GNS-3	大学生9名				○				
[28]	ネットワーク機器の内部処理の可視化を可能とするQoS制御学習支援システム	2022	UMLを用いた自 主開発	大学生				○	○			
[29]	データ通信方式の特徴を科学的に理解する探究型の授業実践	2020	ロールプレイ・ アンブラグド学									○
[37]	パケットキャプチャ演習が通信の仕組みの理解にもたらす効果	2018	Wireshark	大学生3年	○							
[38]	LiNeS Cloud: A Web-Based Hands-On System for Network Security Classes with Intuitive and Seamless Operability and Light-Weight Responsiveness	2022	UMLを用いた自 主開発	大学生				○				
[39]	Scenario-Based Virtual Network Infrastructure Management in Research and Educational Testbeds with VNUML	2009	UMLを用いた自 主開発	大学生				○	○			

# Dynamic AI Difficulty in Unsolved Abstract Strategy Games

University of Electro-Communications  
Anil Tekeli    NISHINO Junji

## Abstract

The goal of this study is proposing a dynamic difficulty adjusting (DDA) Artificial intelligence (AI) algorithm in unsolved abstract games. AI has achieved superhuman performance in board games, and now, it is not enjoyable for human players since it's not winnable. To keep human players entertained, AI needs to change its difficulty dynamically to be on the same level as the player. Especially in this research, the target is DDA for large-scale games such as chess which do not have complete game solution.

For this purpose, we introduce Interval Alpha-Beta algorithm which is created by modifying the Alpha-Beta algorithm toward an adaptive difficulty adjustment. This algorithm is tested in chess AI with a time limit of 30 seconds per move against Elo 1300 human player and 2450 Elo AI. As a result, AI with this algorithm kept the game going over as an average of 24 moves against 2450 Elo AI, 28 moves against the player while keeping the balance in the game with a win rate of %10.

In conclusion, AI which uses the Interval Alpha-Beta algorithm was moderately successful to keep the game long without making unnatural moves.

## 1 Introduction

The goal of this study is proposing a dynamic difficulty adjusting (DDA) AI algorithm in unsolved abstract games.

Artificial intelligence (AI) has achieved superhuman performance in board games such as Go and chess. In other words, it is impossible for human player to beat AI in such games. Therefore, it is not enjoyable for human player since it's not winnable. Also, if a weak version of AI is used, similarly it might fail to entertain human player since it is too weak. Thus, to keep human player entertained, human player needs to feel challenged. To achieve this, AI needs to change its difficulty dynamically to be in same level with player

According to the Kokoro Ikeda's research, to keep human player entertained there are six requirements for the AI [1]. Especially, three of them are related to this research;

**Rq-A. Acquiring an opponent model:** The AI should understand how much knowledge and ability a human player has about the target game.

**Rq-B. Controlling the game position:** The

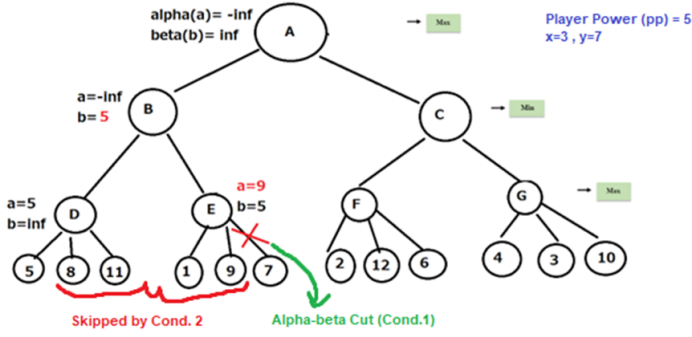
AI should adapt his moves to the level of the weaker player and use some kind of "gentle moves" to keep game in balance without being noticed.

**Rq-C. Avoiding unnatural moves:** The AI should avoid unnatural moves such as making an obvious critical mistake.

There are some researches where DDA which achieves those requirements in Mancala [1] and Nine men's morris [2]. However, those games have less states of game than big table games such as Chess or Go. And now, in this research, the target is DDA for large-scale games such as chess which do not have complete game tree figures and node values.

## 2 Method

For making the game AI difficulty dynamic, AI needs to choose a similar level of moves to the player. Also, since it is not possible to do a full search in unsolved games due to the high number of possibilities, some existing game AI algorithms are proposed in this research such as the Alpha-Beta and Monte Carlo Tree Search (MCTS) game



**Fig. 1.** Example of Interval Alpha-beta algorithm

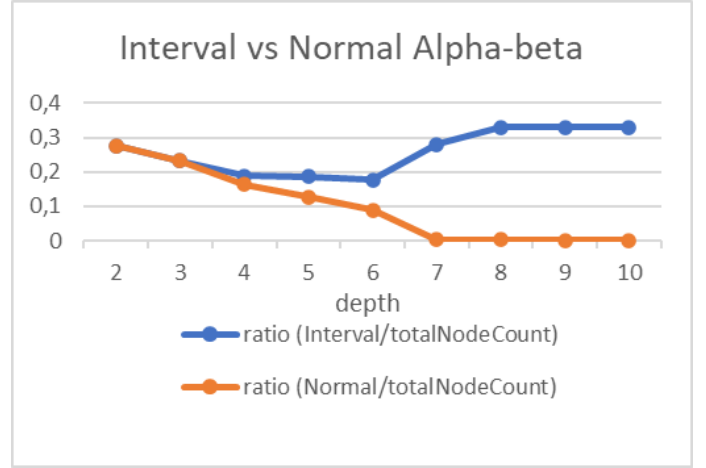
algorithms. However, those algorithms are made for choosing the best move instead of choosing a similar level of move with the player. Therefore, they are tested whether they are open for modification or not. The modification condition is, AI which uses that algorithm is at least stronger than an average chess player whose Elo is around 1300 since AI cannot adjust its difficulty if it is weaker than the player in the first place. If the algorithm meets the condition, the algorithm is modified to search for a move that matches the player's move.

First of all, chess engines that use those game algorithms will be implemented. After testing those in chess, they will be modified for DDA AI if they can meet the condition for modification. Current modification ideas are:

- 1) Modified Alpha-Beta search
- 2) Modified Monte Carlo Tree Search (MCTS)

## 2.1 Interval Alpha-beta algorithm

To choose similar values with the player, the Alpha-beta algorithm needs to be modified. So, for this problem, the  $x, y$  interval is created. The  $x, y$  interval is calculated from player power( $pp$ ) which is the value of the player's move.  $Pp$  is calculated every turn by the player's latest move. AI chooses the max value in the  $x, y$  interval. Aside from normal alpha-beta algorithm condition "condition 1 (if  $(\alpha \geq \beta)$  alpha-beta cut;)", new condition "condition 2, if  $(\alpha > y \parallel \alpha < x)$  skip that node;" is added. As expected, Interval Alpha-Beta algorithm visits more nodes than Alpha-Beta algorithm (Fig.2).



**Fig. 2.** Comparison of Alpha-Beta & Interval Alpha-beta algorithms visit counts in same example tree.

## 2.2 Modified Monte Carlo Tree Search

The MCTS is a method for optimal decisions in AI problems. In MTCS, to calculate the weight of the nodes, UCT formula is used. The purpose of Modified MCTS is, changing the calculation of UCT formula and condition of choosing the next move so, it can be applied to the DDA AI.

## 3 Implementation and experimental results on DDA

Since some of the requirements for AI to keep players entertained are relatively for each player, six requirements of keeping human players entertained [1] are taken as standards. Especially, achieving  $rq-B$  and  $rq-C$  is the main focus of this study, since they make the game long and challenging which leads to a fun game. Therefore, measurement is taken as whether DDA AI fulfills those or not.

### 3.1 Implementation of Alpha-Beta algorithm program for chess

For the Alpha-Beta algorithm in chess, a chess engine called 'Cosette' is used. Since Cosette is 2503 Elo in chess which is far above the average, it is suitable for DDA AI. Cosette also is suitable for modification since the complexity of its code is not

high.

### 3.2 Implementation of Monte Carlo Tree Search for DDA AI

For the Monte Carlo Tree Search, a chess engine that uses the MCTS algorithm and is suitable for modification could not be found. Therefore, it is created by modifying the chess engine called “Minimal Chess Engine”. Only board and piece libraries are used from the Minimal Chess Engine. MCTS algorithm and evaluation function are created from scratch. However, Due to poor implementation chess AI with MTCS kept making unnatural moves each time, and lost the game quickly. Therefore, it could not meet the condition for modification.

### 3.3 Implementation of Interval Alpha-Beta algorithm program for DDA AI

For the Interval Alpha-Beta algorithm in chess, a chess engine called ‘Cosette’ is modified according to the method from section 2.1.

Firstly, the static value of player power which defines the strength of a player in chess is created along with the static interval of x and y. The reason for this modification is to test whether chess AI will choose movements in that interval or not. Overall, AI became weaker to match with the overall player (before it was winning against the player) which is expected. Also, there is not always a move in that static interval, after some point, AI became unable to move and lost the game.

Since the test was successful, as the next step formula for calculating player power, interval x and y dynamically need to be created. For this case, four equations are tested in chess with **a time limit of 30 seconds per move** against a human player whose Elo is in chess around 1300.

In the equations below, pp is Player Power, x is interval X, y is interval Y, e() is the evaluation function which returns the evaluation value of a move,  $m_i$  is  $i$ th move, N is move count,  $m_l$  is last move.

**Type A: Wider and overall version of Interval**

$$pp = \frac{\sum_{i=1}^N e(m_i)}{N} \quad (1)$$

$$x = pp - |pp| \quad (2)$$

$$y = pp + |pp| \quad (3)$$

**Type B: Narrow and overall version of Interval**

$$pp = \frac{\sum_{i=1}^N e(m_i)}{N} \quad (4)$$

$$x = pp - \frac{|pp|}{2} \quad (5)$$

$$y = pp + \frac{|pp|}{2} \quad (6)$$

**Type C: Wider and last move version of Interval**

$$pp = m_l \quad (7)$$

$$x = pp - |pp| \quad (8)$$

$$y = pp + |pp| \quad (9)$$

**Type D: Narrow and last move version of Interval**

$$pp = m_l \quad (10)$$

$$x = pp - \frac{|pp|}{2} \quad (11)$$

$$y = pp + \frac{|pp|}{2} \quad (12)$$

Equation (1) and (4) is the same. Similarly, (2) and (8), (3) and (9), (5) and (11), (6) and (12), (7) and (10) are the same equation. **Player evaluations are calculated with Cosette’s evaluation function, in other words, AI used its evaluation function to calculate player power.**

In **type A** and **type B**, 4 and 5 times out of 10 games respectively, between early and mid-game(around 10-15 moves) AI could not find a move. Therefore, lost the game.

In **type D** 1 time out of 10 games, in mid-game(after 15 moves) AI could not find a move.

In **type C** there was not a problem with finding a move, however, the player lost the AI 8 times out

of 10 games. Therefore, AI was clearly stronger than the player.

To overcome those problems, a new option is added for AI. If AI cannot find until depth 3, it will double the interval range until finding a move.

After adding the new option, equations **type A** and **type B** performance increased. However, it was not enough for carrying the game to the late game, only their move count before the state of not finding a move increased. Therefore, those equations are abandoned. In **type D** case problem of not finding a move is solved. However, the player started to dominate the game generally game finished between the early and mid-game. In other words, the equation **type D** result was the opposite of the equation **type C** result.

Since result of equations **type C** and **type D** similar but opposite, **type E** equation is created.

**Type E: Semi narrow/wide and last move version of Interval**

$$y \leftarrow (pp + |pp|)$$

**if**  $pp < 0$  **then**

$$y \leftarrow (pp + \frac{|pp|}{2})$$

**else if**  $pp == 0$  **then**

$$y \leftarrow 100$$

Since AI searches for the best move in the interval, only the upper border of the interval limits the AI. Therefore the bottom border of the interval, in other words, interval X is removed. Also, to prevent the player and AI to dominate each other, equations **type C** and **type D** are mixed. Therefore, when the player plays positively evaluated moves, AI search for the stronger move, however, if the player plays negatively evaluated moves, AI does not punish the player and searches for a less strong move than a positively evaluated move. In case the player plays a move that evaluates as zero which makes the interval upper limit to zero as well in normal conditions since it might result in AI to go in not finding a move state. Thus by the average of player moves evaluations, a static upper limit value for AI is calculated as 100.

The result of equation **type E** is, the player won 9 games out of 10 in an average of 28 moves. During the games, 3 times unnatural moves occurred such

as not running the queen from the threat or not preventing a checkmate.

Also, Interval Alpha-Beta AI is tested with another AI with an Elo of 2450. Interval Alpha-Beta AI lost to another AI 20 times out of 20 games in an average of 24 moves. During 20 games, AI made a total of 8 unnatural moves.

Since equation **type E** created better results than other equations, it is chosen as the Interval Alpha-Beta algorithm's equation formula.

## 4 Discussion

### 4.1 DDA by Interval Alpha-Beta

The reason for Interval Alpha-Beta AI doing unnatural moves in games might be due nature of the Alpha-Beta Algorithm. AI performs an iterative search and chooses the best move in the deepest leaves of the game state tree it can reach in a limited amount of time. If the player plays a weak move, AI might search for a bad game state for itself to match with the player in 18 moves, which may lead to sacrificing its queen in this turn (second most valuable piece) for nothing because it is the closest game state for AI to match with the player's current move. However, the same principle applies for making good moves as well, even though the player played a bad move. For example, if the player gave their queen for free, AI might find a state 10 moves later where it takes the player's queen now but sacrifices its queen and rook for free in the next moves. Therefore, in 10 moves it matches with players' current evaluation. However, after taking players queen since it will search again, it won't choose the same state and get an advantage.

Moreover, another reason for AI to play unnatural moves is, AI plays weak moves to match the player's weak moves even though the player is creating a strong state with weak moves. For example, in normal conditions, AI is in a position that cannot be checkmated. However, the player makes a move that leads to checkmate in 5-6 moves but can be easily avoided. Since it can be easily avoided, evaluation of that move is low, therefore AI chooses a move with an equation of **type E**. This leads to weak moves as well, however when



the player reaches the last 2 moves for checkmate even though the player's move evaluation is significantly increased, it might be unavoidable for AI because not only it was a sudden increase in evaluation, but also in last 3-4 moves AI played weak moves which made the situation impossible for preventing checkmate.

The reason for abandoning equations **type A** and **type B** is, the evaluation function of Cosette was a bit different. For instance, in the original Cosette (which is a chess AI with 2503 Elo), while the player's first move was 65 points, the best move Cosette chose against it was -3 points. Also, during the game generally normal moves' evaluations between (-400,400) points, so if the average of those is taken and set an interval according to that average after some point average became closer to zero which leads to not finding any moves by AI in 30 seconds due to interval upper limit is around zero.

## 5 Conclusion

### 5.1 Interval Alpha-Beta

Even though Interval Alpha-Beta AI lost to player 9 out of 10 times. The aim of this research is to make a DDA AI in unsolved strategy games which entertain players. Since every people has a different taste in games, this research aims to fulfill the six requirements (mainly three) for AI which keep human players entertained [1]. Therefore, Interval Alpha-Beta AI that uses equation **type E**, in other words, DDA AI of this research, moderately achieved requirements A, B, C. Since, it plays according to the player's move evaluation, tries to keep the balance of the game so that the game can be carried to between mid and late game (around 25-35 moves).

### 5.2 DDA by Monte Carlo Tree Search

Since MCTS AI implemented in this research was not strong enough to beat an easy chess AI, Modified MCTS to make DDA AI is not implemented. Therefore, there is not any suggestion related to creating DDA AI with MCTS algorithm. However, in future research, more suitable chess evaluation

formulas for MCTS are suggested to make MCTS AI stronger.

## References

- [1] K. Ikeda and S. Viennot, "Production of various strategies and position control for Monte-Carlo Go — Entertaining human players," 2013 IEEE Conference on Computational Intelligence in Games (CIG), 2013, pp. 1-8, doi: 10.1109/CIG.2013.6633625. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6633625>
- [2] Y. Arai -人間プレイヤーに対して接待プレイを行うボードゲームAIの提案, Undergraduate Thesis, University of Electro-Communications. 2019
- [3] N. Suzuki -全探索を用いたシックスメンズモリスの接待AI, Undergraduate Thesis, University of Electro-Communications. 2022
- [4] Putra, Werda Heryawan, Lukman. (2017). APPLYING ALPHA-BETA ALGORITHM IN A CHESS ENGINE. Jurnal Teknosains. 6. 37. 10.22146/teknosains.11380.
- [5] C. B. Browne et al., "A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods," in IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, vol. 4, no. 1, pp. 1-43, March 2012, doi: 10.1109/TCIAIG.2012.2186810.
- [6] Ciancarini, P., & Favini, G. P. (2010). Monte Carlo tree search in Kriegspiel. Artificial Intelligence, 174(11), 670-684.
- [7] M. Ishihara, S. Ito, R. Ishii, T. Harada and R. Thawonmas, "Monte-Carlo Tree Search for Implementation of Dynamic Difficulty Adjustment Fighting Game AIs Having Believable Behaviors," 2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), Maastricht, Netherlands, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/CIG.2018.8490376.

- [8] S. Demediuk, M. Tamassia, W. L. Raffe, F. Zambetta, X. Li and F. Mueller, "Monte Carlo tree search based algorithms for dynamic difficulty adjustment," 2017 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), New York, NY, USA, 2017, pp. 53-59, doi: 10.1109/CIG.2017.8080415.
- [9] Demediuk, Simon Tamassia, Marco & Li, Xiaodong Raffe, William. (2019). Challenging AI: Evaluating the Effect of MCTS-Driven Dynamic Difficulty Adjustment on Player Enjoyment. 1-7. 10.1145/3290688.3290748.
- [10] Cosette, Tearth  
<https://github.com/Tearth/Cosette>
- [11] Minimal Chess Engine, lithander  
<https://github.com/lithander/MinimalChessEngine>
- [12] Minimal Chess Engine with MCTS  
<https://github.com/Jseennin1/MinimalChessEngine-with-MCTS>

## 連絡先

Anil Tekeli

電気通信大学 情報理工学研究科 西野順二研究室  
t1910426@edu.cc.uec.ac.jp、nishinojunji@uec.ac.jp

# 不確実性を有するデータ分類に向けた ミシガン型ファジィ分類子システムのルール表現適応

Self-Adaptation of Rule Representations in Michigan-Style Learning Fuzzy-Classifier Systems  
for Data Classification with Uncertainty

○ <sup>1</sup> 白石 洋輝      <sup>2</sup> 速水 陽平      <sup>1</sup> 橋山 智訓  
○ <sup>1</sup>Hiroki Shiraishi    <sup>2</sup>Yohei Hayamizu    <sup>1</sup>Tomonori Hashiyama  
<sup>1</sup> 電気通信大学      <sup>2</sup> ビンガムトン大学  
<sup>1</sup>The University of      <sup>2</sup>The State University of  
Electro-Communications    New York at Binghamton

**Abstract:** This paper explores the influence of rule representation on the performance of *Michigan-Style Learning Fuzzy-Classifier Systems* (LFCSs) in terms of classification accuracy. A novel LFCS, named a *sUpervised Self-Adaptive-Classifier System* (Adaptive-UCS), is introduced to address the limitations posed by conventional rule representations in coping with problems featuring unknown or uncertain data characteristics, such as noisy inputs. Adaptive-UCS utilizes a *fuzzy indicator* and evolutionary operators to optimize the rule representation, leading to an optimal representation. The results from experiments indicate that Adaptive-UCS outperforms other methods in terms of classification accuracy, robustness, and stability, thus providing a practical solution for LFCSs to tackle unknown problems without resorting to trial-and-error.

## 1 はじめに

ミシガン型学習分類子システム (Michigan-Style Learning Classifier System: LCS) [1] は、説明可能な AI (XAI) として応用が進むルールベースの進化的機械学習のパラダイムであり、データ分析技術として頻繁に利用される [2, 3]. LCS はルール学習と定常状態型の遺伝的アルゴリズム (steady-state GA) からなり、データ間に共通する特徴を分類子と呼ばれる説明可能な IF-THEN ルールとして生成する. LCS の代表的分類手法として最もよく知られているのは、教師あり学習分類子システム (sUpervised Classifier System: UCS) [4] とその拡張手法であるファジィ理論に基づく UCS (sUpervised Fuzzy-Classifier System: Fuzzy-UCS) [5] である. 前者は明確なルール境界を持つクリスプルール、後者は曖昧なルール境界を持つファジィルールを用いて分類を行う. 従って、UCS (Fuzzy-UCS) は、明確な (曖昧な) クラス境界で構成される分類問題に適している. 特に、Fuzzy-UCS で使用されるファジィルールは、不確実性 (e.g., 雑音や欠損値) を有するデータ分類において有効であることが知られている [6]. Orriols-Puig ら [5] は両手法の分類性能を 20 問の実データ分類問題を用いて比較検証し、20 問のうち 8 問で Fuzzy-UCS が UCS を上回り、他 12 問では Fuzzy-UCS が UCS に劣ることを報告した. 上記の結果は、ファジィルールのみ、あるいはクリスプルールのみを運用する現状の (Fuzzy-)UCS の枠組みでは、高い分類性能を実現することは困難であることを強調している.

分類性能を低下させることなくファジィ理論の利点を最大限に活用するために、本稿ではルール表現を自己適

応可能な UCS (*sUpervised Self-Adaptive-Classifier System*: Adaptive-UCS) を提案し、その有効性を検証する. Adaptive-UCS には、ルールのメンバシップ関数を長方形型 (クリスプ) または三角型 (ファジィ) のどちらかに設定するルールパラメータであるファジィ指標 (*fuzzy indicator*) が新たに導入されている. ファジィ指標は進化的操作 (交叉・突然変異) によって最適化されることで、システムが最適なルール表現を探索することができる. この機構により、Adaptive-UCS は 1 つのシステムでクリスプルールとファジィルールを効率的に同時運用することが可能となる. Adaptive-UCS の性能は、不確実性を模した雑音環境下でのベンチマーク問題において検証される.

本稿の構成は以下の通りである. 第 2 章では、既存のルール表現について総括する. 第 3 章では提案法の Adaptive-UCS について説明し、第 4 章では従来法である超直方体クリスプルールに基づく UCS, 台形型ファジィルール [7] に基づく Fuzzy-UCS 及び提案法の Adaptive-UCS による比較実験を行う. 第 5 章では実験結果に対する議論を行い、第 6 章にて本稿をまとめる.

## 2 関連研究

本章では、実数値入力を扱う LCS の文脈で提案された様々なクリスプルール表現及びファジィルール表現の概要について説明する. なお、ファジィルールを用いる LCS はファジィ分類子システム (Learning Fuzzy-Classifier System: LFCS) [8] と呼ばれる.

超直方体表現 [9] は、現在主流であるクリスプルール表現であり、単純かつ可読性の高いルール構造を持つこと

から、データ分析において最も使用される [3]. その後、複雑なクラス境界をより正確に近似するために、超楕円体表現 [10], 凸包表現 [11], 超曲面多面体表現 [12] などのクリスプルール表現が提案された.

LFCS の代表的手法である Fuzzy-XCS [6] と Fuzzy-UCS [5] の原著では、三角型メンバシップ関数に基づくファジィルール表現が用いられており、その後の研究においても広く用いられた [13]. Tadokoro ら [14] は、多変量正規分布の確率密度関数をメンバシップ関数とするファジィルールを導入し、データ分布が多変量正規分布に従う実データ分類問題においてその有効性を示した.

Shoeleh ら [7] は、超直方体表現を拡張、すなわちメンバシップ関数を 2 変数の長方形型から 4 変数の台形型へと変更することで、1 つのルールでクリスプ (明確) なルール被覆領域とファジィ (曖昧) なルール被覆領域を同時に表現することを可能にした. しかし、ルール前件部のパラメータ数の増加は、探索空間の拡大を招き、システム性能を阻害する可能性がある. この懸念は、Lanzi と Wilson [11] が示した、凸包表現の頂点数の増加がシステム性能低下を引き起こした実験結果からも支持される. また、台形表現は、いくつかの実データ分類問題において超直方体表現よりも性能が劣ることが示されている. そこで、本稿ではパラメータ数を 2 個に減らしたメンバシップ関数をルールごとに適応的に調整することで、1 つの分類システムでクリスプ及びファジィなルール被覆領域を表現する自己適応機構を取り入れた LFCS を提案する.

### 3 Adaptive-UCS

本章では、前件部のメンバシップ関数をルール毎に自己適応的に調整する LFCS (Adaptive-UCS) を提案する.

#### 3.1 知識表現

##### 3.1.1 ルールパラメータ

Adaptive-UCS の  $n$  次元ファジィルール  $k$  は、Fuzzy-UCS と同様に次の式 (1) で表現される.

$$\begin{aligned} \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^k \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^k \\ \text{THEN } c^k \text{ WITH } w^k, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A} = (A_1, \dots, A_n)$  は条件部集合、 $w^k \in [0, 1]$  は、ルール  $k$  が結論部クラス  $c^k$  を予測する際の確からしさを示す重みである.

Adaptive-UCS の条件部ファジィ集合  $A_i$  は、長方形もしくは三角形の中央値  $c_i \in \mathbb{R}$  (*center*) と幅  $s_i \in \mathbb{R}^+$  (*spread*) によって、 $A_i = (c_i, s_i)$  と定義される. Adaptive-UCS 固

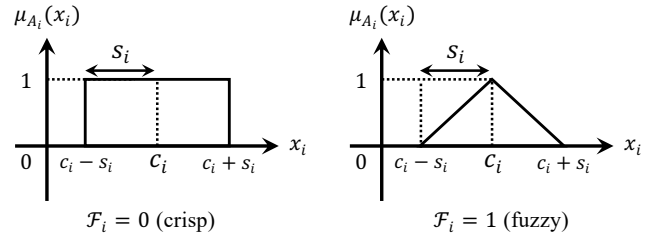


図 1: Adaptive-UCS の条件部ファジィ集合  $A_i = (c_i, s_i)$ .

有の新たなルールパラメータとして、条件部ファジィ集合のメンバシップ関数の形状がクリスプかファジィかを示すパラメータであるファジィ指標  $\mathcal{F} \in \mathbb{B}^n$  (*fuzzy indicator*) が導入されている. 具体的には、 $\mathcal{F}_i^k = 0$  のルール  $k$  の条件部ファジィ集合  $A_i^k$  は、下限値  $c_i^k - s_i^k$ 、上限値  $c_i^k + s_i^k$  の長方形型メンバシップ関数とみなされる. 一方で、 $\mathcal{F}_i^k = 1$  のルール  $k$  の条件部ファジィ集合  $A_i^k$  は、左頂点  $c_i^k - s_i^k$ 、中央頂点  $c_i^k$ 、右頂点  $c_i^k + s_i^k$  の二等辺三角型メンバシップ関数とみなされる. 図 1 は、Adaptive-UCS のルール条件部ファジィ集合  $A_i$  を模式的に示したものである.

各ルール  $k$  は、以下 3 つの主要パラメータを持つ: (i) ルール  $k$  の精度を示す適合度  $F^k \in (-1, 1]$ ; (ii) ルール  $k$  に照合した回数を示す経験値  $\exp^k \in \mathbb{R}_0^+$ ; (iii) ルール  $k$  に内包されているルール数を示す重合度  $\text{num}^k \in \mathbb{N}_0$ . これらのパラメータは、学習を通して更新される.

##### 3.1.2 照合度計算

Adaptive-UCS における入力ベクトル  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  のルール  $k$  への照合度 (*matching degree*)  $\mu_{\mathbf{A}^k}(\mathbf{x}; \mathcal{F}^k) \in [0, 1]$  は、次の式 (2) のように計算される.

$$\mu_{\mathbf{A}^k}(\mathbf{x}; \mathcal{F}^k) = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i; \mathcal{F}_i^k), \quad (2)$$

ここで、 $\mu_{A_i^k}(\cdot; 0) / \mu_{A_i^k}(\cdot; 1)$  はそれぞれ条件部ファジィ集合  $A_i^k$  を表現する長方形型 / 三角型メンバシップ関数である.

図 2 は Adaptive-UCS における 2 次元ルール  $k_1, k_2, k_3$  の表現型指標  $\mathcal{F}$  を変化させた時の照合度を可視化したグレイスケール図であり、白色が照合度 0、黒色が照合度 1 を表す (解像度  $1000 \times 1000$ ). このように、提案法は 1 つのルール前件部によって  $2^n$  通りのルール被覆領域を自己適応する.

なお、本稿では調整するメンバシップ関数の対象として長方形型と三角型を選択しているが、これら 2 つのいずれか、もしくは両方の関数を、左右対称かつ中央値  $c_i$  と幅  $s_i$  の 2 変数で表現できる任意の関数 (e.g., 正規分布 [14] や raised cosine 分布、ラプラス分布の確率密度関数) に置き換えることも可能である.

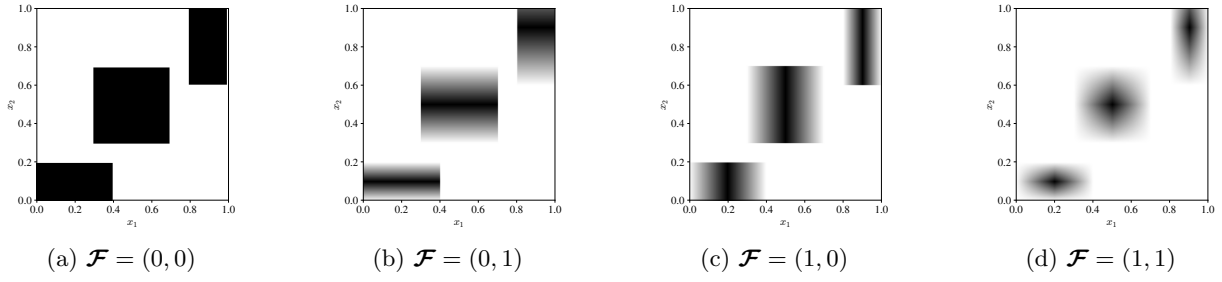


図 2: ファジィ指標  $\mathcal{F} \in \mathbb{B}^2$  を変化させた際の 2 次元ルール  $k_1, k_2, k_3$  のルール被覆領域

( $A_1^{k_1} = A_2^{k_1} = (0.5, 0.2)$ ,  $A_1^{k_2} = A_2^{k_2} = (0.2, 0.1)$ ,  $A_1^{k_3} = (0.9, 0.1)$ ;  $A_2^{k_3} = (0.9, 0.3)$ .)

### 3.2 メカニズム

Adaptive-UCS は実行部 (performance component), 更新部 (update component) 及び発見部 (discovery component) の 3 部から構成される。また, Adaptive-UCS は学習モード (training mode) もしくはテストモード (test mode) のどちらに属しているかによって動作が異なる。学習モードでは実行部, 更新部, 発見部を順に起動することで, 既存ルールの更新及び新規ルールの探索を実行する。一方でテストモードでは実行部のみ起動し, 既存のルールセットを用いて, 正解クラスが付与されていない入力クラスを推論する。本節ではこれらのメカニズムについて順に説明する。

#### 3.2.1 実行部

全てのルールは, ルールセット  $[P]$  (population) に属する。まず時刻  $t$  において, 環境からクラス  $c$  に属する入力  $\mathbf{x}$  を受取る (テストモード時には正解クラス  $c$  は与えられない)。次に, 照合集合 (match set)  $[M] = \{k \in [P] | \mu_{A^k}(\mathbf{x}; \mathcal{F}^k) > 0\}$  を形成する。その後, システムがテストモードに属している場合は,  $[M]$  のルールを用いて, 加重平均推論 (weighted average inference) [13] によって入力  $\mathbf{x}$  のクラスを推論する。システムが学習モードに属している場合は, 更新部を起動する。

#### 3.2.2 更新部

$[M]$  が形成された後, システムは正解集合 (correct set)  $[C] = \{k \in [M] | c^k = c\}$  を形成する。その後,  $[M]$  内の全てのルールのパラメータ  $\exp, F$  を Fuzzy-UCS と同様の更新式 [5] を用いて更新する。その後,  $[C]$  内の最も一般的なルールは,  $[C]$  内の全てのルールと比較され, 包含できる関係であれば包摂する。これを正解集合包摂 (correct set subsumption) という。

#### 3.2.3 発見部

発見部では定常状態 GA を実行し,  $[C]$  から選択された 2 つの親ルールの複製を 2 つの新しい子ルールとする。そ

の後, 進化的操作である交叉・突然変異が 2 つの子ルールに対して適用される。Adaptive-UCS では, 条件部ファジィ集合  $A_i = (c_i, s_i)$  及びファジィ指標  $\mathcal{F}_i$  に対して一様交叉が確率  $\chi$  で適用される。また, 突然変異も  $A_i = (c_i, s_i)$  及び  $\mathcal{F}_i$  に対して適用される。具体的には, 突然変異確率  $p_{\text{mut}}$  を満たした場合,  $c_i, s_i$  には範囲  $[-m_0, m_0]$  から一様に採取した乱数値が加算される。ここで,  $m_0$  は最大変異量を示すハイパーパラメータである。また,  $\mathcal{F}_i$  は, 現在の値を反転させた値へと変異する。すなわち,  $\mathcal{F}_i = 0$  (or 1) の場合, 1 (or 0) へと変異する。進化的操作が適用された 2 つの子ルールは  $[P]$  に挿入される。このとき, 親ルールが子ルールを包含できる関係であれば包摂する。これを GA 包摂 (GA subsumption) という。また,  $[P]$  のルールの  $\text{num}$  の合計が, ルールの最大数を表すハイパーパラメータ  $N$  を超える場合,  $[P]$  の中で相対的に  $\mu_{A^k}(\mathbf{x}) \cdot (F^k)^\nu$  が低いルール  $k$  が優先的に削除される。ここで,  $\nu$  は  $F^k$  に課すペナルティを示すハイパーパラメータである。

## 4 実験

従来法である超直方体クリスブルール表現に基づく UCS [4], 台形ファジィルール表現に基づく Fuzzy-UCS [5], 及び提案法である Adaptive-UCS の性能を検証する。

### 4.1 ベンチマーク問題: Noisy Checkerboard

Noisy Checkerboard 問題 (NCB 問題) は, 実数値 LCS の性能評価に用いられる Checkerboard 問題 (CB 問題) [9] に不確実性を付与した問題である。CB 問題は黒と白の領域に分割された状態空間として与えられ, ランダムに生成される実数値入力  $\mathbf{x} \in [0, 1]^2$  に対して, そのベクトルが黒または白の領域のどちらに含まれるかを各々  $\{0, 1\}$  の正解クラスとして決定する問題である。一方, NCB 問題では学習モードとテストモードにおいて, 環境 (CB 問題と同様) は正解クラス  $c$  に属する入力ベクトル  $\mathbf{x} \in [0, 1]^2$  を UCS に送信する。ただし, 学習モード時のみ, UCS が  $\mathbf{x}$  と  $c$  を受信する前に,  $\mathbf{x}$  はガウス雑音



$\mathcal{N}(0, \sigma^2)$  に晒される．すなわち，雑音に晒された入力は  $\forall i \in \{1, 2\} : x_i \leftarrow x_i + \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  として表現される．本論文は， $\sigma \in \{0, 0.025, 0.05\}$  に設定した 3 種の NCB 問題を用いて実験を行う．なお， $\sigma = 0$  の設定下での NCB 問題は CB 問題と等価である（すなわち，無雑音の理想環境である）ことに留意されたい．

## 4.2 実験設定

全問題で共通に，UCS<sup>1</sup>，Fuzzy-UCS<sup>2</sup>，Adaptive-UCS<sup>3</sup> のハイパーパラメータは先行研究 [4, 5, 7] と同様の値に設定する．ただし， $\sigma \in \{0.025, 0.05\}$  の NCB 問題では，Urbanowicz [15, 2] が提唱した雑音環境におけるパラメータ設定のガイドラインに従い， $\nu = 1, acc_0 = F_0 = 0.95$  とする．学習/テスト回数は 200,000 回とし，学習とテストを 1 回ずつ交互に実行する．評価指標は異なるランダムシードを使用した 30 試行の独立した実験における，テストデータに対する平均分類精度及び平均ルール数とする．加えて，統計的有意差を確認するために，有意水準 0.05 の下で多群検定を行う．具体的には，Levene の等分散検定によって等分散性が認められた場合は分散分析と Tukey の事後検定をペアで実施し，等分散性が認められなかった場合は Welch の検定と Games-Howell の事後検定を併用する．

## 4.3 実験結果

表 1 は，各システムの平均評価値（分類精度，ルール数）を示している．ここで，表中の緑色/桃色の網掛けは多群検定によって全システム間でそれぞれ最良/最悪の群に属していると判断されたシステムの平均評価値を表す．括弧内の数字は，多群検定に基づく順位を表す．

図 3 は，NCB 問題における UCS，Fuzzy-UCS，Adaptive-UCS の 4000 回毎の平均分類精度の推移を示したものである．これらの図の横軸はテスト回数，縦軸は 30 試行における各平均評価値を示す．各グラフのエラーバーは 30 試行における 95%信頼区間を表す．

表 1 が示すように，提案法の Adaptive-UCS は最悪の群に属していることを示す桃色のセルが一切ない．また，全ての評価指標において提案法が最も高い平均順位を記録していることから，提案法の有効性を確認できる．

<sup>1</sup>UCS:  $N = 6400, acc_0 = 0.99, \beta = 0.2, \nu = 10, \chi = 0.8, p_{mut} = 0.04, \delta = 0.1, m_0 = 0.1, r_0 = 0.2, \theta_{GA} = 50, \theta_{del} = 50, \theta_{sub} = 50, \tau = 0.4, doCorrectSetSubsumption = yes, doGASubsumption = yes$ .

<sup>2</sup>Fuzzy-UCS: Analogous to UCS, except:  $acc_0 = N/A, \beta = N/A, F_0 = 0.99, \theta_{exploit} = 10, \theta_{overlap} = 0.8$ .

<sup>3</sup>Adaptive-UCS: Analogous to Fuzzy-UCS, except:  $\theta_{overlap} = 0.5$ .

## 5 考察

本章では，4.3 節で確認された提案法の有効性を視覚的に理解することを目的に，各システムがどのように問題空間（クラス境界）を近似しているかを確認する．具体的には，2 次元の問題空間  $S = [0, 1]^2$  を 1,000,000 分割し（すなわち，解像度  $1000 \times 1000$ ），ある試行における各座標に対する各システム（200,000 回の学習終了時）の推論クラス  $\{0, 1\}$  を各々黒，白で描画する．

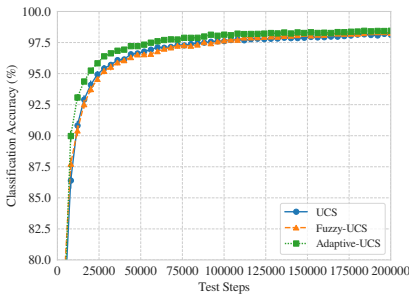
図 4a, 4b, 4c は，それぞれ UCS, Fuzzy-UCS, Adaptive-UCS が出力した NCB 問題 ( $\sigma = 0$ ) における推論クラスの描画結果である．表 1 が示したように，200,000 回時点での各システムの分類精度に有意差は見られないが，これらの図のクラス境界付近に着目してみると，各システムの近似性能差が僅かながら窺える．例えば，図 4a の UCS 及び図 4c の Adaptive-UCS は長方形クリスプルールにより，軸に対して平行なクラス境界を正確に近似している．一方で，図 4b の Fuzzy-UCS は，クラス境界が直交している部分空間を正確に近似できておらず，丸みを帯びた近似となっている箇所が数点見受けられる．これは，台形表現の台形型メンバシップ関数が持つ  $\mu_{A_i^k}(\cdot) < 1$  となる区間 (i.e.,  $[a_i^k, b_i^k] \vee [c_i^k, d_i^k]$ ) が，CB 問題のクラス境界を被覆したことが原因であると考えられる<sup>4</sup>．特に CB 問題のような軸に対して平行なクラス境界で構成されている問題に対しては，長方形クリスプルールのみでの解決が理想であるが，台形型メンバシップ関数によって長方形クリスプルールを表現する場合， $\forall i \in \{1, 2\} : a_i^k = b_i^k \wedge c_i^k = d_i^k$  の条件を満たさなければならない．実数値 LCS の枠組みで用いられる突然変異が，各遺伝子座にランダム値を加減するだけの簡易な操作であることを踏まえると，上記の条件を達成するためには多くの学習（最適化）回数を要すると考えられる．この主張は，冗長なルール表現によって多様性（ルールセットサイズ）が他 2 手法よりも飛躍的に大きい実験結果 (cf. 表 1) から支持される．

一方で，雑音が加わった場合，全システム間における分類性能の有意差が如実に現れる．表 1 及び図 3b, 3c が示すように，雑音強度が低い  $\sigma = 0.025$  の設定下では，UCS/Fuzzy-UCS が全システム間で有意に最良/最悪の分類性能を示しているが，雑音強度が高い  $\sigma = 0.05$  の設定下ではこれら 2 手法の性能が逆転する．この理由については，次のように考察できる．まず，雑音に晒される前後の入力をそれぞれ  $\mathbf{x}, \mathbf{x}^N$  とすると，雑音強度が低い (i.e.,  $\sigma = 0.025$ ) 環境においては， $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{x}^N$  の正解クラスが異

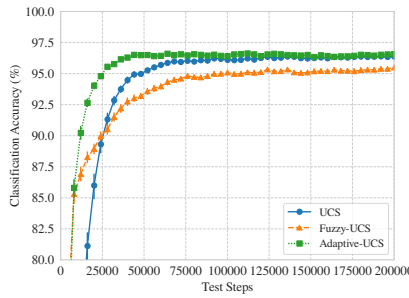
<sup>4</sup>台形表現における条件部ファジィ集合  $A_i$  は，台形の頂点  $a_i, b_i, c_i, d_i \in \mathbb{R}$  ( $a_i \leq b_i \leq c_i \leq d_i$ ) によって  $A_i = (a_i, b_i, c_i, d_i)$  と定義される．

表 1: NCB 問題 ( $\sigma \in \{0, 0.025, 0.05\}$ ) における各システムの分類精度とルールセットサイズ

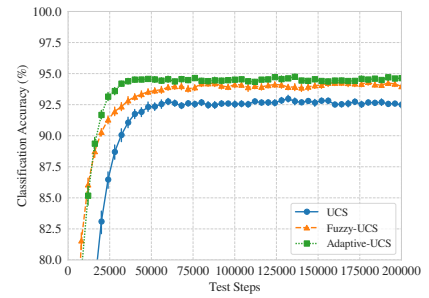
NCB	NOISE STRENGTH	SYSTEM	ENTIRE 200,000 TESTS		LAST 10,000 TESTS	
			Acc. (%)	P	Acc. (%)	P
$\sigma = 0$	No	Adaptive-UCS	<b>97.08</b> (1)	<b>2525</b> (1)	<b>98.34</b> (1)	<b>2651</b> (1)
		Fuzzy-UCS	96.56 (2)	2936 (2)	<b>98.24</b> (1)	3416 (3)
		UCS	96.48 (2)	2955 (2)	<b>98.15</b> (1)	2962 (2)
$\sigma = 0.025$	Low	Adaptive-UCS	<b>95.44</b> (1)	3862 (2)	<b>96.71</b> (1)	<b>3964</b> (1)
		Fuzzy-UCS	93.53 (2)	<b>3719</b> (1)	95.42 (2)	4132 (2)
		UCS	93.63 (2)	4047 (3)	<b>96.59</b> (1)	4088 (2)
$\sigma = 0.05$	High	Adaptive-UCS	<b>93.23</b> (1)	4601 (2)	<b>94.41</b> (1)	4754 (2)
		Fuzzy-UCS	92.76 (2)	4688 (3)	<b>93.79</b> (1)	4840 (3)
		UCS	90.27 (3)	<b>4538</b> (1)	92.66 (2)	<b>4668</b> (1)
<i>Average Rank</i>		Adaptive-UCS	<b>1</b>	<b>1.7</b>	<b>1</b>	<b>1.3</b>
		Fuzzy-UCS	2	2	1.3	2.7
		UCS	2.7	2	1.3	1.7



(a)  $\sigma = 0$  (no noise)



(b)  $\sigma = 0.025$  (low noise)



(c)  $\sigma = 0.05$  (high noise)

図 3: NCB 問題 ( $\sigma \in \{0, 0.025, 0.05\}$ ) における分類精度 (Classification Accuracy) の推移

なる確率は低くなる。従って、最適化に時間を要する台形ファジィルール (Fuzzy-UCS) よりも、長方形クリスプルール UCS による分類が有効であったと考えられる。一方で、雑音強度が高い (i.e.,  $\sigma = 0.05$ ) 環境においては、 $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{x}^N$  の正解クラスが異なる確率は高くなる。従って、同環境においては、不確実性に対して頑健な台形ファジィルールは、不確実性に対して脆弱なクリスプルールよりも有効に作用したと考えられる。この主張は、雑音入力に過適合したクリスプルールによって近似されたクラス境界上に白色雑音が強く現れている図 4g の結果からも支持される。このように、本実験結果は台形ファジィルールの高強度な雑音入力に対する頑健性を示している。しかし、前述したように、同ルールは最適化に時間を要することから、総合的な分類性能に関しては提案法よりも有意に下回ること留意されたい (cf. 表 1)。

## 6 おわりに

本稿では、前件部のメンバシップ関数をルール毎に自己適応的に調整する LFCS (Adaptive-UCS) を提案するとともに、その性能を不確実性を模した雑音環境におけるベンチマーク問題にて検証した。従来法である超直方体クリスプルールに基づく UCS 及び台形ファジィルール

に基づく Fuzzy-UCS との比較実験の結果、雑音の強度が低い (高い) 問題に対しては、クリスプルール (ファジィルール) が分類において有効であることが示された。また、提案法は雑音の有無や強度に依らず、一貫して全手法間で最も有意に優れた分類性能を示した。

今後の課題として、より多様なベンチマーク問題での従来法及び提案法の性能分析が挙げられる。本稿では超直方体ルールでのクラス境界近似が容易なチェッカーボード問題を採用したが、同ルールでのクラス境界近似が困難な問題 (e.g., 斜めや曲線状のクラス境界で構成される問題) による検証が望まれる。また、本稿では入力値に対してガウス雑音を付与する環境を扱ったが、一定確率で入力値の欠損が発生する環境や、学習時に与えられる正解クラスが反転する環境といった、異なる不確実性を模した問題においても提案法が有効であるか検証する必要がある。

## 参考文献

- [1] J. H. Holland, “Escaping brittleness: The possibilities of general-purpose learning algorithms applied to parallel rule-based systems,” *Machine learning, an artificial intelligence approach*, vol. 2, pp. 593–623, 1986.
- [2] R. J. Urbanowicz and J. H. Moore, “ExSTraCS 2.0: description and evaluation of a scalable learning classifier system,”

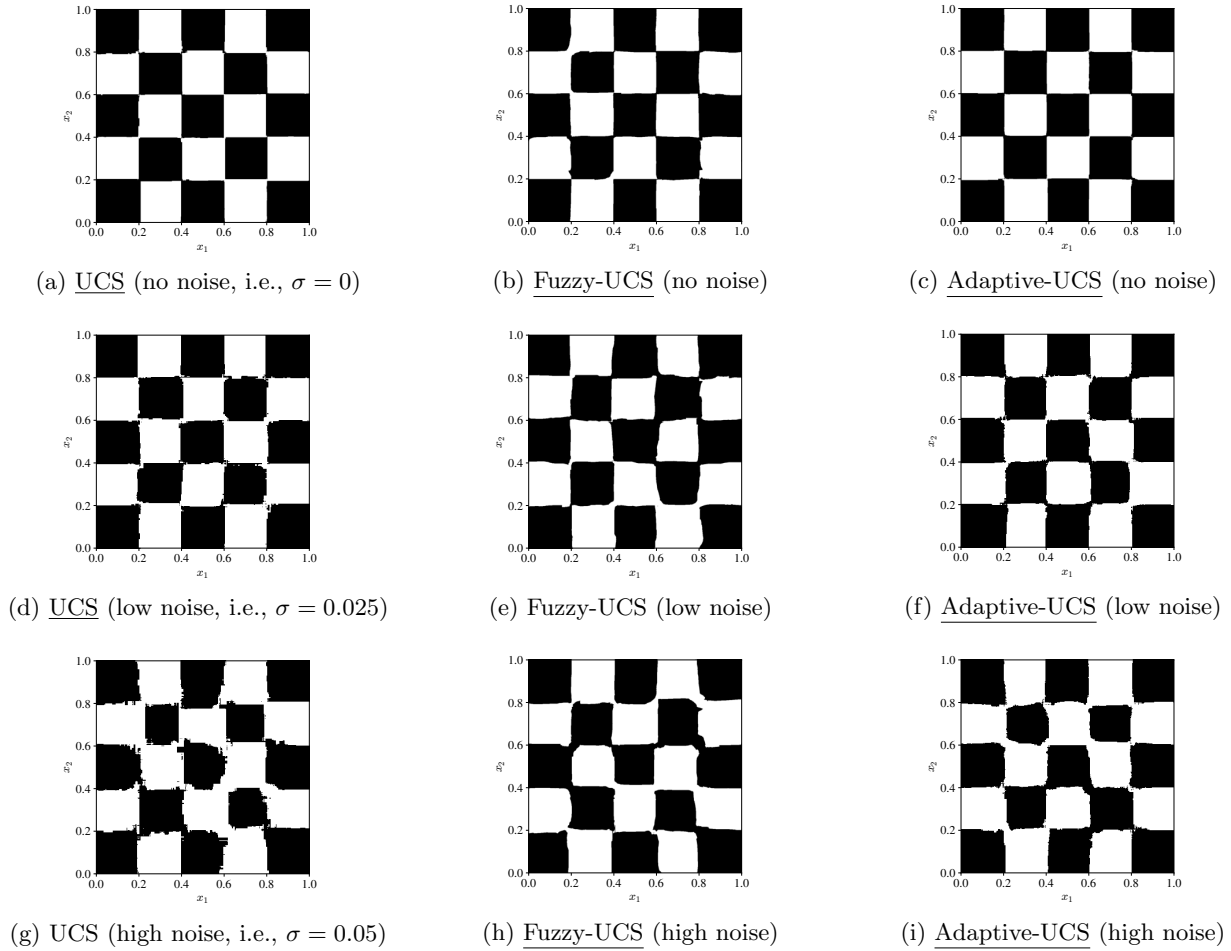


図 4: NCB 問題 ( $\sigma \in \{0, 0.025, 0.05\}$ ) における各システムが出力した推論クラス  $\{0, 1\}$

(下線の手法は、多群検定に基づく最良の手法を示す (cf. 表 1))

*Evolutionary intelligence*, vol. 8, no. 2, pp. 89–116, 2015.

- [3] M. Heider, H. Stegherr, J. Wurth, R. Sraj, and J. Hähner, “Investigating the impact of independent rule fitnesses in a learning classifier system,” in *Bioinspired Optimization Methods and Their Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 142–156.
- [4] E. Bernadó-Mansilla and J. M. Garrell-Guiu, “Accuracy-based learning classifier systems: models, analysis and applications to classification tasks,” *Evolutionary computation*, vol. 11, no. 3, pp. 209–238, 2003.
- [5] A. Orriols-Puig, J. Casillas, and E. Bernadó-Mansilla, “Fuzzy-UCS: a michigan-style learning fuzzy-classifier system for supervised learning,” *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 2, pp. 260–283, 2008.
- [6] J. Casillas, B. Carse, and L. Bull, “Fuzzy-XCS: A michigan genetic fuzzy system,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 536–550, 2007.
- [7] F. Shoeleh, A. Hamzeh, and S. Hashemi, “Towards final rule set reduction in XCS: A fuzzy representation approach,” in *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2011, pp. 1211–1218.
- [8] A. Bonarini, “An introduction to learning fuzzy classifier systems,” in *International Workshop on Learning Classifier Systems*. Springer, 1999, pp. 83–104.
- [9] C. Stone and L. Bull, “For real! XCS with continuous-valued inputs,” *Evolutionary Computation*, vol. 11, no. 3, pp. 299–336, 2003.
- [10] M. V. Butz, P. L. Lanzi, and S. W. Wilson, “Function approximation with XCS: Hyperellipsoidal conditions, recursive least squares, and compaction,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 3, pp. 355–376, 2008.
- [11] P. L. Lanzi and S. W. Wilson, “Using convex hulls to represent classifier conditions,” in *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2006, pp. 1481–1488.
- [12] H. Shiraishi, Y. Hayamizu, H. Sato, and K. Takadama, “Beta distribution based XCS classifier system,” in *2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, 2022, pp. 1–8.
- [13] A. Orriols-Puig and J. Casillas, “Fuzzy knowledge representation study for incremental learning in data streams and classification problems,” *Soft Computing*, vol. 15, no. 12, pp. 2389–2414, 2011.
- [14] M. Tadokoro, H. Sato, and K. Takadama, “XCS with weight-based matching in VAE latent space and additional learning of high-dimensional data,” in *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, 2021, pp. 304–310.
- [15] R. J. Urbanowicz and W. N. Browne, *Introduction to learning classifier systems*. Springer, 2017.

連絡先

白石 洋輝

E-mail: hirokish@media.is.uec.ac.jp

# 本棚メタファを用いて幅広い論文サーベイを支援する 論文検索システムの提案

Scientific Articles Exploration System Based on Book Shelves Metaphor

○<sup>1</sup> 小林 稜, <sup>1</sup> 橋山 智訓

○<sup>1</sup> Ryo Kobayashi, <sup>1</sup> Tomonori Hashiyama

<sup>1</sup> 電気通信大学大学院 情報理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Informatics and Engineering,

The University of Electro-Communications

**Abstract:** In this research, the author developed a system that assists users to explore scientific article widely. This system aims to promote serendipity by (1) expanding the search space of scientific articles and (2) making it easier to find useful articles in the search space with a VR interface of book shelf metaphor. The author conducted experiments that observe availability and the change of the behavior to search information. The result shows that the proposed system has better serendipity scale than the existing system.

## 1 はじめに

研究をするにあたって、研究テーマの立案や、自身の研究の位置づけ、研究手法を定めるためには、論文サーベイは不可欠である。特に、新規性・有用性のある研究とするためには、論文サーベイを幅広く行うことが望ましい。

現在研究者は、論文を Web 上で幅広く入手できる。Google Scholar 等の論文検索システムや、通常の検索エンジンを利用することで、自身の読みたい論文を検索し、アクセスできる。URL を知っている場合、J-STAGE, IEEE Xplore 等の電子ジャーナルや研究者自身の Web サイト等を直接利用可能である。Web 上にはあまりにも多くの論文が存在するため、全ての論文に目を通すことはできない。そのため、自身に必要な論文に絞って読む必要がある。

論文検索の際、様々な検索システム・様々な検索条件を試して論文を探すことが望ましい。しかし、検索条件が思いつかなくなることや、思いついた検索条件では思っていた通りの論文が発見できないことなどが起きうる。どのような検索条件とするか自身で考えることには限度がある。

### 1.1 本棚と情報探索行動

思いがけない情報と出会うことで、自身では想像できなかったような良い研究のアイデアとなり、成果につながる可能性がある。例えば、分野 A の研究動向を調べるために論文検索をしている際、たまたま検索結果中に分野 B に関する論文を見つけ、分野 B に興味を持つことがあるだろう。このような、思いがけない偶然の有用な出会いや、これを自ら察知する能力をセレンディピティという。

人は、図書館などの実世界を探索する際、その道中で、思いがけない有用なものを発見する効果があるといわれている [1]。この性質を、コンピュータ上の論文探索に応用することで、幅広い論文サーベイの実現が期待できる。

## 1.2 提案

本研究は、幅広い論文サーベイを実現することを目的とし、本棚メタファにより、人が実世界を探索して回るかのような行動を伴う論文検索システムを提案する。

## 2 関連研究

### 2.1 情報探索とセレンディピティ

情報探索行動におけるセレンディピティに着目した研究が行われている。Lori ら [2] は、デジタル環境での情報探索実験で得られたセレンディピティに関するアンケートデータと、物理的環境での尺度との相違点を、主成分分析により明らかにした。尺度は「多様性」「好奇心をそそる表示」など 10 次元に及び「システムの予想もしなかったような可視化が目を引きいたか」など 20 個の設問からなる。

2D, 3D, VR などの空間表現やインタラクションの違いで情報探索がどのように変わるか確かめる研究が行われている。VR では、3D や 2D と比べ、タスク遂行時間が短く、パフォーマンスが向上すると報告されている [3]。

### 2.2 論文サーベイ支援

論文サーベイにおける課題に取り組む研究が様々なアプローチから行われている。高久ら [4] らは、知識要求を、自然文や、自然文の載っている参考 Web ページの URL でシステムに入力すると、その文から特徴語を複数抽出し、組み合わせて、論文検索システムにおける検索クエリを複数発行することで、多様な論文検索を実現する「ふわっと関連検索」システムを提案した。

Alfaro ら [5] は、VR 空間上で論文検索ができ、声で操作が可能なシステムを提案し、ユーザビリティの向上を確認している。しかし、論文検索結果は 1 画面に 3 件までしか表示しないものであり、VR 空間を十分活用できていない。本研究では、VR がもたらす、実世界の探索に似た性質を論文サーベイに取り入れることを試みる。

### 3 プロトタイプとその評価実験

論文検索システムにおける検索結果表示を本棚メタファとすることで、検索結果を俯瞰して眺められるようになり、従来よりも幅広いサーベイとなると考えた。

この仮説を確かめるため、ある単語で論文検索をした時、その論文検索結果を3D空間上に可視化するシステムを構築し、被験者実験を行った。被験者には、Google Scholar等を比較システムとし、提案/比較両システムを使って、指定のトピック/自由なトピックをサーベイする2種類の課題に取り組ませた。実験は、液晶ディスプレイや、キーボード・マウスといった、従来どおりのインタフェースを用いて行った。

結果、視点回転量が極端に少ない被験者がみられ、実世界での本棚探索を十分に模したとはいえなかった。また、提案システムでは検索回数の被験者ごとのばらつきが減った他、一つの検索結果をより長時間眺める傾向にあった。

システムがきっかけで新しいトピックに出会った被験者はあまりみられなかった。このことから、ただ検索結果を本棚メタファで可視化するだけでは、幅広いサーベイが支援できるとはいえなかった。

幅広いサーベイを実現するには、セレンディピティを利用することが有効であると期待される。セレンディピティを実現するためには、検索結果を本棚メタファで可視化するだけでなく、その検索結果が多様であることが求められる。このことから、論文探索空間を広げることでの出会いの下地を作ることが今後の課題に残った。

## 4 提案システム

### 4.1 概要

仮想3D空間に、論文検索結果を本棚として表示するシステムを構築した(図1)。各論文が1冊の本として可視化される。検索エンジンにはCiNii Researchを使用している。

### 4.2 本棚

論文探索空間を広げるために、検索結果の論文を最新順に取得したものが手前の本棚に出現し、高久ら[4]らの手法を参考に関連論文の検索結果が奥の本棚に陳列されるものとした(図2)。さらに、検索語やそれぞれの分野名で引用数の多い論文を検索した結果が、平積み陳列される(図3)。

### 4.3 本

事前の複数回の予備実験および聞き取りによって明らかになった、サーベイの際の手がかりのうち、タイトル・

抄録・著者・掲載書誌の権威を可視化内容に反映した。本にはタイトルを記載し、帯に著者名を記載し、帯色を掲載書誌名から計算したものとした。同じ掲載書誌の論文が複数並んでいると、同じ帯色の本が並ぶこととなり、見分けがつく。

### 4.4 インタラクション

本システムはVR空間上に実装され、Meta Quest 2を用いて操作する。Meta Quest 2は、首の回転や体の動きを6自由度でトラッキングするHMDと、左右の手の位置をトラッキングするコントローラからなる。このシステムを使い、ユーザは、仮想空間を自由に歩き回り、本棚を見回すことができる。本にカーソルを合わせクリックすると、文献情報や抄録を閲覧できる。

論文PDFを開いて読むためには、論文をブックマークに登録する必要がある。VRシステムでのサーベイ終了後、ブックマーク論文一覧をWebブラウザ上で確認可能とした。



図1: 提案: 「ゲーム」と検索した際の本棚



図2: 提案: 関連分野「学習」の本の並び



図3: 提案: 関連分野「学習」における平積み論文



表 1: 事後アンケートに用いた設問

セレンディピティの次元	尺度
1. 妨げられない直接アクセス	S1 システムを使って、興味を持ったもの全てを探索することができた
2. 多様性	S2 いろいろな形で情報を見ることができた S3 いろいろなトピックを調べることができた S4 普段よりも多くのトピックで調べることができた
3. 好奇心をそそる表示	S5 いろいろな場所をクリック / 操作して、どうなるか試してみたくなった
4. 印象的な対比	S6 予想もしなかったような言葉が、目を引いた S7 システムの、予想もしなかったような可視化が、目を引いた
5. ポインター	S8 予想もしなかったような単語で、思考が刺激された
6. 欠陥	n/a
7. 相互の接触	S9 予想もしなかったようなコンテンツを持つページで、面白いものを見つけた S10 システムにより、異分野のつながりを感じた S11 システムが、トピックを色々探索するように誘いかけるような方法で、コンテンツを提示してくれた S12 あるトピックについて探索している時、予期せず、他のトピックにもたどり着いた S13 思わぬトピックに出くわした
8. 複数の経路	S14 それぞれのトピックに、色々な経路でたどりつくことができた
9. 探索可能性	S15 システムによって、拾い読みや、探索を促された
10. 立ち止まって考えられるか	S16 物をじっくり見るために、ふと立ち止まっている自分に気づいた S17 システムによって、立ち止まったり、探索したりする気になった S18 以前に調べていたトピックに戻ることができた S19 道に迷うことなく、色々なトピックを簡単に探索できた S20 トピックやアイデア間の興味深い関連性を追求することができた

## 5 実験

### 5.1 概要

当研究室所属/配属希望の学域 3 年～修士 2 年の学生 8 名を対象に、自身の今の研究テーマや、研究テーマとしていたトピックについて、検索語が尽きる/疲れるまで論文サーベイさせ、読みたい論文・興味関心のある論文をブックマークさせる実験を行った。

### 5.2 条件

以下の 2 条件を用意し、それぞれ別の日に実験した。

**提案条件** 提案システムを用いてサーベイした。その後、ブックマークに登録した論文を読んだ。

**比較条件** 提案システムでの検索結果を Web ブラウザに表示するものとしたシステムを用いてサーベイした。

### 5.3 実験の流れ

実験前に、提案システムの使い方を一通り使う練習タスクを行わせた。実験中は、データとして、操作ログ、閲覧・検索履歴、実験システムの動作映像を取得したほか、何を考え、どう操作しているかを話す、思考発話法を実践させた。

各条件の実験後、事後アンケートを実施した。アンケートでは「幅広くサーベイする」目的を達成できたかの主観的評価をさせたほか、先行研究 [2] の提案する 20 の設問を和訳したものに回答させ、システムのもつセレンディピティの性質を評価した。設問群は表 1 の通りであり、セレンディピティの 10 個の条件に対応するものとされる。

## 6 結果と考察

### 6.1 論文サーベイの幅広さとセレンディピティ

表 2: アンケート結果

	提案条件	比較条件	両側 t 検定 p 値
実験目的達成度合い / %	66 ± 21	64 ± 26	0.6971
serendipity 尺度合計点	66 ± 8	81 ± 10	0.00693

事後アンケートの結果は表 2 の通りである。先行研究の指標上では、提案条件のほうが有意にセレンディピティを引き起こすといえる。しかし、提案条件と比較条件とで、幅広いサーベイの達成度の主観的評価には差がなかった。

セレンディピティを測る設問のうち 1 % 有意差があったものは、S6「予想もしなかったような言葉が、目を引いた」S15「システムによって、拾い読みや、探索を促された」であった。このことから、提案条件には、比較条件と比べると、印象的な言葉が目を引き傾向や、検索結果をよりよく探索させる効用があるものと考えられる。

### 6.2 情報探索行動

検索行動の違いについて述べる。検索語の多様性は、提案・比較条件間で有意差はなかった。検索結果から論文詳細を開いた回数や、興味を持った論文の数を比較すると、提案条件のほうが、単位時間あたりの数が微増ではあるものの、有意差はなかった。

検索回数は、比較条件では、被験者 2 人が他の被験者と比べ倍以上の回数であったものの、提案条件では他の被験者と同じ程度の検索回数であるような様子が見られた。これは、3 章で通常の 3DCG を用いる提案条件と比較条件を比べた時にも見られた傾向であった。

## 7 まとめ

幅広い検索結果を持つ論文検索システムにおいて、本棚メタファを取り入れたインタフェースとそうでないインタフェースを用意し、比較実験を行った。

実験の結果、主観的には幅広いサーベイを実現させる実感は得られなかったもの、先行研究 [2] の指標上ではセレンディピティを向上することがわかった。特に、比較手法に対し、印象的な言葉が目を引き傾向や、検索結果をよりよく探索させる効用があるものと考えられる。

アンケートから導いた結論では、利用者の主観に大きな影響を与えず、自然な形でセレンディピティを実現するシステムとなっていると考える。

## 参考文献

- [1] 須崎信伍, 相場亮. 図書館における本との出会いを実現するシステムの研究. 第 81 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 195–196, 2019.
- [2] Lori. McCay-Peet and Elaine Toms. Measuring the dimensions of serendipity in digital environments. *Information Research*, 2011.
- [3] Maurice Schleußinger. Information retrieval interfaces in virtual reality. *Plos one*, Vol. 16, No. 2, 2021.
- [4] 高久雅生, 江草由佳. セレンディピティを促す論文検索ツール「ふわっと関連検索」. デジタル図書館, Vol. 38, pp. 35–41, 2010.
- [5] Luis Alfaro, et al. Scientific articles exploration system model based in immersive virtual reality and natural language processing techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 9, No. 7, 2018.

## 連絡先

小林稜

E-mail: ryo-kob@uec.ac.jp / ryokbysuec@outlook.jp

# 学習スタイルに着目した適応的な情報提示システムの ボードゲーム説明書への応用と検証

An Adaptive Presentation System Focusing on One's Learning Styles  
to Tabletop Game Instructions

○ <sup>1</sup> 永井 美央花, <sup>1</sup> 橋山 智訓

○ <sup>1</sup> Mioka Nagai, <sup>1</sup> Tomonori Hashiyama

<sup>1</sup> 電気通信大学

<sup>1</sup> The University of Electro-Communications

## Abstract:

This study focused on the fact that adapting to one's learning styles improves the ease of understanding for each user. However, few researches have applied the learning style theory to the fields other than that of education. This study proposes 2 types of web-based instruction manuals based on the Sequential/Global dimension of Felder-Silverman Learning Styles Model. This paper describes the results of the experiment to examine the effectiveness of the proposed instruction manuals.

## 1 はじめに

自分がわかりやすいと感じた授業や教材が、自分以外の全員にとってわかりやすい表現であるとは限らないと、誰しも実感したことがあるだろう。この事象は、「学習スタイル」が人ごとに異なるために起こると考えられている。

「学習スタイル」とは、学習者が学習環境をどのように知覚し、相互作用し、反応するかの比較的安定した指標となる、認知的・感情的・心理的な特性である [1]。心理学・教育の分野において、個々の学習スタイルに適した学習環境を提供することで学習効果の向上が見込まれるとして、様々な理論が提唱されている [2]。その一つが Felder-Silverman の学習スタイルモデル (FSLSM) [3] である。

実際に、生徒の学習スタイルに適した教材を提供することによって、生徒の学習効率が上がり、モチベーションが向上した事例が報告されている [4]。また、利用者の特性をモデル化し、それに応じてハイパーテキスト上の文書内容やリンク先を自動的に変更する Adaptive Hypermedia Systems (AHS) の技術分野では、生徒の学習スタイルに適応した画面構成の教材を動的に生成する研究がされており、学習効果に対して良い影響を与えることが示唆されている [5]。これらの事例から、学習スタイルに配慮して情報の表示形式を適応させることは、各利用者にとってのわかりやすさを向上させると言える。

本研究は、わかりやすさは学問を学ぶときだけでなく、「ゲームの遊び方を理解する」などの日常生活における情報処理タスクにも要求されると考えた。しかしながら、学習スタイル論を教育分野以外へ応用した研究は乏しい。

本研究の目的は、学習スタイルに配慮して情報を各利

用者にとってわかりやすい表現に適応させる手法を、日常における情報処理タスクの一例である「ボードゲームの説明書」に適用し、学習スタイル論の応用の幅を広げることである。その第一歩として、FSLSM の Sequential-Global 軸において、それぞれの優位者に配慮した2種類の Web 説明書と、その作成手法を提案する。実験では、提案 Web 説明書を被験者に読ませ、学習スタイルによって理解効率やわかりやすさへの印象に差が生じるかを検証した。

## 2 Felder-Silverman の学習スタイルモデル

### 2.1 概要

FSLSM は、学習者が好む学習方法を Active-Reflective (能動-内省)、Sensing-Intuitive (感覚-直感)、Visual-Verbal (視覚-言語)、Sequential-Global (逐次-全体) の4軸とその強度で表すモデルである (図 1)。Felder はこの4軸を測定するための質問紙である Index of Learning Styles (ILS) を開発し、オンライン上に公開している [6]。



図 1: FSLSM の概要

FSLSM は教材を学習スタイルに適応させる研究において最も適切な理論であるとされ、近年広く用いられてい

る [7]。

## 2.2 FSLSM の Sequential-Global 軸について

### 2.2.1 Sequential 優位者の特徴

Sequential 優位者の特徴として、直線的・段階的に知識を吸収する傾向と、一部分ずつ理解を深めていき、最後に全体を把握する傾向がある。また、収束的思考と分析を得意とする。以上の特徴から、Sequential 優位者には論理的な順序で、情報に区切りを持たせて段階的に進める学習方略が好ましい [3]。

### 2.2.2 Global 優位者の特徴

Global 優位者の特徴として、ランダムな順序で知識を吸収する傾向と、全体像を理解してから部分を把握する傾向がある。また、発散的思考と合成を得意とする。以上の特徴から、Global 優位者には最初に全体像を提示し、情報の教示順を制限せず、主題の関連性に着目した学習方略が好ましい [3]。

## 3 課題

### 3.1 適応的に提示する情報の体系化

先行研究 [4] [5] は、学習者の学習スタイルに応じて情報の提示位置や提示順序を変更する手法を取っている。この手法をボードゲームの説明書に適用するにあたって、提示順序やその入れ替えに再現性を持たせるため、またあらゆるボードゲームに対応可能にするために、ボードゲームにおけるルール説明の体系化、および体系化する手法の制定が必須である。

### 3.2 学習スタイルへの配慮手法

学習スタイルごとの学習方略は Felder によって定められている [3] が、その具体的な手法は研究によって様々で、確立されていない。配慮手法の設定によっては、有意な効果が見られなかった研究もある [8]。本研究は、学習スタイルへの配慮をボードゲームに応用する新規の提案であるため、適応提示システムを開発する前に、その手法が適切に機能するかを検証する必要がある。

## 4 提案手法

### 4.1 ボードゲームを体系化する手法の提案

ボードゲームのルールを、ゲーム進行に関する「手続き的ルール」と、プレイヤーの行動を恣意的に促進・抑制・禁止する「宣言的ルール」の2つに分類する。「手続き的ルール」はフローチャートで、「宣言的ルール」およびゲーム中の固有名詞はオントロジーでそれぞれ表現する。さらにフローチャートの各ノード、およびオントロジーの各要素には、その説明文と説明に付随する画像が

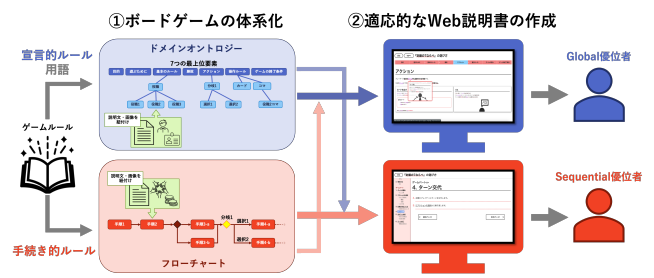


図 2: 提案手法の概要

紐付けられる。図 2 の左にボードゲームを体系化する手法の概要を示す。

### 4.2 学習スタイルに配慮した Web 説明書の提案

#### 4.2.1 Sequential 向け Web 説明書 (SEQ)

説明に順序を与えるため、フローチャートを優先した情報の提示を行う。オントロジー内の説明は、フローチャート内の説明文に初めて登場した際に添えて提示する。区切りのある説明をするため、フローチャートを一定の間隔で分割し、ページを作成する。また、ページナビゲーションとして「メニューバー」と「前後ページへ遷移するボタン」を配置し、順を追いやすくする (図 3)。

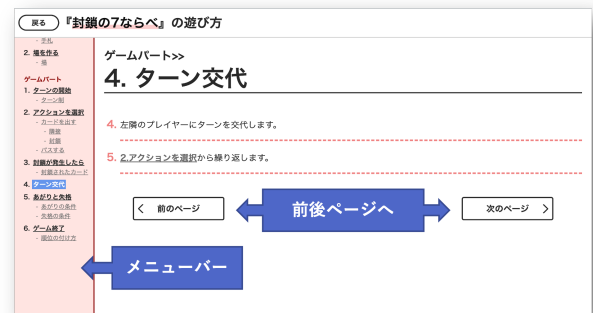


図 3: Sequential 向け Web 説明書 (SEQ) の画面構成

#### 4.2.2 Global 向け Web 説明書 (GLO)

ゲーム要素の関連性に従って説明するため、オントロジーを優先した情報の提示を行う。オントロジーの各要素について、紐付けられた説明文と画像を用いたページを作成する。ページ内部には、オントロジーにおける下位要素ページのプレビューを表示する。フローチャート内の情報は、その説明文と画像の全てを連結して1つのページを作成する。全体像を見せるため、オントロジーの全最上位要素ページとフローチャートから作成したページのプレビューを一覧表示した TOP ページを設ける。ま

た、ページナビゲーションとして「TOP へボタン」、「グローバルメニュー」、「下位ページプレビューボタン」、「リンク先プレビュー」を配置し、情報の取得順を制限しないようにする（図 4）。

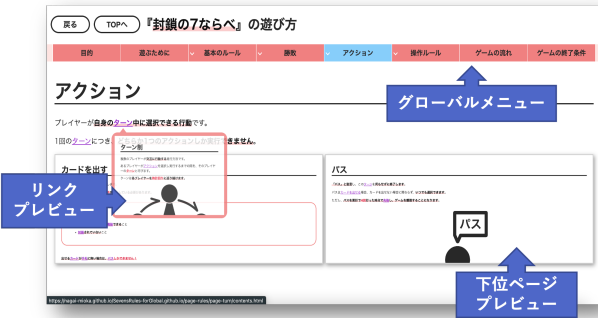


図 4: Global 向け Web 説明書（GLO）の画面構成

## 5 実験

### 5.1 手順

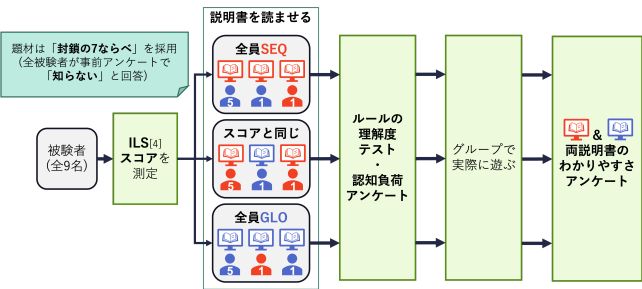


図 5: 実験手順の概要

実験手順の概要を図 5 に示す。今回の実験では「封鎖の 7 ならべ」を題材とし、提案した手法で 2 種類の Web 説明書を作成した。実験の前にアンケートを実施し、「封鎖の 7 ならべ」を知らないことの確認と、ILS スコアの測定を行った。事前アンケートの回答をもとに、「封鎖の 7 ならべ」を知らなかった被験者 9 名を、Sequential-Global 軸の ILS スコアが分散するように 3 グループに分け、それぞれ「全員に SEQ を読ませるグループ」「全員に GLO を読ませるグループ」「各自の ILS スコアに応じた説明書を読ませるグループ」とした。

以降の手順はグループごとに実施した。被験者に Web 説明書を読ませ、その最中のアクセスログを取得した。また説明書の読了後には、ルールを理解度を測る小テストと、認知負荷を測るアンケートを実施した。その後、「封鎖の 7 ならべ」を被験者に遊ばせて実際のルールを確認

してもらった上で、わかりやすさに関するアンケートを実施した。この時、読ませていないもう一方の Web 説明書を見せ、2 種類の説明書を読み比べさせて回答させた。

### 5.2 結果

被験者の Sequential-Global 軸の ILS スコアと各検証項目を相関分析した結果、最初に SEQ を読ませた群（5 名）について有意差が見られたものを表 1 に、最初に GLO を読ませた群（4 名）について有意差が見られたものを表 2 に、実験の最後に実施したわかりやすさに関するアンケートの全被験者分の回答について有意差が見られたものを表 3 にそれぞれ示す。（なお、本来 ILS スコアに正負はないが、分析の便宜上 Sequential を正、Global を負としている。）

表 1: 最初に SEQ を読ませた被験者群の相関分析の結果

検証項目	相関係数	p 値
読了時間	-0.894*	0.041
SEQ 由来の認知負荷	-0.980**	0.0034

表 2: 最初に GLO を読ませた被験者群の相関分析の結果

検証項目	相関係数	p 値
メニューのクリック数	-0.955*	0.045
平均ページ遷移距離	-0.996**	0.0040
読破前の遷移距離 >1 割合	-0.964*	0.036

表 3: わかりやすさに関するアンケートの相関分析の結果

検証項目	相関係数	p 値
SEQ は全体像が把握しやすい	0.821**	0.0067

## 6 考察

SEQ について、表 1 と表 3 の結果から、被験者の Sequential の度合いが強いほど、SEQ を読むときの読了時間が短く、認知負荷が少なく、全体像が把握しやすい有意な傾向が見られた。よって、SEQ が Sequential 優位者のわかりやすさを向上させたと言える。

一方、GLO については、わかりやすさに関する有意な傾向が見られなかった。しかし、表 2 の結果から、被験者の Global の度合いが強いほど、グローバルメニューを使用する回数が多い傾向が見られ、また上から下へ、左から右へといった規則性に従わないページ遷移を多くする傾向が見られた。よって、GLO が Global 優位者のわかりやすさに貢献したとは言えないが、Global 優位者は GLO に含まれる配慮手法の想定通りの行動を示したと言える。



両方の説明書について、理解度テストの点数には有意差が見られなかった。ただし、ほとんどの被験者がゲームのルールを7割以上理解していた。より複雑なルールのボードゲームを題材とした場合や、より難しい設問を出題した場合ならば、差が見られた可能性がある。また、理解が7割未満だった数少ない被験者は、「封鎖の7ならべ」の基礎をなす「7ならべ」を遊んだことがなく、元の知識量に差があったと思われる。したがって、説明書を読ませる前にも理解度テストを実施し、事前テストと事後テストの点数の差で知識量の伸びを見るべきであった。

## 7 まとめと今後の展望

実験の結果、本研究が提案した Sequential 向け Web 説明書は、実際の Sequential 優位者にとってのわかりやすさを向上させることが示唆された。一方、Global 向け Web 説明書は、実際の Global 優位者のわかりやすさに貢献したとは言えないが、情報の教示順を制限しないなどの配慮手法の方向性は誤っていないことが示唆された。

今後は Global 向け Web 説明書が Global 優位者に有用になるように改良するとともに、将来的にはゲームルールを体系化したフローチャートおよびオントロジーから、利用者の学習スタイルに適応した Web 説明書を自動で生成する AHS を提案したい。

## 参考文献

- [1] James W Keefe. Learning style: An overview. *Student learning styles: Diagnosing and prescribing programs*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–17, 1979.
- [2] 青木久美子. 学習スタイルの概念と理論-欧米の研究から学ぶ. *メディア教育研究*, Vol. 2, No. 1, pp. 197–212, 2005.
- [3] Richard M Felder, et al. Learning and teaching styles in engineering education. 2002.
- [4] Sin-Ban Ho, et al. Assessing python programming through personalised learning styles model. In Rayner Alfred, Hiroyuki Iida, Haviluddin Haviluddin, and Patricia Anthony, editors, *Computational Science and Technology*, pp. 139–151, Singapore, 2021. Springer Singapore.
- [5] Tzu Chi Yang, et al. Development of an adaptive learning system with multiple perspectives based on students' learning styles and cognitive styles. *Educational Technology and Society*, Vol. 16, pp. 185–200, 10 2013.
- [6] Richard M Felder, et al. Index of learning styles. <https://www.webtools.ncsu.edu/learningstyles/>, 2005.
- [7] Zine Othmane, et al. A comparative study of the most influential learning styles used in adaptive educational environments. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 10, No. 11, 2019.
- [8] 竹俊稲葉ほか. Rn-001 学習者特性適応型 e ラーニングシステムの構築・実験 (教育・人文科学, 査読付き論文). *情報科学技術フォーラム講演論文集*, 第 7 巻, pp. 55–58, aug 2008.

## 連絡先

永井 美央花

E-mail: MiokaNagai+UEC@gmail.com

# 顔合わせ時において適切な心理的距離を把握する支援システムの提案

A Support System to Understand the Appropriate Psychological Distance  
at the First Time Meeting

○<sup>1</sup> 後藤 匠, <sup>1</sup> 橋山 智訓

○<sup>1</sup> Takumi Goto, <sup>1</sup> Tomonori Hashiyama

<sup>1</sup> 電気通信大学大学院 情報理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Informatics and Engineering,

The University of Electro-Communications

## Abstract:

We are interested in one's feelings about the psychological distance from the other at the first time online meeting. We have experimented on whether communication channels and biological information can represent feelings. The result showed that it is hard to estimate the feelings. We have carried out another experiment to examine how to display one's feelings to the other. We have developed the online meeting system for the experiment with direct display and blur display. As a result, entering the feeling into the proposal system causes more stress to the subject than expected.

## 1 はじめに

学校のクラスや研究室、勤務先など、年単位のような長期的に付き合っていくコミュニティにおいて、メンバー一人一人との適切な心理的距離を把握することは重要である。金子は、心理的距離を「自己が、ある他者との間で、どれほど強く心理的な面でのつながりを持っていると感じ、どれほど強く親密で理解し合った関係を持っていると感じているかの度合」と定義した [1]。適切な心理的距離を早い段階で把握するに越したことはない。

対人コミュニケーションでは、メッセージの記号化と解読が繰り返し行われる [2]。しかしながら、メッセージの記号化と解読がうまくいかない人や場合も存在する。特に、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) が蔓延している現在では、研究室のゼミや勤務先の会議がオンラインで実施されることも多い。オンラインコミュニケーションではビデオの画角やマイクの性能などによってコミュニケーション・チャネルが制限されるため、対面コミュニケーションに比べてメッセージの記号化と解読がうまくいかない人や場合が多いと考えられる。

美山は、心理的距離には近づこうとする動きと遠ざかろうとする動きの両方があると考えている [3]。このことから、相手に対して「近づきたい」「離れたい」と感じる心理的距離に対する気持ちは、適切な心理的距離を把握するために行われる、心理的距離の調整に関係しているのではないかと考えられる。

本研究では、長期的に付き合っていくコミュニティのオンライン顔合わせ時に着目した。自分の心理的距離に対する気持ちを相手に伝達するシステム（以下、提案システム）を用いることで、心理的距離の調整をうまく行い、適切な心理的距離を把握することを支援できないかと考えた。実験 1 では、提案システムの心理的距離に対する

気持ちの入力を自動化するために、心理的距離に対する気持ちの推定ができるかを検証する。実験 2 では、実験 1 の結果を受けて提案したシステムの有用性を検証する。

## 2 関連研究

### 2.1 心理的距離

金子は、「私は■のことを非常に信頼している。」などといった、10 項目からなる心理的距離を測定する尺度を作成した [1]。また、吉岡・野口は、「あなたは父親との心理的距離について、どのように思いますか。」と教示し、「かなり近い」から「かなり遠い」までの 7 件法に回答させることで、心理的距離を主観的にどのように捉えているかの、心理的距離の評価を測定した [4]。

坂本・高橋は、現実の心理的距離と理想の心理的距離が一致している方が疎外感が低いこと、自分と友だちが同じくらいの心理的距離に位置付け合う方が疎外感が低いことを明らかにした [5]。実験 2 では、この研究を参考にして、自分と相手との心理的距離のズレのほか、自分と相手との心理的距離の評価のズレ、自分と相手との心理的距離に対する気持ちのズレを分析で用いることにする。

### 2.2 感情の推定手法

実験 1 では、心理的距離に対する気持ちと感情は似た概念だと考え、感情の推定手法に関する研究を参考にして実験を設計した。参考にした感情の推定手法に関する研究を紹介する。

満倉は、脳波から感性を推定するシステムを作成した [6]。有田らは、表情と生理指標（顔温度、心拍数、瞳孔径）を用いて感情を推定した [7]。岡田らは、表情、音響的特徴、発話文字列から感情を推定した [8]。栗林らは、表情、声色、体動から感情状態をクラスタリングした [9]。

### 3 実験 1: 心理的距離に対する気持ちの推定

実験 1 では、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化するために、心理的距離に対する気持ちの推定ができるかを検証することを目的とする。そのために、心理的距離に対する気持ちと関連しているコミュニケーション・チャンネルや生理指標があるかを調査する。

#### 3.1 実験方法

被験者として、大学生および大学院生 8 名が参加した。また、実験者（顔合わせの相手）として、大学生および大学院生 9 名が参加した。被験者 1 名に対し実験者 3 名とそれぞれ 10 分間、オンラインでの顔合わせをさせた。顔合わせの際には「とある研究室に同じタイミングで配属された同期と、長期的に付き合っていくことを想定して顔合わせを行う」というシチュエーションを想定させた。なお、実験の前に実施した面識に関するアンケートを用いて、被験者と実験者の組み合わせはお互いが初対面（お互いに存在を知らない状態）になるように設定した。感情推定に関する先行研究を参考に、以下のデータを取得した。

- **心理的距離に対する気持ち:** 心理的距離に対する気持ちを入力するシステム（図 1 下部）と Nintendo Switch の Joy-Con を用い、「近づきたい」から「離れたい」までの 5 段階でリアルタイムに回答させた（0.1 秒毎に取得）。
- **脳波:** Muse2 とアプリ「Mind Monitor」を用い、5 種類の脳波×4 つの電極のデータを取得した（0.001 秒毎に取得）。
- **平均心拍数:** TICKR FIT とアプリ「Wahoo Fitness」を用い、取得した（1 秒毎に取得）。
- **動画:** BRIO ULTRA HD PRO ビジネスウェブカメラと Blue Microphones Yeti Nano を用い、被験者の顔合わせの様子を録画した（1280 × 720, 60fps）。



図 1: 実験 1 被験者が見ていた画面

#### 3.2 結果および考察

分析では、システムトラブルにより心理的距離に対する気持ちの入力ができなかった顔合わせ 1 回分のデータは除外した。

まず、感情推定に関する先行研究を参考に、録画した動画を用いて以下のデータを取得した。

- **表情:** 録画した動画に DeepFace を用い、7 種類の感情値を取得した（0.1 秒毎に取得）。
- **顔のランドマーク:** 録画した動画に Dlib を用い、顔の 68ヶ所のランドマークを取得した（0.1 秒毎に取得）。
- **骨格のランドマーク:** 録画した動画に tf-pose-estimation を用い、カメラの画角に写っている骨格の 12ヶ所のランドマークを取得した（0.1 秒毎に取得）。

続いて、取得した全てのデータの時系列を 0.1 秒毎にリサンプリングし、全ての顔合わせにおけるデータを 1 つにまとめた。次に、0.1 秒毎のデータから、10 秒毎の平均値を求めた。そして、心理的距離に対する気持ちとその他全てのデータの相関係数（ピアソンの積率相関係数）を求めた。

また、感情推定に関する先行研究を参考に、録画した動画を用いて、以下のデータを取得した。

- **音声特徴量:** 録画した動画を音声データに変換し、openSMILE を用い、6373 個の音声特徴量を取得した（10 秒毎に取得）。

続いて、10 秒毎に平均化した心理的距離に対する気持ちと、10 秒毎に求めた音声特徴量の、全ての顔合わせにおけるデータを 1 つにまとめた。そして、10 秒毎の心理的距離に対する気持ちの平均値と音声特徴量の相関係数（ピアソンの積率相関係数）を求めた。

その結果、相関係数の絶対値は最大のものでも 0.4 程度であった。相関係数の絶対値が大きいコミュニケーション・チャンネルや生理指標がなかったことから、心理的距離に対する気持ちと関連しているコミュニケーション・チャンネルや生理指標を見つけることはできなかったと結論づける。このことから、コミュニケーション・チャンネルや生理指標から心理的距離に対する気持ちの推定はできないため、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化することはできないと結論づける。

## 4 実験 2: 提案システムの有用性の検討

実験 1 では、心理的距離に対する気持ちの推定はできないため、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化することはできないと結論づけた。そのため、心理的距離に対する気持ちの入力を手動にしたシステムを提案する。実験 2 では、提案システムの有用性を検討することを目的とする。

### 4.1 システム

ユーザの心理的負担を考慮し、心理的距離に対する気持ちの伝達の直接さが異なる、直接伝達システムとモザイク伝達システムの 2 種類のシステムを提案する。キーボードの左右キーから入力された心理的距離に対する気持ちを、直接伝達システムでは文字で伝達し（図 2）、モザイク伝達システムではビデオの解像度の荒さで伝達する（図 3）。提案システムではないが、比較条件として、心理的距離に対する気持ちが伝達されない、伝達なしシステム（図 4）も作成する。



図 2: 実験 2 直接伝達システム



図 3: 実験 2 モザイク伝達システム



図 4: 実験 2 伝達なしシステム

### 4.2 実験方法

被験者として、大学生および大学院生 16 名が参加した。被験者を 2 グループに分け、被験者 1 名につき、もう一方のグループの被験者 3 名とそれぞれ 10 分間、オンライン顔合わせをさせた。その際、3 種類のシステムを 1 回ずつ使用させた（直接伝達条件、モザイク伝達条件、伝達なし条件と呼ぶ）。顔合わせの際には「とある研究室に同じタイミングで配属された同期と、長期的に付き合っていくことを想定して顔合わせを行う」というシチュエーションを想定させた。なお、実験の前に実施した面識に関するアンケートを用いて、被験者の組み合わせはお互いが初対面（お互いに存在を知らない状態）になるように設定した。各顔合わせが終了するごとに、顔合わせ後アンケートに回答させた。顔合わせ後アンケートは、心理的距離 [1]、心理的距離の評価 [4]、心理的距離に対する気持ちの入力を忘れなかったか、心理的負担（以下の 3 つの設問）の 4 項目からなる。

- (1) 正直に心理的距離に対する気持ちを入力できた。
- (2) 心理的距離に対する気持ちの入力にストレスを感じた。
- (3) 心理的距離に対する気持ちの伝達を受けてストレスを感じた。

※「とてもそう思う」から「全くそう思わない」までの 5 件法

### 4.3 結果

分析では、「心理的距離に対する気持ちの入力を忘れなかったか」の項目で「ほとんど・すべて忘れた」と回答していた 2 データや、それらに関連するデータは除外した。

まず、顔合わせ後アンケートの、心理的距離、心理的距離の評価、心理的負担の 3 項目について数値化し、各項目の条件毎の平均値を求めた。また、条件毎の被験者間で、心理的距離のズレの絶対値の平均値と、心理的距離の評価のズレの絶対値の平均値を求めた。結果は表 1 の通りである。

表 1: 実験 2 顔合わせ後アンケートの平均値

項目	直接伝達条件	モザイク伝達条件	伝達なし条件	p 値
心理的距離	-3.71 (SD: 6.34)	-3.71 (SD: 5.69)	-3.79 (SD: 6.02)	0.874
心理的距離の評価	1.93 (SD: 0.829)	2.00 (SD: 0.961)	2.00 (SD: 0.961)	0.975
心理的負担 (1)	2.71 (SD: 1.20)	3.14 (SD: 0.535)	3.43 (SD: 0.646)	0.0807
心理的負担 (2)	2.14 (SD: 1.17)	1.36 (SD: 1.15)	0.857 (SD: 0.949)	0.00199
心理的負担 (3)	1.19 (SD: 0.911)	1.06 (SD: 1.12)	なし	0.559
心理的距離のズレの絶対値	7.88 (SD: 5.06)	3.75 (SD: 2.66)	5.29 (SD: 2.69)	0.194
心理的距離の評価のズレの絶対値	1.38 (SD: 0.744)	1.00 (SD: 0.756)	1.14 (SD: 1.21)	0.656

続いて、心理的距離に対する気持ちのデータの時系列を 1 秒毎にリサンプリングした。次に、各条件の被験者グループ毎に、全ての顔合わせにおける心理的距離に対する気持ちのデータを 1 つにまとめた。その後、各条件毎に、被験者グループ間の心理的距離に対する気持ちの

データの相関係数（ピアソンの積率相関係数）を算出した。結果は表2の通りである。

表 2: 実験 2 心理的距離に対する気持ちのズレ

直接伝達条件	モザイク伝達条件	伝達なし条件
0.785	0.546	0.273

#### 4.4 考察

表1の心理的負担(2)では1%水準で有意差がみられたことから、心理的距離に対する気持ちの入力にストレスを感じていない順から、伝達なし条件、モザイク伝達条件、直接伝達条件、となることが示された。しかし、それ以外の項目においては有意差がみられなかった。その原因としては、山口らの研究[10]より、性格と心理的距離との間には一定の関連があると考えられることから、個人の性格の違いのためにデータのばらつきが大きくなってしまったことが考えられる。

システムの有用性の検討では、「適切な心理的距離を把握できたか」「心理的な負担はなかったか」の2つの観点から考察する。「適切な心理的距離を把握できたか」は心理的距離の評価の項目、「心理的な負担はなかったか」は心理的負担の項目がそれぞれ対応する。しかし、心理的負担(2)のみでしか有意差がみられず、その項目において提案システムは比較用システムに劣っていたことから、提案システムが有用であるとは言えない。

#### 5 おわりに

本研究では、長期的に付き合っていくコミュニティのオンライン顔合わせ時において、自分の心理的距離に対する気持ちを相手に伝達するシステムを用いることで、心理的距離の調整をうまく行い、適切な心理的距離を把握することを支援できないかと考えた。実験1では、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化するために、心理的距離に対する気持ちの推定ができるかを検証した。その結果、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化することはできないと結論づけた。実験2では、実験1の結果を受けて提案したシステムの有用性を検証した。その結果、提案システムの有用性は検証できなかったが、提案システムにおける心理的距離に対する気持ちの入力のストレスが大きかったことが明らかとなった。

実験1では、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化することはできないと結論づけた。しかし、複数のコミュニケーション・チャネルや生理指標を組み合わせたり、機械学習を用いたりすることで、心

理的距離に対する気持ちを推定できる可能性がある。これを試してみることで、提案システムの心理的距離に対する気持ちの入力を自動化を実現し、心理的距離に対する気持ちの入力のストレスを低減させた後に、改めて提案システムの有用性を検討したいと考えている。

#### 参考文献

- [1] 金子俊子. 青年期女子の親子・友人関係における心理的距離の研究. 青年心理学研究, Vol. 3, pp. 10–19, 1991.
- [2] 大坊邦夫. しぐさのコミュニケーション：人はどう親しみをどう伝えあうか. サイエンス社, 1998.
- [3] 美山理香. 大学生の友人との心理的距離に関する基礎的研究. 九州大学心理学研究, Vol. 4, pp. 27–35, 2003.
- [4] 吉岡和子, 野口彩夏. 親との心理的距離及び子どもの夫婦関係の認知と「頼れる感」の関連. 福岡県立大学心理臨床研究: 福岡県立大学心理教育相談室紀要, Vol. 11, pp. 33–41, 2019.
- [5] 坂本安, 高橋靖恵. 友人関係における心理的距離のズレと疎外感の関連. 青年心理学研究, Vol. 21, pp. 69–81, 2009.
- [6] 満倉靖恵. 脳波解析による感性アナライジング. 電気学会誌, Vol. 136, No. 10, pp. 687–690, 2016.
- [7] 有田繭子, 越智晴香, 松藤貴大, 坂本博康, 福島重廣. ファジィメンバシップ値を利用した正準相関分析による顔表情と生理指標からの感情の推定. 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 27 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 303–303. 日本知能情報ファジィ学会, 2011.
- [8] 岡田敦志, 上村譲史, 目良和也, 黒澤義明, 竹澤寿幸. 表情・音響情報・テキスト情報からのリアルタイム感情推定システム. 人工知能学会全国大会論文集 第 31 回 (2017), pp. 1B1OS25a4–1B1OS25a4. 一般社団法人 人工知能学会, 2017.
- [9] 栗林潤, 島田伸敬, 松尾直志. 表情・声色・体動の長時間計測による固有感情状態モデリング. In IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2021
- [10] 山口正二, 小島弘史, 原野広太郎. 性格類型に規定される心理的距離に関する研究. カウンセリング研究, Vol. 24, No. 1, pp. 11–17, 1991.

#### 連絡先

後藤 匠

E-mail: takumi.goto@mail.uec.jp



# 複数の模倣 AI の切り替えによるプレイヤーとの協力プレイの提案

Switching among several AIs for cooperative play by player and AI

○ 東川 由憲, 橋山 智訓

○ Yoshinori Higashikawa, Tomonori Hashiyama

電気通信大学

The University of Electro-Communications

**Abstract:** With the recent development of AIs, AIs became a partner of players in board games to support the missing parts of humans. This research aims to apply this concept to video games, using AI to support the players' enjoyment. Players play only the parts they want to play and let AI play the rest. Some experiment have been carried out to show the feasibility of these switching procedure. As a result, the AIs can play the stages, allowing the player and the AIs to switch intentionally while playing video games.

## 1 はじめに

近年ゲームに関する AI は急速な発展を遂げている。以前まではゲーム AI の強さに関する研究が広く行われていた。しかし、ゲーム AI の強さに関する研究は十分なものになりつつあり、現在は強さだけでなく、プレイヤーを楽しませるための研究が進んでいる。特に人間らしい振る舞いをする AI やプレイヤーを模倣する AI の研究が行われている。これらの研究では様々な学習方法が用いられているが、その一つに模倣学習がある。

模倣学習とは、教師となる人間の行動 (以下、デモ) を模倣することでタスクを攻略する学習方法である。模倣学習の代表的な手法の一つに、Behavioral Cloning (以下、BC) がある。BC はある状態になった時のデモの行動を教師あり学習で獲得する手法である [2]。BC はゲームを記録するツールとプレイヤーによるゲームのデモがあればよく、ゲームの種類に依存しない。一方で、学習には大量のデモが必要で、実用的でないという問題がある。そのため、少ないデモで性能の良い AI ができれば実用的であり、様々なゲームで利用できると考えられる。

AI の発展により、囲碁や将棋ではプロに勝利する AI が現れた。現在は AI の強さを生かし、AI が人間の足りない部分をサポートするパートナーとして人間と協力する考え方ができている。本研究ではこの考え方をビデオゲームにも応用できるのではないかと考え、AI との協力プレイによってプレイヤーの楽しみを支援することを目的とする。具体的には、プレイヤーが遊びたい部分だけをプレイし、残りを AI がプレイするという協力プレイの実現である。

本研究では、多くのゲームで応用するために、BC を用いて少ないデモで性能の良い AI を作成する手法を提案し、プレイヤーが本手法による AI とプレイヤーの操作を任意に切り替えることができるようにすることで協力プレイの実現を目指す。

## 2 関連研究

### 2.1 BC に関する研究

ゲーム分野において BC を用いた研究は既に行われている。Anssi ら [1] は一般的に BC がビデオゲームでどのような性能を発揮するかを調べるために複数のゲームで BC を用いて AI を作成し性能を調べた。結果として、BC で作成した AI はゲームのルールやダイナミクスは学習できるが、最高でも人間のスコアの 30% ほどであったとしている。本研究では、少ないデモで人間の代わりにゲームをプレイする AI を作成し、プレイヤーが遊びたい部分だけをできるように AI とプレイヤーの操作を任意に切り替えられるようにすることを試みる。

### 2.2 プレイヤーと AI の協力に関する研究

AI とプレイヤーの協力プレイに関する研究は主にボードゲームで行われている。古田ら [3] はプレイヤーと AI がペアを組んで将棋をプレイする「A.I.See」というツールの開発を行った。プレイヤーの任意のタイミングで AI がヒントを与えることで、プレイヤーと AI の協力プレイを実現させた。一方、ビデオゲームはボードゲームほどプレイヤーと AI の協力プレイに関する研究は進んでいない。そのため本研究では、ビデオゲームにおいてプレイヤーと AI の協力プレイの実現の可能性を示す。

## 3 提案手法

本研究で対象とするゲームは横スクロール型のアクションゲームとした。アクションゲームには移動や攻撃といった特定のアクションがあり、プレイヤーはそれぞれの特定のアクションの組み合わせてゲームをプレイしている。Anssi ら [1] の研究から、少ないデモから BC を用いて作成した AI の総合的な性能は良くない。しかし、ゲームのルールやダイナミクスは学習できていることから特定のアクションを強調したデモから AI を作成すれば、作成した AI も同様に特定のアクションを強調してプレイできるのではないかと考えた。そこで本手法は、少ないデモから特定のアクションを強調してプレイする AI を作成し、プレイヤーのアクションの割合に基づいて切り替える (図

1). 実験では本手法による AI が人間の代わりにゲームをプレイできるかの検証を行った。

またプレイヤーが特定のアクションを強調してプレイする AI と人間の操作を任意に切り替えられるようにすることで、プレイヤーが遊びたい部分だけをプレイでき、残りを AI がプレイするという協力プレイの実現を可能にした。

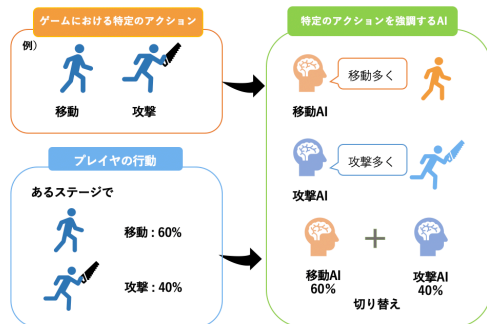


図 1: 提案手法の概要

## 4 実験方法

BC の実装は文献 [2] を参考にし、対象のゲームとして株式会社 SEGA が発売している横スクロール型のアクションゲーム「Alien Soldier」を使用した。このゲームでを使用した操作は次の通りである。

- LEFT: 左に進む
- RIGHT: 右に進む
- S: 攻撃
- D: ジャンプ
- DOWN+D: 向いている方向に突進

この操作からゲームにおける特定のアクションを移動、攻撃、ジャンプの 3 種類とした。それぞれのアクションを強調してプレイするデモを 10 回分収集し、BC を用いて移動 AI、攻撃 AI、ジャンプ AI を作成した。

### 4.1 プレイヤーのアクションの割合でランダム切り替え

プレイヤーのアクションの割合に基づいて 3 つの AI を切り替えるために、プレイヤーのデモの行動を 3 つのアクションに分類した。今回使用するゲームの操作を以下のように移動、攻撃、ジャンプの 3 つのアクションに分類し、対応するアクションと同じ割合でそれぞれの AI をランダムに切り替えた。

- 操作なし：何も操作キーを押していないときの割合
- 移動：LEFT の割合 + RIGHT の割合 + 突進の割合 / 2
- 攻撃：攻撃の割合 + 突進の割合 / 2
- ジャンプ：ジャンプの割合

操作なしの割合をアクションとして含めるかを確かめるために、操作なしを含める場合と含めない場合の 2 種類でランダムに切り替え、比較を行った。アクションを分類するために使用したデモから BC を用いて AI を作成し、本手法による AI と比較を行う比較 AI とした。

### 4.2 プレイヤーと AI の切り替え

プレイヤーと AI との協力プレイの観点から、プレイヤーが移動 AI、攻撃 AI、ジャンプ AI とプレイヤーの操作をキー操作によって任意に切り替えを可能にした。プレイヤーの操作とそれぞれの AI の操作は以下のキーで切り替えた。

- Q キー：移動 AI の操作
- W キー：攻撃 AI の操作
- E キー：ジャンプ AI の操作
- R キー：プレイヤーの操作

## 5 実験結果

### 5.1 プレイヤーのアクションの割合でランダム切り替え

プレイヤーのデモの行動を分類すると結果は表 1 の通りとなった。

表 1: デモのアクションの割合

アクション	操作なしを含む (%)	操作なしを含まない (%)
操作なし	28	-
移動	26	37
攻撃	39	53
ジャンプ	7	10
合計	100	100

この 2 種類の割合を元に移動 AI、攻撃 AI、ジャンプ AI の切り替えを行い、それぞれ 100 プレイ実行した。操作なしを含む場合を changeAI.4、操作なしを含まない場合を changeAI.3 とした。それぞれのスコアの分布を次の図 2、3 に、スコアの詳細を表 2 に示す。

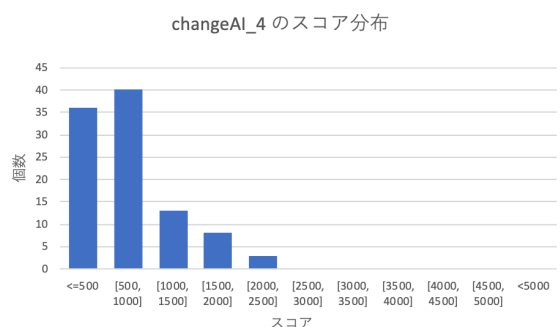


図 2: changeAI.4 のスコア分布

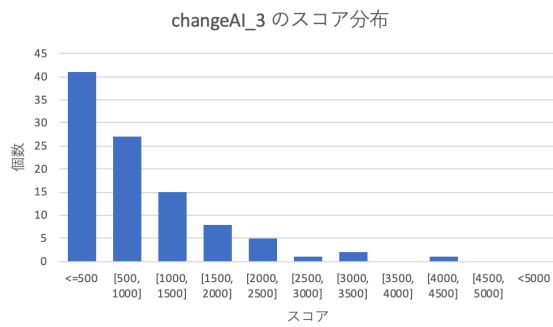


図 3: changeAI\_3 のスコア分布

表 2: ランダム切り替え AI のスコアの詳細

スコア	比較 AI	changeAI_4	changeAI_3
平均値	1084.22	603.68	714.46
最大値	3882	2105	4252
最小値	21	0	21
標準偏差	824.31	532.80	796.28
中央値	1025.0	542.0	542.0
最頻値	42	542	21

図 2, 3 を見ると、操作なしを含む・含まないどちらもスコア 3000 以下が 9 割以上であることがわかった。また、表 2 を見ると平均値・中央値を見ると操作なしを含む・含まないどちらも比較 AI より低い値であり、性能が悪いということがわかった。また攻撃しようとして移動したり、移動しようとして攻撃したりするなど、プレイも機械的な挙動が見られた。この原因として、1 フレーム毎に AI を切り替えていたためと考えた。そのため、AI の切り替えを 1 フレームから数十フレームごとにするこで、一定のフレームの間、同じ AI が行動できるように遅延を入れた。具体的には 10 フレームと 60 フレームごとに切り替わるように遅延を入れ、再度性能を検証した。この時の操作なしを含む場合を 10 フレーム AI\_4, 60 フレーム AI\_4 とし、含まない場合を 10 フレーム AI\_3, 60 フレーム AI\_3 とした。それぞれのスコアの分布を図 4～7 に、スコアの詳細を表 3 に示す。

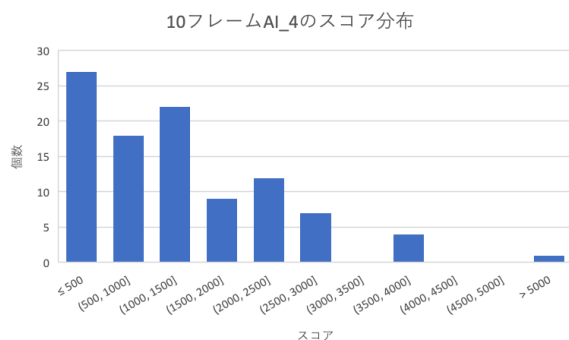


図 4: 10 フレーム AI\_4 のスコア分布

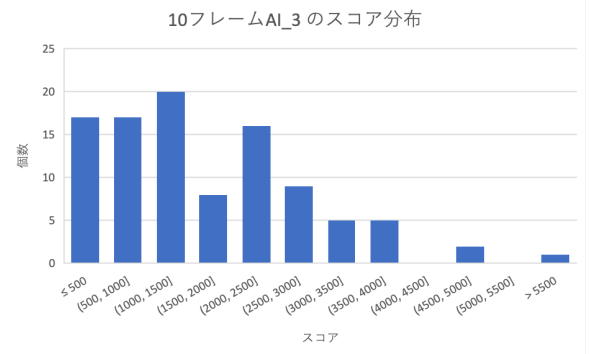


図 5: 10 フレーム AI\_3 のスコア分布

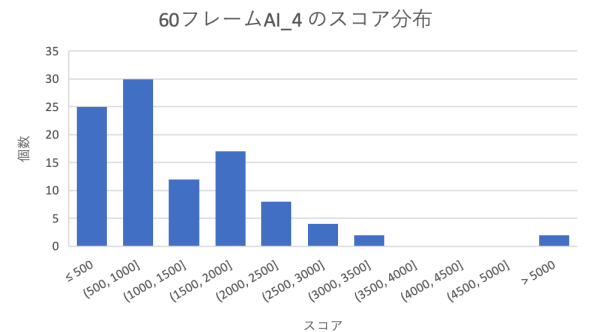


図 6: 60 フレーム AI\_4 のスコア分布

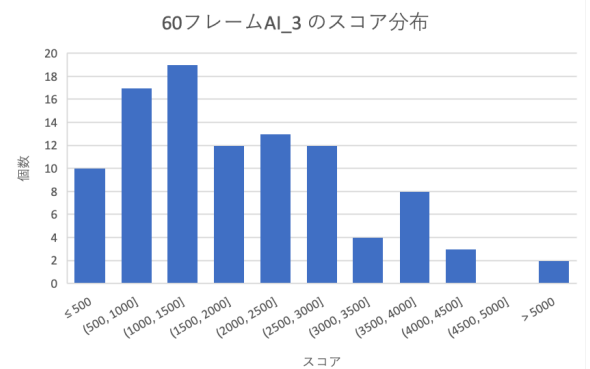


図 7: 60 フレーム AI\_3 のスコア分布

表 3: それぞれの AI のスコアの詳細

スコア	比較 AI	10 フレーム AI_4	10 フレーム AI_3
平均値	1084.22	1264.47	1636.98
最大値	3882	5235	6146
最小値	21	42	21
標準偏差	824.31	1027.26	1237.42
中央値	1025.0	1086.0	1262.5
最頻値	42	84	1252

表 4: それぞれの AI のスコアの詳細 (続き)

スコア	60 フレーム AI_4	60 フレーム AI_3
平均値	1121.31	1843.75
最大値	5147	5067
最小値	0	63
標準偏差	992.34	1222.22
中央値	766.5	1584.0
最頻値	563	693

図4～7を見るとばらつきが大きいので、一概に性能が良いとは言えない。しかし、表3、4の平均値・中央値を見ると60フレームAI.3が最もスコアが高く、性能が良いという結果になった。ばらつきが大きい原因について、AIの切り替えはプレイヤーのアクションの割合に基づいているが、割合ごとにランダムに切り替えるため、同じAIが連続して行動する可能性がある。そのため、一つのAIが長い時間ゲームをプレイしてしまったからだと考えられる。また10フレーム、60フレーム共に操作なしを含まない方が性能が良いという結果になった。この理由として、それぞれのAIごとにプレイの中で操作しないタイミングがあり、わざわざ操作しない割合をアクションの割合として含めると何も操作しないタイミングが増え、時間だけが過ぎてしまったためだと考えられる。

最も性能が良かった60フレームAI.3に対して、プレイ時間を増加させた60フレームlongAIを作成し、スコアの向上が見られるか、ボス戦までゲームをプレイすることができるかを検証した。60フレームlongAIのスコア分布を図8に、スコアの詳細を表5に示す。

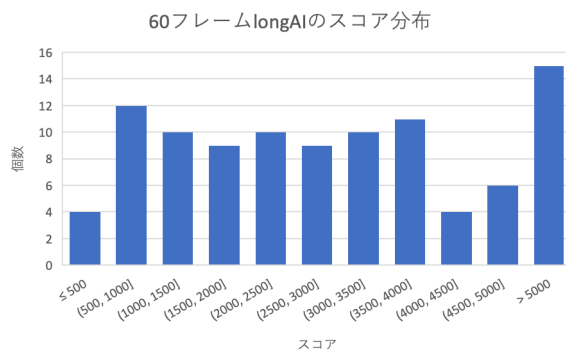


図8: 60 フレーム longAI のスコア分布

表5: 60 フレーム longAI のスコアの詳細

スコア	比較 AI	60 フレーム longAI
平均値	1084.22	3022.64
最大値	3882	11760
最小値	21	126
標準偏差	824.31	2039.40
中央値	1025.0	2808.5
最頻値	42	2634

図8より、スコア5000を超える回数が60フレームAI.3より7倍も増加しているという結果になった。また表5より、平均値、中央値ともに60フレームAI.3より高いという結果になった。したがって、60フレームAI.3のプレイできる時間を増加させることでスコアの向上が見られた。またボス戦までプレイすることができる回数が増えたことを確認できた。

本手法では移動AI、攻撃AI、ジャンプAIの3つのAI

の切り替えでゲームをプレイしており、これらのAIは10回分という少ないデモから作成した。60フレームlongAIがボス戦までプレイできたことから、BCを用いて少ないデモで性能の良いAIを作成できたと言える。

## 5.2 プレイヤとAIの切り替え

キーの切り替えによってそれぞれのAIとプレイヤーの操作を任意に切り替えることが可能になった。プレイヤーとAIを任意に切り替えることが可能になると、プレイヤーがつまづいている場面をAIが代わりに操作することができたり、逆にデモに存在しないためにAIがプレイするのが難しい場面をプレイヤーが操作することができるようになる。しかし、現状では3つのAIとプレイヤーの操作をキー操作によって切り替えているため、プレイヤー側の操作が多いという問題がある。そのため、上記の60フレームAI.3との切り替えを可能にしたり、ゲームの状況に応じてプレイヤーの操作なしで自動で切り替えを行ったりなど、プレイヤーにとって適切な切り替えの方法を考えていく必要がある。

## 6 まとめ

BCにより特定のアクションを強調してプレイするAIを作成し、それらをプレイヤーの割合ごとにランダムに組み合わせてプレイするという本手法によるAIは、BCで作成したAIをそのままプレイするAIよりも、性能が向上しボス戦までゲームをプレイすることがわかった。またプレイヤーがAIとの操作を任意に切り替えられるようにしたことでAIとの協力プレイの実現を可能にした。今後は、他のゲームでも同様の実験を行い、本手法が一般化できるかを調べるとともに、本手法によるAIとの適切な切り替えの方法を考えていく。

## 参考文献

- [1] Anssi Kanervisto, Joonas Pussinen, and Ville Hautamäki. Benchmarking end-to-end behavioural cloning on video games. In *2020 IEEE Conference on Games (CoG)*, pp. 558–565, 2020.
- [2] 布留川英一. Openai gym / baselines 深層学習・強化学習 人工知能プログラミング実践入門. 株式会社ポーンデジタル, 02 2020.
- [3] 古田真緒, 白井暁彦ほか. Ai see: 多重化不可視映像技術を用いたボードゲームプレイ上達支援ツール. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 52–54, 2016.

## 連絡先

東川由憲

E-mail: 1100560yosshi.507@gmail.com

## ポケモンの音象徴について

EP20115 山口郁弥 指導教授：中村剛士

### 1 はじめに

音そのものがある特定のイメージを喚起する事象は音象徴と呼ばれる[1]。音象徴には未だ説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。そのため、多種多様な事例を収集し、音響的な特徴の発見を試みる必要がある。

本研究では、“ポケットモンスター [2]” (以降、ポケモン) を事例として AI による分類実験を行い、調査・解析する。これまでにポケモンの音象徴については報告があり、有性阻害音とモーラ数に関する音響的な特徴について議論されている[3]。しかし、AI を用いた研究報告は見当たらない。

本研究の目的は、ポケモンシリーズのポケモン名が持つ音響的な特徴を、AI を用いて発見し、その特徴が音象徴であることを議論することである。先の研究ではポケモンの進化前と進化後による音象徴の差異について報告していたため、本研究では身長、体重の大小による音象徴を議論する。

### 2 実験方法

本研究ではポケモン名の持つ音象徴として、身長が“高い”か“低い”の 2 クラス分類実験と体重が“重い”か“軽い”によって、ポケモン名の音響的な特徴による分類の可否を示す。分類実験には CNN を用いた。分類結果に対して Grad-CAM による特徴分析を行い、分類根拠となる音響的な特徴を発見し、音象徴仮説を設定する。

まず、ポケモン名を音響特徴量(MFCC)に変換し、Leave-1-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ポケモン名に対して、身長の場合、“高い”か“低い”のいずれかのクラスを出力する。また、体重の場合、“重い”か“軽い”のいずれかのクラスを出力する。

次に正しいクラスが出力されたポケモン名について、Grad-CAM を適用し分類根拠となる音響的な特徴を発見し、音象徴仮説を設定する。

### 3 分類実験とその結果

データセットは身長と体重をポケモン図鑑から抽出しており、ポケモン赤・緑からポケットモンスターウルトラサン・ウルトラムーンまでの作品に登場するポケモンを対象とした。しかし、分類を行うにあたって判断できない文字(記号、英字など)が記載されているポケモンは作成したデータセットから除外している(例 ポリゴン Z など)。また、ポケモンには同一名だが複数の姿を持つポケモンも存在し、クラス分けを行った際にそれぞれの姿が同じクラスである場合、1 体としてカウントするものとした。他方、それぞれが別のクラスとなる場合はそのポケモン自体をデータセットから除外した。

今回の実験では、身長・体重ともに平均値あたりであるポケモンをデータセットから削除した。実験に使用したデータセットは身長のデータ数 403 個、体重のデータ数 427 個である。このデータセットを用いて Leave-one-out 法によって分類クラスの予測実験を行った。

分類実験の結果、正解値と F1 値の算出を行った。また、正解したデータの抽出を行い、それらについて Grad-CAM を使用し、分類根拠となる音響的な特徴を分析した。ここでは、正解データがもつ音響的な特徴について勾配の大きな箇所に注目し、勾配の大きな箇所がどのモーラに該当するのか調査を行った。

身長に関する混合行列を表 1 に、体重に関する混合行列を表 2 に示す。身長の正解率は.69、F1 値は.70、体重の正解率は.72、F1 値は.71 であり、音響的な特徴からどちらもある程度判別できていることがわかる。

表 1：身長の混合行列

予測 \ 真値	高身長	低身長
	高身長	低身長
高身長	142	64
低身長	59	138

表 2：体重の混合行列

予測 \ 真値	軽量級	重量級
	軽量級	重量級
軽量級	147	65
重量級	52	163

次に、正解したデータについて Grad-CAM を使用し、勾配が大きかったモーラを調べ、各モーラが出現するデータを数え上げた。現在、体重のみしか調査できていないため、体重の場合の勾配の大きかったモーラとそれを含むデータの数の一部を以下に記す。このとき、“一”は長音を示す。

- 軽量級： 一、シ、チ、イ、キ、ピ、ス、モ、ム
- 重量級： 一、ン、ド、オ、ガ、イ、ラ、バ

### 4 考察

Grad-CAM による分析で得られた結果から、体重が軽いポケモンには母音が/i/の音が多く、体重が重いポケモンには母音が/a/や/o/の音が多いことがわかる。先行研究[4]において、/i/の音は小さいく弱い意味を表す音であり、/a/、/o/の音は大きく強い意味を表すとされている。本実験の結果は先行研究の知見と一致しており、ポケモンの音象徴は先行研究と同様の法則で名付けられているのではないかと考える。

### 5 まとめ

本実験では、ポケモンの名前において身長・体重の二つの項目を 2 クラス分類の音象徴について調査を行った。また Grad-CAM によって作成されたヒートマップから、勾配の大きな箇所に対応しているモーラを音響的な特徴として獲得し、得られた結果から考察を行った。その結果、先行研究と同様の法則を発見することができた。

今後は、統計的な分析を実施し、判別できる可能性のあるモーラを発見していきたい。またそのモーラの発見後、そのモーラの有無に対して仮想のポケモン名を作成し、主観評価実験のアンケート調査を行う予定である。この一連の流れを身長、体重の二つの項目で行いたいと考えている。

### 参考文献

- [1] Ohala, John J., “The frequency code underlies the sound symbolic use of voice pitch”, Sound symbolism, 1994, 2, 325–347.
- [2] 株式会社ポケモンから発売されているゲームソフトシリーズの名称
- [3] ポケモンのネーミングにおける母音と有性阻害音の効果 熊谷 学而(国立国語研究所) 川原 繁人(慶應義塾大学言語文化研究所)
- [4] 日本語の母音における音象徴の研究



# モンスターハンターの音象徴について

○渡邊 紫花<sup>1</sup>, 中村 剛士<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>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喚起する事象は音象徴と呼ばれる[1]. 音象徴には未だ説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. そのため, 多種多様な事例を収集し, 音響的な特徴の発見を試みる必要がある.

本研究では, “モンスターハンターシリーズ[2]” (以降, モンハン)を事例として AI による分類実験を行い, 調査・解析する. これまでにモンハンの音象徴については報告があり, 有性阻害音とモーラ数に関する音響的な特徴について議論されている[3]. しかし, AI を用いた研究報告は見当たらない.

本研究の目的は, モンハンシリーズのモンスター名が持つ音響的な特徴を, AI 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. 先の研究ではモンスターの大きさによる音象徴の差異について報告していたため, 本研究でも同様に大きさによる音象徴の存在を検証する.

## 2 調査方法

本研究ではモンスター名の持つ音象徴として, “大きい”か“小さい”の 2 クラス分類実験によって, モンスター名の音響的な特徴による分類の可否を示す. 分類実験には 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, 分類根拠となる音響的な特徴を発見し, 音象徴仮説を設定する.

まず, モンスター名を音響特徴量(MFCC)に変換し, Leave-1-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モンスター名に対して, “大きい”か“小さい”いずれかのクラスを出力する. 次に正しいクラスが出力されたモンスター名について, Grad-CAM による特徴分析を行う. Grad-CAM は図 1 のようなヒートマップを出力し, 入力した各モンスター名の MFCC に対応する. ヒートマップ上に濃赤色で示される箇所は, 分類する上で特徴的なモーラであると考えられるため, 濃赤色箇所のモーラを抽出した.

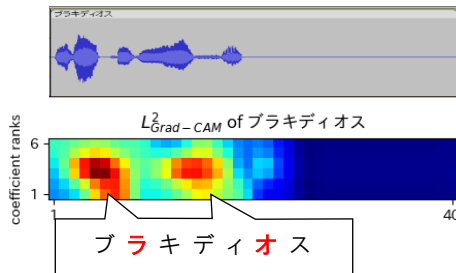


図 1 Grad-CAM のヒートマップ例

## 3 分類実験とその結果

分類実験は CNN を用いた. 各モンスター名を MFCC に変換し, CNN に入力した. 実験に使用したデータセットは大きいモンスター名が 80 個, 小さいモンスター名が 80 個, 合計 160 個である. 結果の混合行列を表 1 に示す. 正解率は約 76%, F 値は約 77%であった. 以上より, 何らかの音響特徴量によって, モンスター名をある程度分類可能であることが分かる.

表 1 分類結果

予測 \ 真値	大きい	小さい
大きい(80)	64	16
小さい(80)	22	58

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思

えられる濃赤色で示された箇所のモーラを数えた. その一部を表 2 に示す. 大きいモンスター名と小さいモンスター名を比較すると, 歯茎音, 半母音, 有聲の音である /r/ の音が大きいモンスター名に多く出現している. このことから /r/ が大きい印象を与えているのではないかと仮説を設定する.

表 2 ヒートマップ上で濃赤色を示すモーラの出現回数

	大きい	小さい
ル(ru)	13	2
ラ(ra)	11	1
オ(o)	10	3
ロ(ro)	8	0
レ(re)	7	0

上で設定した仮説について検証するために, モンスター名が /r/ を含むか否かについてカテゴリカル分布を構成し, “大きい”と“小さい”の間で  $\chi^2$  検定を実施したところ p 値は 0.00006 であった.

## 4 考察

Grad-CAM による分析により得られた結果から, 大きいモンスター名であることを特徴づける可能性を持つ重要なモーラは /r/ である可能性があると考えられる.

さらに様々な先行研究から, 濁音は大きい印象を与えることが報告されていることから, 本実験において /r/ と濁音の有無について前節で述べたように  $\chi^2$  検定を実施してみたところ, p 値は 0.00000 であった. この結果の p 値は, /r/ の有無同様非常に小さく, /r/ と濁音がどちらも含まれているという特徴が音象徴と関係する可能性が高いのかもしれない.

## 5 まとめ

本研究では, モンハンのモンスター名を音象徴事例と仮定し, “大きい”か“小さい”の 2 クラス分類の音象徴について調査した. また, Grad-CAM によって作成されたヒートマップから, 大きいモンスター名の判別に寄与したと思われる重要モーラ /r/ を音響的な特徴として獲得し, それに対して  $\chi^2$  検定を実施した. その結果, 大きいモンスター名をある程度判別できる可能性のあるモーラを発見することができた. しかしながら, そのモーラが実際に人に大きい印象を与えるか否かを調査することはできていない.

今後は, 重要モーラの解析を進めるとともに, /r/ の有無に対して, 存在しないモンスター名を作成し, 被験者実験を通して音象徴の検証を行う予定である. また, 本実験で十分に調査ができていない母音についても研究を進めたい.

## 参考文献

- [1] Ohala, John J., “The frequency code underlies the sound symbolic use of voice pitch”, Sound symbolism, 1994, 2, 325–347.
- [2] カブコン, “モンスターハンター”, 2004–2018 発売の作品
- [3] 熊谷他: “デジタル・モンスターやモンスターハンターにおけるモンスターの名前とファイナル・ファンタジーの呪文名における有性阻害音とモーラ数の音象徴”, 音声研究, Vol. 24, pp.63-70, 2020

## 連絡先

中部大学工学部情報工学科 EP20130 渡邊紫花  
E-mail: ep20130-1600@sti.chubu.ac.jp



# Grad-CAMを用いた“JoJoの奇妙な冒険”の音響的特徴の発見

○ 吉兼 利浩, 中村 剛士  
中部大学

## 1 はじめに

オノマトペは、動作や心情を表す語として活用される。オノマトペについては、音象徴を調査した多くの報告がある [1]。音象徴とは特定の音が特定のイメージを喚起する事象であるが、その全容は未だ明らかになっていない。我々の研究の最終目的は、音象徴の解明であり、多種多様な事例からこれらを明らかにしたいと考えている。

本研究では、“ジョジョの奇妙な冒険 [2]” (以降, JoJo) に登場するオノマトペを事例として調査・解析し、音象徴について検証することを目的とする。JoJo のオノマトペについては、一般の読者の間で、特異であると言われているため、音象徴が存在するのではないかと考える。

## 2 提案手法

音象徴事例として採用したオノマトペのデータセットを構築し、CNN を用いたクラス分類と XAI 技術の一つである Grad-CAM [4] を用いて、データセットの持つ音響的な特徴を発見する。データセットとしては、JoJo と銀魂 [3] の戦闘シーンに登場するオノマトペを採用し、2 クラス分類問題として扱う。各オノマトペを音響特徴量 MFCC に変換後、CNN に入力し、JoJo か銀魂のいずれのクラスかを判別する。

主観評価によって JoJo らしさの音象徴について検証する。Grad-CAM によって発見した音響的な特徴を JoJo らしさとして音象徴仮説を設定する。その仮説を用いた未知のオノマトペを実験協力者に提示して検証を行う。

## 3 分類実験

データセットは、各コミックの戦闘シーンから抽出しており、JoJo のオノマトペ 247 個、銀魂のオノマトペ 188 個から構成される。今回の実験では、このデータセットを用いて Leave-one-out 法によって分類クラスの予測実験を行った。

分類結果から、正解率と F1 値の算出を行った。また、正解したオノマトペの抽出を行い、それらについて Grad-CAM を使用し、分類根拠となる音響的な特徴を分析した。ここでは、正解オノマトペがもつ音響的な特徴について勾配の大きな箇所に注目し、勾配の大きな箇所がどのモーラに該当するのか調査した。

## 4 分類実験の結果と考察

混同行列を表 1 に示す。正解率は.661, F1 値は.708 であり、オノマトペの持つ音響的な特徴から JoJo と銀魂のオノマトペをある程度判別できていることが分かる。次

に、正解したオノマトペについて、Grad-CAM を使用し、勾配が大きかったモーラを調べ、各モーラが出現するオノマトペを数え上げた。一部ではあるが表 2 に、勾配の大きかったモーラとそれを含むオノマトペの数を示す。表 2 に示すように、JoJo と銀魂を比較すると、‘ぐ’と‘ぼ’のような有声阻害音や‘しゅ’のような拗音が JoJo では多く使用される傾向がある。この傾向から、有声阻害音・拗音が JoJo らしさに寄与しているのではないかという仮説を設定する。

表 1: 分類結果

予測 \ 真値	JoJo	銀魂
JoJo	179	68
銀魂	79	109

仮説より、拗音について、データセットから JoJo, 銀魂でそれぞれ使用されている回数を集計し、 $\chi^2$  検定を行った。結果として、‘ゅ’について、p 値が .0001 以下となり、この結果からも、拗音が JoJo らしさに寄与しているのではないかと考えられる。

表 2: 勾配の大きいモーラの出現回数

	JoJo	銀魂
ぼ(/ba/)	16	0
ぐ(/gu/)	14	0
お(/o/)	13	2
しゅ(/sju/)	10	0

## 5 主観評価実験

分類実験結果から設定した仮説について、アンケート調査を行い音象徴仮説の検証を行った。アンケートは、二つのオノマトペを提示し、どちらのオノマトペがより JoJo らしいと感じるか選択するという形で作成した。オノマトペについては、分類実験結果より得られた特徴(‘ぼ’, ‘ぐ’, ‘ど’, ‘お’, ‘ん’, ‘ゅ’)を含めて作成した JoJo らしいと考えるオノマトペと、特徴を含まないオノマトペを 1 組とし 28 組、さらに、選択肢の傾向が読み取られてしまわないようにダミーのオノマトペを 22 組作成した。アンケート調査の実験協力者が JoJo らしいと回答した比率を表 3 に示す。

## 連絡先

E-mail: ep19115-4542@sti.chubu.ac.jp

表 3: 仮説として設定した音響的な特徴を持つオノマトペを JoJo と回答した比率

	JoJo と回答した比率(%)
ば(/ba/)	65
ぐ(/gu/)	62
ど(/do/)	60
ゅ(/-ju/)	65

アンケート結果から、有性阻害音、拗音について、JoJo と回答した比率が 60%以上あり、分類実験結果と同様に、ある一定の特徴があるのではないかと考える。有性阻害音については、データセットの中でも登場回数が多く、バ行は銀魂と比較したとき、特に数が多いので、JoJo の特徴であると感じる人が多かったと考えられる。拗音については語尾で使用されていたり、連続で使用されているなど、拗音の使い方が特徴となっているのではないかと考える。

## 6 まとめ

本実験では、JoJo、銀魂の戦闘シーンに限定し、オノマトペの分類・調査・分析を行った。分類結果から、JoJo では有性阻害音や拗音といったモーラが使用される傾向があり、これが JoJo らしさに寄与している可能性があると考えられる。アンケート調査からも、有性阻害音や拗音が含まれるオノマトペについて、JoJo らしいと感じやすいという結果を得ることができた。

今回の実験では、JoJo について第一部のみでの実験であったので、今後は第 2 部以降も同様に調査を行いたい。また、本実験では、単音のみに着目したが、今回特徴が得られた、有性阻害音や拗音の前後の文字に着目することで新たな特徴が得られるのではないかと考える。

## 参考文献

- [1] 伊藤惇貴, “オノマトペの音象徴属性値の調整のための一手法”, 人工知能学会論文誌 Vol.30, No.1, pp.364 - 371, 2015.
- [2] 荒木飛呂彦, “ジョジョの奇妙な冒険”, Vol.1-5, 集英社, 1987-1988.
- [3] 空知英秋, “銀魂”, Vol.62-66, 集英社, 2016.
- [4] Selvaraju, R. R. et al., “Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization”, ICCV, pp.618-626, 2017.

# e-Paper 上の可変格子状マーカの撮影による 魚眼レンズ校正システムの構築

Construction of Fisheye Lens Calibration System  
by Photographing of Variable Lattice Markers on e-Paper

○<sup>1</sup> 福井 阜河, <sup>1</sup> 矢野 良和

○<sup>1</sup> Koga Fukui, <sup>1</sup> Yoshikazu Yano

<sup>1</sup> 愛知工業大学

<sup>1</sup> Aichi Institute of Technology

## 1 研究背景

近年、バスや自動車による輸送サービスに対する自動運転が実証実験の段階を迎え、普及に向けての準備が進められている。一方で、狭窄地や住宅地周辺などの非整備道路環境では障害物を十分に想定することが難しく、完全自動運転の早期適用が困難という課題がある。また完全自動運転においてトラブル時に緊急停止した際、後に復帰が必要となる。これらに対しては、人間の介在する遠隔運転操作が期待される。また遠隔操縦は、自動車の運転操作以外にも農業機械、建設機械などの大型作業用ロボットに対しても広く利用される。

遠隔にいる操作者へは移動体に搭載したカメラで撮影した周辺映像を提供する。画角の狭いカメラを複数取り付けて撮影映像を提供する方法では、操作者が実際の周辺状況を直感的に理解することが困難である。そのため、360 度視野をもつカメラユニットによる全周囲映像の撮影と VR 映像の提供が一般的に利用される。しかし、全方位が見渡せる車両ルーフ上に設置すると映像の下部に車体自身が映り、死角が生じる。死角により周辺の近距離領域が確認できず、安全な遠隔操作の実現を阻害する。

そこで我々は、視野角が 180 度程度の広角撮影できる魚眼レンズカメラを車体の前後左右に 1 台ずつ、計 4 台設置したシステムを提案している [1]。隣接する映像には、およそ 90 度の視野が重複する領域が存在する。これらを適切に合成することで天地前後左右を死角なく確認できる全周囲映像が生成できる。

## 2 研究目的

魚眼カメラによる撮影画像は半球状の魚眼レンズを通した光線が射影される。一般的には、画像上の像高 (射影点の光軸からの距離) を外界からレンズへの入射角と焦点距離によって記述した投影モデルとして表現される。一方で、VR 空間の表現に利用される全周囲画像は、天球の経度および緯度の座標系で構成される。そのため全周囲画像の経緯度に対応するように、魚眼カメラ画像に対して座標変換を適用する。

本研究では、システムの低コスト化のため安価な民生品の魚眼レンズを用いる。このようなレンズはその歪みにより投影モデルが不明確な製品が多く、製造上の個体差も大きい。そのため映像変換に際しては、これらカメラレンズ毎に固有の歪み特性を推定し校正する必要がある。

これに対して我々は、小型の特殊なマーカの撮影に

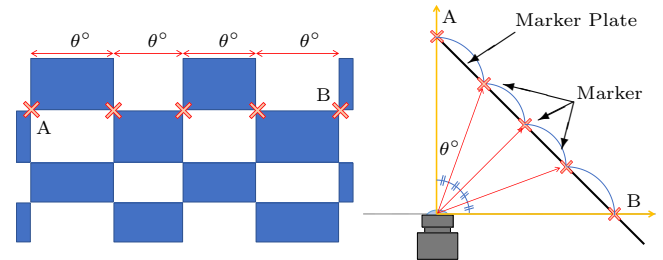


図 1: 等角度マーカ

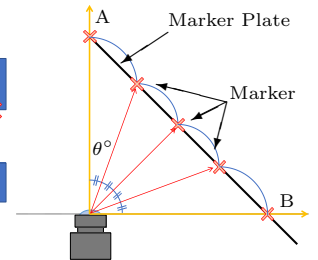


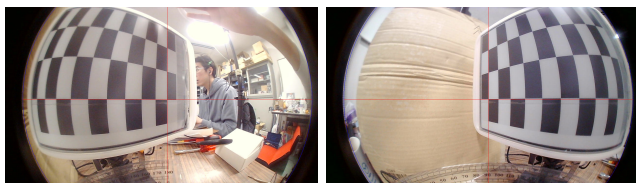
図 2: カメラとマーカの位置関係

より簡易な操作で魚眼カメラのレンズ特性を推定・校正できる手法を提案している [2]。提案する校正法により十分な精度での歪み補正を実現したが、実用面での課題が明確となった。そこで本稿では、実用性向上のためディスプレイデバイスを用いた可変マーカによる校正システムを提案する。

## 3 提案手法

魚眼カメラによる撮影画像では、外周が円形状になる被写体が結像し、それ以外の部分は受光せず黒領域になる。そのため、投影範囲の中心としてレンズの光軸が推定でき、視野限界への半径も定義できる。本研究では、レンズの歪み計測を小型かつ簡単に実現するため、レンズ中心からの同心円上では同じ歪み量として単一半径上での計測を行う。図 1 のような格子状のマーカパターンを撮影する。撮影時のカメラとマーカの俯瞰図を図 2 に示す。撮影時は図 1 中の点 A が撮影画像の光軸中心と一致し、かつ点 B が図 2 にて視野の周辺位置になるように調整する。カメラの視野角 0 から 90 度の等角度 ( $\theta$  度) ごとの位置にマーカ点が配置されるように間隔を調整してマーカを作成した。レンズが理想的な投影モデルであれば、撮影画像においてマーカ点が等間隔に投影される。実際の撮影画像における等間隔に対する誤差量を計測し、得られた離散的な角度間隔での誤差量から、多項式近似により任意角での誤差量を求める。この誤差量を補正し、再投影することで歪み補正を実現する。

一方で、印刷されたマーカの撮影では図 1 中の点 B の撮影画像上での投影位置が不明なため、カメラに対するマーカの提示位置設定が困難である。そこで、電子ペーパーディスプレイによる動的なマーカ提示とカメラの回転による計測システムを構築する。



(a) 0 度点の特定 (b) 90 度点の特定  
図 3: 拘束点 (0 度点・90 度点) の特定



(a) 撮影画像 (b) 補正後画像  
図 4: 動的マーカの撮影によるレンズ歪みの補正

カメラをサーボモータに取り付け、カメラを任意角度に回転できるようにする。最初にディスプレイとカメラ光軸が垂直になる位置を探す。その角度から  $-45$  度および  $+45$  度の位置になるよう回転させたとき、カメラの光軸中心が示す位置を図 1 のそれぞれ点 A および点 B とした。特定した点 A および点 B 間の計測範囲でマーカを提示し、レンズ歪みの計測・校正を行う。

#### 4 実験

提案手法の有用性を検証する。画角  $180$  度の安価な魚眼カメラとして GS-A15WDCM-1.5MM を用いた。撮影画像の解像度は  $1280 \times 720$  [px] である。レンズ歪みの補正を行っていない画像を図 4(a) に示す。撮像範囲の外周部境界の円を推定し、その円の中心を光軸点とした。

計測範囲の特定を行う。本実験では、図 3(a) に示すように撮影画像上の光軸点と一致するようにマーカの格子交点をディスプレイ上で移動させ、計測時の  $0$  度位置を特定する。図 3(b) に示すようにカメラを  $90$  度回転させた位置でも同様の特定作業を行い、計測時の  $90$  度位置を特定する。これにより  $90$  度区間が特定されたため、この範囲を  $9$  分割したマーカパターンを提示し、レンズ歪みを計測、補正する。

カメラの光軸からのマーカ交点の角度位置を計測し、それらが理想的な間隔になるよう調整を行う。図 5 の横軸は理想的な入射角度、縦軸は観測された入射角度であり、これらの対応関係を示している。図 5 上の点は観測された  $0 \sim 90$  度の各交点における対応関係を示している。これらの離散的な計測点から  $5$  次多項式を推定した。多項式近似により任意角での対応関係を求めた結果が図 5 の実線であり、これが歪み補正関数となる。

図 5 にて推定された歪み補正関数を用いて、図 4(a) を補正したものを図 4(b) に示す。補正後の各角度での角度誤差量を図 6 に示す。太実線で示すような大きな歪みを、細実線で示すような誤差まで補正することができた。

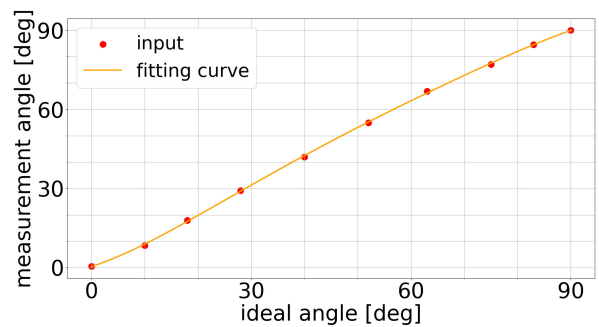


図 5: 推定した補正関数

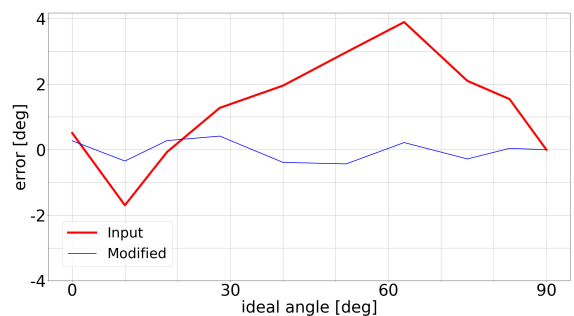


図 6: 補正前後の角度誤差量

#### 5 まとめ

小型で簡易なレンズ歪みの校正法について、ディスプレイ上で可変のマーカパターンを提示することで、計測時におけるマーカ提示位置の特定を半自動化したシステムを構築した。実験により有用性を確認し、実用面での問題の解決指針を示した。今後は、ディスプレイの表示情報と撮影画像間での推定計算によりカメラの傾きなど姿勢ズレを考慮したパターン提示を試みる。

#### 参考文献

- [1] 福井皐河, 矢野良和: 遠隔運転支援のための複数魚眼カメラによる全周囲映像システムの構築, 第 28 回画像センシングシンポジウム講演資料集, SO2-15, 2022
- [2] 福井皐河, 矢野良和: 等角度マーカによる魚眼レンズ校正法, 情報処理学会 第 84 回全国大会講演論文集, pp.147-148, 2022

#### 連絡先

愛知工業大学 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻  
E-mail: k.fukui@hmi.aitech.ac.jp

# FCR 法における矛盾度の定義についての一考察

京都西山短期大学  
愛知工業大学

山田 洋巳  
福澤 和久, 小田 哲久

## 1 はじめに

これまで山田ら[1][2]により, 消費者の選好を数値化する手法として, 精密な心理測定を志向した小田[3][4]の FCR 法で得られる矛盾度について, その利用方法などが考察, 提案されている.

## 2 研究目的

本研究では, 小田, 高萩[5]により, 新しく提案された複合スコア法 1 の新しい矛盾度指標と従来の矛盾度指標を比較し, 新しい矛盾度指標の定義について考察する.

## 3 研究方法

### 3. 1 FCR 法

FCR 法は, ファジィ理論を応用した評定尺度法である. FCR 法では, 評定尺度法の項目をそれぞれ独立尺度 (肯定尺度と否定尺度) として, 全尺度に回答させる (図 1).

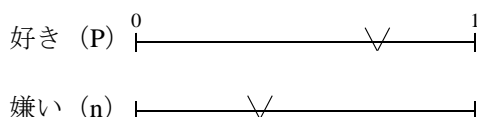


図 1 FCR 法による応答例

FCR 法で得られた複数応答を 1 つの代表的な数値に集約したものが, 統合値である.

統合値の算出アルゴリズムは, 単純スコア法, 逆スコア法, 複合スコア法 1, 複合スコア法 2, 複合スコア法 3, 複合スコア法 4, 複合スコア法 5 などがある[3][4]. また, 高萩[6]は, ファジィ測度を応用した統合値算出アルゴリズムを提案している. その他, 間淵[7]も独自の統合値算出アルゴリズムを提案している.

### 3. 2 FCR 法応答値の拡張ファジィ論理での扱い

FCR 法の 2 項目並列尺度 (図 1) で得られたデータの対  $(p, n)$  は, 2 次元の拡張ファジィ論理空間

(Hyper Logic Space: HLS) 上の 1 点  $(T, F)$  にプロットされる. ただし,  $(T, F) = (p, n)$  とする.

HLS は, 真理値  $T$  と偽値  $F$  の直積  $T \times F$  である. HLS を, 横軸を  $T$ , 縦軸を  $F$  とした 2 次元のデカルト座標で表すと, 右下がりの対角線  $F = T$  の左下は「無関心領域」あるいは「無関連領域」, 右上は「矛盾領域」と呼ぶ. [8]

### 3. 3 複合スコア法 1 の矛盾度指標

#### 3. 3. 1 従来の矛盾度指標

複合スコア法 1 による統合値  $I_4$  は, 次のように求める. ただし, 肯定応答値を  $p$ , 否定応答値を  $n$  とし,  $p, n \in [0, 1]$  である.

$$\text{統合値 } I_4 = \begin{cases} 0.5 & (p = n = 0) \\ \frac{p}{p+n} & (p = n = 1) \\ \frac{1-n}{2-p-n} & 0 < p+n \leq 1 \\ \frac{1-n}{2-p-n} & p+n > 1 \end{cases}$$

また, 定和からのずれの矛盾度  $C_3$  は,  $C_3 = p + n - 1$ .

となる. [3][4]

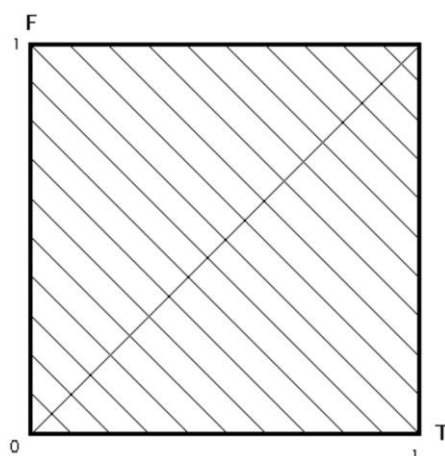


図 2 矛盾度  $C_3$  の等矛盾度線 ( $F = -T + C_3 + 1$ ) [5]

#### 3. 3. 2 新しい矛盾度指標

新しい矛盾度指標である矛盾度  $C_{new}$  は

$$C_{new} = \begin{cases} 0 & \text{if } p + n = 1 \\ \frac{1-n-p}{n-p-1} & \text{if } p \geq n \\ \frac{n+p-1}{1+n-p} & \text{if } p < n \end{cases}$$

となる．[5]

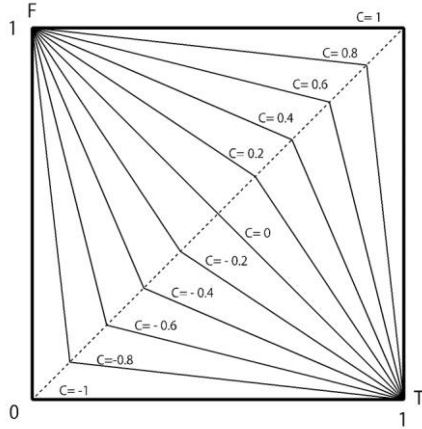


図3 矛盾度  $C_{new}$  の等矛盾度線[5]

#### 4 矛盾度の定義

矛盾度  $C_3$  は、矛盾－無関連（無関心）指標と定義されており、定和からのずれを使用している． $C_3 = -1$  の場合は完全な無関連（無関心）， $C_3 = 1$  の場合は、完全な矛盾， $C_3 = 0$  は無矛盾である．

矛盾度  $C_{new}$  は、 $n=1$ ， $p>0$  ならば、矛盾のある状態と考えることができ、図4のようになる．また、 $n=0$ ， $p<0$  ならば、 $C_{new} = -1$  となる．なお、 $C_{new} = 0$  は無矛盾である．

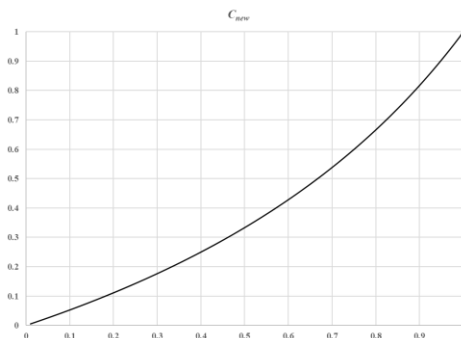


図4 矛盾度  $C_{new}$  の曲線 ( $n=1$ ， $p>0$ )

#### 5. まとめ

矛盾度  $C_3$  は、小田、高萩[5]が述べているように、「真と偽の和は1」という、定和条件からのずれの程度を矛盾度に使おうというもので、簡明である．しかし、矛盾度  $C_{new}$  は、矛盾度  $C_3$  のようには決まらない．山田ら[9]により、矛盾度  $C_{new}$  は、矛盾の要因の中で、大きい要因を際立たせる効果があることは確

認されているが、矛盾度  $C_{new}$  を、これまで推奨されてきた矛盾度  $C_3$  と同等の実践的価値をもつ、矛盾－無関連（無関心）指標とみなすには、今後も心理学的な実験や調査を積み重ねる必要がある．

#### 参考文献

- [1] 山田洋巳，宇佐美貴史，成瀬健一郎，小田哲久：“FCR 法の矛盾度のバラツキによる被験者のグループ化”，日本経営システム学会誌，Vol.34，No.3，pp.341-346，(2018)
- [2] 山田洋巳，宇佐美貴史，成瀬健一郎，小田哲久：“FCR 法矛盾度を利用したスクリーニングー 6 種類のお茶を題材とした一対比較で発生する矛盾のループの低減ー”，日本経営システム学会誌，Vol.35，No.3，pp.186-195，(2019)
- [3] 小田哲久：“ファジィ多項目評定法の特徴について”，日本経営システム学会誌，Vol.12，No.1，pp.23-32，(1995)
- [4] 小田哲久：“FCR 法の新アルゴリズム 提案と数値的分析による比較”，日本経営工学会論文誌，51(2)，pp.93-107，(2000)
- [5] 小田哲久，高萩栄一郎：“FCR 法矛盾度の新提案ーファジィ測度による FCR 法アルゴリズムを参考にしてー”，日本知能情報ファジィ学会・ソフトサイエンス研究部会 第 27 回ソフトサイエンス・ワークショップ，A1-1，(2017)
- [6] 高萩栄一郎：“さまざまな FCR 法の特徴と比較”，日本知能情報ファジィ学会，ノンエンジニアリングワークショップ講演論文集，pp.60-63，(1997)
- [7] 間瀬重昭：“不明、矛盾を含む複数観測の真理度算出法による 2 項目並列評価の統合”，大阪学院大学流通・経営科学論集，30，pp.3875-3893，(2004)
- [8] 小田哲久：“多次元多値論理体系の提案ーファジィ論理の多次元的拡張としての超論理空間モデルー”，日本経営工学会論文誌，Vol.49，No.3，pp.136-145，(1998)
- [9] 山田洋巳，福澤和久，小田哲久：“FCR 法のアルゴリズムの違いによる選好度への影響ーFCR 矛盾度に着目してー”，日本経営システム学会 第 69 回全国研究発表大会論文集，pp.76-79，(2022)



# TWINE に対するハミング重みを利用した故障利用解析の検討

○野崎 佑典<sup>1</sup>, 吉川 雅弥<sup>2</sup>

○Yusuke Nozaki<sup>1</sup>, Masaya Yoshikawa<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>名城大学

<sup>1,2</sup>Meijo University

**Abstract:** 現在, 小型の組込デバイスでも利用可能な軽量暗号が注目されている. 本研究で対象とする TWINE は代表的な軽量暗号の一つである. また, 暗号に対する解析として故障利用解析の脅威が報告されている. 安全性評価の観点では, 様々な解析手法に対する耐性 (耐タンパ性) を評価することが重要である. そこで本研究では, TWINE に対して新たにハミング重みに着目した故障利用解析を提案する. シミュレーション実験では, ランダムビットリセット故障モデルとランダムビットセット故障モデルにおいて, 30 個の暗号文を使用することで, ラウンド鍵を全て推定することに成功した.

## 1. はじめに

Internet of Things (IoT) の普及に伴い, 外部のネットワークへ接続されるデバイスが増加している. そのため, これらの繋がるデバイスでのセキュリティ確保は重要な課題である. セキュリティを確保する主要技術は暗号化であり, この暗号技術として軽量暗号が注目されている [1]. 軽量暗号は, 小回路規模・低消費電力・低遅延で利用できるため, リソースが限られる場合でも IoT デバイスで活用することができる.

一方で, 暗号に対する解析として故障利用解析の脅威が指摘されている [2]–[6]. 故障利用解析は, 暗号処理時に意図的に演算誤り (故障) を混入させることで, 内部の秘密鍵情報を不正に取得する解析である. そのため, 故障利用解析に対する安全性について検証することは非常に重要である.

本研究では, TWINE に対する故障利用解析として, 新たにハミング重みに着目した手法を提案する. そして, シミュレーション実験によって提案手法の有効性を検証する.

## 2. 準備

### 2.1 TWINE

TWINE [1]は, ブロック長が 64bit で 16 分割一般化 Feistel 構造を持つ軽量暗号である. 鍵長は 80bit か 128bit から選択が可能であり, 本研究では鍵長 80bit の TWINE を対象とする. TWINE の暗号アルゴリズムを Algorithm1 に示す.

鍵長が 80bit の TWINE は 36 回のラウンド処理で構成し, 各ラウンド処理は F 関数と拡散層 ( $p()$ ) による処理を行う. F 関数では, S-BOX による置換処理 ( $S()$ ) とラウンド鍵  $RK$  との排他的論理和演算を行う. また, 最後のラウンドである 36 ラウンド目では, 拡散層を除いた処理を行うことで, 平文  $PT$  から暗号文  $CT$  を生成する.

### 2.2 故障利用解析

故障利用解析は, 暗号処理時に演算誤りを混入させて解析を行う. 故障の混入方法には, レーザー照射や異常電圧の供給, 不正クロックの挿入, 電磁波の注入などの方法が知られている. これらによって,

### Algorithm1: Encryption of TWINE

```
Function TWINEenc ( $PT, RK, CT$ )
 $X_0^1 \parallel \dots \parallel X_{15}^1 \leftarrow PT$ 
 $RK^1 \parallel \dots \parallel RK^{36} \leftarrow RK$ 
for  $i \leftarrow 1$  to 35 do begin
     $RK_0^i \parallel \dots \parallel RK_7^i \leftarrow RK^i$ 
    for  $j \leftarrow 0$  to 7 do
         $X_{2j+1}^i \leftarrow S(X_{2j}^i \oplus RK_j^i) \oplus X_{2j+1}^i$ 
    for  $k \leftarrow 0$  to 15 do
         $X_{p(k)}^{i+1} \leftarrow X_k^i$  //  $p()$ : diffusion layer
    end
    for  $j \leftarrow 0$  to 7 do
         $X_{2j+1}^{36} \leftarrow S(X_{2j}^{36} \oplus RK_j^{36}) \oplus X_{2j+1}^{36}$ 
     $CT \leftarrow X_0^{36} \parallel \dots \parallel X_{15}^{36}$ 
```

演算誤り (故障) を混入させ, 故障入り暗号文を取得する. 解析では, 故障入り暗号文のみを使用して解析する手法 (Statistical Fault Analysis : SFA [2]) と, 故障が混入していない正規の暗号文とのペアを用いて解析する手法がある.

本研究で対象とする TWINE に対しては, 暗号文ペアを用いた解析手法がいくつか提案されている. 具体的には, 差分故障解析 (Differential Fault Analysis : DFA [3][4]) やラウンド加算 DFA [5], 暗号文ペア間のハミング距離に着目した解析手法 [6]などが報告されている. 一方で, TWINE に対する SFA に関する研究は見当たらない.

## 3. 提案手法

本研究では, TWINE に対する SFA を提案する. SFA では, 故障を混入させることで暗号中間値の均一性が損なわれることに着目して解析を行う. 具体的には, 故障混入時の複数の暗号中間値の平均ハミング重みを利用し, これらの値が期待値よりも小さくなるか大きくなるかに着目する.

提案手法の概要を図1に示す. 図1に示すように, TWINE の 36R 目のある暗号中間値 (図1の例では  $X_1^{36}$ ) に着目し, この値を計算する. この暗号中間値は未知であるため, 計算には既知の暗号文  $C$  と  $RK^{36}$

の候補鍵を用いる。ここで、 $RK^{36}$ は4bitであるため、 $2^4=16$ 通りの計算で全て計算できる。そして、計算した暗号中間値において故障によって均一性が低下しているかを確認する。このとき、真の候補鍵で暗号中間値を算出した場合、故障による均一性の低下がみられるが、間違った候補鍵の場合はこのような均一性の低下はみられない。したがって、この均一性の偏りが現れる候補鍵を真の鍵値として推定する。

本研究では、表1に示すようにいくつかの故障モデルを提案する。ここで、ランダムビットフリップモデルは、各bitでランダムに値を反転させるモデルであり、ランダムビットリセットモデルは、各bitでランダムに値を0にするモデルである。また、ランダムビットセットモデルは、各bitでランダムに値を1にするモデルである。

#### 4. 評価実験

シミュレーションによる実験を行った。実験では各故障モデルで100個の故障入り暗号文を生成した。故障の生成確率は各bitで50%とし、解析は100回行い、その平均を正解鍵数として算出した。実験結果を図2に示す。図2の横軸は解析に使用した故障入り暗号文の数を、縦軸は正解鍵数を示している。解析はTWINEの36Rのラウンド鍵を対象としているため、最大で32bitとなる。実験結果より、ランダムビットリセット故障モデルとランダムビットセット故障モデルにおいて、30個の故障入り暗号文を使用することで全てのラウンド鍵の推定に成功していることが確認できる。一方で、ランダムビットフリップ

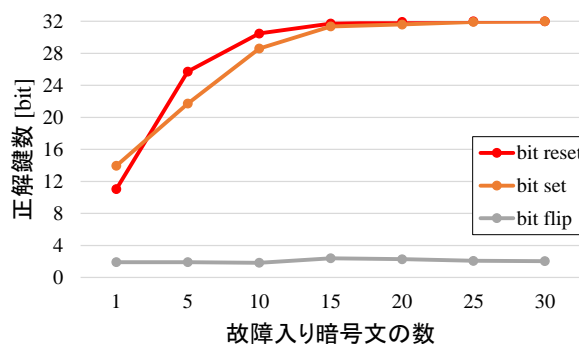


図2 実験結果

ップ故障モデルでは、ほとんどラウンド鍵を推定できていないことが確認できる。これは、ランダムビットフリップ故障モデルでは、解析に必要とする故障混入時の暗号中間値の均一性があまり低下していないことが原因として考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、TWINEに対してハミング重みに着目したフォールト解析を提案した。本研究では3つの故障モデルを導入し解析した結果、TWINEにおいてランダムビットリセット故障モデルとランダムビットセット故障モデルにおいて、ハミング重みに着目することで、故障入り暗号文のみでラウンド鍵を解析可能であることを明らかにした。

今後は、検算対策回路などを含めたフォールト解析対策手法の適用について検討する予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Suzuki, K. Minematsu, S. Morioka, and E. Kobayashi, "TWINE: A lightweight, versatile block-cipher," Proc. of LC11, pp. 146–149, Nov. 2011.
- [2] T. Fuhr, E. Jaulmes, V. Lomné, and A. Thillard, "Fault Attacks on AES with Faulty Ciphertexts Only," Proc. of FDTC 2013, pp. 108–118, Aug. 2013.
- [3] W. Li, W. Zhang, D. Gu, Z. Tao, Z. Zhou, Y. Liu, and Z. Liu, "Security Analysis of the Lightweight Cryptosystem TWINE in the Internet of Things," KSII Trans. on Internet and Information Systems, vol. 9, no. 2, pp. 793–810, 2015.
- [4] H. Luo, Y. Wu, and W. Chen, "Differential Fault Attack on TWINE Block Cipher with Nibble," Proc. of IEEE ICCT 2020, pp. 1151–1155, Oct. 2020.
- [5] H. Yoshikawa, M. Kaminaga, A. Shikoda, and T. Suzuki, "Round Addition DFA on 80-bit Piccolo and TWINE," IEICE Trans. on Information and Systems, vol. E96.D, no. 9, pp. 2031–2035, 2013.
- [6] Y. Nozaki, K. Asahi, and M. Yoshikawa, "Statistical Fault Analysis for a Lightweight Block Cipher TWINE," Proc. of IEEE GCCE 2015, pp. 497–498, Oct. 2015.

#### 連絡先

野崎佑典

E-mail: 143430019@ccalumni.meijo-u.ac.jp

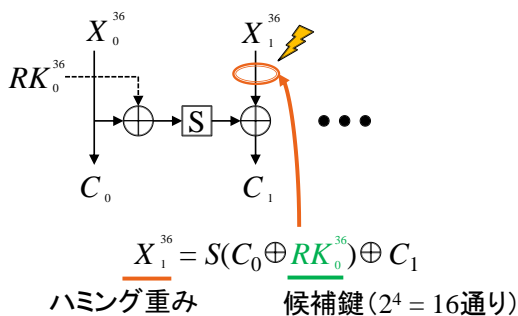


図1 提案手法の概要

表1 提案手法での故障モデル

故障モデル	内容
ランダムビットフリップ	各 bit でランダムに値を反転させる
ランダムビットリセット	各 bit でランダムに値を '0' にする
ランダムビットセット	各 bit でランダムに値を '1' にする