

三ホウ



キセキ

- ・本書に記載されているクリエイターの所属、および成果報告書の内容は、未踏IT人材発掘・育成事業終了時のものです。
- ・本書に記載されている会社名、製品名、およびサービス名は、それぞれ各社の商標または登録商標です。本文中では、™または®マークは明記しておりません。

まえがき

「未踏」という言葉は「前人未踏の荒野」という使い方がされるように、いまだ踏み入れられていないことを表す、やや抽象的な意味の普通名詞である。この言葉が、ITとその関連分野に関心のある方々にとっては、IPAが主宰している「未踏事業」を指す固有名詞になりつつある。ただし、まだ国語辞典に載るほど世の中に浸透しているわけではない。

千年に1回しかない千年紀（Millennium）である西暦2000年に、当時の小渕恵三首相が掲げた「ミレニアム・プロジェクト」の1つとして始まって、四半世紀を超えたいまでも続いているのが未踏事業である。固有名詞になりそうなくらい継続的な予算措置がなされているミレニアム・プロジェクトは未踏事業だけだと言われているが、どうも正しいようだ。

「百年の計は人を植うるにあり」という故事成語（管子の一節に由来）がある。遠い将来まで計画を立てるなら人材を育てることに尽きるという意味である。未踏事業はこれを見事に具現している。この四半世紀を振り返ると、山ありというより、むしろ谷ありの歴史だったが、その谷を乗り越えて、いまや大きな山になろうとしている。その山、すなわち未踏事業にたくさんの優秀な人材が集うようになった。未踏峰に登るのはもちろん未踏人材の仕事だが、登るべきこういう大きな山を育てるのは未踏事業の仕事である。実際、ここ10年以内に未踏IT人材発掘・育成事業（以下「未踏IT」と記す）に加えて、未踏アドバンスト事業、未踏ターゲット事業という山が加わって、未踏事業は多峰性の山脈のような偉容を備えてきた。そして、山から山へ尾根を通過して制覇する人たちも出てきている。

未踏ITの成果を（単年度ではあるが）まとめて、本棚で自立しそうな分厚い1冊にしたのが本書である。未踏事業が始まって四半世紀経ったことで、その歩みをより強く世の中に訴えるために毎年度作成することになったものである。いま手にされている本は、未踏事業のうち、25歳未満の若い人たちを対象とした未踏ITの2024年度の成果報告をまとめたものである。

本書の内容は、ちょっと残念かもしれないが、IPAのWebページに掲載されているものと同じである。しかし、書物という物理的な形にすることにはそれなりの意義がある。なにしろ一覧性がよく、記憶に残りやすく、マニア心をくすぐる。同じ形でPDF出版もされるが、内容の重みに紙の重みが加わる相乗効果は必ずある。大事にしていきたい。一方、PDF出版は、電子ブックとして読みやすいのが売りである。

本書は『ミトウのキセキ』という、ちょっとキャッチーなタイトルになっている。これには2つの意図がある。1つは、固有名詞化しつつある「未踏」をあえてカタカナすることで、固有名詞化をさらに加速したいということ（未倒の未踏というシャレもあり?）。そしてもう1つ、「キセキ」が「軌跡」と「奇跡」を掛詞にしていることである。

この中で紹介されている成果は未踏ITの採択者（クリエイターと呼ぶ）自身によって記述されている。読みやすいかどうかは、書き手やテーマによるかもしれない。しかし、これらは確実にクリエイターたちの内側から溢れ出てきたものである。未踏人材がすごいと思うのは、未踏事業の期間（未踏ITの場合は約9ヵ月間）に著しい成長をすることに加えて、未踏事業を修了したあと、その経験をバネにしてさらなる成長を続ける能力を身に付けてしまうことである。だから、ここに記載されているのは、クリエイターたちの未踏IT期間中の成長の記録だと思っていただきたい。これは、クリエイターたちの過去の記録、つまり「残した足跡」というか「軌跡」なのである。これをお読みになっているときには、クリエイターたちが（ひょっとしてまったく異なるテーマに挑戦したりして）もっと先へ進んでいると想像していただけるとありがたい。未踏ITが短期的な成果を産むためというより、人を育てることを第一義としているからである。

さらに、本書の中に、若い人たちが起こした「奇跡」を感じ取っていただければ、望外の喜びである。

未踏IT人材発掘・育成事業
統括プロジェクトマネージャー
竹内 郁雄（たけうち いくお）

What is MITOU?

2000年に「未踏事業」が始まってから25年。

2024年度もまた、新たな才能が世界に羽ばたいていきました。

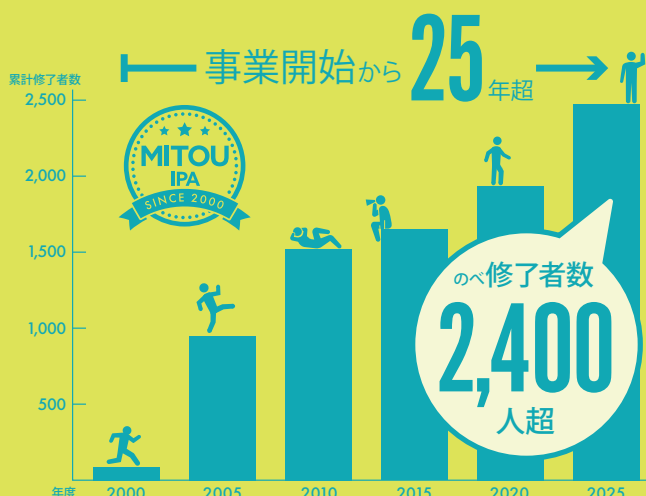
夢をカタチにし続けてきた未踏事業についてご紹介します。



What is MITOU?

突出した人材を発掘・育成する 国家プロジェクト

未踏事業は独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) が実施する、突出したIT人材の発掘・育成プログラムです。ITを駆使してイノベーションを創出することのできる独創的なアイデアと技術を有するとともに、これらを活用する優れた能力を持つ、突出した人材を発掘・育成することを目的としています。2000年度の開始以来、延べ2,400人を超える優れた人材を輩出し、未踏修了生たちは様々な分野で活躍しています。



目的・対象が違う3つの未踏事業

未踏事業は3種類。それぞれ目的や対象が異なります。

「未踏IT人材発掘・育成事業」は独創的なアイデアと優れた技術を持つ25歳未満の若いIT人材を発掘・育成します。

「未踏アドバンスト事業」は、ITを活用した革新的なアイデア等を有し、ビジネスや社会課題の解決につながる人材を育成します。

「未踏ターゲット事業」は、次世代ITを活用して世の中を抜本的に変えていける先進分野の人材を育成します。

アイデア、技術を持つ25歳未満の方



未踏IT人材発掘・育成事業



ビジネスや社会課題の解決につなげたい方



未踏アドバンスト事業

年齢制限なし

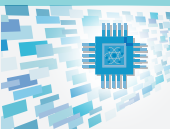


次世代IT (量子コンピューティング・リザーコンピューティング) を活用したい方



未踏ターゲット事業

年齢制限なし



プロジェクトマネージャーが 伴走支援

才能の発掘と育成には、プロジェクトマネージャー (PM) が大きな役割を果たします。個性あふれるPMが採択から育成までを担当し、埋もれてしまいがちな突出した人材の才能を伸ばすサポートを行います。

未踏統括プロジェクトマネージャー



たけうち いくお
竹内 郁雄

東京大学名誉教授



なつの たけし
夏野 剛

近畿大学 特別招聘教授
情報学研究所長

未踏IT人材発掘・育成事業 プロジェクトマネージャー



いがらし ゆき
五十嵐 悠紀 (～2025年度)

お茶の水女子大学 理学部
情報科学科 准教授 / 東京
大学 先端科学技術研究セ
ンター 准教授



いなり まさひこ
稲見 昌彦

東京大学 総長特任補佐
先端科学技術研究センター
副所長・教授



おか みずき
岡 瑞起

千葉工業大学
デザイン&サイエンス研究科
研究科長・教授



おちあい よういち
落合 陽一

メディアアーティスト /
筑波大学 デジタルネイチャー
開発研究センター センター長



そがわ けいすけ
曾川 景介

newmo株式会社 CTO



たけさき よしのり
竹迫 良範

神山まるごと高等専門学校
デザイン・エンジニアリング
学科 教授



たなか くにひろ
田中 邦裕

さくらインターネット株式会社
代表取締役社長



よねざわ ともこ
米澤 朋子 (2026年度～)

関西大学 総合情報学部
教授

推進費用を支援

活動実績に応じてプロジェクト推進費用を支援します。1プロジェクトあたりの費用は、プロジェクトに必要な作業時間と時間単価によって決まります。

未踏IT人材発掘・育成事業

最大 **302.4** 万円

未踏アドバンスト事業

最大 **1,600** 万円

未踏ターゲット事業

最大 **396** 万円

※2026年度

What is MITOU?

知的財産権は採択者に帰属

日本版バイ・ドール制度に基づき、開発した成果物の知的財産権は採択者に帰属します。育成期間終了後は知的財産権を基にビジネス活動を行うことができます。

日本版バイ・ドール制度

制度が生まれた背景と制度の詳細については、経済産業省のWebサイトに掲載されています。

「日本版バイ・ドール制度（産業技術力強化法第17条）」

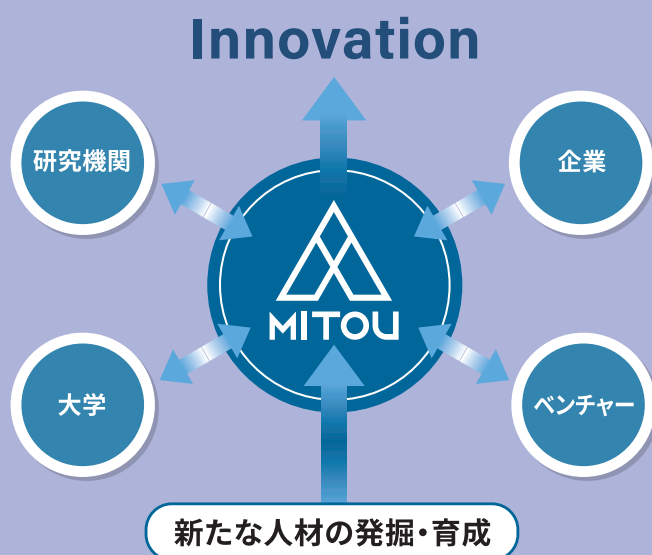
https://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/innovation_policy/bayh_dole_act.html

イノベーションを生みだす源

未踏修了生たちの進路は大きく3つに分けられます。自分のアイデアを社会実装するために起業する人たち、企業の中でITのコア人材として活躍する人たち、研究を続けるために大学や研究機関のアカデミアに進む人たちです。

各方面で修了生たちは活躍し、イノベーションを生み出しています。躍進するスタートアップ企業の創設者や、分野をリードする研究者となった修了生も珍しくありません。

未踏修了生たちは修了後もつながりを持ち、企業を超えて協業したり、共に事業を起こしたりする例も多数あり、「未踏エコシステム」を形成しています。



のほり たいやう

登 大遊 さん (2003年度)

ソフトイーサ株式会社 代表取締役 / IPA 産業サイバーセキュリティセンターサイバー技術研究室長 / NTT東日本特殊局 特殊局員 / 筑波大学 客員教授



なかむら ひろみ

中村 裕美 さん (2010年度)

東京都市大学 メディア情報学部 情報システム学科 准教授



ほんだ たつや

本多 達也 さん (2014年度)

富士通株式会社 Antennaプロジェクトリーダー

電気味覚による食の拡張という未踏領域に挑戦。2023年にはイグノーベル賞を受賞、世界からも注目。

未踏での経験をもとに、大手メーカーで製品化。ろう者に振動と光で「音」を届ける。

未踏コミュニティとのつながり

未踏への採択は、各界で活躍する未踏修了生の集まりである「未踏コミュニティ」への参加を意味します。

未踏事業の育成期間中に開かれる全体会議やPM合同ミーティングには、未踏修了生や関係者が多数参加します。最先端で活躍する修了生たちから鋭い指摘を直接受けたり、親身に相談に乗ってもらいながら採択者たちは大きく成長し、未踏コミュニティの一員としてふさわしい能力を身に付けていくのです。



INFORMATION

未踏関連情報をWebサイトやSNSで発信

未踏事業Webサイト

事業概要や公募情報、修了生インタビューやイベント情報、動画リストなど、未踏事業に関する情報を掲載しています。



YouTube IPA Channel

プロジェクトマネージャーからのメッセージや「成果報告会」「未踏会議」の動画をご覧いただけます。



Facebook (ipa.mitou)

FacebookのIPA未踏アカウントでは、公募開始やイベント開催など、未踏事業に関する最新情報を発信しています。



EVENT

未踏の才能に触れられるイベント



成果報告会
(2月頃)

採択期間の開発成果をクリエイターがプレゼンする公開イベント。ライブ配信のほか会場参加も可。



未踏会議
(3月上旬頃)

未踏関係者が一同に揃う「未踏のお祭り」。対談ステージや修了生のプロダクトを体験できる。

2024年度 未踏IT人材発掘・育成事業

2024年度「未踏IT人材発掘・育成事業」には**175件**の応募があり、**21件(35人)**が採択されました。

公募期間：2023年11月10日～2024年3月14日

人材育成／開発期間：2024年6月24日～2025年3月7日

人材育成／開発期間スケジュール

採択者（クリエイター）がそれぞれのペースで自分のプロジェクトの開発を進めていく期間です。その間、PMはメールでのアドバイスやミーティングを重ねながら伴走支援します。育成期間の節目には同期のクリエイターや修了生が集まる会議を開催。自らのプロジェクトを発表する場を目標に、プロジェクトを進めていきました。

●合同ミーティング

PMの枠を超えた合同ミーティングを実施。普段は接することが少ない他のPMの同期と出会い、刺激を受ける機会。

●全体会議

・ブースト会議（2024年7月6日、7日）

クリエイターやPM、修了生が揃う採択後最初のイベント。自分のアイデアを大勢の前で発表し、フィードバックを受けることでプロジェクトの進む方向を決定していく。

・八合目会議（2024年11月2日、3日）

再びクリエイターやPM、修了生が集合。ブースト会議以降進めてきた開発の現状を報告し、再びフィードバックを受ける。残り3ヶ月どのようにプロジェクトと向き合うか決めていく。

・成果報告会 MITOU DEMODAY（2025年2月15日、16日）

育成期間中に取り組んできた成果を発表する晴れの場。一般に公開される。

未踏での経験を糧として、育成期間を終えたクリエイターはそれぞれの道へと進んでいきます。









目次

まえがき	iii
What is MITOU?	v
目次	xiv
五十嵐 悠紀PM 担当プロジェクト	1
スムーズな多言語交流を実現するためのARによる会話支援システム	2
機械学習を用いた語源的英単語分割手法の開発	7
人工遺伝子回路設計のための統合開発環境	14
稲見 昌彦PM 担当プロジェクト	21
家族の腸内環境を改善する排便分析デバイス	22
ユーザとモノのネットワーク体験を創作するためのAR システム	27
バーチャル空間における飛翔体験の構築	35
岡 瑞起PM 担当プロジェクト	43
自分自身と気を交わすためのMRによる剣道稽古システムの開発	44
認知症当事者の意思決定支援のためのエージェントシステムの開発	51
ニューラル言語モデルによる個人最適な日本語入力システムの開発	58
落合 陽一PM 担当プロジェクト	65
機械学習に基づく中山間地域向け農業用散布ドローン群	66
粘菌ファブリケーションのための粘菌の自動培養システム	73
量産可能な4D ファブリケーションテキスタイルの開発	78
曾川 景介PM 担当プロジェクト	85
型安全でクロスプラットフォームな次世代ML ライブラリの開発	86
Capability-Based Microkernel によるセキュアなユーザレベルメモリ管理システム	92

ソースコードとGUIで編集可能なシナリオテスト作成ツールの開発	98
竹迫 良範PM 担当プロジェクト	103
ジェネラティブVJソフトウェアの開発を容易にするシステム	104
ゼロトラストネットワークアクセスの導入を容易にするクラウド型プロキシの開発 ...	111
トラックボール型3Dマウスの開発	118
田中 邦裕PM 担当プロジェクト	125
ゼロデイ攻撃の対象となるIoT機器を早期特定するシステムの開発	126
スマートフォンを活用して理想のデジタルペットを作成するためのプラットフォーム ...	131
RISC-Vの拡張を仮想化できるハイパーバイザの開発	137

Column クリエータの生の声

最大の魅力は「人」	42
とことん突き詰め考え抜ける場、未踏	64
修了後にも続く「つながり」	84

※本書には印刷版（本文2色刷）、電子書籍版（本文カラー）の2種類があります。印刷版では図版の一部が見つらい場合があります。電子書籍版ではカラー版の図版を拡大してご覧いただけますので、併せてご利用ください。

—— プレゼン動画をYouTubeで公開中 ——

未踏採択期間の最終イベント「成果報告会」で行った、各プロジェクトのプレゼンテーション動画をYouTubeで公開しています。文章だけでは伝えきれない、クリエイタたちの熱い思いを知ることができます。本書と併せてぜひご覧ください。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業 成果報告会

https://youtube.com/playlist?list=PLi57U_f9scILwMvoh4Xj3JNnzRT-8-am9



五十嵐 悠紀 PM 担当プロジェクト



五十嵐 悠紀 (いがらし ゆき)

お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 准教授／
東京大学 先端科学技術センター 准教授

■プロフィール

2010年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。日本学術振興会特別研究員DC2、PD、RPDを経て2015年より明治大学総合数理学部 先端メディアサイエンス学科 専任講師、2018年より同准教授。2022年より現職。IPA未踏IT人材発掘・育成事業プロジェクトマネージャー兼任（2016年度～2025年度）。インタラクティブコンピューターグラフィックス、ユーザーインターフェイスに関する研究に従事。

著書に「縫うコンピューターグラフィックス」（オーム社）、「スマホに振り回される子 スマホを使いこなす子」（ジヤース教育新社）他。情報処理学会学会誌編集長（2022年～2026年）。日本ソフトウェア科学会理事。

五十嵐は未踏IT人材発掘・育成事業（以降、未踏事業）に2016年度からPMとして就任した。プロジェクト採択においては、「世の中の常識を変えることができるような提案」、「まだ世の中にない技術や仕組みの提案」、「熱意のある提案」、「広く使われる技術の提案」などを重視した。

書類審査では「特に世の中の常識を変えることができるような提案」を重視し、二次審査の際には、未踏プロジェクト期間で具体的にどこまで開発可能か、実現可能かといった点も考慮した。夢物語であり、具体的な方針が一切立っていないものはプロジェクト期間中に開発を進めるのは難しいと判断した。逆に粗削りでも良いのでプロトタイプや実現に向けての課題抽出ができているものは評価した。さらに、本事業で成長をさせることができる人材ということにも意識した。

未踏事業全体としては、自身が受け持つプロジェクトはもちろんのこと、合同ミーティング等を月1回ペースで開催して、未踏事業に採択された全体のプロジェクトに対して、HCIの研究者としての視点に加えて、女性視点、子を持つ母親視点など、多様な観点からのアドバイスや方向性の提案を積極的にすることを意識した。ダイバーシティの重要性は世の中でも訴えられており、未踏クリエイタにとっても未踏事業での開発期間はPMやOB・OGからの様々な観点からのアドバイスをもとに、自身の方向性を模索していく期間でもあるため、多様な立場のPMから、様々な角度のアドバイスや方向性をクリエイタに与えることで未踏事業全体に貢献できると考えている。

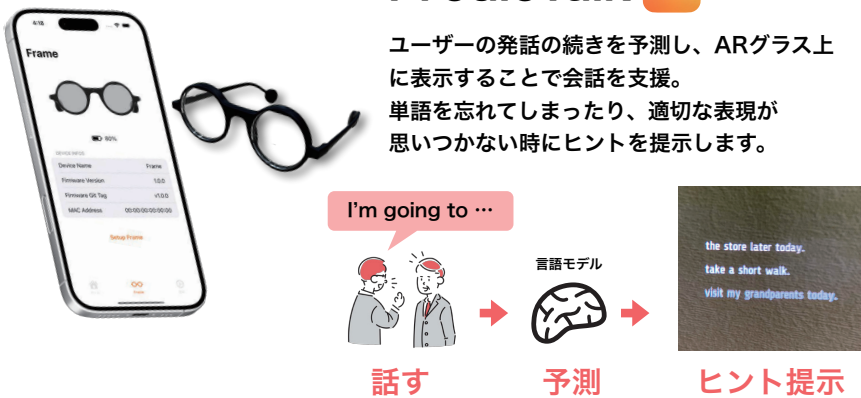
2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

青原光 伊藤朝陽（名古屋工業大学）

スムーズな多言語交流を実現するためのARによる会話支援システム
— PredicTalk：誰もが外国語を話せる世界へ —



ユーザーの発話の続きを予測し、ARグラス上に表示することで会話を支援。
単語を忘れてしまったり、適切な表現が
思いつかない時にヒントを提示します。



話す 予測 ヒント提示

スムーズな多言語交流を実現するためのARによる会話支援システム

青原 光（名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻 メディア情報プログラム）

伊藤 朝陽（名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻 ネットワークプログラム）

1 背景

異なる言語を話す人々が円滑にコミュニケーションを取るためのツールとして、これまでに多くの翻訳アプリケーションが開発されてきた。これらのアプリケーションは、ユーザーの発話をリアルタイムで翻訳し、画面に表示したり音声として出力することで、外国語を話す必要がなくなるようにして、言語の壁を越えた意思疎通を可能にしている。

しかし、既存の翻訳アプリケーションにはいくつかの課題がある。第一に、ユーザーの発話

2

を代替する形で機能するため、ユーザー自身が話す機会を奪ってしまう。第二に、翻訳した文章を見るために画面を注視する必要があり、会話相手とのアイコンタクトが減ることで、自然なコミュニケーションが阻害される。

実際に我々は、短期留学や海外旅行を通じて、こうした課題を実感した。例えば、フランス留学において、現地の学生と英語で交流をした際に、会話の途中で単語や適切な表現が思い浮かばず詰まってしまうことがあり、そのたびに翻訳アプリケーションに頼らざるを得なかった。翻訳アプリケーションは正確に訳してくれるため助かったが、一度アプリケーションを使い始めると、会話が終了するまで使うのをやめるタイミングがなく、気づけば会話のほとんどが画面越しのやりとりになってしまっていた。結果として、相手と目を合わせる機会が減り、会話の自然な流れが失われるという問題を感じた。

2 目的

本プロジェクトでは、既存の翻訳アプリケーションが抱える課題を解決するため、ユーザーの発話を支援しながらも、自然な会話の流れを維持できるシステムの開発を目指す。本システムでは、ユーザーが会話の途中で適切な単語や表現が思い浮かばず詰まってしまった際に、次の発話の候補を言語モデルがリアルタイムで予測し、ARグラスの視界内に候補を表示する。これにより、ユーザーは会話相手の顔を見ながらスムーズに会話を継続でき、翻訳アプリケーションに依存することなく、自らの言葉で話すことが可能となる。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、Brilliant Labs製のARグラスであるFrameを活用して上記の目的を果たす、iOSアプリケーション「PredicTalk」を開発した。PredicTalkは音声認識、次文予測、データ管理などの機能を持ち、FrameとBluetoothで接続することでリアルタイムの音声データのやり取りを行う。次文予測にはOpenAIのAPIを使用し、ユーザーの発話を解析した上で、次に話すべき文章の候補を予測する仕組みを採用している。

本システムの構成は、iOSアプリケーションとFrameのデバイスドライバーの大きく2つの要素に分かれる。

iOSアプリケーションは、ユーザーインターフェイスの設計にも工夫を凝らしており、直感的に操作できるデザインを採用している。

図1に示すホームタブでは、システムが音声認識したユーザーの会話のテキストと、そのテキストの続きを予測した3つの次文予測候補を表示することで、ユーザーに対してシステムの状態をフィードバックしている。

図2に示すFrameタブは、アプリケーションと接続したFrameの情報を表示し、ユーザーへ伝えるための画面である。この画面ではFrameのバッテリー残量、デバイス名、ファームウェアのバージョン、ファームウェアのGit Tag（ファームウェア管理用の番号）、MACアドレスを表示し、また下部にあるボタンを押すことで後述するデバイスドライバーをアプリケーションからFrameへ送信することができる。

図3に示す設定タブは本システムの設定を変更するための画面であり、会話に詰まってから新しい予測を提示するまでの時間と、よりユーザーに最適化された予測を実現するために予測モデルへ入力するユーザー情報を編集することができる。

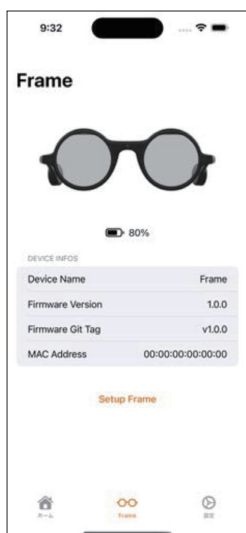


図1：ホームタブ



図2：Frameタブ



図3：設定タブ

FrameのデバイスドライバーはLua言語で記述されており、Frameの各状態での画面表示やユーザーからの様々な入力処理する機能、スマートフォンとのBluetooth通信機能などを担っている。Frameに表示された情報が実際にどのように見えるかを示した画像を図4～6に示している。

ユーザーはFrame起動後（図4）、Frame側面をタップすることでFrameのマイクを起動して録音を開始することができる（図5）。録音された音声はスマートフォン側でリアルタイムに送信・認識され、OpenAIのAPIを用いて次に話す内容が推定される。スマートフォンから受信した予測候補はFrameのディスプレイへ表示され、ユーザーは次に何を言えば良いのかのヒントを得ることができる（図6）。この状態でFrame側面をタップすると、予測候補を切り替えることもできる。こうした構成により、ユーザーが会話中に詰まったときに迅速に次の文章候補を参照でき、自然なコミュニケーションを継続することが可能となっている。

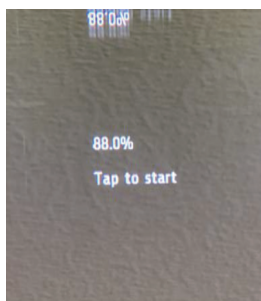


図4：起動直後の状態

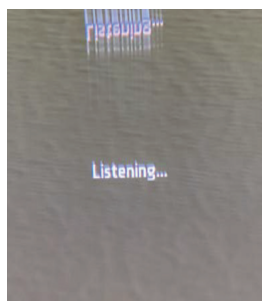


図5：ユーザーの発話を待っている状態

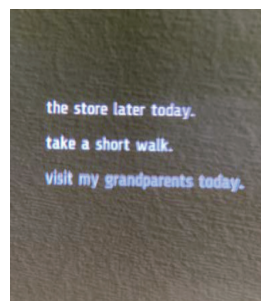


図6：予測したユーザーの発話の続きを表示した状態

4 従来の技術（または機能）との相違

従来の翻訳アプリケーションは、言語の壁を越えてスムーズな意思疎通を可能にする点で優れているが、一方で「ユーザー自身が英語を話す機会を奪う」という課題がある。翻訳機能が主体となることで、ユーザーは言語を学ぶ意欲を失い、相手との会話も「翻訳された情報のやり取り」に留まる可能性がある。また、翻訳の精度や文脈理解の限界により、不自然な会話になってしまうこともある。

本システムは、翻訳アプリケーションとは異なり、ユーザーが「自分で英語を話すこと」を前提にしている。ARグラスに提示されるのは、翻訳された文章ではなく、ユーザー自身が話すためのヒントである。そのため、会話の主体は常にユーザーにあり、翻訳システムのように「機械が会話を代行する」形にはならない。この点で、本システムは単なる翻訳ツールではなく、「会話のスムーズな進行を支援するツール」としての役割を果たす。

5 期待される効果

本システムは、ユーザーが自ら発話することをサポートするものである。これにより、ユーザーは会話の主導権を維持したまま会話を楽しむことができるようになる。また、言葉に詰まる不安が軽減されるため、ユーザーが積極的に他言語での会話ができるようになる。そのため、語学力向上のためのツールとして活用することも可能である。

さらに、ARグラスを通じて情報を視界内に表示する仕組みによって、会話の自然な流れを保ちながらサポートを受けることが可能となり、従来の翻訳アプリケーションが抱える、視線がアプリケーションに集中して会話相手とのアイコンタクトが減少するという課題を解決している。

6 普及（または活用）の見通し

本システムのターゲットは、英語学習者や海外出張者、観光客、ビジネスパーソン、語学教育機関など多岐にわたる。本システムの普及のために、スマートフォンアプリの継続的なアップデートに加え、PCアプリ版の開発を行い、オンライン通話でも利用できるようにする予定である。また、SNSを活用したプロモーションや、学校や企業との連携を通じて、より多くのユーザーに利用されることを目指している。

関連URL

PredicTalkのApp StoreダウンロードURL

<https://apps.apple.com/jp/app/predictalk/id6476206495>

PMの評価

採択時の評価

本提案は、外国語で会話をする際に「対面で目を見て会話をしたい」という人間の本当にやりたいことを人間に残し、「次の言葉が出てこない」といった不足する語学力の問題を技術で支援するツールを開発するというものである。次に続く文章を言語モデルで予測し、ユーザーが会話を継続できるようサポートする、という仕組みは、英会話だけでなく多言語への発展や、母語同士であっても会話のサポートを可能にするなど、様々な展開が期待できるとして採択した。新たなユーザー体験を提供するためのインタラクショナルデザインにも注力しながら取り組んでほしいと期待する。

プロジェクト終了時の評価

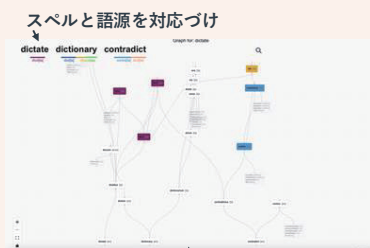
本プロジェクトでは、「ユーザーが話している文章の続きの候補をARグラスで視界内に表示することで、スムーズな多言語間の会話を支援するシステムを開発する」という当初の目標を達成することができた。開発したシステムでは、ユーザーが会話の途中で単語や文法が思い浮かばず詰まってしまった際に、言語モデルによって次に続く文章を予測し、それをモバイルアプリケーションと連動したARグラスに表示することで、会話の継続を支援する仕組みを実現した。外国語でのコミュニケーションを技術で円滑にサポートする世界を見せた点を評価する。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

機械学習を用いた語源的英単語分割手法の開発
— 同語源単語を比較する学習アプリケーション —

中澤正樹（東京大学）

語源情報を生かした単語学習



複数の共通語源単語を並べて表示
中級以上の単語や専門単語にも対応

語源的新語生成

Etymological word coinage (put two or three English words)

etymon

-more

Enter word 3

Submit

Results

Predictions

etymologic	etymic	etymological	etymologic	etym	etymology	etymologic
etymologic	etymologic	etymologic	etym	etym	etymologic	etymologic
etymologic	etymologic	etymologic	etym	etym	etymologic	etymologic

References

<[d] mod[ə] 'nu:ʒ[em]p 'nu:ɹ[em]p etym[ɒ] <[ɪ]p etym[ɒ]

-nu:ɹ[em]p <[ɪ]p <[ɪ]p etym[ɒ] 'nu:ɹ[em]p etym[ɒ] nu:ɹ[em]p

入力単語の先祖を探索し派生語を予測することで、
語源的に自然な架空の単語を作成

機械学習を用いた 語源的英単語分割手法の開発

中澤 正樹 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻)

1 背景

外国語単語学習は、しばしば任意の文字列の羅列に対して無関係な意味を対応づけるという苦痛な作業になりがちである。このような場合に語源情報を生かして学習すると良い、ということはしばしば言及される。外国語単語学習のために語源情報を整理した書籍やWebサイトは既に複数存在する。しかしながら、このような情報資源は手作業でまとめられているため、中級以上の単語や専門用語に関してはカバーできていない。一方で語源情報を機械的に解析してデータベース化した取り組みはいくつかあるが、必ずしも学習者が使いやすいようになっている。

2 目的

本プロジェクトの目的は、語源情報を機械的に整理し、それを外国語単語学習に向けて使い

勝手の良い学習アプリケーションとして提供することである。

英単語を語源とともに暗記する利点は、共通の祖先を持つ単語類（同語源単語）を一括りに暗記できることである。同語源単語は意味とスペリングの両面で先祖となる単語の特徴を引き継いでいるため、同語源単語内ではそれらに共通性があることが多い。従って、英単語を確認する都度そのグループの意味とスペリングの特徴を把握しておけば、知らないスペリングを見た時に意味を推測できるようになる感覚が身に付く。このような学習を手軽に行えるようにするため、本プロジェクトで作成する学習アプリケーションで提供する機能は、検索単語のスペリングに対して語源を紐づけること、及び、紐付けた語源を共通にもつ他の単語を並べて表示し、比較できるようにすることである。

また、作成する学習アプリケーションの主要なターゲットは中学や高校の基礎レベルといった、すでに手作業ベースの処理で対応できている層ではなく、大学レベルから専門用語といった中級以上に分類されるような英単語学習である。また、英語以外の外国語にも利用できることも重要である。従って本プロジェクトの解析手法は機械的であって、情報源の拡張に対応できる方法である。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、まず、語源情報を機械的に扱いやすい、グラフ形式にまとめる（以下、このようにまとめたものを「語源ネットワーク」と呼ぶ）。次に語源とスペリングを紐づけるために、このデータを用いて、任意の単語に対してそのスペリングを語源的意味のある最小単位と対応する語源語のリストに変換する仕組みを開発する。また、複数の同語源単語の語源を比較できるようにするため、複数単語の語源ネットワークを見通しよく描画する手法を開発し、Webアプリケーションを作成する。

3.1 高品質な語源ネットワークの構築

Web上で利用可能な散文形式の語源の記述を取得して、グラフ形式にまとめた語源ネットワークを作成した。これは、スペリングと、所属する言語、idの情報を持つノードに対し、継承関係のある場合に先祖から子孫の方向に有向エッジを持たせたものである。高品質な語源ネットワークを構築するため、冗長性という観点で取り組んだ。複数のデータソースを解析し、解析結果を統合することで、1つのエッジに対してその根拠が複数のデータソースにあるようにすれば、誤解析の影響を抑えられるからである。

データソースには、複数言語版のWiktionaryをWiktextextractで事前変換したものや、スクレイピングアルゴリズムを記述して収集したWebデータを用いた。収集した語源の記述から、Transformerモデルを用いて継承関係を抽出した。英語版Wiktionaryを独自にルールベースで解析・スクリーニングしたデータセットの一部を用いてモデルをファインチューニングし、その他のデータの解析を行う方針を採った。プロンプトは、散文形式の語源の記述から、その中に含まれる単語に対しその先祖は何かを問う形とした。また、回答の正確性を上げるため、Few-shot形式の問い方にした。先祖がない場合は、空白を返すようにした。

Transformerモデルには学習済みのLLAMA3あるいはT5-baseを試してみた。LLAMAに関しては推論が遅いことや、入力した語源の文章にない単語を出力してしまう挙動が多かった。また、今回のような単語抽出のタスクには、Decoder-onlyモデルであるLLAMAよりも

Encoder-DecoderモデルであるT5の方が適していると判断した。T5モデルの推論に関しては、FasterTransformerを用いて約4倍に高速化した。また、地の文が英語以外の場合はMarianMTモデルで翻訳してから解析した。この翻訳処理はONNX形式にエクスポートしたりT5の推論処理と非同期に行うようにして高速化した。

このようにして取得した継承関係のデータを統合して一つのネットワークにまとめる。この際様々な種類の表記揺れが問題となる。活用形に関してはWiktionaryの活用表から活用関係のグラフデータを作成し、その結合成分をとったりクラスタリングをしたりして、活用のグループを作り表記揺れを統一した。同形異義語に関しては、SentenceTransformerで意味表現の埋め込みベクトルを作成し、その内積を比較することで分類した（図1）。また言語名の表記揺れを手作業で直したり、継承関係の粒度を語源ネットワークのショートカットを修正することで統一したりした。

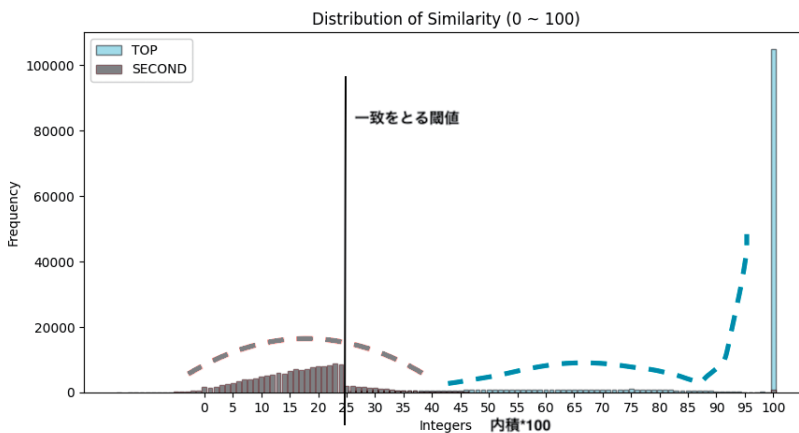


図1：意味表現のベクトルの類似度の分布。同じスペリングの単語の異なる意味に対して内積を取った時、その値の分布を表したものである。横軸は0~1の内積の値を100倍にしており、bin幅1のヒストグラムにしている。青色が最も一致したもの、灰色が2番目に一致したものの分布であり、この2つの分布の山が区別できているので同形異義語を区別できている状況証拠となる

最終的には語源ネットワークに含まれるエッジのうち32.8%に関して、重複性を確保できた状態となった。

3.2 語源的英単語分割の開発

スペリングに語源との相関付けを行う技術を開発する。主にCross-Attentionレイヤを直接見ることで、アラインメント情報を取り出す手段を取ることにした。様々なモデル構造を試した結果、EncoderおよびDecoderのEmbedding層のすぐ後に、LSTMを導入した構造が扱いやすかった（図2）。Decoderには子孫の一単語、Encoderにはその先祖（1つあるいは複数）を入力し、Decoderの出力がDecoderの入力の次文予測となるように学習させた。データセットは子孫と、語源ネットワークを参照して取得した先祖のペアのリストとした（図3）。トークナイザは文字ごとに数値を割り当てるものとして行った。この結果、Cross-Attentionの最終層を取り出すと、人間の直感とも整合するヒートマップが得られた（図4）。

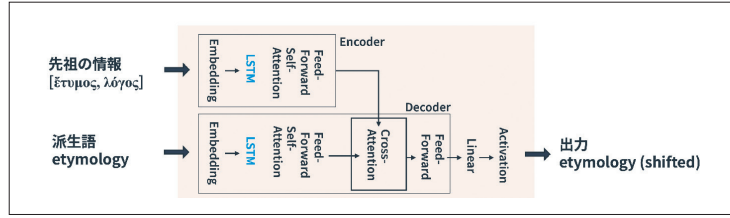


図2：モデルの構造。
青字のLSTMが新たに入れた層である

<st>egg-shaped<en>	<st>egg-shaped[en]<en>
<st>intrasegmentally<en>	<st>-ly[en]intra[la]segmental[en]<en>
<st>wikipedia<en>	<st>encyclopedia[en]algebraic[en]-ik[en]wiki[en]-al[en]<en>
<st>pharmacodependence<en>	<st>-ence[en]dependence[fro]φαρμακων[grc]depend[en]<en>
<st>noble<en>	<st>-ibilis[la]*gneh ₂ [ine-pro]<en>
<st>earthshine<en>	<st>*erbu[gmw-pro]*skinan[gmw-pro]<en>
<st>guardhouse<en>	<st>garde[fro]hous[enm]<en>
<st>departmentwide<en>	<st>-wide[en]department[fro]--ment[fro]de-[fro]departire[LL]partir[fro]<en>
<st>unpollutable<en>	<st>por--[la]-luo[la]por-[la]*lew-[ine-pro]<en>
<st>troll<en>	<st>trollen[enm]<en>
<st>bookdealer<en>	<st>*boko[gem-pro]dælere[ang]<en>

図3：学習に用いたデータセットの一部

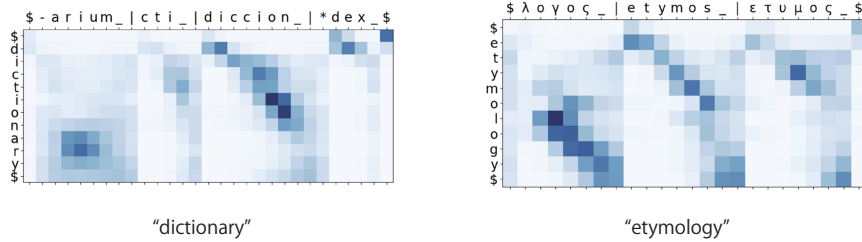


図4：語源とのアラインメントの例。なお、アンダーバーのところには先祖の言語コードに対応するトークンが埋め込まれている。また、ドルマークは文字列の始まりや終わりを表すスペシャルトークンである

最後に、語源的分割を作成する。語源ネットワークの派生語に対してその先祖の部分を展開し、いくつか代表的な先祖を選択する。選んだ先祖に対して学習済みのモデルで推論を行い、Cross-Attentionの最終層を抽出し1次元に平坦化する。こうして得られたスペクトルに対し、語源グラフを用いたクラスタリングと、スペクトルを用いたクラスタリングを組み合わせて調整し、主要な先祖を選択することで一意な語源的分割を定めた。

3.3 逐次更新可能な階層的グラフ描画

同語源単語を並べて表示するために、ノードやエッジを後から追加できる、すなわち逐次更新可能なグラフ描画が必要である。一方で語源ネットワークは時系列のあるデータなので階層的な描画でないと見通しの悪い表現になってしまう。

そこで、縦軸方向は階層番号で固定しつつも、横軸方向に1次元のスペクトル描画を用いる描画法を採用した。これによって、逐次更新が可能であるほか、クラスタを強調できるので見通しの良い描画方法となる。実際図5のように、数回のイテレーションを回すだけで、階層性やクラスタ性を保ちながら2つのグラフを融合することができている。

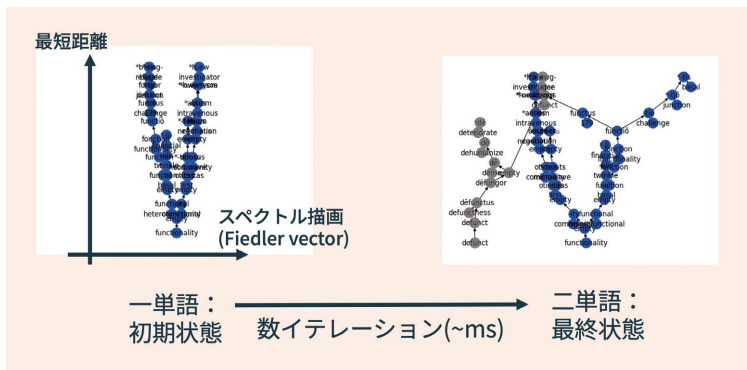


図5：グラフ描画のアップデートの様子。青色が初期ノード、灰色が新たに追加したノードである。初期ノードに対して階層的スペクトル描画をしたものが左の図であり、そこからノードを追加し、数回のイテレーションを回した際に得られた描画が右の図である

3.4 学習アプリケーションの作成

以上の語源ネットワーク、語源的単語分割、グラフ描画の技術を集合して、英単語学習のためのWebアプリケーションを作成した。図6はこの学習アプリケーションで“dictate”, “dictionary”, “contradict”という語源情報を並べて表示した際の画面である。左上に表示されているのが語源的分割で、そのアンダーラインの色と対応するグラフ上のノードの色が同じになるようにしている。また、共通部分が取れた先祖もまた同じ色で着色するよう工夫している。複数単語の共通祖先のノードは赤く縁取って強調するようにしている。このような機能によって直感的に語源やスペリングの共通性を理解できるようになっている。

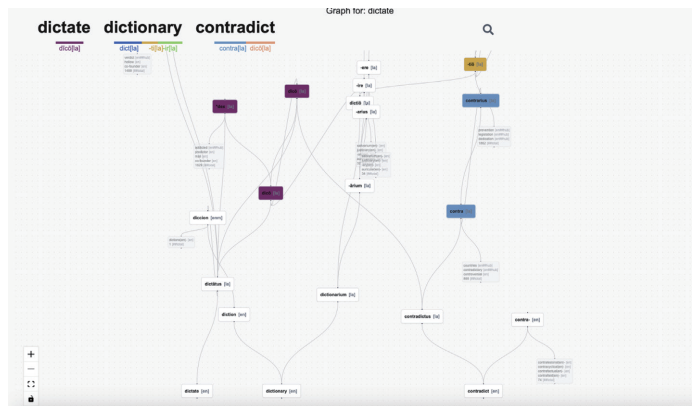


図6：Webアプリケーションで語源情報を検索した画面の例

3.5 語源的新語生成

語源的英単語分割で作成した語源分割モデルのEncoderには実際にに関わり合った先祖を入力して子孫を推定していたが、歴史上は交わり合わなかった2つの先祖を入力することも可能である。

この際にDecoderの出力を見れば語源的に自然な新語が生成されていると考えられる。

そこで、サービス名等の新語生成時に複数の単語を合体させて一つの単語を作ることに資することを目的として、入力した2、3の英単語に対して、語源ネットワークでその先祖をたどり、いくつかサンプリングして語源分割モデルに入力し、新語を生成するサービスを作成した。

4 従来の技術（または機能）との相違

単語学習のサービスとしては、語源情報を用いた単語学習を中級以上の英単語や専門単語、また英語以外の外国語でも行えるようになったという点が新しい。また、同語源単語を比較するという構想に基づいたかつてない単語学習のサービスである。語源的分割を表示することで同語源単語のスペリングの共通点を把握できる機能も今までにないものである。

言語処理の研究分野では語源ネットワークを構築する研究がいくつかなされてきたが複数データセットを大規模に統一することによって品質を向上する取り組みは新しいものである。また、英語版以外のデータセットも用いることで英語話者がアクセスしにくい言語の情報も取り込んでいると考えられ、文化的・産業的にも価値がある。

語源的分割手法としては、機械学習モデルの内部レイヤを、機械的に処理して利用するという新しい発想に基づいている。また、グラフ描画手法としては、一次元でスペクトル描画を用いた例はみられず、本手法は優れた階層性・クラスタ性と逐次更新可能性を両立した応用性の広い描画手法である。

5 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトで開発したWebアプリケーションは、今までに語源情報が利用しにくかった水準の単語学習が手軽に利用できる構成になっている。本アプリケーションはそうした学習者への普及や、語源情報を日常的に利活用する分野自体の価値を向上することが期待される。

また、言語学の研究面での活用も考えられる。開発した語源ネットワークはかつてない多種のデータセットに基づくものであるため、品質や多様性の面で優れていると考えられる。今後整理・評価をした上で、同分野の研究に利用可能な資源として使いやすいように整える。また、語源的分割を作成するために異種言語の単語間でのアラインメントを取ることは、それら言語の関わりを分析する手法としての広がりが見られる。このような研究は、多様な言語の文化的理解と共に、言語処理の産業を多言語に拡大する上でも重要な技術である。

近況

大学院で研究に打ち込んでいます。未踏で学んだ、新しい成果にたどり着くために、どのように開発項目を取捨選択するかという判断や、限られた時間でも諦めずに課題に取り組む粘り強さが、大きな力となっています。

PMの評価

採択時の評価

本提案は、英単語を対象として語源的に意味のある最小単位に分割する機械学習モデルを開発する提案である。英単語を語源で着目しなおし、一般ユーザーにわかりやすくそれを提示することで、単語を知らなくてもその意味を推測できるセンスが積めるようになる支援にもつながるアプリケーションも開発する。すでに語源データの解析部分を開発し、ファインチューニングのプロトタイプもできていたことで、プロジェクト期間中に開発するシステムの技術的側面や乗り越えるべき課題も明確であったことと、本手法によりユーザーの英語学習の幅が広がりそうなことに期待して採択とした。英語だけでなく、語学全般に使える技術に展開できる可能性にも期待する。

プロジェクト終了時の評価

当初目標としていた3点、

- (1)機械学習を用いて任意の英単語を語源的に意味のある最小単位に分割する方法の開発
- (2)分割した単語を学習者が見やすい形に描画すること
- (3)それらを単一のアプリケーションとして使えるようにすること

について丁寧に実装を進めた結果、すべて達成し、Webアプリケーションとして一般に公開することができたことは評価に値する。特に語源分割手法とグラフ描画については、技術的には非常に面白い成果と評価する。

一方で、語源分割については、限られた開発期間の中で一定の実装と検討を進めることができたが、言語学的妥当性の詳細な検証やユーザーインタビューによる評価までは十分に実施できなかった。グラフ描画機能についても、単語探索や英語学習支援における実利用シーンの検証には今後の発展の余地が残されている。特に、ユーザーがどのように機能を活用し学習体験につなげていくかという観点について、継続的なユーザー調査を通じてさらに磨き込まれることを期待したい。



人工遺伝子回路設計のための統合開発環境

奥田 宗太 (早稲田大学 大学院先進理工学研究科 電気・情報生命専攻)

須賀 幹太 (早稲田大学 大学院先進理工学研究科 電気・情報生命専攻)

外尾 航季 (早稲田大学 大学院先進理工学研究科 電気・情報生命専攻)

1 背景

人工遺伝子回路とは遺伝子発現の相互作用ネットワークの構成要素（遺伝子回路パーツ）を切り出し、それらを組み合わせることで人為的に遺伝子発現のタイミングや発現量を設計した遺伝子発現制御ネットワークのことである。

人工遺伝子回路を実際に構築するためには生物実験や長鎖DNA合成など多大な時間的・金銭的成本がかかる工程を踏む必要があるため事前の入念なシミュレーション、検討が不可欠である。具体的には、人工遺伝子回路のトポロジーを設計したら、適切な遺伝子発現強度パラ

メータの調整や遺伝子回路パーツ選択をシミュレーションと共に繰り返し実施した後、パラメータに合った配列を設計する最適化プロセスが存在する（図1）。

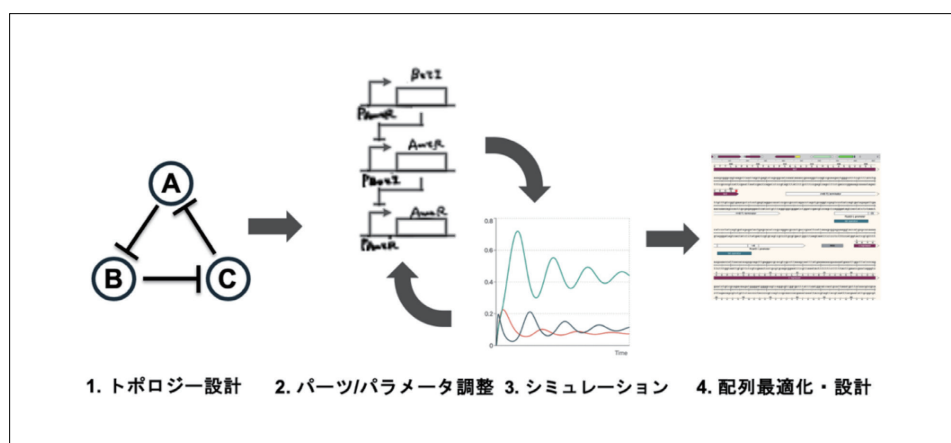


図1：人工遺伝子回路を設計するためのワークフロー

一方で、人工遺伝子回路の設計環境は未整備な点が多く残されている。例えば、デファクトとなる人工遺伝子回路の動作シミュレータが存在せず、適宜シミュレータを自作していたり、具体的な配列設計のために必要なツールが散在しており、それらを横断的に活用しようとするのが極めて煩雑な操作が伴う。加えて、既存ツールの多くはUI/UXに対する検討やドキュメント整備、継続的なメンテナンスが十分ではないという課題もある。こうした要因が人工遺伝子回路の設計効率を著しく低下させ、結果として設計者の増加を阻み、技術や開発コミュニティの発展を鈍化させる大きな要因になっていると懸念している。

2 目的

このような現状において、人工遺伝子回路開発をより効率的に行い、生命体の高度な設計手法の開発を世界的に加速させるためには、人工遺伝子回路の設計・シミュレーションなど全ての工程を一つのツールで行うことができる快適な統合開発環境（IDE）の作成が急務である。

よって本プロジェクトでは、プログラミングにおけるVisual Studio Codeのような、先端研究レベルでデファクトになりうる人工遺伝子回路のためのIDEの開発を目標とする。更にUI/UXを工夫することによって、非専門家も人工遺伝子回路構築に取り組みたいようなツールに仕上げ、人工遺伝子回路という概念に触れるための媒体となり社会へ普及させることを目指す。

3 開発の内容

本プロジェクトで開発した「Synergetica」は、①人工遺伝子回路を直感的に設計するノードベースの回路エディタ、②YAML形式のコードによる回路設計を可能にするコードベースの回路エディタ、③回路の動作を時間経過とともに可視化するシミュレータ、④パラメータをもとにDNA配列を生成するジェネレータ、⑤ユーザー独自のパーツを扱えるようにするパーツ

カスタマイズ機能が搭載されたEnd to Endのデスクトップアプリケーションである（図2）。

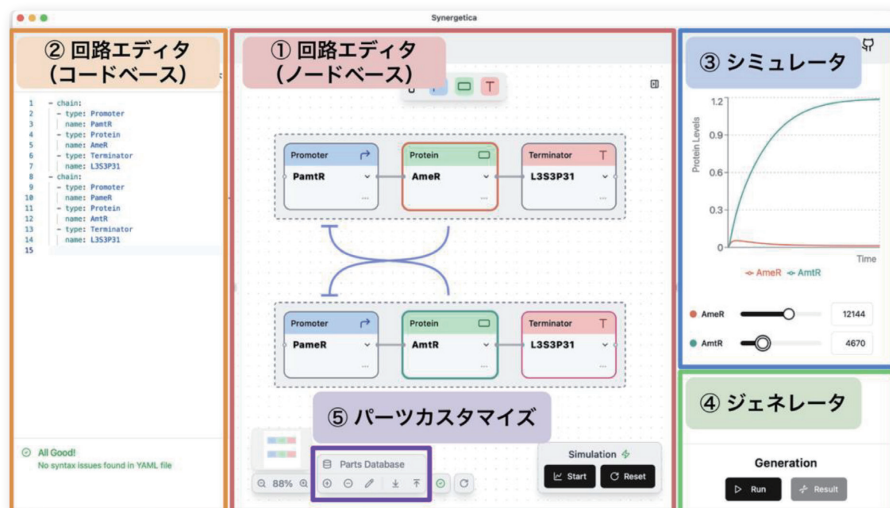


図2：デスクトップアプリの画面上における各機能の配置

以下に機能別の概要を示す。詳細はSynergeticaのドキュメントを参照されたい。

3.1 回路エディタ（ノードベース）

図2の画面上部のパレットからプロモータやプロテインなどのパーツをドラッグ&ドロップして配置すると、パーツ同士が自動的に接続されてチェーンが形成される。配置したパーツをクリックするとポップアップウィンドウが開き、パーツ名を選択できるようになっている（図3）。相互作用するパーツが回路内に含まれている場合には、自動で矢印を描画し、見やすさを保つためにパーツの上下左右に用意したハンドルを使って矢印の端点を動的に切り替える（図4）。専門家に馴染みがある形状をベースにカード型UIのデザインを刷新し、非専門家にも理解しやすくなるように工夫している。さらに画面左下には、回路全体を概観するミニウィンドウや拡大縮小率、バリデーション結果の表示、回路のリセットボタンなどを配置し、操作性の向上を図っている。

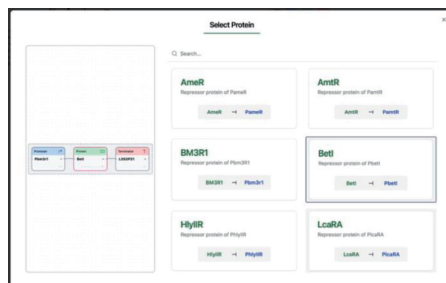


図3：パーツ選択画面

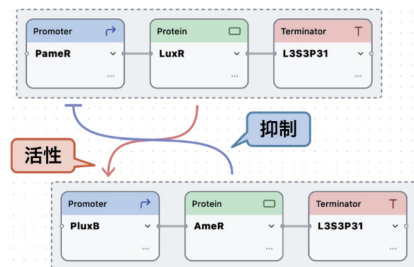


図4：相互作用の表示

3.2 回路エディタ（コードベース）

YAML ベースの独自DSLを設計し、チェーンに含まれるパーツを簡潔に表現できるようにしている（図5）。スキーマバリデーションを用いて、生物学的に成立する回路かどうかをチェックし、エラーがあればコードエディタ上で箇所をハイライトしてメッセージを表示する。ノードベースへ変換する際には、部分的な記述でも反映できるように制約を緩やかにしたスキーマを用いており、記述中のコードも随時ビジュアルに確認できる。ノードベースのエディタからコードへの反映は変更ごとに実行するのではなくデバウンス処理でまとめて行い、パフォーマンスを確保している。インポート・エクスポート機能によってYAML ファイルを入出力でき、回路の共有にも利用できる。

3.3 シミュレータ

正しく設計された回路の動作を、タンパク質発現量の変化として時間経過とともに可視化する機能である。PythonのFastAPIで微分方程式を動的に生成し、オイラー法で解を求め、WebSocket通信を介してフロントエンドへ結果を送信する。スライダーでタンパク質発現強度などのパラメータを調整すると即座に再計算が行われ、結果がグラフに描画される。同じ名称のパーツが複数ある場合にはナンバリングして個別にスライダーを用意し、グラフ表示ではこれらをまとめて示す仕様になっている（図6）。回路に変更があった場合は整合性を保つため、自動的にシミュレーションがリセットされる。

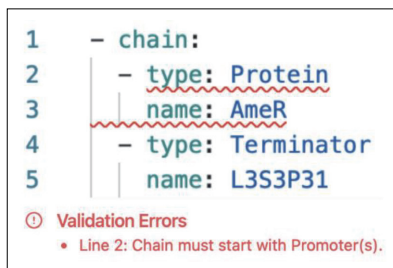


図5：YAML ベースのDSL とエラー表示

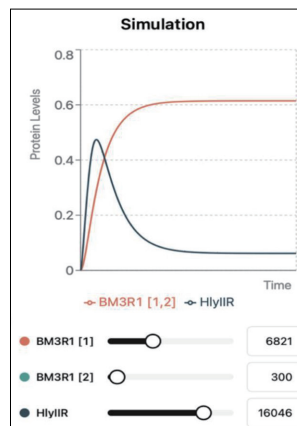


図6：シミュレーション結果のグラフとパラメータ調節のスライダー

3.4 ジェネレータ

シミュレーションで用いたパラメータを基に、DNA 配列文字列を生成する機能である。

Transformer ベースの深層学習モデルを組み合わせた遺伝的アルゴリズムで最適化を重ね、回路に対応するDNA 配列を算出する仕組みになっている。生成処理が開始されると画面右下に実行中であることを示すポップアップが表示され、キャンセルボタンで途中停止できる。生成が完了すると結果をポップアップで確認でき、回路ビューとの対応がわかるようチェーン

IDを記載してテーブルに並べ、ボタンを押せば生成配列をファイルにエクスポートすることも可能である（図7）。

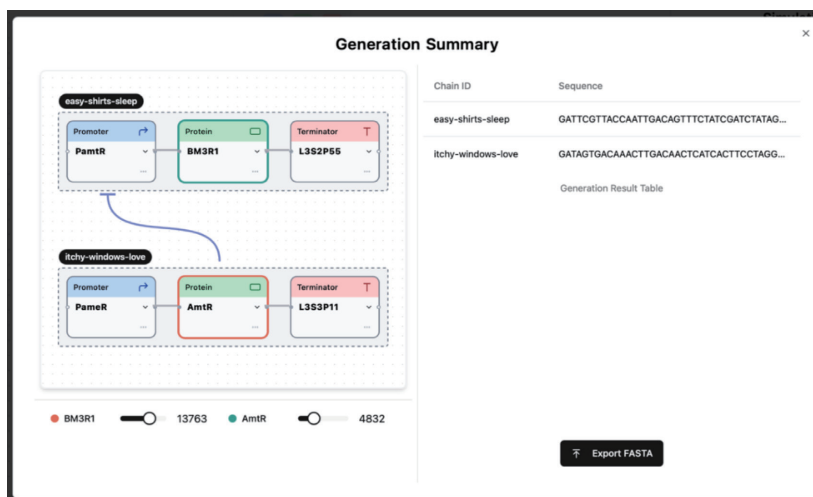


図7：DNA 配列生成結果の表示画面

3.5 パーツカスタマイズ

研究室独自のパーツをSynergeticaに登録して利用できるようにする機能である。フォームにパーツのメタデータを入力して追加・編集・削除し、誤ったデータが入力されそうな場合はスキーマバリデーションでエラーを検出する。既存のパーツ情報を流用して新規パーツを簡単に登録できるようにしており、登録内容をJSON形式でまとめてインポート・エクスポートすることで、設定を他者や別の環境に共有することもできる（図8）。

#	name	type	Ymax	Ymin	K	Hill coefficient
1	AmeR	Repress	3.8	0.2	0.09	1.4

図8：遺伝子回路パーツ登録フォーム

4 従来の技術（または機能）との相違

Synergetica は非定常的なタンパク質発現パターンを設計する人工遺伝子回路設計支援ツールとして、回路の概形設計、数値シミュレータ、配列最適化機能を搭載した世界初のツールである。

Synergetica は UI/UX 向上に徹底的にこだわり、先発ツールと比較しても抜きん出て快適なツールとなっている。さらに、Synergetica を使用するためには Docker 環境さえ用意すればよいのである。

また、Synergetica の開発は、生物学的に限りなく精密であるということよりも、動くものをできる限り簡単に作れるということに焦点を当てて進められた。この開発思想により、ユーザーは込み入った設定など煩わしい操作や込み入った知識がなくても、インストール後、すぐに、直感的に人工遺伝子回路をデザインできるツールとなっている。

5 期待される効果

Synergetica が実現する人工遺伝子回路の概形設計から配列生成までの一連の流れの効率化は、計算機科学における高級言語およびそのコンパイラの開発に対応する。これらの登場によって、ソフトウェア開発が急速に普及し、IT 産業全体が大きく発展した。これとのアナロジーで、人工遺伝子回路デザインの「高級言語」や「コンパイラ」に相当するツールを開発することにより、人工生命システムを誰もが容易にデザイン可能になり、ステムデザインの民主化、業界の勃興、発展の起点となることを期待する。

6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトの次の到達点は、Synergetica を用いて設計した人工遺伝子回路配列の品質向上のため、生物実験を伴う生物学的な妥当性の評価を実施し、組み込むことである。

また中長期的には、Synergetica を中心として、非アカデミックユーザの人工遺伝子回路の DNA 配列の入手、駆動実験を実施できるインフラ整備を主体的に推進し、本当に誰でも簡単に人工遺伝子回路設計ができる世界を構築する。様々なバックグラウンドの人工遺伝子回路エンジニアが誕生することで、アカデミアからは生まれることのなかった様々な応用例が繁茂し、人々が遍在する人工生命システムと共生する世界が到来すると見通している。

近況

須賀と外尾は機械学習・ソフトウェアエンジニアとして、奥田は生命科学系の博士学生としてキャリアを進めています。Synergetica の次の課題は、遺伝子パーツが実際の生命システムの中でどのように振る舞うのかを計測し、シミュレーションや配列設計に還元することです。最近の言葉を借りるならば、“Physical AI” の概念と同様に、リアルワールドの生命システムの挙動をどのように情報空間に落とし込むかがこれからの取り組むべき課題だと考えています。我々は、生命システムを「プログラマブルなマテリアル」と捉え、その設計可能性を拡張するとともに、社会実装に向けた安全性や倫理的課題にも向き合いながら、この技術の民主化に向けて何ができるのかを考え続けていきます。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、人工遺伝子回路を直感的に設計するために、設計ユーザーインタフェース、回路動作シミュレータ、最適化モデルを備えた統合開発環境（IDE）を開発する提案である。提案者らは生命科学の専門性を持ち合わせており、課題も丁寧に捉えている。開発計画も明確で実現可能性も高く、合成生物学の発展に寄与する提案であると感じたため、採択とした。他分野を含めた様々なプレイヤーが人工遺伝子回路を設計できるようなシステムとして仕上げるために、使いやすいインタフェースを開発し、実際にユーザーに使ってもらいフィードバックループを回すまでプロジェクト期間中に頑張って取り組んでほしいと期待する。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトで人工遺伝子回路の設計を画期的に効率化する統合開発環境（IDE）を開発した。人工遺伝子回路の設計を一気通貫して行うことができるプラットフォームを実現したことで、従来工程数が非常に多く、たくさんのソフトウェア等を行ったり来たりしながら数日かけて行っていたような作業を、誰でも簡単に試行錯誤してみることが可能になった。人工遺伝子回路の世の中を変える可能性がある環境を提供することができたことを大きく評価する。

特筆すべき点は、システム内部には多くの工夫がなされていることである。例えば、回路エディタは、直感的に設計するだけでなくYAML形式のコードでの記述も可能にし、入出力にも対応していることで、初心者だけでなく、中級者、上級者といった多くのユーザーを取り込む工夫がされている。また、対応しているだけでなく、生物学的に成立する回路であるかどうかをチェックする機構、それを即座にノードベースで可視化可能にするための制約を緩めたスキーマ、など随所に工夫がなされている。パーツカスタマイズ機能でも、誤ったデータが入力されそうな場合には、エラーを検出する機能が付与しており、とても使いやすく仕上がっている。

当初予定していた機能を実装するだけでなく、内部的にたくさんの工夫がされていることで、ユーザー体験が非常に良い統合開発環境を仕上げた点を大きく評価する。

稲見 昌彦PM 担当プロジェクト



稲見 昌彦 (いなみ まさひこ)

東京大学 総長特任補佐 先端科学技術研究センター 副所長・教授

■プロフィール

東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学助手、電気通信大学教授、マサチューセッツ工科大学客員科学者、慶應義塾大学大学院教授等を経て2016年より現職。光学迷彩、触覚拡張装置、動体視力増強装置、第3・第4の腕などを開発。米TIME誌 Coolest Invention of the Year、文部科学大臣表彰若手科学者賞などを受賞。IPA未踏プロジェクトマネージャー、JST ERATO 稲見自在化身体プロジェクト研究総括、超人スポーツ協会発起人・共同代表。一般社団法人情報処理学会理事、日本バーチャルリアリティ学会理事、日本学術会議連携会員。

人間拡張工学やバーチャルリアリティ技術の進展により、近い将来、誰もが容易に「能力」を獲得・伝達できる社会が到来すると予測される。そのような社会に向けて重要となるのが、「誰もが身につけたいと思える魅力的な能力をデザインする能力」であると考えられる。

つまり、今後の社会においては単なる「ゲーマー」としてではなく、「ゲームクリエイター」としての資質が求められる。本プログラムでは、ゲーム企画の募集を行うわけではない。むしろ期待されるのは、「自分と特定の誰かが楽しめる」「作りたくてたまらない」といった、ユーザーとクリエイターの顔の見える提案を期待し募集時のメッセージとした。

提案の対象分野は、食、スポーツ、ファッション、観光、農林水産業など、情報技術の未踏の領域へのチャレンジであれば広く歓迎される。採択後は、その提案を社会と未来につなぐための戦略をPMと共に検討することを想定した。

情報技術の著しい進化により、人々の「能力」の在り方が大きく変わろうとしている。そうした新しい時代に求められるのは、魅力ある「能力」をデザインし提示できる創造性である。本プログラムでは、そうしたビジョンを具現化する挑戦的な提案を採択した。



家族の腸内環境を改善する排便分析デバイス

工藤 時大 (早稲田大学 基幹理工学部 情報通信学科)

本多 拓翔 (慶應義塾大学 環境情報学部 環境情報学科)

1 背景

健康管理手段として食生活や睡眠を記録するウェアラブルデバイスは既に広まりつつあるが、腸内環境を映し出す重要な指標である便の状態については、その有用性が十分には認識されていない。特に子どもの便秘が近年増加傾向にあることが指摘されているが、家庭内で排便を意識的に管理し、早期に異常を発見・対処する仕組みはまだ普及していない。このような状況を背景に、排便の状態を日常的に観察しやすくし、さらに家族間で共有できる環境を整えることの必要性が高まっていると我々は考えている。

2 目的

本プロジェクトは、家庭内での排便状態を可視化することで、便秘や腸内環境に関する問題を早期に把握できるようにし、家族の健康管理を促進することを目指している。トイレに設置するだけで便の形状や色を自動的に分析し、利用者が日々の生活の中で自然に記録を続けられるようにする。また、得られた便の画像がインターネットを介してサーバーなどに送信されることなく、ローカルで処理する仕組みを採用することで、プライバシーの懸念を軽減し、継続的な利用を促進させる。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、トイレに設置する排便分析デバイス「うんポスト」、機械学習を活用した便の分類モデル、家族間で排便状況を共有できる専用スマートフォンアプリケーションを開発した。以下に、それぞれの詳細を記述する。

はじめに、うんポスト本体のハードウェア設計についてであるが、便を撮影するためのカメラと照明、そして機械学習による推論を行うエッジコンピューターが一体化した構造を採用している（図1）。具体的にはRaspberry Pi 5を中心に構成し、照明にはLEDを採用して、暗所でも便の形状や色を明瞭に取得できるよう設置位置や光量を慎重に調整している。筐体は3Dプリンタで試作した試作品を用い、各種トイレの形状にも対応しやすいように凹凸のある固定機構を検討した。固定方法としては当初、ネジやナットでしっかり留める形式を検討していたが、実際の使用では頻繁な取り外しや掃除が想定されるため、より簡易に着脱が可能で、かつ安定性も確保できる方法に改良を加えている。



図1：「うんポスト」をトイレに設置している様子

次に、便の画像解析に用いる機械学習モデルの開発について述べる。本プロジェクトではブリストルスケールを参照して便を7つのタイプに分類する方針を採り、ディープラーニングを用いて形状を判定している。具体的には、インターネット上で収集した便の画像数千枚を手作業でラベリングし、CNN（畳み込みニューラルネットワーク）を中心としたモデルを構築している。「便秘」「通常」「下痢」という大まかな分類を行ったのち、さらに細かい特徴に基づ

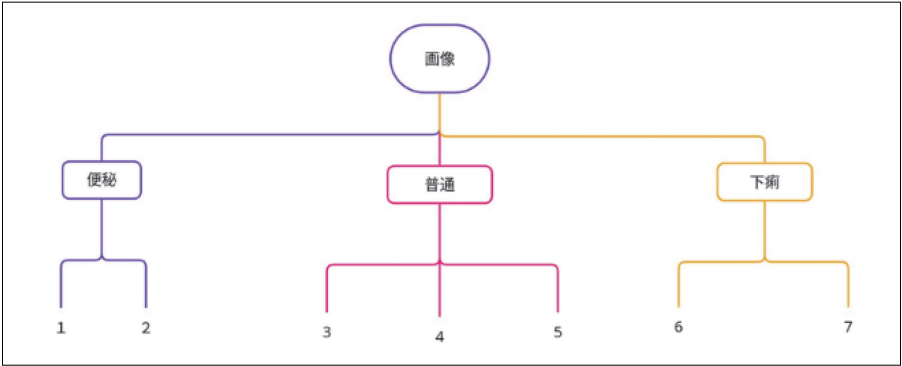


図2：階層的な便画像の分類のイメージ

いた詳細な分類を行うという階層的なアプローチを採用している（図2）。色の解析においては、便の画像をHSV色空間に変換して分析をしている。学習後の評価段階では約85%の分類精度を得ることができたが、便は光の当たり方や水量によって見え方が変化するため、より現実的な環境下で撮影した追加データを収集し、モデルを継続的に再学習させることも今後は検討している。推論はエッジコンピュータ内で全て完結する設計とし、便の画像データそのものをクラウドに送信しないことでプライバシー保護を図っている。

そして、排便情報を家族で共有するためのスマートフォンアプリケーションの開発についてである。アプリケーションの開発にはFlutterを用いており、iOSとAndroidに両対応させる形で実装を進めた。カメラで取得された便の画像は即座にうんポスト内部で解析され、その結果がネットワーク経由でアプリケーションへ送られる。アプリケーション側では日付や時刻、便の状態、ブリストルスケールでの判定結果などを一覧表示し、各ユーザーが自分や家族の排便状況を把握できる仕組みを整えている（図3）。さらに、子どもにとっては便の状態を直接数値



図3：スマートフォンアプリケーションの画面

や評価で示されることに抵抗がある場合も考えられるため、キャラクターを使ったゲーミフィケーション要素を導入し、便の状態に応じて腸内環境を擬人化するなど、楽しみながら健康管理を続けられる設計としている。

4 従来の技術との相違

便の状態を記録するためのスマートフォンアプリケーションは存在していたが、多くはユーザーが手作業で情報を入力する必要がある、継続が難しいという課題があった。介護現場や医療施設で導入されている排便記録デバイスは高額かつ設置が複雑であり、一般家庭での利用には適さないことが多い。また、排便記録デバイスの中にはクラウドでの解析を前提とするものもあり、便の画像データを外部に送信することでプライバシーリスクが発生する懸念がある。

本プロジェクトではエッジコンピューティングを導入してローカルで処理を完結させるため、プライバシー面での優位性を保持している。また、トイレへの簡易な後付け設置や、子ども向けに抵抗感を減らすキャラクター要素などを盛り込み、実際に家庭で使い続けやすい設計を行っている点に相違がある。

5 期待される効果

うんポストによってユーザーの便の状態が自動的に記録されることで、家族の腸内環境の異常を早期に察知しやすくなることが期待される。家庭内で気軽に情報共有ができることによって、ユーザーは生活習慣の見直しや医療機関への受診につながりやすくなり、結果として子どもから高齢者まで幅広い世代で健康管理の意識が向上する可能性がある。医療機関との連携が進めば排便データが診断の補助として利用される未来も考えられ、広範な実証データの集積が、腸内環境の研究や予防医療の分野でも新たな発見をもたらすと考えられる。

6 普及の見通し

今後は、家庭向け製品としての販売につなげるとともに、介護や在宅医療の現場にも応用範囲を広げたいと考えている。うんポストは日常生活における排便データが客観的に得られるため、施設や医療現場での身体管理や栄養指導にも利用価値が高いと想定される。

さらに、得られたデータを医療機関や研究機関と連携して活用し、過敏性腸症候群や便秘症といった疾患の予防や早期発見に資する取り組みを拡大していく余地がある。加えて、今後はユーザーに対する心理的ハードルのさらなる軽減や設置方法の改良を進め、幅広い世帯での継続的な利用を促進していきたい。そうした普及活動を通じて、家庭のみならず社会全体で腸内環境の重要性を共有し、便の状態を入口とした包括的な健康管理を根付かせることがこのプロジェクトの展望である。

PMの評価

採択時の評価

「腹の虫」という言葉があるように、我々の消化器官は最も身近な「他者」である。そしてトポロジカルには腸内は外部であり、従来のヒューマンインタフェースが対象としていた体表面へのインタラクションの延長上にもあるといえる。

本プロジェクトはまさに腸内環境への間接的なインタラクションを志向した野心的な取り組みでありつつ、社会へのインパクトも大きいと判断し採択とした。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトの成果は、以下の点において評価できる。

- 一般家庭向けに設計された排便分析デバイス：既存の排便記録アプリケーションや介護・施設向けの排便関連ハードウェアの欠点を克服し、一般家庭で簡単に導入・利用できるデバイスを開発した点は革新的である。特に設置の容易さと操作性を重視した設計は実用的価値が高い。
- プライバシー保護を重視したローカル処理：排便データという非常にプライベートな情報を扱うシステムとして、エッジコンピューティングを活用し、データを外部に送信せずローカルで処理を完結させる設計を採用した点は、ユーザー保護の観点から極めて重要である。
- 子どもでも楽しく使えるデザイン：排便という一般的に「恥ずかしい」と感じられがちな健康指標を、ゲーミフィケーションを通じて子どもでも抵抗なく記録できるよう工夫した点は秀逸である。腸内環境をキャラクター化し、健康な排便が続くとキャラクターが成長するなどの演出は、子どもの継続利用を促進する効果的なアプローチである。

なお、機械学習モデルの精度（85%）は実用レベルに達しており、おおむね良好な結果と言える。現状では隣り合うカテゴリでの誤識別がほとんどであり、実用上大きな問題は生じないと考えられる。

一方でクリエイータ同士での連携や学業との両立に関しては課題があったように見受けられる。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業
ユーザとモノのネットワーク体験を創作するためのARシステム

Monokko

後藤 汰誓 (九州大学)
大塚 敏郎 (九州大学)
石山 遼 (九州大学大学院)

あなたは「モノと話したい。心を通わせたい」と思ったことはありませんか？
Monokkoは、CV / LLM / XR技術によって日常のモノをエージェント化するシステムです。
ヒトとモノが通じ合う、未来の日常がここにある！

考える。
Helloかみ。
話す。
目がある。
モノである。

モノをスキャンしよう
モノをカメラでスキャンして、性格や見た目の設定をすれば、あなたのモノッコが誕生。
慣れ親しんだモノとの間に、エージェントを通した新たな関係性が生まれます。

モノッコと話そう
MonokoScopeアプリを使って、モノッコたちを眺めたり、話してみたり、触れ合ってみたりすることで、モノッコがあなたを癒してくれます。

コップのモノッコ
コーヒー大好き
カップン

今日は寄り添うかなコーヒーを入れてほしいカプ！

ユーザとモノのネットワーク体験を創作するためのARシステム

後藤 汰誓 (九州大学芸術工学部芸術工学科音響設計コース4年)

大塚 敏郎 (九州大学芸術工学部芸術工学科メディアデザインコース4年)

石山 遼 (九州大学大学院システム情報科学府情報理工学専攻修士1年)

1 背景

人間の生活空間には、家具や家電、趣味や思い出の品など、感情や記憶と結びつく多様なモノが存在する。

これらは単なる道具ではなく、生活体験を形成する大切な要素である。IT技術を活用し、これらのモノをエージェントとして扱うことで、人工ペット型エージェントによる心の安らぎの提供や、スマートエージェントによる家事・コミュニケーションの補助など、生活の利便性と豊かさが向上する可能性が示される。

さらに、Apple社のVision Pro（2024年発売）などの最新の高性能デバイスの進化により、物理的なハードウェアに依存せず、現実空間のモノをデジタルに拡張してエージェント化するアプローチが現実味を帯びている。これにより、モノ自体に新たな機能や存在感が付与され、従来の枠を超えた新しい生活体験が提案されることが期待される。

2 目的

本プロジェクトでは、日常生活のモノをエージェント化し、ユーザーがモノを介して愛着を育む仕組みを構築することを目指す。そのXR技術を活用することで、ユーザーがデバイスを装着していない時でも「そのモノにはデジタルの分身がいる」と感じられるような、新たな生活習慣や感性の変化を促すことを狙う。

このシステムでは、モノが単なる便利なツールとしてだけでなく、ユーザーの思い出や感情を引き出す「パートナー」のような存在になることを目指している。これらの要素を組み合わせ、本プロジェクトでは「モノのエージェント＝モノッコ」を開発し、ユーザーが日常の中で自然に対話し、愛着を育めるインタラククションを実現するシステム「Monokko（モノッコ）」を構築することを目的としている。

3 開発の内容

Monokkoでは、生活空間の任意の物を画像解析技術を用いて検出したのち、XR技術でモノッコの様相を空間に提示し、LLM技術でそのモノッコと会話可能となるようなアプローチをとる。この際、複数種類のデバイスでモノッコを観察可能であり、それぞれ異なる体験が得られる。また、モノッコの性格や容姿などをユーザーが自由に創作可能である。そして、キューベンという独自デバイスを開発し、システムとしての世界観を深める。

3.1 管理アプリ

管理アプリは、モノッコの作成・登録、設定変更、見た目のカスタマイズという三大機能に大別される（図1）。まず、ユーザーはカメラを用いて対象物体を撮影し、そのスキャンデータを取得することで、現実世界のオブジェクトをMonokkoシステム内で認識可能な状態にする。



図1：管理アプリ

次に、サーバーに登録された各モノッコの名前、性格、対話スタイルなどの基本パラメータを編集する設定変更機能がある。モノッコの見た目のカスタマイズ機能では、瞳孔の大きさ、色、形状（丸型、ハート型、星型など）、眉の種類、アクセサリ、音声のトーン、全体の大きさなど多様な視覚的要素を調整可能である。これらのカスタマイズ要素は単なる外見の変更に留まらず、ユーザーがモノとの心理的距離を縮め、愛着を生み出す体験につながると考えている。

技術の実装としては、管理アプリはMonokoScopeアプリと同様に、Unityゲームエンジンを採用し、UIはUnityのuGUIを用いてレスポンスな画面レイアウトを構築している。バックエンドとの通信はREST APIを介してJSONフォーマットで行われ、モノッコの設定情報やカスタマイズデータをサーバー側で一元管理する仕組みとなっている。

3.2 MonokoScope

MonokoScopeは、Monokkoシステムの中核をなすアプリケーションであり、ユーザーがモノッコと対話するための主要インターフェイスである。iPad版とApple Vision Pro版の2種類が存在し、両者は基本的な機能とコンセプトを共有しつつ、それぞれのデバイス特性を活かした独自の体験を提供する。iPad版は手軽にモノッコ体験ができるよう最適化され、家庭や教育現場など幅広い環境での利用を想定している（図2）。一方、Vision Pro版は没入感の高い体験を実現するために、UI要素を極力排除し、Hand TrackingやObject Tracking技術を導入して、物体の3D形状に合わせたモノッコの配置と自然な対話を可能にしている（図3）。



図2：iPad版MonokoScope



図3：Apple Vision Pro版MonokoScope

両バージョンはUnityを基盤にAR Foundationライブラリを活用して開発した。iPad版はARKit、VisionPro版はARKitに加えPolySpatialライブラリを採用することで、共通基盤を維持しつつ各デバイス固有の機能を実装している。カメラやセンサーを用いて現実空間の物体を認識し、サーバー設定に応じたモノッコの3D座標を特定・重量表示するほか、専用ジェスチャーやボタンで音声入力モードを起動し、Whisper APIで音声をテキスト変換、入力に基づく適切な応答を生成する仕組みである。さらに、眼球の多層構造による豊かな表情表現や自然な瞬き、視線のランダムな動き、抽象的な鳴き声と改行コードを用いたフキダシ分割によって、機械的な印象を排除した自然な対話が実現されている。

iPad版は横持ちでiPadスタンドに設置し、カメラ範囲内の対象物にモノッコが出現する仕組みとなっている。技術面では、iPad ProのLiDARカメラを活用し、後述するYOLOによる物体認識と深度カメラによる3D座標特定を組み合わせている。UIはシンプルかつ直感的で、

画面四隅に機能ボタンを配置し、モノッコが主役となるよう画面の大部分をカメラビューに割り当てている。

Vision Pro版は、没入型体験を重視しており、immersiveモードで全画面表示されることで、ユーザーが自らの生活空間にモノッコが存在しているかのような強い没入感を体験できるよう設計している。また、HandTrackingを活用してモノッコに対する「撫で」インタラクションが実現され、これにより物理的な触れ合いを通じた愛着形成が促進される。Object Tracking技術により、3Dスキャンデータから生成された認識モデルを用いて、物体の正確な3D形状を把握し、モノッコの目玉を物体表面に自然に配置することを可能としている。(図4、図5)



図4：Apple Vision Pro版の使用の様子

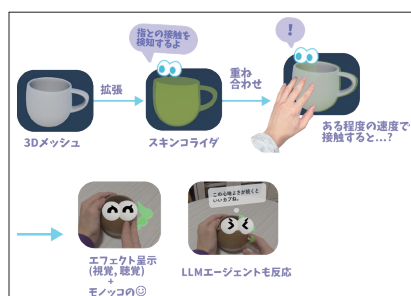


図5：「撫で」機能の実現プロセス

3.3 画像解析システム

本システムは、図6に示すようにユーザーが身の回りの所望の物を(1枚以上)撮影、画像登録をすることで、ユーザーは上述のデバイスを介してモノッコを視認できる。具体的には、ユーザーが登録した画像について、Image-to-Text技術を用いて、オブジェクトに関するテキストラベルを生成する。次に、Monokoscopeにより得られる周囲の画像について、サーバー側でオブジェクト検出モデルによる推論を行う。特に、登録されたオブジェクトについて画像中の位置情報を検出し、バウンディングボックスを獲得する。以上のプロセスを通して図7に示すように、登録済みオブジェクトに関するモノッコの可視化を行う。

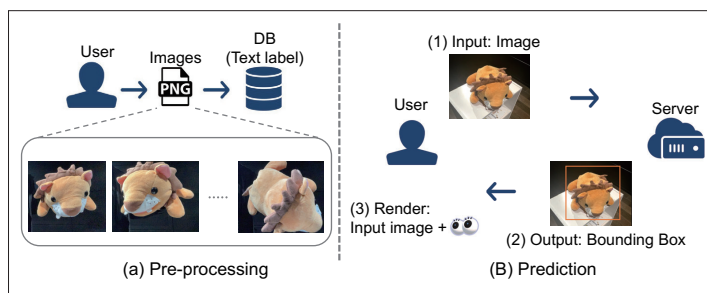


図6：画像解析システム概要。(a)前処理：ユーザーが行うオブジェクト画像の登録。登録された画像からImage-to-Text技術によりオブジェクトのラベルを生成し保存。(b)推論時：登録されたオブジェクトが画像中にあればバウンディングボックスを取得

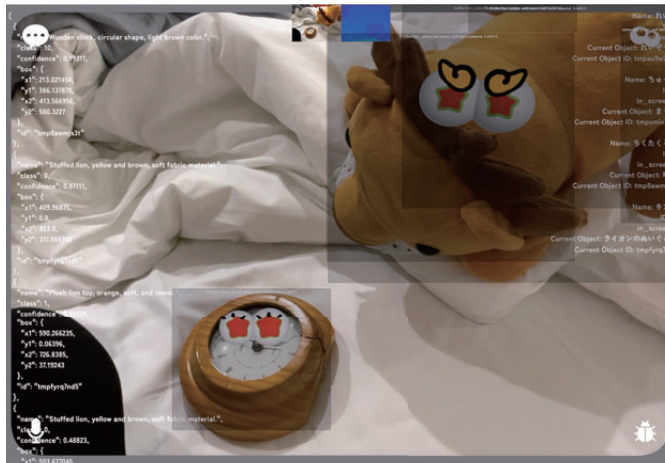


図7：登録済みオブジェクトの検出。左下：“Wooden clock, circular shape, light brown color.”, 右上：“Stuffed lion, yellow and brown, soft fabric material”

オブジェクト検出ではYOLO-Worldを用いて入力画像からバウンディングボックスを獲得する。YOLOWorldでは、登録されたオブジェクトのラベルを用いたクロスモーダル推論により、固定クラスラベルに依存しないオブジェクト検出が実現される。従って、オブジェクトに関する画像を大量に用意する必要もなく、モデルの追加学習が不要である。これにより、ユーザーはオブジェクトの登録からモノッコの可視化まで即座に実行可能である。また、オブジェクトについて複数のラベルを用意することで、ある程度頑健な検出が可能であることを確認した。

3.4 会話システム

本プロジェクトでは、図8に示す仕組みでモノッコと対話可能であり、モノッコ同士の会話も行われる。具体的には、ユーザーが入力する文章について、モノッコのキャラクターを反映したLLMエージェントが応答を行う。プロンプトは、モノッコのペルソナおよび個々のキャラクターに設定されている取り憑くオブジェクト、性格や過去の思い出等の情報を用いて記述されている。

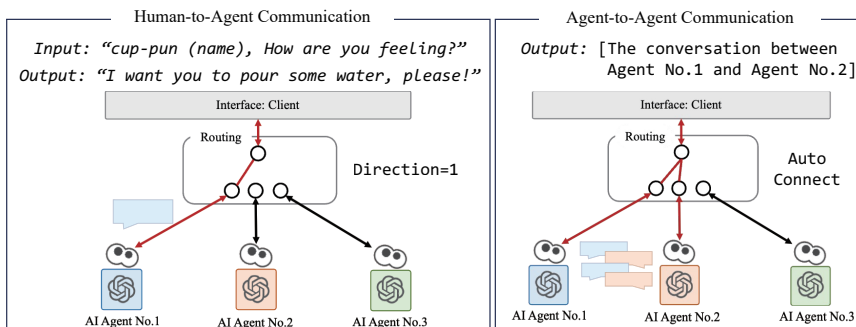


図8：会話システム概要。左：ユーザーによるモノッコの応答生成。右：モノッコ同士の会話生成。自動で対応するエージェントが選択される

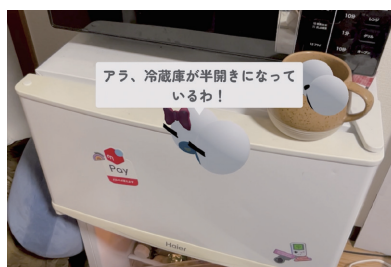


図9：冷蔵庫に取り憑くモノッコの応答例。入力：「今、冷蔵庫が開いたままです。」

例えば、図9に示すモノッコは冷蔵庫に取り憑いており、設定された話し方の特徴に合わせて応答が生成されている。また、ユーザーの与える文章のコンテキストを理解して、あたかも本当にその場にいるような、その物自身が話しているような体験を生み出せる。

ユーザー体験の品質向上のため、モノッコ同士の会話については、過去の会話に基づき自律的に停止する処理と会話履歴の外部評価により打ち切る処理を用意している。これにより、ユーザーが興味を失うほどに重複したトピックが続くことを未然に防ぎ、程よいタイミングで会話を締めくくることが実現している。

3.5 キューブン

「キューブン」は、Monokko システムの世界観を深化させ、ユーザーとモノッコの関係性を豊かにする専用デバイスである。Raspberry Pi 5を基盤とし、マイク、スピーカー、タッチディスプレイを搭載している。箱状のキャラクターとして設計され、3Dプリンタで製作されたプラスチックカバーを装着し、中央に目玉表示、右上にフキダシ表示を設けている。ユーザーがタッチすると内部プログラムが起動し、音声合成で呼びかける（図10）。録音・文字起こしされた会話はモノッコのバックエンドシステムと共有され、エピソードや思い出として蓄積される仕組みである。



図10:キューブン操作の流れ

4 従来の技術との相違

モノに一切の加工をせずエージェント化することができる点は、本システムの大きな特徴である。また、会話システムのみならず、触覚的な「撫で」インタラクションを、最新の Object Tracking 技術を導入して実装したことで、モノのエージェントと交流するという体験の質をより一層高めている。さらに、本システムの特徴として、システム独自の世界観を持っている点が挙げられる。これにより、技術的な部分と同時に世界観を深めていくことで、システムの質向上が行われている。

5 期待される効果

まず、チャットボットによる会話と「撫で」アクションへの反応で、ユーザーが自然にモノに興味や愛着を持つ行動が促進される。これにより、モノは単なる操作対象や情報ツールではなく、ユーザーのライフスタイルに溶け込み、感情や記憶と結びつく「パートナー」として機能することが期待される。

また、本システムは物理的なモノにデジタルな付加価値を付与し、従来の家電やツールでは得られなかったエンターテインメント性やコミュニケーションの幅を実現する。ユーザーは、普段使用するモノが生きたキャラクターのように振る舞い、親しみやすい会話や触覚的反応を示すことで、生活空間全体が温かみのあるものになり、行動や感情にポジティブな影響を受けると期待される。

さらに、デジタルとフィジカルの境界を意識せず、自然にエージェントと対話・触れ合える体験を提供することで、未来のスマートホームや生活支援システムとしての普及・活用が期待される。

6 普及の見通し

本システムの強みは、体験の面白さと可愛い世界観にあるため、特に若年層や家族、さらにはエンターテインメントやライフスタイルに敏感な層へアプローチすることで、広範に受け入れられると期待される。モノに加工を施すことなくそのままエージェント化できる柔軟なアプローチにより、XR技術の普及に後押しされる形で、既存の生活空間にシームレスに溶け込んで行ける可能性が高い。加えて、本プロジェクトで構築した独自の世界観は、XRアプリケーションとしての利用に留まらず、マルチメディア展開やキャラクターグッズ、さらにはコンテンツとしての拡大展開も視野に入れたブランド戦略と連動し、幅広いマーケットへの普及を狙う戦略も考えられる。

関連URL

ティザーサイト：<https://www.monokko.com/>

ソースコード：<https://github.com/monokko-project5/5>

近況

「Monokko」プロジェクトは九州大学所属の3人で実施したが、未踏修了後はそれぞれ異なる道へと歩みを進めている。リーダーだった後藤は未踏ITの同期と組んで未踏アドバンス事業に採択され、ReMENTIA株式会社を共同創業して認知症向けバーチャルヘルパー「Tomori」を開発する傍ら、九州大学芸術工学部に所属して人間と非人間エージェントの相互作用について研究を行い、博士課程への進学準備を行っている。メンバーの大塚は、生業であるゲーム・インタラクティブコンテンツの開発を続ける傍ら東京藝術大学大学院へ進学し、ゲーム文化と表現の持つ可能性について探究すべく勉学に励んでいる。同じくメンバーの石山は、未踏期間中は専門であるCV技術を活かしてプロジェクトを支えた。現在は九州大学大学院博士後期課程でCV技術を用いてグラフィックデザインや記号認識を計算論的に理解する研究に没頭している。

PMの評価

採択時の評価

ユーザーが自由に創作できるエージェントを生活の中に取り入れるシステムであり、八百万の神の実体化ともいえるプロジェクトである。同様の発想のプロジェクトはこれまでも多数提案されているが、絵心のあるクリエイターによるかわいく魅力的なキャラクターデザインと、ユーザーの行動変容にしっかりつながられるチャットAIとしての発展を期待し採択とした。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、従来技術との差別化ポイントとして、モノに一切の物理的加工を施さずにエージェント化できる点が特筆される。これにより、既存の生活空間にシームレスに導入可能な拡張現実体験を実現している。また、最新の Object Tracking 技術を活用した「撫で」インタラクションの導入は、モノとの触覚的な交流を可能にし、体験の質を大幅に向上させている。

技術面では、複数のデバイス向けに最適化されたアプリケーションの開発、クロスモーダル推論による柔軟なオブジェクト検出、特定のキャラクター設定に基づいた会話生成など、先進的なアプローチが見られる。特に、ユーザーによる登録から「モノッコ」の可視化までのワークフローの即時性と、複数のラベルを用いた頑健な検出の実現は評価に値する。

ユーザー体験の設計においても、モノッコ同士の会話品質向上のための自律的停止処理や外部評価による調整機能など、細部まで配慮されている。また、システム独自の世界観を構築し、技術的側面と世界観の双方を深化させる戦略は、単なる技術デモを超えた完成度の高いプロダクトへと昇華させている点も評価できる。

チームメンバー間の連携も円滑に行われたようであり、プロジェクト実施体制に関しても評価できる。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業 バーチャル空間における飛翔体験の構築 -人間が翼を持つには-

谷澤健太 甲斐貴一朗 酒井鴻（九州大学）

目的

自分の体から翼を生やして空を飛ぶ

手法

4つの体験を順に行うことで翼が身体から生えている感覚を生成し、バーチャル空間で自分の翼を得る



物理身体 + 物理翼

背中から生える
物理的な翼を
動かし目視で確認



物理身体 + 仮想翼

ディスプレイ上の
仮想の翼を動かし
目視で確認



仮想身体 + 仮想翼

バーチャル空間
上の自分の翼を
鏡越しに確認



飛翔体験

飛翔体験

バーチャル空間における飛翔体験の構築

谷澤 健太（九州大学）

甲斐 貴一朗（九州大学）

酒井 鴻（九州大学）

1 背景

人々は昔から空への憧れを抱いてきた。特に自分の力で空を飛ぶという欲求は強く、例えばハンググライダーはその場の風を感じながら適切に体を動かし飛行を楽しむことができるが、その危険性と必要な練習量などに課題があり、一般に普及していない。それに対してVR空間で自分の力で空を飛ぶ研究、プロダクトも数多く考えられ、これらは実際に自分の手や体を用いて空中を移動している感覚、映像を提示することができている。これらのプロダクトは「ものに乗って空を飛ぶ」、「腕を振って空を飛ぶ」体験に特化しており、「自分の体から翼を生やして空を飛ぶ」体験を行えるシステムはまだない。

2 目的

本プロジェクトでは、「自分の体から翼を生やして空を飛ぶ」体験を構築することを目的としている。自分の体から翼が生えている感覚を得るためには自分の身体像を拡張する必要がある。身体像とは、自己の身体各部位とその相互の関係に関するイメージであり、人間はそれを知覚することで、自己とそれ以外を区別することができるが、特定の条件下でそれを外部へと拡張することができる。この理論を用いることで「自分の体から翼を生やして空を飛ぶ」体験を構築することができると考えられる。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、「自分の体から翼を生やして空を飛ぶ」体験を構築するために以下の4つの体験を構築した。

- ・現実空間で現実の翼を操作する感覚を提示するためのシステム
- ・現実空間で仮想的な翼を操作するためのシステム
- ・バーチャル空間で仮想的な翼を操作するためのシステム
- ・バーチャル空間で翼を操作することにより飛翔体験を行うためのシステム

3.1 現実空間で現実の翼を操作する感覚を提示するためのシステム

現実空間で現実の翼を操作し、そのフィードバックを行うためのシステムを構築した。翼の操作は主に腹直筋の筋電位により行い、フィードバックは視覚情報と触覚情報について行った。センシング、フィードバックシステムについては以下のような鳥の翼に関する筋肉と翼の構造をもとにして、仮想的な筋肉と翼の配置を考案した（図1）。

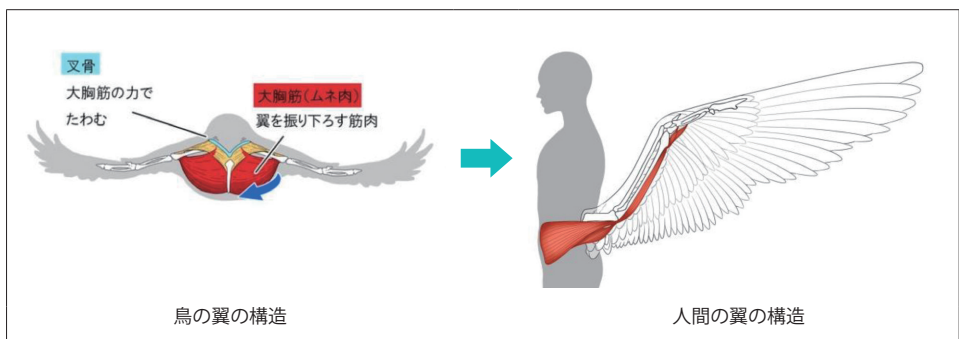


図1：人間に仮想的に生えた翼の構造

この仮想的な筋肉の収縮感、翼の駆動感、翼の受ける力覚を提示する以下のようなベルト状のハードウェアを製作した（図2、図3）。

翼デバイスはサーボモーターと振動モーター2つで構成されている。サーボモーターを駆動させることにより、皮膚を牽引し翼が動いている感を提示する。また、振動モーターを駆動させることによりそれぞれの翼にかかる外力をユーザーへ提示する。

筋肉デバイスは包帯の内側にボタン型の振動アクチュエータを接着している。翼を駆動するための仮想筋肉の収縮を振動により表現する。

また、視覚的にユーザーへ翼の動きを提示するために物理的に操作する翼をデバイスに取り付けている。この翼はユーザーが後ろを振り返ることにより目視で確認できる。

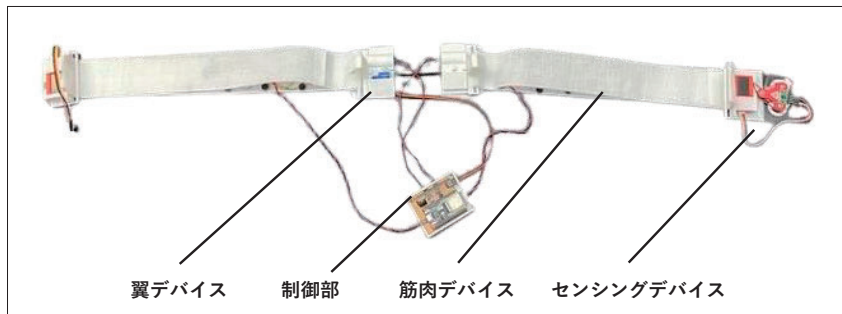


図2：ハードウェアの全体図



図3：デバイスの装着時の様子

3.2 現実空間で仮想的な翼を操作するためのシステム

ユーザーに中で拡張された物理的な翼の身体像を仮想的な翼へと適用させるために上記と同じ操作で物理空間における仮想的な翼を操作するシステムを構築した。このシステムは上記の物理デバイスと、カメラ付きPC、表示用のディスプレイ、専用のパーカーにより構成される(図4)。



外から見た様子



ディスプレイの映像

図4：物理空間における仮想翼の表示

専用のパーカーにはQR マーカーが印刷されており、カメラ付きPCはそのQR マーカーを認識してディスプレイにユーザーの背部から生える翼とその翼を操作するための仮想的な筋肉を表示する。この翼と筋肉はユーザーの腹直筋の筋電位と連動して動作し、触覚と同時にユーザーへ視覚的なフィードバックを行う。

3.3 バーチャル空間で仮想的な翼を操作するためのシステム

仮想的に翼を持ったユーザーの現実な身体をバーチャルなものに拡張するためにデバイスとHMD を使用したシステムを構築した。

アプリケーションを起動したユーザーはバーチャル空間上で部屋の中に設置されている鏡の前で翼の羽ばたき動作やその他の身体を動かす動作を行い、これによりバーチャル空間内の翼を持つ人型アバターに対して存在拡張を行う（図5）。



図5：バーチャル空間内の翼を持った人型アバター

3.4 バーチャル空間で翼を操作することにより飛翔体験を行うためのシステム

空中で自分から生える翼を操作して飛翔を行うシステムを構築した（図6）。翼を羽ばたかせることで上昇を行い、体の姿勢を変化させることで滑空中の制御を行う。センシング部は体の姿勢のyaw 軸とpitch 軸、腹直筋の筋電位を取得してWi-Fi上のMQTT ブローカーを介してサーバーPCへと送信される。



図6：バーチャル空間における飛翔の様子

飛行時のキャラクターの挙動とユーザーの飛行時に翼にかかる力は、IMUのデータを元に独自のシミュレータにより計算している。

デバイスの制御部はサーバーPCからデータを受け取り、それぞれのアクチュエータを駆動させる。羽ばたきに対する触覚提示は上記と同様に行い、滑空時には翼が受ける力に応じて筋肉デバイス、翼デバイスの振動モーターを駆動させる。

また、ユーザーがこれら一連の体験をまとめて行うことができるような、図7に示す通信設計を行った。

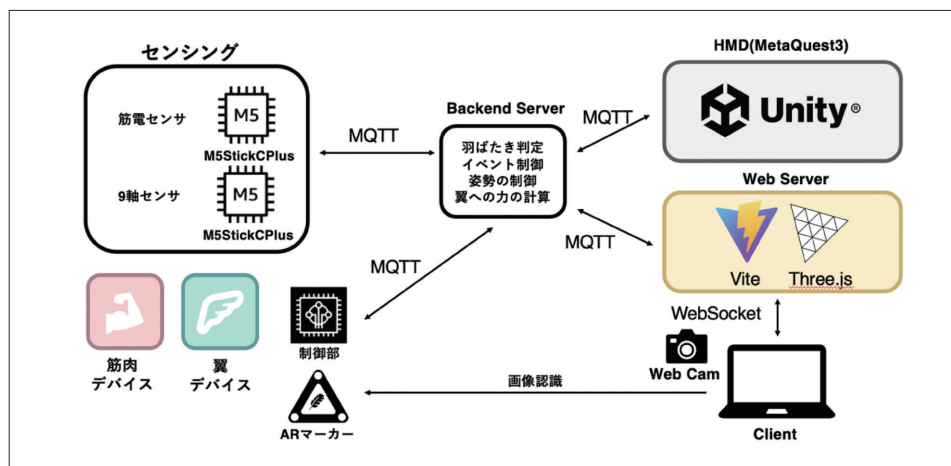


図7：システム全体の通信設計

一連のシステムはこのようになる。各触覚デバイスの制御を行うマイコンは起動と同時にWi-Fi経由でバックエンドサーバーとのMQTT通信を試みる。これに失敗した場合にBluetooth通信をセンシング部分のマイコンと行う。これによりバックエンドサーバーを介さずに現実空間で現実の翼を動かす体験をデバイスのみで行うことができる。また、この体験はバックエンドサーバーが起動しており、MQTT通信が可能であった場合でも同様に行うことができる。現実空間で仮想的な翼を動かす体験を行う場合、クライアントとなるPCでWebアプリケーションを起動する。起動時にMQTT通信を開始し、各種デバイスとクライアントとなるPCはバックエンドサーバーを介して接続される。その後のHMDを用いた体験を行うとき、HMDにインストールされているアプリケーションを起動する、起動時にHMDはWi-FiによるMQTT通信を開始し、起動時にMQTT通信を開始し、各種デバイスとHMDはバックエンドサーバーを介して接続される。このようにサーバーPCを中心とする通信設計をすることで複数のデバイスを用いたシステムを並行して処理することを可能とした。

4 従来の技術（または機能）との相違

従来は、主に関節運動を伴う動作を元としてバーチャルでの飛翔体験を構築していた。それに対して本プロジェクトでは身体像そのものを拡張させ、身体に生えた翼を用いて空を飛翔する体験を構築した。

■ 5 期待される効果

本プロジェクトによるバーチャル空間における身体像の容易な拡張を行う UX は、翼以外の拡張部位に対しても有用と考えられ、この技術に応用することでさまざまなバーチャル空間でのアバター、体験設計を可能にする。これにより、学術、産業問わず身体と VR の分野に大きな影響を与える。

■ 6 普及（または活用）の見通し

VR ゲームの制作による製品化考えている。現在、VR アーケードゲームは普及しつつある中で、本プロジェクトによる身体像を拡張させた VR ゲームを制作することで、VR でなければできない体験を構築し、業界の発展に寄与する。

近況

未踏で取り組んだプロダクトを元に、展示会や論文への打ち出しを行っています。谷澤は博士課程へ進学し HCI の研究を、甲斐は就職してソフトウェアエンジニアへ、酒井はゲーム会社に就職し、未踏で得た経験を元にそれぞれ他の道に進んでいます。

PMの評価

採択時の評価

空を飛ぶたいという人類の夢は航空機の登場により実現した。しかし鳥になったかのように自由自在に飛ぶ体験にはほど遠い。本プロジェクトは空を飛ぶVRという、古くて新しい課題に対して真正面から取り組もうとしているが、体験者の意図を動作に反映させるためのシステム構成と、VRにとどまらない新たな操作系として発展する可能性を期待し採択とした。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、従来の身体拡張研究と一線を画す独創的な取り組みである。多くの「空を飛ぶVR」体験が腕を振る動作や乗り物に乗る体験に焦点を当てているのに対し、本プロジェクトは「自分の体から翼を生やして空を飛ぶ」という新たな体験を構築している点が極めて斬新である。

技術的な観点からは、腹直筋の筋電位センシングとその処理アルゴリズムの洗練さが評価できる。特に、筋電データの前処理や移動平均フィルタの適用、力みと緩みの適切な判定など、生体信号の取り扱いに工夫が見られる。また、翼デバイスの設計においても、皮膚の2点弁別閾^{いき}を考慮した振動モータの配置など、人間の知覚特性を踏まえた設計がなされており、学術的な深みがある。

実装面では、バーチャル空間のフライトシミュレーションが特筆に値する。重力、揚力、抵抗力、はばたき力という4つの力のバランスを調整し、初心者でも操作可能でありながら、飛翔の爽快感を損なわない制御システムを実現している。また、体験会での被験者からの「笑ったときに筋電が反応したことで翼を動かすコツを掴んだ」という感想が示すように、ユーザーにとって直感的な操作感を実現することに成功している。

デバイス開発の変遷を見ると、初期のプロトタイプから多くの改良を重ねており、使用感と装着性を向上させるための試行錯誤の跡が見られる。このようなイテレーティブな開発プロセスが、最終的な体験の質を高めることに貢献したと評価できる。

最大の魅力は「人」

クリエイターみなさんに、未踏の魅力について聞きました。

●刺激的な人に出会えた

未踏に参加してよかったと一番感じているのは、刺激的な人にたくさん出会えたことです。期間中は、志の高い同期や未踏関係者と関わる中で、いい刺激をもらえました。その影響は修了後も続いていて、同期の活躍を見ると自分も頑張ろうと思えますし、入社先にも未踏出身者が数人いて、意気投合して一緒に開発を進めています。こうしたつながりが今も続いていることを、素直にありがたいと思っています。(青原 光)

●味のある人間が集まる

未踏のよいところは、PMもクリエイターも含めて「味のある」人間が多いことだと思う。「味のある」の意味するところは、こちらから噛みついた時に得られるものがあり、一方的に舐めて終わることができない(舐めるだけではもったいない)人たちだということだ。そういう人たちとの相互作用に巻き込まれる場所に身を置けたことが、未踏を通してよかったことだと感じる。特に未踏ITに関しては、同世代が集まっているということもあり、事業修了後もその相互作用が効果的に続いているように思う。(後藤 汰誓)

●貴重な同期と先輩の存在

未踏で得られるものは、普通に生活して得られるものと比べて大きな意味を持つように感じます。もちろん金銭面での支援はうれしいものですが、それよりも大きいのは同期とコミュニティの存在です。苦しみ・楽しみながらも切磋琢磨する、同じ方向を向いて開発を進める同期の貴重さは計り知れないものがあります。また、それら同期や、期間中にアドバイスをくれる先輩方との繋がり是一生続きます。私にとって、10代の貴重な1年を消費して命を燃やした未踏は「青春」そのものです！(伊組 烈火)

●PMと仲間がプロジェクトの推進力に

開発にどっぷりと浸かれた日々は非常に充実していました。個人などでプロジェクトをやるには学業や仕事などがあるとおろそかになってしまい、開発が遅々として進まないこともあります。PM、そして同チームの三輪さんにも引っ張っていただき力強くプロジェクトを推し進めることができました。9ヶ月とは思えないほど濃厚で一瞬で過ぎ去ってしまった未踏ですが、数えきれないほどの刺激を受け、全くの別分野を探索する多くの友人もできました。(高橋 直希)

岡 瑞起 PM 担当プロジェクト



岡 瑞起 (おかみずき)

千葉工業大学 デザイン&サイエンス研究科 研究科長・教授

■プロフィール

研究者。千葉工業大学 デザイン&サイエンス研究科 研究科長・教授/株式会社ConnectSphere 代表取締役。2003年、筑波大学第三学群情報学類卒業。2008年、同大学院博士課程修了。博士(工学)。同年より東京大学 知の構造化センター 特任研究員。2013年、筑波大学 システム情報系 助教を経て准教授。2025年、千葉工業大学 変革センター 主席研究員。2026年より現職。専門分野は、人工生命、ウェブサイエンス。著書に「ALIFE | 人工生命 ーより生命的なAIへ」(ビー・エヌ・エヌ)、「作って動かすALife - 実装を通した人工生命モデル理論入門」(オライリージャパン) などがある。

2024年度は、3つのプロジェクトを採択した。「自分自身と気を交わすためのMRによる剣道稽古システムの開発」(古田花恋)、「認知症当事者の意思決定支援のためのエージェントシステムの開発」(宮下拓磨)、「ニューラル言語モデルによる個人最適な日本語入力システムの開発」(三輪敬太・高橋直希)の3つである。

各プロジェクトは、実証実験やプロトタイプ開発を通じて、ユーザーからのフィードバックを得ながら改善を重ねた。特に、三輪・高橋のプロジェクトでは、ニューラル言語モデルを用いたかな漢字変換システムの実用化という、これまであまり例のない領域に挑戦し、オープンソースとして公開できる実用レベルの成果を達成した。また、宮下のプロジェクトでは認知症当事者の生活を支援するエージェントシステムを、古田のプロジェクトでは最新のMR技術を剣道の練習に活用するシステムを開発し、それぞれ社会的意義の高い取り組みを行った。



2024年度未踏IT人材発掘・育成事業
自分自身と気を交わすためのMRによる剣道稽古システムの開発
～稽古相手は自分。自分と気を交わそう。～
古田花恋（筑波大学 情報学群 知識情報・図書館学類 B4）

自分自身を相棒にした剣道の稽古
剣道では老若男女と剣を交わすことができるが、この世でひとりだけ絶対に戦うことができない相手がいる。それは自分自身である。自分自身との稽古を通して、心から強くなることを目指す。

剣道における“気”
剣道において“気”は規則にも取り入れられている重要な概念である。視覚・聴覚・触覚に着目した実装により、MR(Mixed Reality)を活用した世界においても、剣道における“気”を表現する。

MRを用いてダブルゲンガーと剣道の稽古をした10日間の記録



自分自身と気を交わすためのMRによる 剣道稽古システムの開発

古田 花恋（筑波大学 情報学群 知識情報・図書館学類 B4）

1 背景

剣道の稽古では、老若男女と剣を交えることができる。しかし、一人だけこの世で剣を交えることができない相手がいる。それは自分自身である。しかし、剣道では「自分に打ち勝て」「本当の敵は自分だ」という言葉を用いて指導することがある。この言葉は、自分の持つ弱い気持ちに流されずに戦い抜くことを示している。つまり、本当に戦っているのは向かい合う相手ではなく、紛れもなく自分自身なのである。このように、剣道は相手を自分の鏡にして自分自身を成長させる「人間形成の道」である。

また、剣道の規則では「有効打突は、充実した氣勢、適正な姿勢をもって、竹刀の打突部で打突部位を刃筋正しく打突し、残心あるものとする。」と明記されている。つまり、剣道では選手が充実した氣勢をもつことがルールとして定められ、合意形成されている。

2 目的

本プロジェクトの目的は、以下の3点である。

- 自分自身と剣道の稽古をすることができるMR剣道稽古システムを開発する。
- 複合現実における気の表現方法の一例を示す。
- オートエスノグラフィーの公開、展示、体験会を通して、人々に新たな視点を提供する。

3 開発の内容

3.1 MR 剣道稽古システム

開発したMR剣道稽古システムを利用する際のユーザーの装備を図1に示す。本プロジェクトでは後述する、クリエイターである古田を模したデジタルヒューマン「古田モデル」を作成した。ユーザーはそれと対峙し、剣道の稽古を行うことができる。ユーザーは図2に示すように、古田モデルが繰り出す技をMR空間上の空間キーパッドから指示することができる。

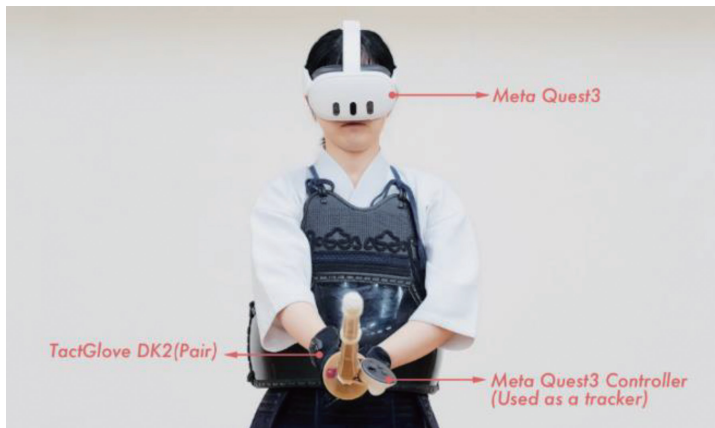


図1：ユーザーの装備



図2：空間キーパッドによる指示

開発工程の全体像を図3に示す。自分自身と剣道の稽古ができるのはクリエイターである古田のみである。そのため、その他のユーザーがシステムを体験する際には、古田モデルと稽古を行うことになる。各ユーザーが自分自身と剣道の稽古をするためには、まずそのユーザーのデジタルヒューマンを作成する必要がある。

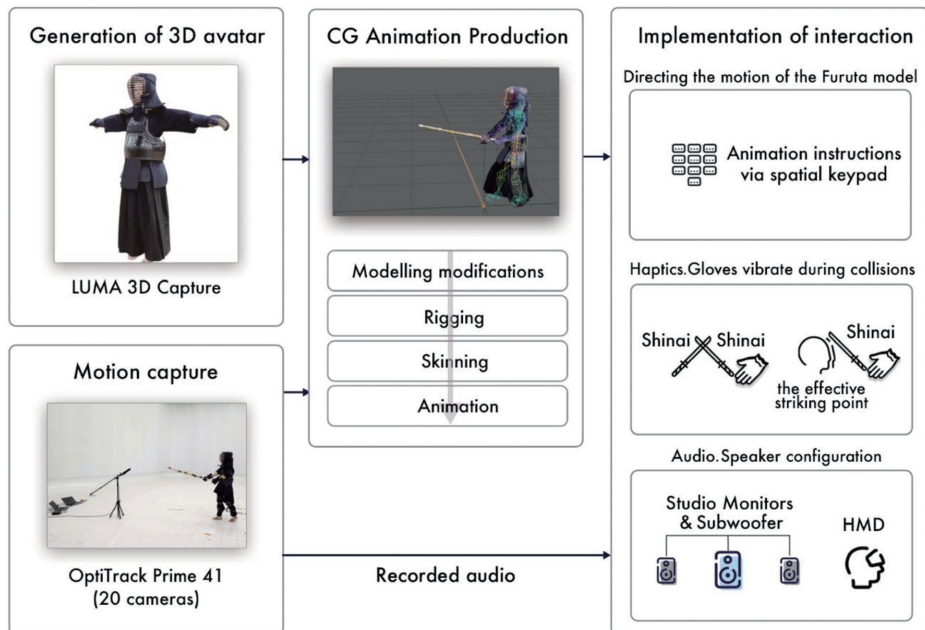


図3：開発工程の全体像

3.2 視覚情報に着目した実装

見た目には、「気」に関連する重要な要素が詰まっている。剣道では、防具や剣道着の着こなしや、立ち姿からその人の強さや気迫が伝わることもある。視覚情報が与える印象を損なうことがないように、リアリティの高い見た目・動作をする古田モデルの実装を目指した。

古田モデルの作成では、まずLUMA3D Captureを用いて古田の全身を3Dモデル化し、CGアニメーションソフトウェアMayaを用いて3Dモデルの修正とモーションデータを適応させるための準備を行った。モーションデータは光学式モーションキャプチャーシステムOptiTrack Prime 41を20台用いて取得した。モーションキャプチャーの際には、古田自身がアクターを務め、人体と竹刀に対して図4（左）に示すように反射マーカを貼った。そのようにして完成した古田モデルが図4（右）である（図では骨格が可視化されているが、システム上では非表示にしている）。

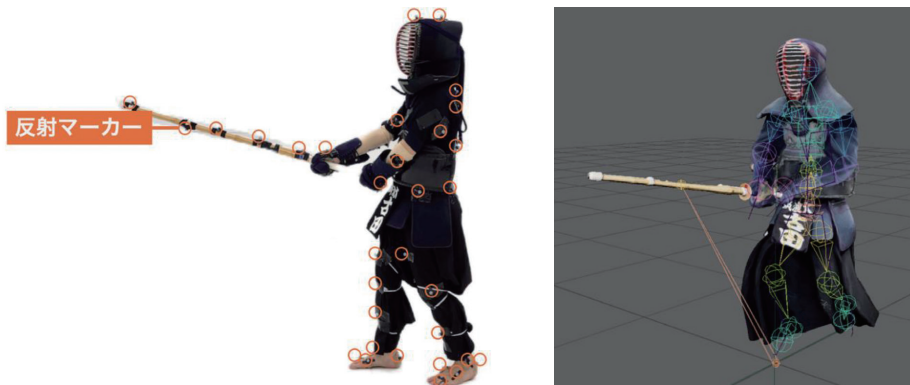


図4：アクターに反射マーカ―を貼った様子（左）、Maya 上で修正した古田モデル（右）

3.3 聴覚情報に着目した実装

氣勢（発声）には心の内が表れやすい。発声に留まらず、呼吸や踏み込み音などの聴覚情報は剣道の「場」を形成する重要な要素である。これを伝えるために、計4台のスピーカーを利用し、音声を出力している。音響システムの構成を図5に示す。

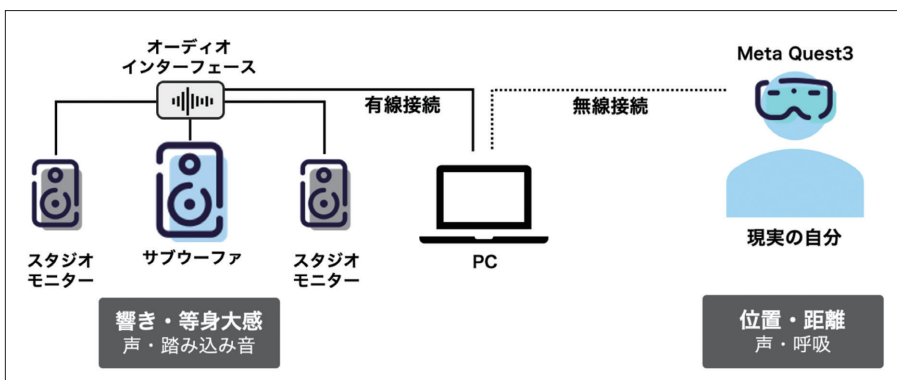


図5：音響システムの構成

3.4 インタラクションに着目した実装

1 触覚情報

古田モデルが持つ仮想竹刀や古田モデルの有効打突部位には、コライダーが付いている。ユーザーが制御する竹刀にもコライダーが付いており、これらが衝突した際には、ユーザーが両手に装着しているグローブが振動するフィードバックを実装している。振動によって、打突の感覚を視覚だけでなく触覚でも体験できる。

2 「機」のデザイン

後述する体験会で行ったユーザーインタビューにて、より強い動作インタラクションが求められる声が挙がった。これを受けて、ルールベースで古田モデルが技を繰り返す機能を開発した。

技を繰り出す“機”会と、剣道における“気”には関連があることから、この機能を実装することにした。古田モデルが技を繰り出すタイミングについて、主に追加したルールは以下の2つである。

① ユーザーが技を出した際に技を繰り出す

剣道では技を出す際に竹刀が上下に素早く動く。竹刀の動きをコントローラーの回転の変化量から検出し、ユーザーが技を出したタイミングで同時に技を繰り出すようにする。

② 竹刀が相手の中心を取った際に技を繰り出す

剣道では剣先が相手の中心を取るようにして動作する。中心を取ったタイミングを、ユーザーの竹刀の向きと古田モデルの竹刀の向きの内積を利用して検出する。内積が閾値を超えた場合、お互いに中心を取ったと判定し、古田モデルが技を繰り出すようにする。

3.5 外部への成果公開

2024年12月14日に開催されたSecHack365 Returns2024というイベントで本システムの体験ブースを設けた。イベントの来場者数は全体で130名程度であり、体験者は約9名である。体験ブースではポスター展示とプロモーション映像の公開を並行して行い、システム体験者を対象としたヒアリングも行った。

また、クリエイターである古田が本システムを用いて自分自身と剣道の稽古を行った10日間の記録を、オートエスノグラフィーとしてWeb上に公開している。

4 従来の技術（または機能）との相違

これまでに発表されているXR技術を活用した剣道・剣術システムにおいて、剣道特有の精神性や「気」に深く着目した事例は確認できなかった。本プロジェクトでは、剣道における精神性や「気」という概念を重要視した上で、MR技術を活用した稽古システムの構築を目指している点が大きな特徴である。

さらに、「自分自身」を模したデジタルヒューマンとの稽古を通じて、過去の自分と対峙し、精神的な成長機会を提供するという新しいアプローチを導入している。過去の自分と戦うというテーマを扱った研究はいくつか見られるが、剣道の文化的・精神的側面を重視し、それをインタラクション設計やビジョンに反映している点で、本プロジェクトは従来の研究と本質的に異なるアプローチをとっていると言える。

5 期待される効果

本システムを活用することで、ユーザーは自分自身を客観視する力を養い、精神的な成長につなげることが期待できる。また、熟達者の経験則として捉えられがちだった「剣道における気」という感覚的なものを表現した試みは、新たな視点から武道への理解を深めることにつながるだろう。さらに、剣道は日本国内では盛んに行われているものの、海外ではまだ十分に普及していないのが現状である。本プロジェクトを国際学会等で発表することにより、剣道の国際的な認知度を高め、普及を促進することが期待される。

6 普及（または活用）の見通し

2025年3月に開催される未踏会議2025での展示をはじめとして、各種展示会での出展や国際会議で本システムの体験を提供する予定である。さらに、Web上に公開しているオートエスノグラフィーでは、自身を模したデジタルヒューマンとの関係性や、自己認識、デジタル化された「気」など、自身との対峙を通して得た知見を共有している。

関連URL

本プロジェクトのオートエスノグラフィーを公開している Web サイト：

https://note.com/karen_furuta/n/na25121520515

論文情報：

<https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/2025/07/discipline-together-with-the-self-in-kendo/>

近況

未踏期間中に投稿した論文がSIGGRAPH 2025 Art Papersに採択され、バンクーバーにて発表を行った。また、2025年日本国際博覧会・参議院議員会館・AXIS Galleryなどでの展示やデモンストレーションを通じて、プロダクトを広く発信してきた。一部イベントでは、全日本剣道連盟「剣道未来プロジェクト」による後援を受けている。さらに、「剣窓」「剣道時代」「月刊武道」といった一般向け雑誌への寄稿やメディアインタビューを通じて、成果を広く社会に届けてきた。

加えて、第4回スポーツ情報学研究会における「剣道と情報学に関する特別セッション」での講演をはじめ、他学会での招待講演も予定されている。現在も武道に関する研究開発を継続しており、継続的な発信活動を通じて武道コミュニティに受け入れられ、支えられながら活動を前進させている。



五十嵐 P M

稲見 P M

岡 P M

落合 P M

曾川 P M

竹迫 P M

田中 P M

PMの評価

採択時の評価

伝統文化である剣道と最新のMR技術を融合させ、新しい練習方法を提案する点を評価した。

技術的革新性と社会的インパクトを兼ね備えており、提案者の情熱と成長の可能性が感じられた。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、伝統文化である剣道と最新のMR技術を融合させるという独創的なアプローチが高く評価できる。特に、「気」という抽象的な概念を再現するための試みは、伝統と技術の新たな接点を模索する意欲的な取り組みであり、文化的・技術的に意義深い。

開発プロセスにおいては、単に技術ありきではなく、剣道の本質や「気」の意義を文献調査や剣道経験者へのヒアリングを通じて丁寧に掘り下げた点が特筆に値する。技術と文化の双方に対する深い理解に基づいたシステム設計は、ユーザーである剣道経験者からも高い評価を得ている。

技術面では、OptiTrack Prime 41を用いた高精度なモーションキャプチャシステムを使い、古田氏自身の精巧な3Dモデルを構築したことや、Meta Quest 3のパススルー機能を活用したMR環境の実現など、複数の先端技術を組み合わせて統合的なシステムを構築した点が評価できる。特に、竹刀の動きをリアルタイムで捉えるためのコントローラトラッキング機能は、剣道の稽古における実用性を高める重要な要素となっている。

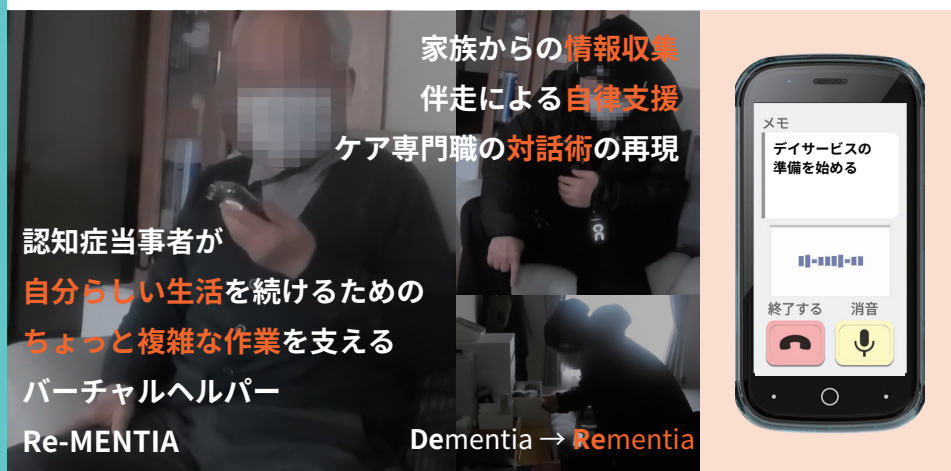
一方で、MRデバイスの装着感や長時間使用時の快適性など、実用化に向けた課題も残されている。しかし、プロジェクトの過程でユーザーからのフィードバックを積極的に取り入れ、継続的に改善を行ってきた姿勢は、今後の発展に期待を抱かせるものである。

SNSでの発信や各種イベントでの展示を通じて、多くの人々に本システムの価値を伝える努力も行われており、技術開発にとどまらない社会的インパクトの創出も評価に値する。特に、SecHack365 Returns 2024での発表は、専門家や一般参加者から高い関心を集め、本プロジェクトの社会的意義を広く認知させる機会となった。

総じて、本プロジェクトは伝統文化と先端技術の融合という難しいテーマに挑戦し、一定の成果を上げたことで、今後のMR技術の文化的応用の可能性を広げる先駆的な取り組みとして高く評価できる。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業 宮下拓磨（北海道大学工学部）

認知症当事者の意思決定支援のためのエージェントシステムの開発 自立支援エージェント Re-MENTIA



認知症当事者の意思決定支援のための エージェントシステムの開発

宮下 拓磨（北海道大学 工学部）

1 背景

認知症は、介護保険法第5条の2第1項において「脳血管疾患、アルツハイマー病その他の要因に基づく脳の器質的変化により、日常生活に支障を生じる程度にまで記憶機能およびその他の認知機能が低下した状態」と定義されている。世界保健機関（WHO）によると、世界の認知症有病者数は現在約3,560万人であり、2030年には6,570万人まで増加すると推定されている。その中でも、アルツハイマー型認知症（AD）と脳血管性認知症が最も多く、認知症全体の約80%を占めている。

ADが中等度まで進行すると、海馬や前頭葉の萎縮による記憶障害や失行といった中核症状に加えて、周辺環境の影響により慢性的な不安や徘徊といった行動・心理症状（BPSD）が顕著になる。さらに、身体機能が保たれている段階においても計画の立案や実行順序を考える能力が低下し、洗濯や買い物、服薬管理といった手段的日常生活動作（IADL）の実行が難しくなることがある。特に要介護1程度の段階では、身体機能は維持されているものの、上手くできていないという状態に陥りがちである。

五十嵐 P M

稲見 P M

岡 P M

落合 P M

曾川 P M

竹迫 P M

田中 P M

このような課題に対し、認知症ケアでは「自立支援」が注目されている。自立支援とは、支援者が認知症当事者の不安や状況を理解し、本人が持つ能力を引き出しながら、適切なタイミングで必要な情報を提供し、段取りの補助や不安軽減を図るものである。しかし、こうした支援を行うためには熟練したケア技術と多くの時間・労力が必要となる。この自立支援は支援者への時間的・精神的負担が大きく、ケアの現場では、「要介護1の認知症当事者のケアは、要介護5の全介助よりも負担が大きい」という声も少なくない。

こうした課題を踏まえ、本プロジェクトでは「認知症当事者が持つ能力を活かし、自分の意思やペースで生活を進められるよう支援する」ためのAIエージェントを開発した。本エージェントでは、家族が持つ生活情報を事前に整理し、必要な情報を適切な粒度で提示することで、軽度から中等度の認知症当事者の自立的な生活を支援するとともに、家族や介護職の負担軽減を目指している。

2 目的

本プロジェクトでは、認知症当事者が自立的に日常生活動作（IADL）を遂行できるよう支援する対話エージェントの開発を目的としている。具体的には、家族から収集した日常生活の手順や個別の注意点を大規模言語モデル（LLM）により構造化し、ステップごとの適切な声かけを行うことで、当事者が混乱や意欲の低下なくIADLを実行できるよう支援する。また、家族自身がエージェントの修正サイクルに関わることで、当事者の「できる部分」に気づき、支援への意識や方法を前向きに変えていくためのナッジも期待される。

3 開発の内容

3.1 自立支援対話エージェント

本システムの中核は、家族が提供した日常生活の手順情報をLLMで知識グラフ化し、それをもとにステートマシンを構築して一つずつ行動を促す対話エージェントである（図1）。独自開発のオントロジを導入し、手順や注意点を「Task」「Action」「Activity」といった粒度で分類・構造化した上で、LLMにより適切な状態遷移を自動生成する。これによりIADL支援の対話時に、話の粒度をその都度適切なレベルに調整しながら説明を行うことを可能としている。このデザインにより当事者のワーキングメモリの機能が低下している場合でも、明瞭に情報を伝えることが出来る。

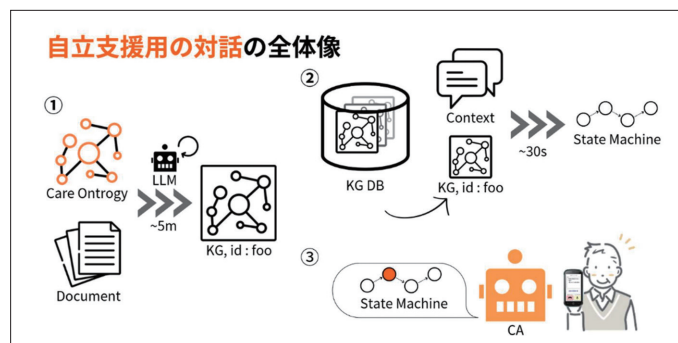


図1：自立支援対話エージェントのシステム概要

対話エージェントはAndroidアプリケーションとして実装し、ホーム画面への誤遷移を防ぐキオスクモードを採用した。要点表示と最小限の操作ボタンに絞ったUIを設計し（図2）、コンパクトなスマートフォンを首掛けストラップで装着する運用を想定している。



図2：開発したAndroidアプリケーションの実際のUI画面

実際の装着例を図3に示す。また、音声応答の遅延による混乱を防ぐため、OpenAI Realtime APIを用いて低レイテンシな対話環境を実現した。さらに、歩行検知機能と連動し、状況に応じて適切なタイミングで行動を促す仕組みを導入した。軽度の認知症当事者であれば、このような段階的インタラクションによって「次にやること」を見失わずにIADLを進められる事が確認された。



図3：首掛けストラップを使用して端末を装着した実際の様子

3.2 連絡エージェント

本プロジェクトでは、家族から自立支援に必要な手順や注意点を効率よく収集するために、LINEを用いた対話型の連絡エージェントを開発した。家族が自主的に構造化された情報を提供するのには心理的・作業的に負担が大きいと、連絡エージェントが事前に設定されたワーク

フローに従い、「洗濯機の注意点」などの質問を段階的に掘り下げる方式を採用した（図4）。

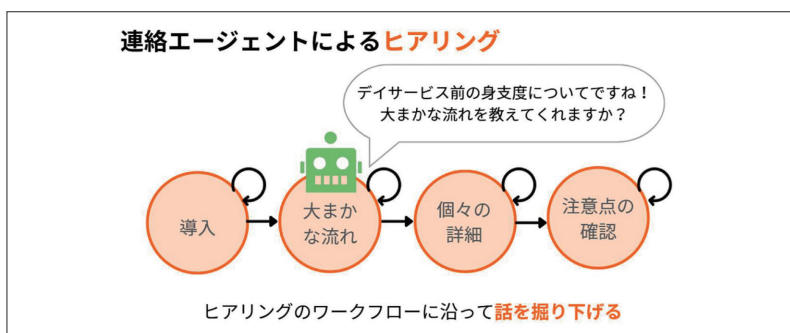


図4：連絡エージェントによるヒアリングのワークフロー概念図

家族は日常的な言葉で質問に答えるだけで、自然に体系的な情報を提供できる仕組みである。収集した情報はLLMを用いたパイプラインにより整理・統合され、自立支援対話エージェントが利用する知識グラフとして生成される。洗濯手順のヒアリングから生成された知識グラフの例を図5に示す。

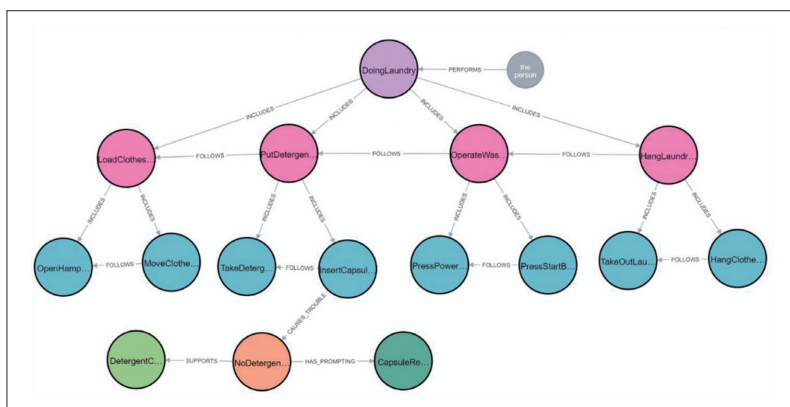


図5：ヒアリング結果に基づいて生成された洗濯手順の知識グラフ

また、自立支援対話の終了後には、エージェントが家族に対して改善が必要なステップを示し、修正案を尋ねる仕組みを導入した。この仕組みにより、ケア手順が現実の状況に即して徐々に更新されることに加え、エージェントからのフィードバックが家族に対し良いケアを行うように促すナッジとして機能した。その結果、家族自身が認知症当事者の「できる部分」に気づき、支援方法を前向きに見直す具体的な変化が複数のケースで確認された。

3.3 ケア技術の再現

認知症当事者の認知機能や言語能力が低下した場合にも円滑なコミュニケーションを行うため、本プロジェクトではケア専門職の「発話調整」と「積極的な傾聴」技術を再現する対話エ

ージェントを試作した。

発話調整については、介護福祉士の読み上げ音声を用いてコーパスを作成し、Style-Bert-vits2をベースに「ゆっくり・柔らかく話す」等の特徴を持つ「アコモデーションTTSモデル」を構築した。元の声質を維持しつつ柔軟に発話調整できることを確認した。

積極的な傾聴については、LLMを用いてクローズドクエスションによる状況推定を行うベイズ推論機構を開発した（図6）。情報ゲインとベイズ更新に基づき最適な質問を段階的に探索する仕組みである。実験では一定の精度が確認されたが、リアルタイム性や自然さの向上が課題となった。今後は、強化学習を用いたエンドツーエンドモデルを導入し、実運用レベルの自然な対話性を目指す。

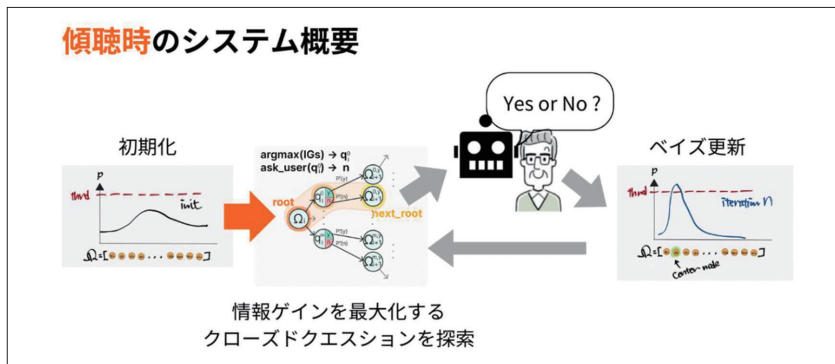


図6：積極的な傾聴のフロー略図

3.4 実証実験

札幌市および砂川市の病院やケアマネージャーを通じ、MCI・要支援1～3の複数の認知症当事者とその家族計5組を対象に、各々約1～2ヶ月間の実証実験を行った。

要介護1程度の当事者では、本システムによる「段階的な声かけ」により、身支度などの日常生活動作がスムーズに進行する事例が多数確認された。一方、要介護3程度の当事者に対しては、対話エージェントの対話性能や行動誘起の面で課題が多く残された。また、家族が連絡エージェントを通じて手順情報を繰り返し調整することにより、「意外とできることがある」と認識を改め、実際の支援方法や環境設定を前向きに改善するケースも複数観察された。

4 従来の技術（または機能）との相違

従来の対話エージェントは、RAGベースの質問応答や雑談が中心であり、一度に多くの情報を提示する傾向がある。しかし、認知症当事者にとっては一度に多くの情報を提示されると混乱や意欲低下を引き起こすことから、段階的かつ少量の情報を適切なタイミングで提供することが重要である。本プロジェクトのエージェントは、事前に知識グラフとステートマシンを活用して1ステップずつ適切な粒度で情報を提示する仕組みを採用している。また、家族が日常的に使用している言葉を元に独自のオントロジを構築・更新することで、言語機能が低下した認知症当事者でも理解しやすい表現を実現しており、認知症アクセシビリティの観点からも従来技術と明確な差異がある。

■ 5 期待される効果

本プロジェクトで実施した実証実験を通じて、要介護1程度の認知症当事者が対話エージェントを活用し、実際に身支度や洗濯などのIADLを自力で遂行できることが確認された。

この成果は、介護人材に限られる現状において、現場で求められる熟練のケアを部分的に代替可能であることを示唆している。当事者が自ら「したいこと」を実際にできることで、本人の自己肯定感や生活の質が向上することが期待される。

さらに、家族が連絡エージェントを通じて積極的に支援手順を調整するプロセスを導入した結果、「本人にはまだできることがある」という認識が家族に広まり、実際に支援方法や環境のポジティブな変化が複数確認された。これにより、家族側の精神的・時間的負担が軽減され、より丁寧で前向きなケアが提供される好循環が生まれる可能性がある。

今後、アクセシビリティや対話の基本性能を向上させることで、認知機能がさらに低下した要介護2～3程度の当事者にも対応範囲を拡げ、ケア支援の影響力をさらに高めていくことを目指している。こうした改善は単なる技術的進展にとどまらず、社会に存在する計算機リソースを活用し、認知症を「生活の終わり」ではなく「個性の一部」として受け入れる社会の構築に寄与することになると考えている。

■ 6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトで開発したシステムは、要介護1程度の認知症当事者において効果が確認されている。今後は対話性能やアクセシビリティの改善を進めることで、要介護2や3など、より認知機能が低下した当事者にも対応範囲を広げることを目指す。現状ではIADL支援とケアに特化しているが、より広範な生活シーンでの活用を視野に入れ、長期間の実生活環境での運用実験をすでに開始している。また、対象ユーザーのITリテラシーが決して高くはないことから、オープンソースソフトウェア（OSS）などの普及経路ではなく、事業化も含めた形での社会実装を目指していく。

近況

未踏修了後、プロジェクトで取り組んだ認知症当事者の生活支援を社会実装するため、ReMENTIA株式会社を創業しました。現在は、在宅介護を行う家族向けに、AI見守り・声かけデバイス「Tomori」を開発・販売しています。Tomoriは、本人への声かけや生活リズムの支援を行いながら、家族がLINEを通じて状況を確認し、必要なサポートを設定できる仕組みです。認知症当事者の自立を支えつつ、家族の不安や介護負担を減らすことを目指し、実家庭での導入と改善を進めています。

PMの評価

採択時の評価

認知症という社会課題に対してAIエージェントを活用した新たなアプローチを提案している点を評価した。

技術的革新性と社会的インパクトを兼ね備えており、提案者の情熱と成長の可能性が感じられた。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、認知症ケアという重要な社会課題に対して、AIエージェント技術を活用した新しいアプローチを提案した点が高く評価できる。特に、「Dementia（認知症）から Rementia（能力の回復）へ」という理念のもと、当事者の残存能力を最大限に活かす支援のあり方を模索した視点は、単なる技術開発にとどまらない社会的な意義を持っている。

開発プロセスにおいては、認知症ケアの専門家や当事者の家族との緊密な連携のもと、ユーザー中心の設計を徹底した点が特筆される。複雑な認知症ケアの現場のニーズを丁寧に掘り下げ、それを技術的に解決する方法を探った姿勢は、社会実装を見据えたプロジェクト運営の模範といえる。

技術面では、家族からの情報収集に基づくパーソナライズと、ケア専門職の対話術を再現したAIエージェントの構築は、認知症ケアにおける個別化されたアプローチを可能にする革新的な試みである。特に、知識グラフを活用して当事者の生活パターンや好みを構造化し、それに基づいた支援を行う仕組みは、本プロジェクトの技術的な核心部分と評価できる。

実証実験の結果から、要介護1程度の認知症当事者の自立支援において一定の効果が確認されたことは、本システムの実用性を示す重要な成果である。特に、デイサービスの準備など、具体的な日常タスクにおける支援効果が実証されたことで、実際の介護現場への導入可能性が高まったといえる。

一方で、より広範な認知症の症状や進行度に対応するための技術的な改良や、長期的な使用における効果検証など、実用化に向けた課題も残されている。しかし、このプロジェクトで培われた認知症ケアと技術の融合に関する知見は、今後の展開に大いに役立つものと期待される。

総じて、「Re-MENTIA」は認知症ケアという社会的課題に対して、技術的なイノベーションと人間中心の設計思想を融合させた優れたプロジェクトであり、今後の高齢社会における認知症支援の新たな可能性を示した点で高く評価できる。

2024年度末踏IT人材発掘・育成事業

三輪敬太（Turing株式会社／東京大学）

高橋直希（株式会社CoeFont／早稲田大学）

ニューラル言語モデルによる個人最適な日本語入力システムの開発 — 高度な個人最適化・翻訳・生成のIMEへの統合 —

近年の爆発的な自然言語処理技術の発展にもかかわらず、日本語入力システムへの導入はあまり進んでいない。本プロジェクトでは、高い精度で長文脈を扱えるニューラル言語モデルに基づくかな漢字変換システム「Zenzai」を開発し、個人最適化のためのシステム「Tuner」と組み合わせたオープンソースの実用的な日本語入力システム「azooKey on macOS」として公開した。



Tunerは入力履歴や画面情報を取得・学習し、Zenzaiに連携することで個人最適化を実現する

ニューラル言語モデルによる個人最適な日本語入力システムの開発

三輪 敬太（Turing 株式会社／東京大学）

高橋 直希（株式会社CoeFont／早稲田大学）

1 背景

日本語入力において中心的な役割を占めるかな漢字変換は、1960年代から研究が進められてきた。初期のアルゴリズムでは、計算速度とメモリの制約から効率を重視した手法が用いられていたが、計算機の性能が向上するにつれて、1990年代後半からは確率モデルを用いる統計的な漢字変換が主流となり、大規模な言語データを用いて確率モデルを構築することで文脈幅の制約を受けつつも妥当な変換結果を得られるようになった。

近年、ニューラルネットワークを用いてかな漢字変換をEnd-to-Endでモデル化するニューラルかな漢字変換が注目されている。RNNやLSTM、Transformerなどを用いた手法が研究レベルでは提案されているものの、実用化はまだ限定的である。ローカル環境においてリアルタイムで変換候補を更新し続ける必要があるかな漢字変換ではニューラルネットの推論の計算負

荷が大きな障壁となる。また、既存のシステムは複雑に発達しており、End-to-Endのシステムに置換することは容易ではない。

この結果として、実用的なオープンソースのニューラルかな漢字変換システムは未だ存在せず、実用化に際するあらゆる知見が得られていない状態にある。

2 目的

ニューラルかな漢字変換は高い変換精度を実現することが期待できるが、その実用化はいまだ研究段階にある。本プロジェクトでは最新の自然言語処理技術を取り入れた高精度なニューラルかな漢字変換システムを構築し、高精度な変換、実用のための個人最適化、入力支援の向上を実現する日本語入力システムを開発した。最先端の性能と実用性を兼ね備えることを第一の目標とし、大胆な方針を採用できるようにすべくGPUの利用や高スペックな端末での動作を前提とした。計算機の性能向上については将来的な技術進展に委ねる方針を採った。

これにより、精度と使い勝手の両面で優れたシステムを提供し、ニューラルかな漢字変換の普及と日本語入力の進化を促進したいと考える。

3 開発の内容

3.1 Zenzai（ニューラルかな漢字変換エンジン）の開発

本プロジェクトでは、GPT-2アーキテクチャによる日本語言語モデルにかな漢字変換に特化した追加学習を行い、かな漢字変換をEnd-to-Endで実施するニューラル言語モデル「zenz」を開発した。zenzは日本語テキストデータに対して読み推定パイプラインを用いることで得られる「読み」と「変換候補」のペアを学習し、推論時には「読み」としてユーザー入力を受け取り、「変換候補」を自己回帰的に生成する。これにより、外部の辞書モジュールに依存することなく、ひらがな入力から漢字交じりのテキストを直接予測できる。さらに、GPU環境を前提に量子化やKVキャッシュなどを組み合わせて処理を最適化し、ニューラルモデルによる推論を実用的な速度で実行できるよう工夫した。

3.2 投機的デコーディングと高速化

zenzは91Mパラメタと軽量のモデルであるが、生成を行うには推論時間が長く、リアルタイム動作には課題があった。そこでZenzaiでは、従来の統計的かな漢字変換システムを「ドラフトモデル」として利用する投機的デコーディング手法を導入した。まず高速であるドラフトモデルが変換候補の「下書き」を生成し、後段でzenzがそれを検証・修正する。こうすることでzenzの推論回数を大きく削減できる。zenzの推論回数の上限を制限する設定を設けることで、実行する端末の性能に合わせた推論負荷の調整も可能になった。

3.3 条件付き変換と変換プロンプト

Zenzaiでは確定済みの文脈や、ユーザーが自由な指示を書ける「変換プロンプト」によって多様な条件付けを行うことが可能である。たとえばプロフィールや話題トピックを与えることで、文章の文体や専門用語をより正確に変換できるようになる。こうした柔軟な条件付けは、従来の辞書ベース変換では扱いづかった広範な情報を活用する手段となる。

■ 3.4 Tuner（個人最適化モジュール）の設計と動作

従来の日本語入力システムはユーザーが文章を入力したあとに学習する「履歴学習」を中心に個人最適化を行っているが、本プロジェクトではユーザーが読んだ文章に対して先回りして最適化をかける「画面学習」を導入した。Tunerは画面上のテキストを記録し、これをZenaiの日本語入力に反映するため処理するシステムである。

TunerはmacOSのアクセシビリティ APIを活用して、画面に表示されたテキストやインポートしたファイルを収集する。取得テキストはMinHash法を用いて近似重複を排除し、専門用語やユーザー特有の表現を含むデータを効率的に学習可能にする。

このデータから「ユーザー言語モデル」を構築し、これをZenaiの推論時に用いる。

言語モデル間で実行時に動的に差分を適用する代理チューニングの仕組みを用いることで、ニューラルモデルを再学習せずにユーザーごとの言語環境に適応させることができるようになった。このユーザー言語モデルには5-gramモデルを用いている。

■ 3.5 azooKey on macOS

本プロジェクトで開発した「azooKey on macOS」は、高精度な変換を実現するZenaiを搭載し、Tunerと連携して個人最適な変換候補を提示する日本語入力システムである。OS標準に近い変換候補ウィンドウや簡潔な設定画面を備え、ユーザー辞書や履歴学習などの機能も従来の日本語入力と同様に利用できる。

■ 3.6 いい感じ変換

azooKey on macOSでは、入力支援機能として「いい感じ変換」を搭載した。「いい感じ変換」は大規模言語モデルの文脈理解に基づき、単一のインターフェイスで翻訳・言い換え・絵文字の推薦などの多様な機能を統合的に呼び出せる仕組みである。

具体的には、ユーザーが「ワラッテイルエモジ」「エイゴ」「イイワケ」などを入力すると、その前の文脈に応じた出力をLLMが生成し、その結果を入力候補として提示する。たとえば「ペットがいなくなった」という文脈に対して「エモジ」を変換すれば悲しい絵文字「😞」を、また「オオサカノオバチャンポク」といったクエリであれば、直前の文章に対する方言調の言い換えを提案するなど、状況に応じて「いい感じ」に文章を変換するのが特徴である。ユーザーが無入力の状態でのこの機能呼び出すと「ツツキ」の入力に準じて後続文を生成するなど、柔軟な文章補完機能も備えている。

■ 4 従来の技術（または機能）との相違

従来のかな漢字変換手法は、文脈幅の極小な言語モデルに基づいた統計的手法に大きく依存しており、長い文脈を考慮するのは計算コストが高く、ユーザーの好みに対応するのも限界があった。この点、本プロジェクトで開発したZenaiはニューラル言語モデルに基づくEnd-to-Endのかな漢字変換を実現しながら、高速化のための新たなアルゴリズムを構築し、その実用性を示している。また、Tunerによって履歴学習に加えて先回りの学習を可能にする「画面学習」を提案したほか、ニューラル言語モデルの個人最適化という問題に軽量高速な解決策を導入した。azooKey on macOSは、こうした統合的なアプローチによって、歴史的経緯から複雑なソフトウェアとなっている日本語入力システムにニューラルかな漢字変換を導入し、高い精度を

実現できることを示した。azooKey on macOSではこれにとどまらず、「いい感じ変換」などのユニークな変換機能を導入し、日本語入力システムのインターフェイスの将来像を浮かび上がらせている。これらの点でZenzai、Tuner、azooKey on macOSが実現した技術は従来未開拓であった領域であり、既存技術との大きな差異を持っている。

5 期待される効果

開発したシステムが実装するニューラルかな漢字変換と個人最適化機能は、文章の入力やドキュメント作成を必要とする幅広い分野に活性化をもたらすと期待される。

特に、研究やビジネスの現場では、高精度かつ文脈を深く考慮した変換によって執筆作業が効率化し、生産性の向上が見込める。従来は専門用語などに悩まされやすかった技術文書や学術論文においても、辞書拡張をユーザーが自力で行わずとも画面学習を通じてモデルが自動的に適応しやすくなるため、利用者の負担は大きく軽減される。

また、個人単位で変換精度を高められることにより、在宅勤務・リモートワークの増加に伴うコミュニケーション効率の向上や、教育・福祉分野での入力支援など、多面的な活用が可能である。加えて、本プロジェクトではオープンソース化の一環で学習・評価データの公開などを行った。このような取り組みから、新たな日本語処理技術や関連産業（自然言語処理、ソフトウェア開発ツール、ユーザーインタフェース設計など）のさらなる発展が期待できる。

6 普及（または活用）の見通し

開発したシステムは、オープンソースとして公開し、多くのユーザーや開発者が利用しやすい形を目指している。興味を持ったユーザーは「azooKey on macOS」をGitHubからダウンロードし、すぐにmacOSの日本語入力としての利用を開始できる。

また、OSSコミュニティによってWindowsやLinuxへの対応も有志で進められており、クロスプラットフォームでの利用も現実味を帯びている。さらに、近年の最適化技術の進展により、端末スペックやGPU環境に対する要求も以前ほど高くなく、比較的手軽に使えるようになってきている。そのため、ハイエンド端末に限らず、一般的なPCやノートパソコンでも快適に動作する見込みである。macOS環境では、2020年発売のM1チップ搭載端末でも十分な速度で動作することを確認できている。

各種OSSコミュニティと連携しながら改良や機能拡張を進め、日本語入力の高度化に関心のある個人や組織を中心に、利用者の拡大を見込めると考えている。

関連URL

azooKey on macOSのリポジトリ：<https://github.com/azooKey/azooKey-Desktop>

Tunerのリポジトリ：<https://github.com/azooKey/Tuner>

Zenzaiのレポジトリ：<https://github.com/azooKey/AzooKeyKanaKanjConverter>

Zenzaiについて執筆した記事：

<https://zenn.dev/azookey/articles/ea15bacf81521e>

アクセシビリティ APIの利用方法について執筆した記事：

<https://zenn.dev/azookey/articles/8835f5ebd7dcd9>

zenz-v2.5と学習用データセット：

<https://huggingface.co/collections/Miwa-Keita/zenz-v25-6784cd5d57147f61bc4c3031>

評価用ベンチマーク：

<https://github.com/azooKey/AJIMEE-Bench>

iOSで利用できるソフトウェアキーボード：

azooKey：<https://azookey.netlify.app/>

近況

2025年、私たちはiOS版 azooKeyにもCPU版 Zenzaiを搭載し、iOS上で高精度な日本語入力を実現しました。これにより、従来難しかった高精度な変換がiOS上でも気軽に使えるようになりました。

ニューラルかな漢字変換は私たち以外の手によっても広がりを見せています。Zenzaiは、Linux向けの「Hazkey」やWindows向けの「azooKey-Windows」、さらにSKKサーバなどにも展開されました。また、Zenzaiのコアであるニューラルかな漢字変換モデル「Zenz」は、Android向けのオープンソース日本語入力システム「Sumire」や、ZenzをGoogleのMozcに統合した日本語入力システム「Mozkey」にも活用されています。2026年の初めには、Zenzの学習を再現したニューラルかな漢字変換モデル「Jinen」と、それを搭載する日本語入力システム「Karukan」も登場して、話題になりました。さらに、私たちがニューラルかな漢字変換の評価のために構築した「AJIMEE-Bench」を用いて、LLMのかな漢字変換性能を継続的にレポートしてくれている人もいます。

ニューラルかな漢字変換は単なる azooKeyの一機能にとどまらず、複数のOS・入力方式・評価活動へと広がるエコシステムになりつつあります。私たちはこのパラダイムをさらに推し進めるべく、引き続き開発を進めています。

PMの評価

採択時の評価

日常的に使用される日本語入力システムにニューラル言語モデルを導入する技術的挑戦性と、オープンソースでの公開による社会的波及効果の可能性を評価した。

技術的革新性と社会的インパクトを兼ね備えており、提案者の情熱と成長の可能性が感じられた。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、かな漢字変換という長年研究されてきた自然言語処理の応用分野に、ニューラル言語モデルという新たなパラダイムを導入した画期的なプロジェクトとして高く評価できる。特に、実用可能なオープンソースのニューラルかな漢字変換システムとして世界初の取り組みである点は特筆に値する。

技術的な成果としては、GPT-2アーキテクチャをベースとした「zenz」モデルの開発、投機的デコーディングによる高速化、Marisa-Trieを用いた効率的な個人最適化、文脈付き変換や変換プロンプトの実装など、多岐にわたる革新的な要素が含まれる。特に、投機的デコーディングの手法を用いて大規模言語モデルの推論回数を制約しつつ高精度な変換を実現した点は、理論と実装の両面で優れた工夫といえる。

また、「AJIMEE-Bench」という評価ベンチマークを構築・公開した点も、今後の研究開発の基盤を整えるという観点から重要な貢献である。ベンチマークの結果から、Zenmaiが既存の日本語入力システムを大きく上回る変換精度を示したことは、アプローチの有効性を実証する重要な成果である。

開発プロセスにおいては、オープンソースとして公開し、コミュニティからのフィードバックを積極的に取り入れながら改良を重ねた点が評価できる。その結果、有志による他プラットフォーム向けの移植が始まり、コミュニティの形成も進んでいる。このようなオープンな開発アプローチは、技術の普及と発展に大きく貢献することが期待される。

実用面では、文脈付き変換や個人最適化、「いい感じ変換」など、ユーザーの利便性を高める多様な機能を実装している点も高く評価できる。特に、macOSのアクセシビリティAPIを活用した画面情報の取得と、それを基にした個人最適化は、ユーザー環境に自然に適応する日本語入力の新たな可能性を示している。

総じて、このプロジェクトは日本語入力という日々の作業に直結する基盤技術において、ニューラル言語モデルの可能性を広く示した先導的な取り組みであり、今後の発展が大いに期待される価値ある成果といえる。

とことん突き詰め考え抜ける場、未踏

クリエイターみなさんに未踏での体験を振り返ってもらいました。

●アイデアに本気で向き合える

未踏では、自分のアイデアに本気で向き合える環境があったのがよかったです。まだうまく言葉にできていない考えでも、PMや他のクリエイターとの議論を通じて、少しずつ整理して形にしていけることができました。自分だけで考えていると気づけない視点をもらえたことも、大きかったです。また、周りに本気で何かをつくっている人たちがいる環境も刺激になりました。分野は違っても、それぞれが自分の問題意識を持って取り組んでいて、自分ももっと考え抜きたいと思いました。（伊藤 朝陽）

●周囲とのずれを通じて自分が何者かを知る

研究でもエンタメでも、つくることは突き詰めると「自分はこう見ている」という表明だと最近思う。未踏で面白かったのは、一見近いプロジェクトほど原点や思想のずれが際立つことだった。ずれに気づくたび、自分が何者かの輪郭が少しずつ定まっていっていった。技術や手段が均質化していく時代だからこそ、その表明がどれだけ切実かが、じわじわ大事になってきている気がする。（大塚 敏郎）

●プロダクトを届けることまで考えるようになった

未踏を通じて、ただの技術好き・プロダクト好きから、「そのプロダクトにどういう価値をよりつけられるか」を考えられるようになったと思っています。技術だけでなく、それをより遠いところへ届けることまで含めて向き合う経験ができたことが一番の収穫でした。エンジニア兼プロダクト開発者兼経営者という立場になり、周囲とは悩みを共有しづらい状況にありますが、未踏の同期は同じようなスキルセットを持っていて、話すと楽しく心強いです。（椎名 貫太）

●インスピレーションをくれる

挑戦的なテーマやニッチなテーマでも、その価値の広げ方についてインスピレーションをくれるのが未踏のよさだと思います。（中澤 正樹）

●プロジェクト飛躍のきっかけに

細々とやっていた日本語入力プロジェクトが飛躍するきっかけが未踏でした。普通に過ごしていたら意識することがなかったような様々な分野に専門と情熱を持ったクリエイターが集まる空間で、9ヶ月ほどの期間を通してガンガン刺激を受けました。（三輪 敬太）

落合 陽一PM 担当プロジェクト



落合 陽一（おちあい よういち）

メディアアーティスト／筑波大学 図書館情報メディア系教授／デジタルネイチャー開発研究センター長／東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑システム講座 デジタルネイチャー分野 准教授

■プロフィール

1987年生まれ、2010年ころより作家活動をはじめ。境界領域における物化や変換、質量への憧憬をモチーフに作品を展開。筑波大学准教授・デジタルネイチャー開発研究センター長。2025年大阪・関西万博テーマ事業プロデューサー。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業における落合陽一PMプロジェクトでは、「デジタルネイチャー」の概念を基盤とした3つの革新的プロジェクトを採択し指導を行った。デジタルネイチャーとは、計算機技術によって創造・拡張される新たな自然観や環境を指す概念であり、技術と文化・社会・自然の境界を再定義する試みである。

従来のテクノロジー開発が「効率化」や「利便性」といった価値観に偏重する中、デジタルネイチャーは「計算機によって生み出される新たな自然としての体験」という、より感性的・文化的な価値の創出を目指す。これは単なる技術的革新ではなく、人間とテクノロジーの関係性そのものを問い直す哲学的な問いかけでもある。採択された3プロジェクトは、いずれも従来の技術分野の枠組みを超え、人間の暮らしや社会システム、生態系との新たな関係性を模索するものだったが、同時に多くの批判的考察と課題も内包していた。それぞれが独自の視点から計算機自然と人間社会の新たな関係性を問い直し、感動や驚きに満ちた価値創造の可能性を示した点で高く評価できる。いずれのプロジェクトも単なる技術開発に留まらず、テクノロジーが生み出す新たな自然環境や文化的体験まで視野に入れた包括的な取り組みであり、未踏IT人材発掘・育成事業の理念に合致する優れた成果を上げた。彼らの取り組みは、日々進化を続ける計算機自然の中で、より豊かで味わい深い体験をデザインするという、私が提唱するデジタルネイチャーの哲学と深く共鳴するものである。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

機械学習に基づく中山間地域向け農業用散布ドローン群
- 蜂を機械化するAgriswarmの開発 -

有田朋樹・和田唯我(慶應義塾大学)

課題

中山間地域を始めとして、国内農業においては機械化が遅々として進んでいない現状が存在する。特に果樹栽培においては受粉作業が全体のボトルネックになっており、何らかの手段でこの作業を自動化することが喫緊の課題となっている。

一般的なキウイ農園の月別の投下労働時間 (h/10a)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
20.0	13.5	3.4	5.4	48.8	21.8	11.4	9.4	3.4	3.4	37.0	20.0

山口県による統計を引用。 <https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/uploaded/attachment/52213.pdf>

Agriswarm

自己位置推定・経路計画を含めた飛行制御システムと果樹受粉のための花認識技術、それらを動作させるためのドローンを開発した。

機械学習に基づく中山間地域向け農業用散布ドローン群

有田 朋樹 (慶應義塾大学 理工学研究科 滑川研究室)

和田 唯我 (慶應義塾大学 理工学研究科 杉浦研究室)

1 背景

日本の農業は近年ようやく機械化が進み始め、農業散布ドローンや貨物運搬ロボットなどの導入により競争力のある食農産業が生まれつつある。しかし、中山間地域の果樹栽培においては、その地形の険しさから従来の大型機械による自動化が困難であり、特に受粉作業は今なお大きな労働負担となっている。

キウイなどの果樹の受粉は、ミツバチによる「虫媒授粉」と人の手による「人工授粉」が主流だが、花粉媒介昆虫の減少や気象変動により、人工授粉への依存度が高まっている。一方で人工授粉は労働集約的であり、例えば一般的なキウイ農園では受粉時期に月1000時間を超える労働需要が発生する。さらに、病気の接触感染リスクからスプレーによる吹き付け授粉への移行が進んでいるが、これを効率的に行う手段は限られている。

また、果樹栽培において「樹冠占有面積率」(棚面における樹冠の占める割合)は実質的な耕地面積として農業的・経営的に重要な指標であるが、これを測定する実用的な手法はまだ確立されていない。このように、中山間地域の果樹栽培には多くの課題が山積している。

2 目的

本プロジェクトは、果樹園、不整地、中山間地域など、これまで機械化が進行してこなかった過酷環境において、小型ドローンを用いた機械化を模索することを目的とする。第一の具体的課題として、棚下を飛行できるドローンを開発し、キウイ栽培における労働負荷の大きい授粉作業を自動化する。福島県の果樹農園を実証フィールドとして、「Agriswarm」と名付けたドローンシステムにより、授粉その他の蜂の働きを機械で代替することを試みる。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、目的別に2種類のドローン実機を開発した。一つは圃場^{ほじょう}監視を目的としたプロトタイプ、もう一つは授粉機能を追加したモデルである。

3.1 ハードウェア構成

開発したドローンの主要構成は以下の通りである。

圃場監視用プロトタイプ（図1）：

- 高性能エッジコンピューティングデバイス
- 深度カメラセンサー
- 小型・軽量フレーム（総重量約450g）
- 自律飛行のための各種センサー類



図1：圃場監視用プロトタイプ

授粉機能追加モデル（図2）：

- 基本プロトタイプ構成に加え、授粉用の拡張として小型タンク、小型モーター、マイクロポンプ、ミストノズルを装備
- 授粉機構開発には様々なノズル径を試験し、吹き付け距離と面積のトレードオフを考慮して最適なものを選定

両モデルともフレームは3Dプリンターとカーボン素材を組み合わせで製作し、最小限の重量で必要な強度を確保している。



図2：授粉機能追加モデル

3.2 ソフトウェア構成

開発した Agriswarm システムのソフトウェアは、以下の主要モジュールで構成される。

花検知アルゴリズム：最新の物体検出技術と姿勢推定技術を組み合わせ、果樹の花の位置と向きを高精度に特定する（図3）。アノテーションコストを削減するため、3Dモデル化技術を活用し、一度のアノテーションで多視点からの学習データを生成している。

自己位置推定アルゴリズム：ステレオカメラと慣性センサーの情報を統合し、GPSに依存しない高精度な自己位置推定を実現。特徴点抽出と追跡により、果樹棚下という複雑環境でも安定した位置把握が可能となっている。

経路計画・追従アルゴリズム：3次元空間における障害物認識と最適経路計画を行い、授粉対象の花に安全かつ効率的にアプローチする。滑らかな軌道生成により、安定した飛行と精密な位置制御を両立させている。

飛行制御アルゴリズム：オープンソースの飛行制御技術をベースに、果樹栽培環境に最適化した制御パラメータを設定。状態推定と制御を統合し、全体の安定性と応答性を確保している。

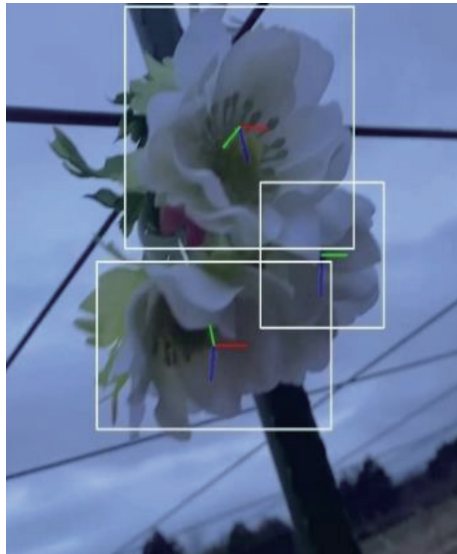


図3：学習モデルによる花検知の様子

さらに、圃場の3Dモデル化システムとして、ドローンのカメラデータから圃場を3次元再構成するパイプラインを構築した（図4）。これにより樹冠占有面積率の測定が可能となる。

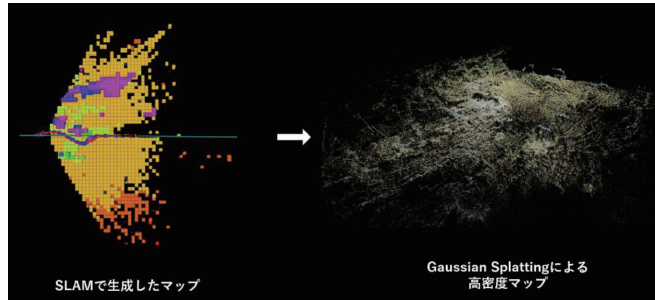


図4：圃場の3Dモデル概要図

4 従来の技術（または機能）との相違

本システムは2つの観点から従来技術と比較した場合、顕著な優位性を持つ。

まず、制御システムの観点では、既存の屋外ドローン技術と比較して、特定タスク（授粉）に特化した機能実装と機械学習による高精度化を実現している。具体的には、授粉のためのハードウェア拡張を実装するとともに、エッジコンピューティングの計算能力を活用して機械学習モデルをオンボードに実装し、視覚情報処理や花認識システムの高精度化を実現した。

次に、授粉ドローンとしての観点では、既存の授粉用ドローンが特殊な位置計測システムに依存しているのに対し、Agrismarmはカメラと慣性センサのみによる自己位置推定を実現している。これにより、GPSに依存せず、山間部や半屋内環境でも安定した動作が可能となり、

中山間地域の果樹栽培における実用性が大幅に向上している。

このように、Agriswarmは特定用途に最適化された機械学習モデルとGPSに依存しない自律飛行技術を統合することで、これまで機械化が困難だった中山間地域の果樹栽培において画期的なソリューションを提供している。

5 期待される効果

Agriswarmの実現により、中山間地域の果樹栽培において以下の効果が期待される。

授粉作業の自動化による労働負荷軽減：実証実験の結果、Agriswarmは1花あたり平均約12秒で授粉を行えることが確認された（図5）。この処理速度により、一般的な開花期間と日照時間の条件下で、1台のドローンが約2万個の花を授粉できる計算となる。このシステムを複数台導入することで、中規模のキウイ農園における授粉作業の大半をカバーできる可能性がある。



図5：圃場での受粉実験の様子

樹冠占有面積率の定量的測定：開発した圃場の3Dモデル化システムにより、短時間の飛行で広範囲の圃場モデルを生成できることが確認された。これにより、これまで測定が困難だった樹冠占有面積率を定量的に把握できるようになり、より効率的な栽培管理と経営判断が可能となる。

中山間地域における機械化推進：GPSに依存しない自律飛行技術により、中山間地域特有の複雑な地形環境でも安定して動作するドローンシステムを実現。これは単なる授粉作業の自動化を超え、中山間地域全体の農業機械化を促進する重要な一歩となる。

6 普及（または活用）の見通し

Agriswarmシステムの普及については、実証フィールドである福島県の果樹農園での使用を皮切りに、段階的な展開を計画している。

短期的活用：近い将来に予定されている初回商業目的での授粉作業に向け、複数台のドローンを配備し実地検証を行う。これにより、システムの運用性と経済性について実践的な知見を蓄積する。

長期的普及：技術的課題である自動給電システムの開発と複数ドローンの協調制御を実現し、より大規模な圃場での運用を目指す。成熟した栽培環境では1農園あたり多数のドローンが必要との試算もあるが、量産効果による製造コスト削減と機能拡張によって経済性を向上させる。

現時点での課題としては、ドローン1台あたりの製作費を人工授粉の人件費以下にするための技術開発が必要であるが、量産化や部品の標準化によるコスト削減、複数機能の統合による付加価値向上などにより解決を図る。

また、本プロジェクトの意義は単なる商業的価値にとどまらず、工業的技術を農業現場に接続するプロセスそのものにある。「蜂の機械化」というコンセプトを通じて、持続可能な農業のあり方を示すモデルケースとなることを目指している。

近況

有田、和田両名とも博士課程に進学し、どちらもそれぞれの分野で楽しくやっています。有田は東大松尾研とGMOの研究開発組織に籍を移し、農業とヒューマノイドをテーマに研究を行っています。和田はカーネギーメロン大学への留学から帰国したのち、マルチモーダル基盤モデルの研究に邁進しております。

時に福島では、5月の低気圧による強風の影響を受け、いくつかの苗木の枝が吹き飛ばされて枯れてしまいました。近年の気候変動の強まりを考えると、受粉のみではなくもう少し大きな問題に取り組む必要があるなと感じるこの頃です。ということで、VLAやWAM、マニピュレータを使って半屋内でキウイの栽培自動化を目指すプロジェクトを始めました（唐突）。昨今のembodied AIにおける技術発展をみると、福島のキウイ農園におけるいくつかの課題も解決できそうなアイデアがあり、仲間を増やして技術開発や実証実験を続けています。AIやロボティクス、植物生理、工場自動化といった広範かつ大規模な課題をまとめて扱えるプロジェクトになりそうです。なかなか挑戦的なテーマかなと思うのでもし興味がある方は連絡をお待ちしています。

PMの評価

採択時の評価

3つの評価軸「没入性とレジリエンス」、「未踏性と時代の技術的背景理解」、「共感性と巻き込み力」に基づき、多数の応募の中から特に独創性が高く、実装可能性があり、クリエイタの成長が期待できるプロジェクトを採択した。本プロジェクトは、農業という伝統的領域と最先端技術の融合が日本特有の地形的・社会的課題に直結する実践性を評価した。

プロジェクト終了時の評価

技術的側面では、複数の先端技術を統合し、実用的なシステムを構築した点は評価できる。評価できる点で特に注目すべきは以下のとおりである：

1. GPSに依存しない自己位置推定技術の実装：中山間地域特有の複雑な環境下でも安定して動作する自律飛行を実現した点は技術的に価値が高い。ステレオビジョンカメラとIMUを組み合わせたVisual-Inertial Odometryにより、半屋内環境である果樹棚下でも正確な位置把握を可能にした。これは、様々な環境条件下でも機能する頑健なテクノロジーの開発という点で、計算機自然の範囲を拡張する取り組みと言える。

2. 花検知システムの高度な実装：機械学習モデルを用いた花の位置・姿勢推定において、アノテーションコスト削減のための工夫（Gaussian Splattingによる3Dモデル化と多視点からの学習データ生成）が見られる。実用的な課題に対する創意工夫と、物理世界と情報世界を接続する新たな手法として評価できる。

3. 全体システムの統合：自己位置推定、花検知、経路計画、飛行制御という複数のサブシステムを統合し、実用レベルのシステムに仕上げた点は高く評価できる。特に、小型・軽量のハードウェア制約の中でこれらを実現した技術力は特筆に値する。これは単なる個別技術の集積ではなく、全体として有機的に機能するシステムを構築する能力を示している。

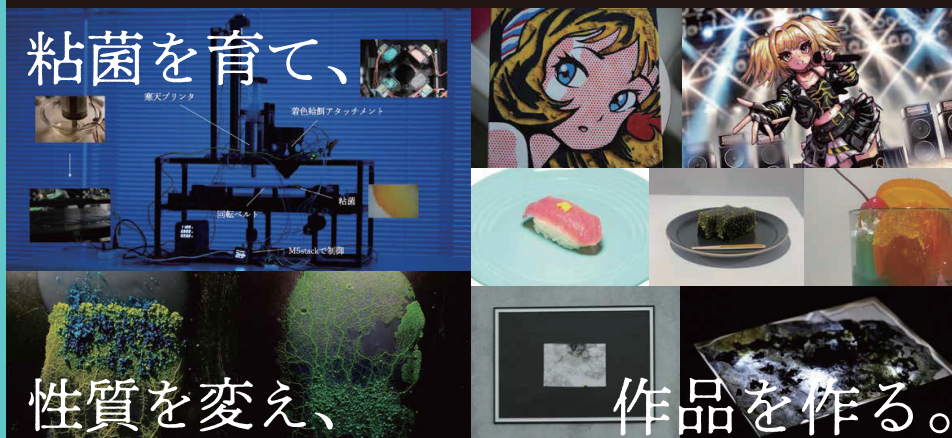
社会的側面では、日本の中山間地域における農業の持続可能性という重要課題に対して、実践的なアプローチで挑んだ点が評価できる。有田・和田両氏が自身で農業に携わり、現場の課題からプロジェクトを発想した点も、技術と社会の接点を重視する私のPM方針に合致している。

総合的に見て、本プロジェクトは技術的な完成度の高さと社会的意義の明確さを兼ね備えており、未踏IT人材発掘・育成事業の理念に合致する優れた成果を挙げたと評価できる。特に、単なる技術開発に留まらず、計算機と自然環境・地域社会が交差する新たな関係性や体験をデザインしている点で、デジタルネイチャーの思想を体現した素晴らしい実践例といえる。

2024 年度末踏 IT 人材発掘・育成事業

粘菌ファブリケーションのための粘菌の自動培養システム —粘菌と共に暮らし共に作品を作る粘菌ファブリケーションの世界へ— 迫田海斗（公立はこだて未来大学大学院）

“粘菌無限ランニングマシーン”は粘菌を「ファブリケーションマテリアル」として扱うための装置である。
水槽（生け簀）のように使用される装置によって粘菌が生活に侵食し、粘菌と共に生きる人類をサポートする。
粘菌が人間社会に溢れかえった世界を想像してミヤマキヤクと楽しいスローライフを送ろう。



粘菌ファブリケーションのための 粘菌の自動培養システム

迫田 海斗（公立はこだて未来大学大学院）

1 背景

粘菌は、倒木や切り株、落ち葉などの裏のようなジメジメした環境に生息する単細胞生物である。餌や光などの刺激に応じて移動し、時には迷路を解くような行動を示すなど知的ともいえる性質が報告されている。このような特異性から、イグノーベル賞を受賞した迷路解きの研究や、靴に這わせた粘菌が時間とともに模様を変化させるバイオアート、粘菌を電子回路に組み込みインタラクションの可能性を探るHCI研究など、多様な分野で活用されてきた。本プロジェクトのクリエイターの迫田は、こうした粘菌の魅力を自らの暮らしの中で存分に味わい、さらに粘菌と一緒に作品を作る文化を広げる試みを「粘菌ファブリケーション」と称している。粘菌は動物のように大きな声や派手な運動をしないが、じっと観察するとその移動パターンや変色のしかたが独特であり、毎日眺めているだけでも発見や癒やしをもたらしてくれる存在である。粘菌が部屋の一角でのびのびと育ち、日々の生活や創作活動に溶け込んでいくイメージ

五十嵐 P M

稲見 P M

岡 P M

落合 P M

曾川 P M

竹迫 P M

田中 P M

は、まさに「粘菌が溢れかえる世界」への入り口である。

2 目的

本プロジェクトの第一の目的は、粘菌を日常生活環境で培養しながら、粘菌をファブリケーションマテリアルとして捉え、粘菌ならではの動きや色彩変化を作品づくりに取り込む「粘菌ファブリケーション」を推進することである。粘菌と共に暮らす粘菌生活者が増えれば、粘菌を愛でる人々のコミュニティが形成され、新たな食文化やファッション、アート表現などが生まれる可能性が高まる。また、粘菌と暮らす人類とはどういうものか、こんな世界があっても良い、興味の対象が人ごとに違う視点で見た環世界を提示することが社会の多様性を生むと考えた。

第二の目的は、そのような粘菌と暮らす人類のために、粘菌を常に健康に育てながら鑑賞・楽しむために必要な餌・水分・清潔な培地の供給を自動化することである。水槽で魚を飼うように、粘菌もそれほど手間をかけずに誰もが長期にわたって楽しめる仕組みを作り上げることで、粘菌の観賞や研究、さらには表現実験がより容易になり、日常に粘菌が溶け込む社会が実現しやすくなると考えている。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、自動培養システム「粘菌無限ランニングマシン」を開発した(図1)。

これはベルトコンベア型の機構を利用し、餌と水分が含まれた寒天培地を連続的に供給し続ける装置である。粘菌は汚れた場所よりも清潔な場所を好む性質があるため、ベルトの移動に合わせて新しい寒天が常に提示されることで、まるでランニングマシンの上を走るかのように粘菌が元気に移動し続ける。さらに、着色給餌アタッチメントと光刺激アタッチメントを装着することで、粘菌の色や動きに多彩な変化を与えられる。着色給餌アタッチメントでは、粉末状のオートミールに赤や青などの色素を混ぜ、散布するタイミングを制御することにより、粘菌そのものを多彩な色に染め分けることが可能になった。光刺激アタッチメントでは、粘菌



図1：粘菌無限ランニングマシンの概要

が青色光を嫌う性質を利用し、光を当てる位置や強度を変えることで、粘菌の広がり方をある程度コントロールする遊びや実験が可能となっている（図2）。

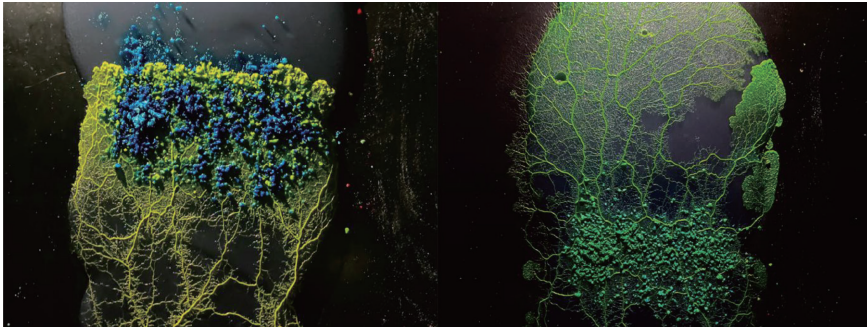


図2：システム上で粘菌に着色した様子（24時間経過）

そして、「粘菌と共に暮らし、共に作品を作る」という目的を遂行すべく、このシステムで培養した粘菌を使用したバイオアートとして、墨と粘菌が織りなす水墨画的表現「粘墨画」や、粘菌と墨に浸したオートミールによる自然の表現、いわば、粘菌版枯山水の「粘山水」、粘菌が模様を描きながら育つ、アニメキャラクターのハッキリとした輪郭が時間経過で崩壊する「粘菌少女」のような作品などを制作した。さらに、粘菌を食材とした食文化を広げるための「粘菌食」や、粘菌が暮らす世界観をアイドルやキャラクターに重ねる「粘菌アイドル」といった取り組みも行った（図3）。



図3：粘菌ファブリケーション作品

上段は左から「粘墨画」、「粘山水」、中段は左から「粘菌少女」、「粘菌アイドル」、下段は「粘菌食」

 五十嵐
PM

 稲見
PM

 岡
PM

 落合
PM

 曾川
PM

 竹迫
PM

 田中
PM

■ 4 従来の技術（または機能）との相違

従来、粘菌を研究や作品制作に用いる場合、限られた環境で一時的に育て、定期的な培地交換や餌やりを人手で行うことが多かった。粘菌は清潔な環境を好むため、長期的な管理には注意を要する側面があり、頻繁な交換や掃除を行わねばならないという課題があった。本システムでは、ベルトコンベアが常に新しい寒天培地を提供する仕組みを採用しているため、粘菌が清潔な環境を維持しやすく、水槽感覚で粘菌を眺めながら暮らすスタイルを可能にした。さらに、着色や光刺激といった刺激アタッチメントをアドオンのように取り付けられるため、粘菌の動きや色を自在に演出しながら表現や実験に活かせる点が、従来にない利点といえる。

■ 5 期待される効果

粘菌との暮らしを通じて、粘菌ファブリケーションの世界が身近になる効果が期待される。粘菌を観賞しながらファブリケーション作品を作ること、粘菌が自然かつ有機的なパターンを生み出す様子を、日常生活の中で気軽に楽しめるようになる。粘菌がアート、食、エンターテインメントなど多彩な分野で新しいアイデアをもたらす可能性がある。粘菌ならではの緩やかな時間感覚や、餌を求めて伸びる造形の美しさが、バイオアートやインタラクション研究の領域をさらに拡張すると見込まれる。

■ 6 普及（または活用）の見通し

迫田自身が第一の利用者として、粘菌の様子を観察しながら育むためのこの装置を使い続ける。人間が介入しない、培養装置だけで動き続け、見るごとに粘菌の様子が変化するようなオートマタ装置として装置を発展させる。装置の発展と拡張だけでなく、粘菌を使用した作品や研究を作り続け、人類が経験したことのない新たな体験と感動を与えることで、粘菌だけに限らない生物や物質などの色々なマテリアルを使い面白いモノづくりの世界を展開していきたい。また、迫田の粘菌と共に暮らす様子に触発されて、粘菌を気軽に飼ってみよう、自分も粘菌を育てて何かを作ってみようなどの、粘菌への興味が湧く人が増えると嬉しい。

近況

未踏採択当時は修士2年でしたが、現在はそのまま進学し、博士後期課程の学生として活動しております。

また、自身の未踏プロジェクトはUIST 2025 demoで発表したり、開発を続けています。粘菌をよりポップに扱える装置を目指してギャル度を上げています。

PMの評価

採択時の評価

3つの評価軸「没入性とレジリエンス」、「未踏性と時代の技術的背景理解」、「共感性と巻き込み力」に基づき、多数の応募の中から特に独創性が高く、実装可能性があり、クリエイターの成長が期待できる3つのプロジェクトを採択した。本プロジェクトは、生物と人間の新たな共生関係を模索する独創的な視点と、そこから生まれる驚きや感動の可能性に注目した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは従来の技術開発の枠組みを超え、生命体と人間、そして計算機環境の新たな関係性を提案するものであり、デジタルネイチャーの概念を具現化する挑戦的な取り組みであるが、同時に生命倫理や環境負荷、技術の意味など多くの問いも投げかけている。技術的側面では、以下の点が特に優れている：

1. 自律的・継続的な粘菌培養の実現：ベルトコンベア機構と計算機制御を融合し、粘菌が好む清潔な環境を継続的に提供するという独創的なアプローチで、長期的な粘菌培養の課題を解決。2. 拡張可能なシステム設計：基本システムに機能を追加できる拡張性の高い設計を採用。3. 生物の特性を活かした制御手法：粘菌が青色光を嫌う性質を利用した光刺激や、餌に着色料を混ぜることで粘菌自体の色を変える方法など、生物の特性を理解し活用した制御手法の開発。

文化的側面では、以下の点が注目される：1. 新たな生物との共生関係の提案：「粘菌と共に暮らす」という視点は、人間と他の生命種との関係性を再考する重要な提案である。計算機環境の進化によって、従来見過ごされてきた微小生物との共生が可能になるという、デジタルネイチャーがもたらす新たな生活様式の可能性を示している。2. 多様な表現形態の開拓：「粘墨画」「粘山水」などの作品シリーズは、粘菌という生物の特性を活かした多様な表現形態を開拓している。これらは生命の自律的振る舞いとデジタル的介入が交差する場所で生まれる新たな美学を探究する試みであり、計算機自然がもたらす感動や驚きを体現している。3. 分野横断的なアプローチ：バイオテクノロジー、機械工学、デザイン、アートなど、複数の分野を横断する学際的なアプローチは、デジタルネイチャーの領域を広げる重要な貢献である。

総合的に見て、本プロジェクトは技術開発の枠を超えて、生命とテクノロジーの関係性を問い直す哲学的深みを持っている。単に粘菌の培養を自動化するという機能的側面にとどまらず、人間と他の生命種との新たな共生関係や、デジタル環境を通じた生命表現の可能性を探究している点で、デジタルネイチャーの概念を体現した極めて価値の高い取り組みであると評価できる。

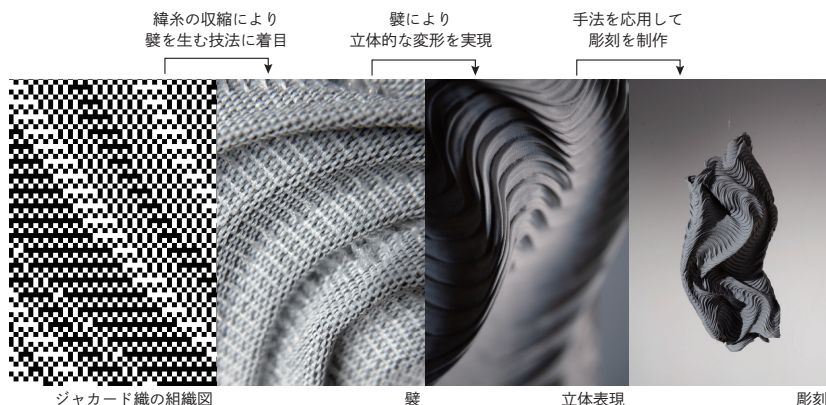
2024 年度末踏 IT 人材発掘・育成事業

上條陽斗（東京大学大学院）

量産可能な 4D ファブリケーションテキスタイルの開発

最古のデジタルファブリケーション機器、ジャカード織機の可能性

ジャカード織機をデジタルファブリケーション機器として再読し、テキスタイルによる革新的な立体表現を実現。



量産可能な4D ファブリケーション テキスタイルの開発

上條 陽斗（東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻）

1 背景

4D ファブリケーションとは、3D プリンティングに時間軸を足したようなデジタルファブリケーション手法の概念であり、直線状や平面状にものを作り、後から何かしらの刺激を与えて変形を引き起こすことと曲線・曲面状の形状を得る手法を指す。4D ファブリケーションは立体形状を得るために従来のデジタルファブリケーション手法、つまり3D プリンティングやCNC ミリングに比べて製造時間の短さ、材料効率の高さ、輸送コストの低さなどの利点が挙げられ、近年多くの研究が行われている。4D ファブリケーションの中でもテキスタイルを材料としたものを4D ファブリケーションテキスタイルと呼ぶ。

4D ファブリケーションテキスタイルはプロダクトデザイン分野からの関心の高さに反して、実際に市販される製品に応用された例は知られていない。その理由は主に工業的な生産性の低さに由来すると考えられる。

2 目的

本プロジェクトでは量産可能な4D ファブリケーションテキスタイルを開発することを目的とする。これを達成するために本プロジェクトでは、デジタルファブリケーションの分野で取り組まれてきた4D ファブリケーション手法の生産性を高めるだけでなく逆に、既にテキスタイル産業の中で使われている手法を4D ファブリケーションテキスタイルとして再読するアプローチも試行する。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、従来の4D ファブリケーションテキスタイルの改善と、ジャカード織りの4D ファブリケーションテキスタイルとしての再読の2点に取り組んだ。

3.1 従来の4D ファブリケーションテキスタイルの改善

従来手法の4D ファブリケーション手法に対して材料選択および熱溶着の方法の再検討を行うことで生産性を改善した。この成果を応用して照明デザインを提案し（図1）、またキネティックアートを制作した（図2）。キネティックアートにおいては2022年に制作した同種の作品に比べてテキスタイルの使用量が27倍へと増えた大型の作品を制作できた。

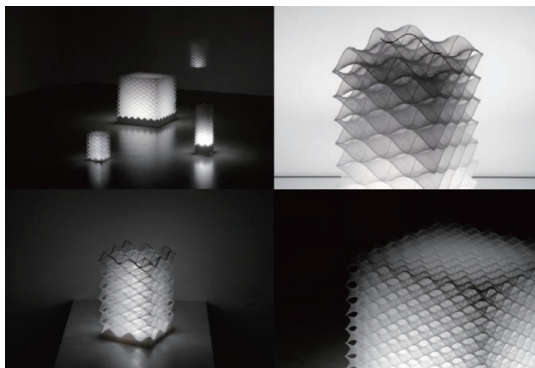


図1：提案した照明デザイン

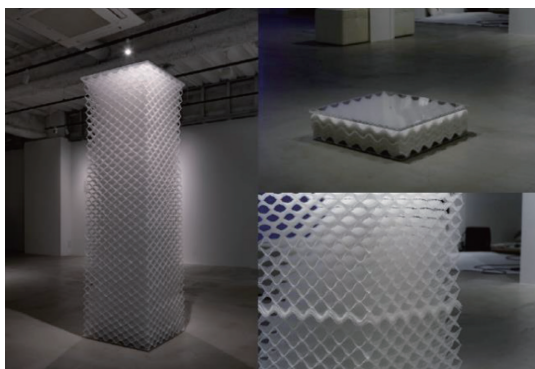


図2：制作したキネティックアート

3.2 ジャカード織りの4Dファブリケーションテキスタイルとしての再読

テキスタイル産業の中で使われてきた「ピンタック織り」に着目し、これをベースにした4Dファブリケーションテキスタイルを開発した。ピンタック織りの基本は図3に示すように伸縮性の糸を組織から部分的に浮かせるように織り込んで、それが縮むことによって襷が作られるという技法である。この技法を用いて様々なパターンを探索する中で、サインカーブの振幅を大小交互に配置した襷のパターンをせん断変形させたパターンを織ると、一方向に曲がりやすく他方に曲がりにくいヒンジを生じることが発見された(図4)。この表現を用いて布の彫刻シリーズ《forming patterns》を制作した(図5)。

《forming patterns》は文様から立体が生じるダイナミックな造形を目指したもので、山梨県で出土する水煙文土器にインスピレーションを得ている。ジャカード織の生地はおよそ平面のかたちをとっているが、全面に配置された襷に内在するヒンジを持っている。このヒンジのエッジが立つように形を整えながら数点を糸で留めていくことで生地を立体化させる。

得られる立体形状は一意ではないが、襷のパターンから大きく制約される。

プロセスは2段階、織りのデータ作成時に襷の配置を決定する段階と織られた生地から立体を構成する段階がある。それぞれが決定的ではなく、時差のある恣意的な操作と、物質として

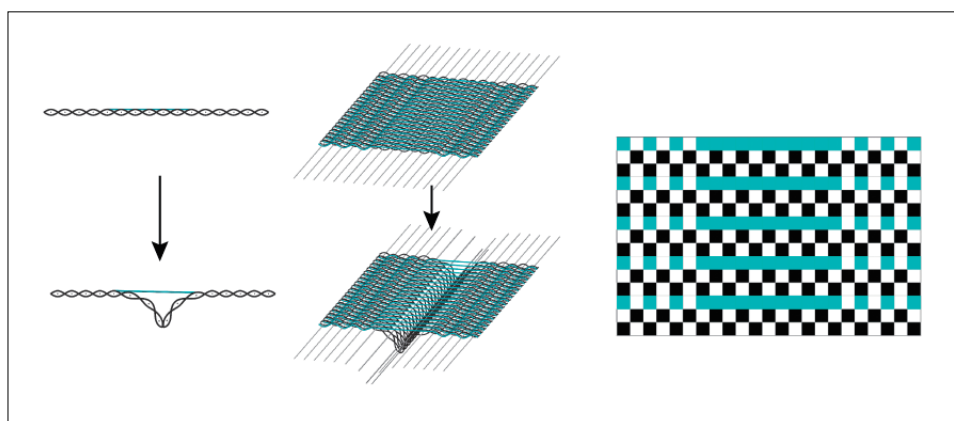


図3：ピンタック織りの図解
左：断面図、中央：見取り図、右：組織図

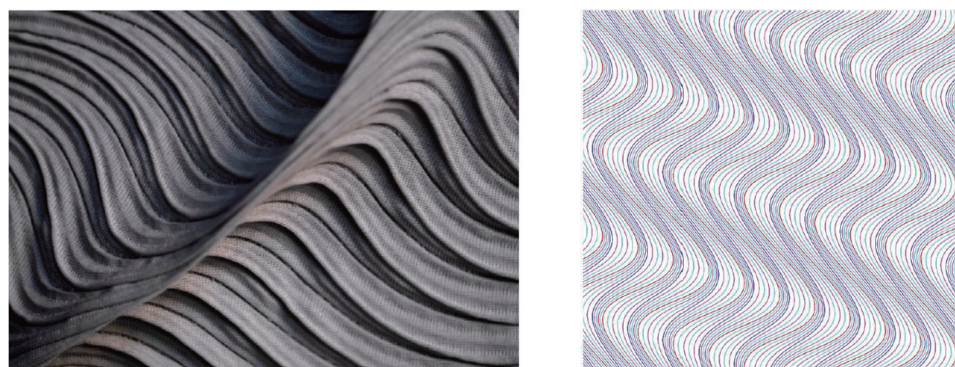


図4：ヒンジによってエッジが立った様子（左）とヒンジを生む襷の配置パターン（右）

の生地との対話から形が作られるプロセスがこの取り組みのデジタルファブリケーションに対する姿勢を特徴づけている。

■ 4 従来の技術（または機能）との相違

従来手法の改善では2022年に上條自身が従来手法を用いて制作した同種の作品に比べてテキスタイル使用量を約27倍に増やした大型の作品を制作することができた。

ジャカード織りの再読では、他の4Dファブリケーションテキスタイルに比べて量産性が担保されていることに本プロジェクトの利点がある。類似する既存のジャカード織りと比べると、積極的に形態を保持した立体形状を作る点で他の手法とは区別される。

■ 5 期待される効果

4Dファブリケーションテキスタイルの社会実装に向けて以下のような効果を持つことが期待される。

- ・プロダクトデザイン領域における4Dファブリケーションテキスタイルに着想した取り組みの活性化：

本プロジェクトを通じて、量産可能な手法としての4Dファブリケーションテキスタイルによって生じる造形のバリエーションを示した。すでにプロダクトデザイン領域の一部からは関心を集めている4Dファブリケーションテキスタイルから着想した取り組みが活性化されることが期待される。



図5：《forming patterns》作品写真

・メディア芸術領域における4Dファブリケーションテキスタイルの認知度向上：

これまででもデジタルファブリケーションを用いた作品が数多く発表されてきたメディア芸術領域においても4Dファブリケーションテキスタイルの認知度は依然として低い。本プロジェクトの一環で制作されたテキスタイルをメディアとした彫刻《forming patterns》はアート作品としての展示予定がある。メディア芸術領域における数少ない4Dファブリケーションテキスタイルを用いた作品を発表することで認知度が向上することが期待される。

・デジタルファブリケーション領域におけるジャカード織機への関心の向上：

デジタルファブリケーション領域でジャカード織機を用いた研究は多くない。その理由の一つに、ジャカード織機を用いてできることが十分に理解されていないことが考えられる。本プロジェクトを通じてジャカード織機を、特に立体造形を行うためのデジタルファブリケーション機器として利用することへの関心が向上することが期待される。

6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトの成果は2025年3月に開催される展示でアート作品として鑑賞可能、購入可能な作品として活用される。今後のアート作品としての展開に加えて、開発した4Dファブリケーションテキスタイルは量産可能であることが特徴であるため、プロダクトデザイン、テキスタイルデザイン、ファッションデザインなどへと展開することを計画している。

近況

未踏で開発したテキスタイルを用いた作品を、大阪・関西万博のIPA「LIFE 2050 パピリオン」に出展したことをきっかけに、同閉会式での衣装制作に関わらせていただきました。ダンスユニット・アオイツキのお二人が着用する衣装素材を、開発したテキスタイルを用いて制作しました。制作した素材をもとにアオイツキのお二人やスタイリストのRemi Takenouchi氏、デザイナーのKANEHIRO氏が素材の双安定性や伸縮性などの特性を積極的に活かした動きを考案されてダンスパフォーマンスの中に取り入れてくださいました。自分の制作した素材が、他の分野の専門家の手によって更なる可能性へと広がっていくプロセスに深く感動しました。

また、FUJI TEXTILE WEEKや台湾のCHIAYI DESIGN WEEKでは200平米のテキスタイルを使ったインスタレーションを制作し、照明の製造・販売を行う株式会社YAMAGIWAからは4Dファブリケーションテキスタイルを用いた照明が発売されました。これらはいずれも量産可能性を獲得したことによって社会との接点を獲得できた事例です。

現在は東京大学大学院で博士課程に在籍しています。これからは研究・アート・デザインのいずれの分野でも一層精進して参ります。

PMの評価

採択時の評価

3つの評価軸「没入性とレジリエンス」、「未踏性と時代の技術的背景理解」、「共感性と巻き込み力」に基づき、多数の応募の中から特に独創性が高く、実装可能性があり、クリエイタの成長が期待できるプロジェクトを採択した。本プロジェクトは、伝統技術を現代的視点で再解釈する革新性と、物質と情報の境界を探究する深みを高く評価した。特に手と素材のインタラクションによる、自然の創発プロセスを再帰的にデジタル制御するという野心的なアプローチと、材料科学の新たなパラダイムを提示する可能性に注目した。

プロジェクト終了時の評価

技術的側面では、以下の点が特に優れている：

1. 二方向からのアプローチ：従来の4Dファブリケーション手法の改善と、既存のテキスタイル技術の再解釈という二方向からアプローチしている点は極めて独創的である。2. ヒンジ構造の発見：サインカーブの振幅を大小交互に配置した襞^{ひだ}パターンが、一方向に曲がりやすく他方に曲がりにくいヒンジとして機能することを発見した点は、新たな構造原理の発見として高く評価できる。3. 量産可能性の実証：従来の4Dファブリケーションテキスタイルに比べて、ジャカード織りを用いたアプローチが量産性に優れていることを実証した点は、この技術の社会実装に向けた重要な成果である。

文化的側面では、以下の点が注目される：

1. 伝統技術の現代的再解釈：ジャカード織りという伝統的技術を、4Dファブリケーションという現代的文脈で再解釈している点は、技術の歴史的連続性と発展を示す重要な取り組みである。2. 芸術表現としての深み：技術的要素と造形表現が高いレベルで融合している点が評価できる。3. 多分野への展開可能性：プロダクトデザイン、テキスタイルデザイン、ファッションデザインなど、複数の分野への展開可能性を示している点も評価できる。

総合的に見て、本プロジェクトは伝統と革新、技術と芸術、理論と実践のバランスが優れており、未踏IT人材発掘・育成事業が目指す「未踏的な取り組み」として高く評価できる。特に、単なる新技術の開発ではなく、既存技術の再解釈という視点は、持続可能な技術発展の観点からも示唆に富んでいる。計算機環境と物理環境の創造的融合を通じて、デジタルネイチャーの新たな可能性を開拓した点で、極めて価値の高いプロジェクトであると評価できる。

修了後にも続く「つながり」

未踏期間を終えても未踏のつながりは続いていきます。

●多くのものを得られる交流の場

未踏では多くのつながりが得られたと感じています。未踏同期やPMの竹迫さんとは定期的に連絡を取っており、今でも未踏関係で集まる機会もあります。未踏を修了して1年経ちましたが、いまだによい刺激を得ています。(高橋 伊織)

未踏のイベントの中でも、交流会でご飯を食べながらみんなで開発を発表しあっている時間が1番楽しかったです！ なかなかない経験だと思うので、未踏に採択されたらぜひ参加してみてください！(成瀬 宏亮)

未踏はプロジェクト期間中だけでなく、修了後も成果を展示する機会をいただけるほか、忘年会などを通じて修了生や関係者の方々と交流できる場があります。こうした継続的なつながりは、未踏の大きな魅力だと感じています。(匿名)

●同期と創業

別プロジェクトの同期と会社を共同創業しました。いい仲間に出会えたのが一番大きかったです！(宮下 拓磨)

●純粋に未踏的開発能力が評価される

未踏は年齢や学位、所属などの制限をつけずに、ただ純粋な未踏的開発能力によって評価されるところが最大の魅力だと思います。人工知能が東大数学、司法試験、医師国家試験などの試験問題に対して高得点を取れるようになった現代では、未踏のような旧来の試験問題で測れない才能を発掘する仕組みがますます重要になっていくでしょう。(道本 将弘)

●未踏についてひとこと！

一年間試行錯誤しながらやり遂げる力がつきます！(今野 佑星、川尻 千遥、吉田 海翔)

未踏は受かるまでが大変と言いますが、受かってからが大変でした。(谷澤 健太)

「未踏」をひとことでいうと、「次のステージに進む力をもらえる場所」です。そこで得たつながりや経験は、未踏でしか手に入らなかったものだと思います。(椎名 貴太)

曾川 景介 PM 担当プロジェクト



曾川 景介 (そがわけいすけ)

newmo 株式会社 CTO

■プロフィール

京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程を修了。2010年にIPA未踏ユース事業に採択。ウェブペイ株式会社の最高技術責任者（CTO）としてクレジットカード決済のサービス基盤の開発、LINEグループ参画後、LINE Payを開発。17年6月メルカリグループに参画。株式会社メルペイ取締役CTO、株式会社メルカリ執行役員CISOなどを歴任。24年1月newmo株式会社を共同創業。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業の一環として、PMである曾川の指導のもとで3つのプロジェクト「型安全でクロスプラットフォームな次世代MLライブラリの開発」「Capability-Based Microkernelによるセキュアなユーザーレベルメモリ管理システム」「ソースコードとGUIで編集可能なシナリオテスト作成ツールの開発」が実施された。それぞれのプロジェクトの目的は、次世代の機械学習ライブラリ「Rusty Lantern」の開発、セキュアなメモリ管理システムを備えたMicrokernel「A9N」の構築、そして使いやすいシナリオテスト作成ツールの開発である。

次世代機械学習ライブラリ「Rusty Lantern」の開発では、ニューラルネットワーク開発における環境依存やランタイムエラーの問題を解決するために、Rust言語とWebGPUを組み合わせた新しいアーキテクチャを提案した。Capability-Based Microkernel「A9N」の開発では、従来のOSカーネルが抱える複雑さやセキュリティリスク、保守性の問題を解決するための新しいアーキテクチャを提案した。ソースコードとGUIで編集可能なシナリオテスト作成ツールの開発では、シナリオファイルをグラフ構造で表現し、直感的にテストシナリオを管理できるようにした。

総じて、3プロジェクトは、各分野における現代的な課題に対して新しいアプローチを提示し、高い技術的完成度と実用性を持つ成果を上げた。今後の発展が期待される内容である。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

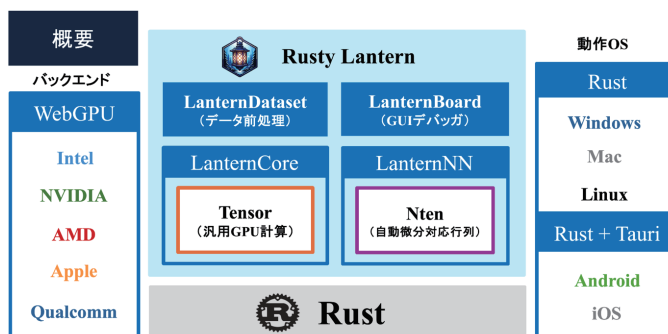
型安全でクロスプラットフォームな次世代MLライブラリの開発

— 環境依存とランタイムエラーの低減 —

道本将弘(埼玉大学)

Rust製の機械学習ライブラリRusty Lanternを開発

- 多様な環境で動作: WebGPUとRustにより環境の差異を吸収 + 書いたコードは全環境での共通資産
- コンパイル時に検証: Rustの型システムを使用してランタイムエラー徹底削減
- 専用GUIデバッガ: ブラウザで実行時の内部状態を表示して問題を迅速に特定



型安全でクロスプラットフォームな次世代MLライブラリの開発

道本 将弘 (埼玉大学工学部電気電子物理工学科)

1 背景

近年、ニューラルネットワークの持つ可能性が注目され、次々と新たな技術が開発されている。特に、モデルの高度化に伴って、GPUや専用ハードウェアといった計算アクセラレータの使用や学習プロセスの複雑化、モデル自体の複雑化が顕著である。しかし、今日のニューラルネットワークの訓練や推論に使用されるライブラリやそのライブラリを中心とするエコシステムは旧来の技術を前提として設計されており、ユーザー側の実装が比較的簡潔な数値計算には向いているが、近年の複雑なモデルを取り扱うために必要な工学的堅牢さを持たない。そのために、ニューラルネットワークの研究や開発において、本質的に関わらない作業に割く時間が増加している。

このような課題は、PythonやGPUの利用規格といった既存のライブラリやエコシステムの根幹をなす要素に起因しているため、既存ライブラリの機能追加や改修によって解決することは難しい。従って、現代のニューラルネットワーク開発に求められる要件を満たすように設計した、新しいライブラリやエコシステムをゼロから構築し直す必要がある。

2 目的

本プロジェクトでは、そのような新たなライブラリやエコシステムを作成しうる構成があることを示し、これからの時代の人工知能開発の基盤となるエコシステムの原型を作成し、方向性を示すことを目的としている。長期的には、人工知能開発の効率化の実現を通して次の世代の人工知能開発を支え、もって人間の役に立つ高性能な人工知能の誕生を下支えすることを目指す。

3 開発の内容

上記の目的のために本プロジェクトで開発した機械学習ライブラリ「Rusty Lantern」の構成概要を図1に示す。Rusty Lantern本体はRust言語で実装されており、外部に数値計算ライブラリ等の依存を持たない。

計算バックエンドにはCPUバックエンドおよび、WebGPU規格を使用したGPUバックエンドが用意されている。これらのバックエンド実装は全て四則演算からフルスクラッチされている。WebGPUバックエンドは、FireFox ブラウザの内部実装であるWgpuを使用し、ブラウザの介在なしでネイティブコードとして動作する。それらのバックエンドごとの実装を取りまとめ抽象化するものとしてLanternCoreがあり、汎用的なCPUおよびGPUでの行列計算、行列操作の機能を提供する。さらにLanternCoreを使用する形で、LanternDatasetとLanternNNが実装されている。LanternDatasetはAIモデルの学習に必要な訓練データおよび推論時の入力データをストレージから読み出し、ユーザーが指定した方法で前処理を行って、行列型にまとめる機能を持つ。LanternNNはニューラルネットワークの学習アルゴリズムであるバックプロパゲーションを実行するために必要な計算グラフの構築および自動微分の機能を備えている。LanternBoardはこれらの3つのシステムに対してGUIによるデバッグを行うことができるブラウザ上で動くアプリケーションであり、計算プロセス側に立てられたAPIを介して内部状態の確認や簡単な指示を行うことができる。これらの機能は図1の右側に示す5つのOS上で実行することができる。

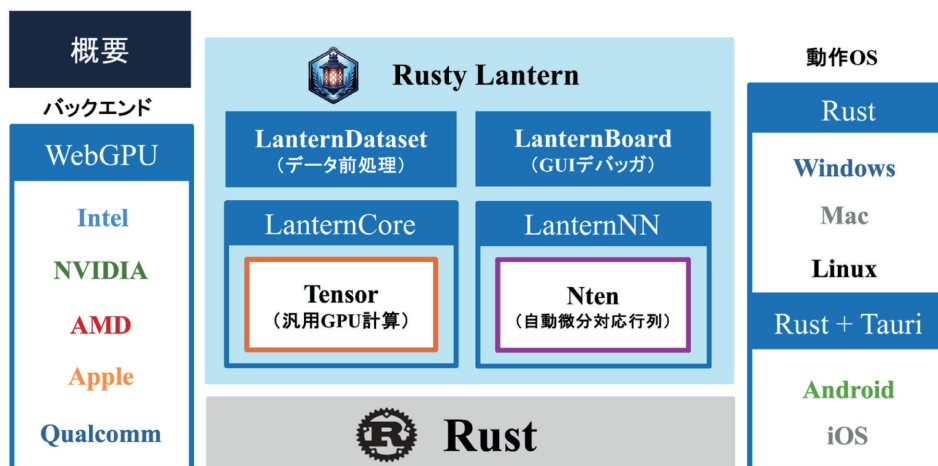


図1：Rusty Lanternの概要

Rusty Lanternはニューラルネットワークを実行する際に図2に示す動作をする。ユーザーが実装するものはモデル定義、データ入力、計算グラフ構築、パラメータ更新処理であり、実際の計算実行の管理はシステム側で行う。これによって、システム側が使用する演算の統合、実装の透過的な置き換えや並列化、計算実行の非同期化を行うことを可能にしている。

データ形式と演算の抽象化階層は図3のように5段階に分けられている。低レイヤー側の機能はLanternCoreに含まれており、自動微分レイヤー以降はLanternNNに含まれている。

このうち、実体演算レイヤーと自動微分レイヤーはユーザーがライブラリに備えられている一般的な演算のみを使用する場合には意識する必要はない。独自の演算が必要な場合にはカスタム演算として実装することができる。

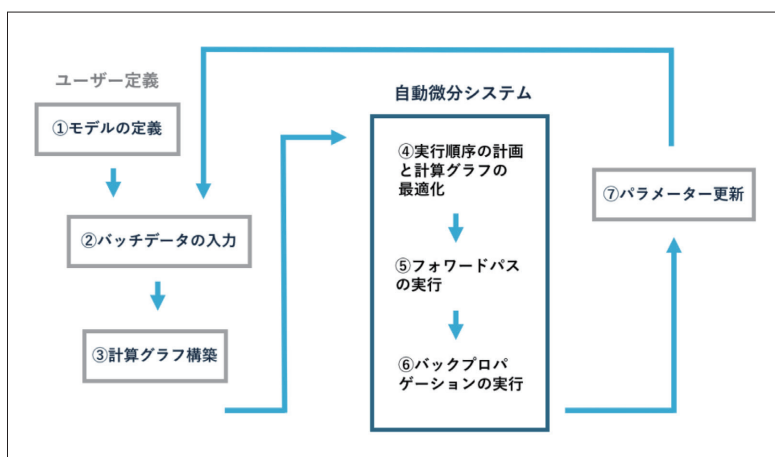


図2：Rusty Lanternのニューラルネットワーク実行順序

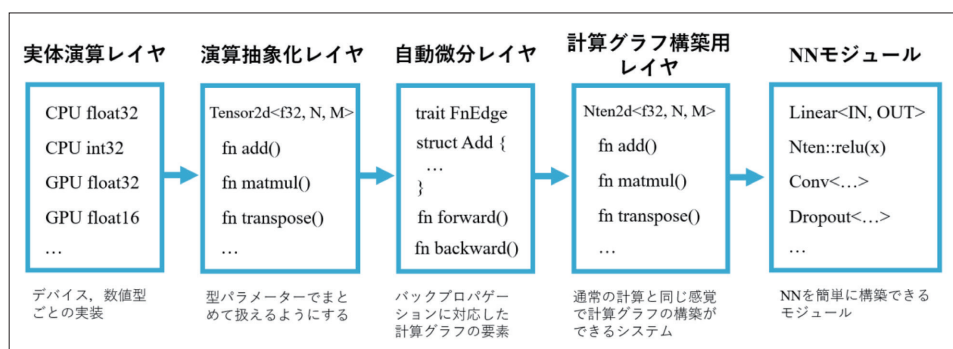


図3：Rusty Lanternの内部階層

演算における型制約と型推論は図4に示すサンプルコードのような使用感を持つ。行列の演算ではスカラーの場合と異なり引数の行列の形状について計算可能な組み合わせと未定義の組み合わせがある。例えば、要素ごとの演算では引数となる2つの行列は同形状である必要があるし、行列積の場合は図4でNと指定した箇所の大きさが一致している必要がある。従って、これらの誤りをコンパイル時に検出することはランタイムエラーを削減し、デバッグの手間を

減らす効果がある。

計算可能な組み合わせは演算関数ごとに定義されており、その戻り値の形状は型推論によって自動的に決定される。図4ではmatmul関数の戻り値「c」の後に続く「:」以降の灰色の部分 が型推論によって示された形状である。これによって、操作している値の形状変化を追うことができ、可読性が向上する。

```
#[test]
▶ Run Test | Debug
fn matmul_gpu_ones() {
    const N: usize = 8;
    let a: Tensor2d<Gf32, R: 3, N> = Tensor2d::new_ones();
    let b: Tensor2d<Gf32, N, C: 5> = Tensor2d::new_ones();
    let c: Tensor2d<Gf32, 3, 5> = a.matmul(&b);
    println!("{}", c);
}
```

図4：LanternCoreを使用した行列積計算のサンプルコード

4 従来の技術（または機能）との相違

現在のデファクトスタンダードであるPyTorchやTensorFlowといったPython系ライブラリは、Python ライブラリやGPUバックエンドに起因する環境依存が多く、さらにPythonがインタプリタ言語であることに起因して、ランタイムエラーの抑制が困難である。これらは、複雑化する現代のニューラルネットワークを扱う上で生産性の向上を阻害している。

Rusty Lanternでは、広範な環境向けにコンパイルできるRust言語と、高い可搬性を持つWebGPUをGPUの抽象化として使用し環境の差異を吸収することによって、どこでも同じコードを実行可能である。

また、Rustの型システムを使用してニューラルネットワーク向けに最適な型設計を行い、コンパイル時にほとんどの計算互換性を検証することによって、ランタイムエラーが大幅に低減された。さらに、GUIデバッガによって内部状態を可視化する機能により、実行時の問題も迅速に特定できる。

5 期待される効果

Rusty Lanterを使用すれば各種OS、GPUに対しても単一ソースで実装を記述でき、クラウドからモバイル端末まで広範なデバイスでコードの変更なしで実行可能である。可搬性を持たせることによって、開発マシンの制約がなくなるとともに、開発環境構築の手間を劇的に低減し、さらに環境に依存しないためコードの長期的な再現性が保たれる。また、開発環境と同じコードが使用できるためユーザーアプリケーションへの展開も高速になる。

また、専用の型設計とGUIデバッガにより、複雑なAIモデルに対しても高い開発効率を備える。

これによって、開発者の時間や思考力といったリソースを本質に集中させることでさらに高度なAIの研究を加速させる。また、応用アプリケーションの開発や保守も容易にする。

6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトの成果をカンファレンスでの発表やSNSでの発信を通してニューラルネットワークの研究者や応用アプリケーションの開発者に周知し、今後の人工知能開発に貢献する。また、ドキュメントの整備やサンプルコードの充実化、ユーザーからのフィードバックの反映、コントリビュータの獲得などを進め、OSSプロジェクトとして発展させる。

関連URL

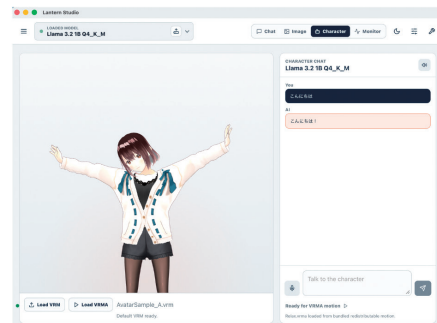
Rusty Lantern ライブラリの公式広報Xアカウント：https://x.com/RustyLantern_rs

近況

本プロジェクトで開発された「Rusty Lantern」は2026年に新たに生まれ変わり、異種GPU間での可搬性というメリットを保ったまま、CUDAやROCmなど高速な数値計算向け規格にも対応したより実用的なMLライブラリとして公開されています。これは、私が2025年から作っていた、Rustで異種GPU言語を抽象化するGPUカーネル記述言語「CommonCL」の成果も取り入れた刷新です。

最近は、この技術スタックでStable Diffusionを実装して遊んだり、量子化LLM推論を実装したりと、どこでも動く機械学習ライブラリを目指して楽しく開発中です。

Rusty Lanternを使って実装した
Stable Diffusionで生成した画像



Rusty Lanternを使って実装した
量子化LLMでチャットアプリ実験

PMの評価

採択時の評価

どのようなOSやどのベンダーのGPUであっても動作することを目指した、まさに次世代のMLライブラリを開発しようとする提案である。加えて提案者は、型システムを導入することでデバッグの容易性や開発効率の向上も見込めると考えている。本提案のユニークなところはGPUの抽象化レイヤーとしてWebGPUを用いることである。現在主流となっているMLやAIの環境は特定のベンダーのプロプライエタリなライブラリに大きく依存しており、今後のこの領域の発展には本提案が貢献できる余地があると評価した。また提案者は、一つの問題を解決するだけでなく、他の問題も同時に解決しようという大胆な発想を持っており、OSやGPUベンダーに対してクロスプラットフォームであるだけでなく、同時に型安全なライブラリとして提供しようとする点も評価した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、既存のPythonベースの機械学習ライブラリが抱える環境依存やランタイムエラーの多発といった課題を、Rustを活用することで根本的に解決した、独自の型システムを導入し、コンパイル時に計算互換性を検証することで、実装の堅牢性を高めることに成功した。さらに、WebGPUを活用したクロスプラットフォーム対応により、環境構築の負担を軽減する点も実用的で優れている。

機械学習ライブラリ分野では、PyTorchやTensorFlowがデファクトスタンダードとなっているが、Rustをベースにした型安全なライブラリを実現することは野心的な挑戦であった。クロスプラットフォームを実現するためにMLライブラリのバックエンドにWebGPUを活用している点も革新的であり、将来的にブラウザ上での実行も可能になる新たな応用可能性も示唆している。しかし、現状のデファクトスタンダードと比較した場合の優位性を本プロジェクト期間内に十分に実証できなかったことが残念であった。

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

Capability-Based Microkernelによるセキュアなユーザレベルメモリ管理システム — 最速の3rd-Generation Microkernelとその応用 —

伊組 烈火



A9N Microkernel

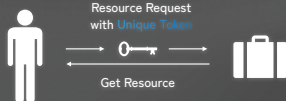
高速なIPC機構を備える
3rd-Generation Microkernel
<https://github.com/horizon2038/A9N>



Nun

A9N Microkernel上に
OSを構築可能なFramework
<https://github.com/horizon2038/Nun>

Capabilityを用いた
User-Level Memory Managementを可能とする



IPC Benchmarkで
世界最高レベルの速度を達成

590 Cycles / 91.4 ns

Rustコード8行で
最小のOSを構築可能

ModernなError Typesを利用
Kernel Callにおけるresult<T, E>の使用



KOITO

User-Levelで
Memory Managementを実行するOS

User-Levelで
SLAB Allocator, Buddy Systemを実装

Capability-Based Microkernel による セキュアなユーザレベルメモリ管理システム

伊組 烈火 (フリーランス)

1 背景

近年、計算機の民主化による Internet of Things (IoT) の拡大は大きなムーブメントを生み出している。Moore's Law で予見されたように、半導体集積回路に対する面積当たりのトランジスタ数は指数関数的に増加した。このような Hardware の技術革新により、かつては軍事や研究機関に限られていた高度な計算資源が一般にも普及し利用されるようになった。そして、これらは相互に Network を形成し、Ubiquitous Computing の実現に向け進化を遂げつつある。これにより、Hardware と User を繋ぐ基盤となる Kernel や OS といった Software の役割もますます重要視されるように変化している。しかし、Linux のように Monolithic な構造を持つ Kernel はもはや現代の要求に適合しなくなりつつある。このような Architecture は Project 成長に伴う Code Base の肥大化が避けられず、Trusted Computing Base (TCB) の拡大による

Security上のリスクが増大する。また、人的リソースの限界による開発の困難化や、利害関係者の増加に伴う意思決定スピードの低下も問題となる。Kernelを柔軟かつ安定したものとするため、MicrokernelというArchitectureが存在する。MicrokernelはMonolithic Kernelとは異なり、提供する機構を最小化することでUserへ最小限のApplication Programming Interface (API)のみを提供するような設計手法である。従って、ほぼ全てのSystem ComponentはUser-Levelで実行され、安定性と柔軟性を両立させることができる。また、User-Levelで実行されるそれぞれのComponentは互いにInter Process Communication (IPC) し、ある種のNetworkを形成する。そのため、Ubiquitous Computingのような相互通信を基本とするSystemにも適する。ただし、Microkernelは性能面の問題を抱えている。Microkernelはその特性上、IPCの実行回数がMonolithic Kernelと比較しても増加しOverheadとなる。また、多くのMicrokernelはSecurity上の問題からMemory ManagementをKernel-Levelで実行する傾向にあり、Microkernelの持つ利点が損なわれてしまう問題がある。

2 目的

MonolithicなKernelやMicrokernelの問題を解決するためには、柔軟性と安定性、安全性、そして性能を両立させる必要がある。そのため、本Projectではこれらの要求を満たす新たなKernelと、そのKernelをBaseとしたSystemの開発を実施した。

3 開発の内容

本Projectでは、Object-Capability Modelによる3rd-Generation Capability-BasedMicrokernelである「A9N Microkernel」を開発した。また、このKernelをBaseとしてOSを構築するためのFrameworkである「Nun」と、それを用いて実装される、User-LevelでMemory Managementを実行するOSである「KOITO」を開発した。加えて、A9N MicrokernelをModernに開発するためのLibraryである「liba9n」も開発した(図1)。

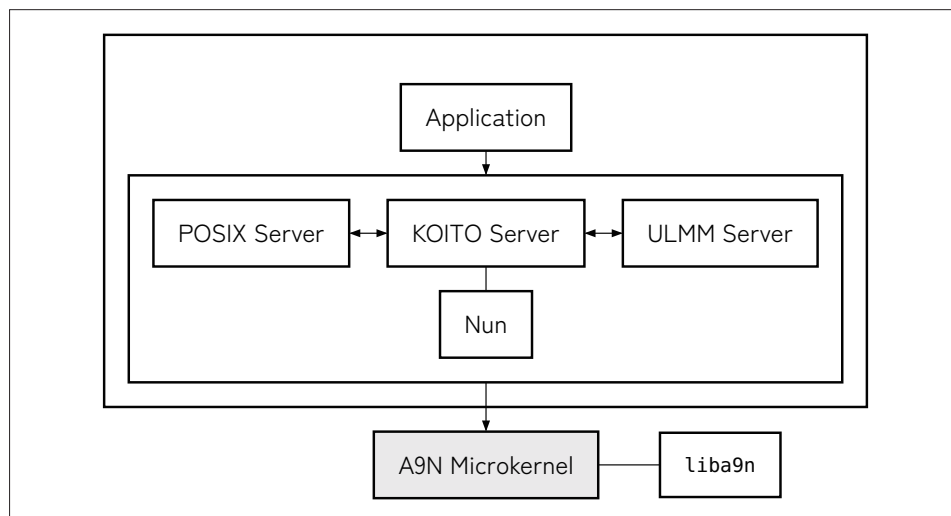


図1：Project Architecture

A9N MicrokernelはCapabilityという概念を用いることで、柔軟かつ安全にSystemを構築できる。CapabilityはあるObjectに対する操作権限を表す譲渡可能かつ偽造不可能なTokenであり、Userはこれを用いることでのみ特権的なObjectに対する操作を実行できる。従来のAccess Control List (ACL)とは異なり、Capabilityそのものが操作に必要な鍵といえる。これにより、A9N Microkernelが持つKernel-LevelAPIは極めて簡素化され、種類としてはCapabilityに対して操作を実行するCapability Callと、実行中ContextがTime Sliceを譲るYield Call、そしてDebugに使用されるDebug Callの3つのみになる。それぞれのCapabilityはRadix-Based Capability Nodeによって管理され、Addressingされる。そのため、探索にかかる時間はわずか $O(\log n)$ であり、極めて高速である。Memoryに関連する特権的操作として、Generic Capability, Address SpaceCapability, Page Table Capability、そしてFrame Capabilityなどが提供される。これによりA9N MicrokernelはKernel内にHeapを持たず、完全にUser-LevelでMemory Managementを実現する。また、これらの操作はArchitecture-Independentであり、Userは実装したMemory Management Serverを容易にPortingできる。また、A9N Microkernelは高速なIPC機構を持つ。Virtual Message RegisterによってHardware Registerを効率的に利用し、Low-LatencyなIPCを実現する。さらに、Client-Server Modelに最適化されたCallとReply ReceiveがSendやReceiveといった基本的な機構に置き換わり使用される(図2)。この機構により、IPCのさらなる高速化を実現する。

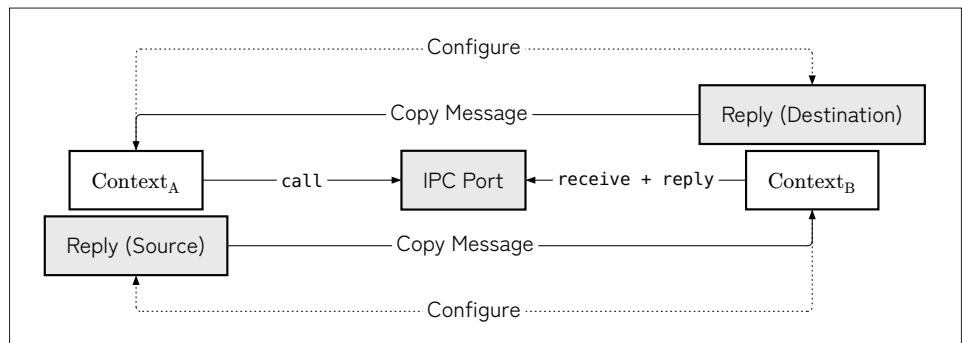


図2：Call/Reply Mechanism

NunはA9N Microkernel上にOSを構築するためのRust製Frameworkである。KernelはInit ProtocolをもってInitial Serverを起動するが、このFrameworkはそのProtocolに沿うOSを構築するために最小限の抽象化を提供する。Rustを用いることでType SafetyやMemory Safetyを保証し、またCargoによる優れたBuildSystemを享受できる。通常、Microkernel-Based SystemのStartupは複雑な処理Flowを持つが、Nunはこれを簡略化し、UserがOSを開発する際の負担を軽減する。KOITOはNunによって実装される、A9N Microkernel上で動作するOSである。A9Nによって提供されるMechanismを用い、それに対応するPolicyを実装するLayerといえる。実態としては複数のServerで実現される抽象概念であり、InitialServer, POSIX Compatible Server, User-Level Memory Management Serverによって構成される。KOITOを構成する各ServerはすべてUser-Levelで動作するため、極端なUsecaseから普遍的なUsecaseま

で動的かつ柔軟に対応することが可能となる。liba9nはA9N Microkernelのために設計されたC++20用のTemplate Libraryであり、Monadic Operationを用いたModernなError Handling機構を提供する。Standard Libraryに一切依存しないため、EmbeddedなFreestanding環境やA9NMicrokernel以外のProjectでも使用できる。

4 従来の技術との相違

既存のCapability-Based MicrokernelはArchitecture-DependentなAPIを持つことが多く、User-Level ServerのPortingが困難であることが多い。一方、A9NMicrokernelはHardware Abstraction Layerを備えることでKernel-LevelのPortabilityを実現し、さらにArchitecture-IndependentなAPIを提供することによるUser-LevelのPortabilityも実現している。また、A9N Microkernelは極めて高速なIPC機構を持ち、NICTAの開発したseL4、Kernkonzeptの開発したFiasco.OC、Googleの開発したZirconといった競合となる3rd-Generation Microkernelと比較したBenchmark（表1）の結果、590Cycles/91.4nsというx86_64 Architectureにおいてほぼ世界最速といえる値を達成した。そのため、このKernelは柔軟性、安定性、安全性、性能、さらにPortabilityを兼ね備えたものといえる。また、Rust-BasedなOS構築を支援するFrameworkの実装も他にはあまり見られない。

Kernel	Architecture	Cycles
seL4 (Fastpath)	Intel® Core™ i7-6700	786
Fiasco.OC (Fastpath)	Intel® Core™ i7-6700K	2717
Zircon	Intel® Core™ i7-6700K	8157
A9N	Intel® N150	590

表1：Single-Core IPC Round-Trip Latency cf., [1], [2]

5 期待される効果

本ProjectはあらゆるUsecaseに対応することが可能な抽象性を持っている。そのため、Embedded DeviceからServer、HPC、そして一般に使用するDesktop環境まで幅広く利用できる。あらゆるDeviceがNetworkを形成していく中で、A9NMicrokernelによるEcosystemはその基盤となることが期待される。

6 普及の見通し

現在途中まで完成しているA9N MicrokernelのDocumentに引き続き、NunやKOITO、liba9nのDocumentを作成する。これにより新規Userを獲得し普及させていく予定である。また、複数人程度のContributorを獲得し、継続して開発を実施する。

関連URL

A9N Microkernel :

<https://github.com/horizon2038/A9N>

A9N Boot Protocol(x86_64) に従った Reference Bootloader 実装 :

<https://github.com/horizon2038/A9NLoader>

A9N Microkernel 上で動作する OS を開発するための Rust 製 Framework :

<https://github.com/horizon2038/Nun>

参考文献

- [1] Z. Mi, D. Li, Z. Yang, X. Wang, and H. Chen, “SkyBridge: Fast and Secure Inter-Process Communication for Microkernels,” in Proceedings of the Fourteenth EuroSys Conference 2019, in EuroSys '19. Dresden, Germany: Association for Computing Machinery, 2019. doi: 10.1145/3302424.3303946.
- [2] “seL4 Performance.” [Online]. Available: <https://sel4.systems/About/Performance/>

近況

開発したプロジェクト群は「A9N Project」として現在も開発面・研究面において成長を続けています。

開発面でいうと、特にA9N Microkernelは期間中と比較しても実用面において大きく進化し、より一般的なユースケースへ対応できるようになりました。また、成果を使いやすくするためのRustによるエコシステム整備も進めています。

研究的な側面では、大学の研究室で仮想化技術やネットワークを学ぶ傍ら、成果の論文文化を進めています。

未踏期間を修了しても、A9N Projectの歩みは止まりません。

PMの評価

採択時の評価

Capability-Based Securityを採用することで、最小特権の原則に基づくセキュアなメモリ管理を実現すると同時に、ユーザーレベルでのメモリ管理を行うことで、柔軟性も同時に満たすOSを作ることができると提案者は考えている。メモリをCapabilityによって抽象化するという試みである。ContainerやHypervisorなど仮想化技術との親和性や、Wasmなどでの活用の可能性も評価した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、オペレーティングシステムの根幹技術に対する深い理解と、極めて高度な実装力によって構築された、現代的かつ先進的なMicrokernelシステムの開発である。開発されたCapability-Based Microkernel「A9N」は、既存のモノリシックカーネルが抱える肥大化や保守性の低下、セキュリティ上のリスクといった問題を真正面から捉え、最小限の機能のみをカーネルにとどめ、その他の機能をユーザー空間に分離するという明確な方針のもとに設計されている。特に、操作ごとに明示的な権限（Capability）を必要とする設計は、最小特権の原則を徹底し、システムの安全性を高めている点で優れている。

本プロジェクトの技術的な完成度は非常に高く、プロセス間通信（IPC）においては既存のMicrokernel（seL4、Zirconなど）を上回る世界最速クラスの性能を達成しており、Microkernelが一般的に抱える性能面のボトルネックに対しても、実装レベルで明確な解決を示している。さらに、ユーザー空間におけるメモリ管理については、SLAB AllocatorとBuddy Allocatorの組み合わせによって、安全かつ効率的な動的メモリ管理を実現しており、これはCapabilityをベースとした設計との整合性も非常に高い。

当初の計画を大きく超えて、プロジェクト中盤からはハイパーバイザ機能の実装にも着手され、A9N上で動作する仮想マシンモニタ（VMM）の基本的な構造も整備された。これにより、Microkernelとしての役割に加えて、仮想化基盤としてのポテンシャルも大きく広がっており、今後はこのVMM上でLinuxを動作させることを視野に入れた開発が継続されている。

加えて、A9N上でユーザーレベルのOSを構築するためのRust製フレームワーク「Nun」が新たに開発されており、設計段階からクリーンアーキテクチャやドメイン駆動設計（DDD）といったモダンなソフトウェア設計手法を取り入れている点が特徴的である。これにより、OS開発という低レイヤーかつ複雑な領域においても、高い可読性、保守性、再利用性を実現しており、技術的洗練度の高さが際立っている。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

ソースコードと GUI で編集可能なシナリオテスト作成ツールの開発

- GUI ベースでシナリオテストを作成する -

池奥裕太（エムスリー株式会社）

GUIでシナリオを作成可能。グラフを分岐させることでパターン違いのシナリオを表現できる。

ソースコードとGUIで編集可能なシナリオテスト作成ツールの開発

池奥 裕太（エムスリー株式会社）

1 背景

ソフトウェアの品質保証は昨今のプロダクト開発における重要な課題であり、致命的なバグはビジネスリスクや信用の損失につながる。そこで私が着目しているのがシナリオテストである。シナリオテストは、実際にユーザーがサービスを利用する流れに沿ってシステムを操作し、期待する挙動をするかを確認するテストである。バックエンドのAPIサーバに着目すると、複数のエンドポイントをまたいでリクエスト送り、期待するレスポンスが得られるかを確認する。

このようなテストでは、テストシナリオをどのように管理するのが重要となる。

しかし、プロダクトによっては100を超えるテストシナリオが存在し、これらを俯瞰的に把握することは困難になっている。この状態では、テストケースの抜け・漏れがないか確認するだけでも大変な作業である。

このような状況下で、複数のテストシナリオを効率的かつ簡単に閲覧および編集できるソリューションが求められている。

上記に加え、多くの場合テストファイルはエンジニアやQA担当者のみによって管理されている。しかしプロダクトマネージャーやデザイナー、カスタマーサポートなどより多くの人がテストケースを把握することで、品質向上に寄与できると考えている。

2 目的

本プロジェクトの目的は、GUIで直感的にシナリオを閲覧・編集できるシナリオテスト作成ツールを構築することである。YAML形式と双方向同期を可能にすることで、ソースコードとGUIエディタの両方で操作可能であり、また、グラフ構造を採用し、複数のシナリオを単一画面で把握できる仕組みを実現する。

3 開発の内容

開発したアプリケーションのスクリーンショットを図1に示す。中央に表示されているのがGUIエディタである。ユーザーはここで自由にブロックを配置し、ブロック同士を連結させることでシナリオを作成することができる。

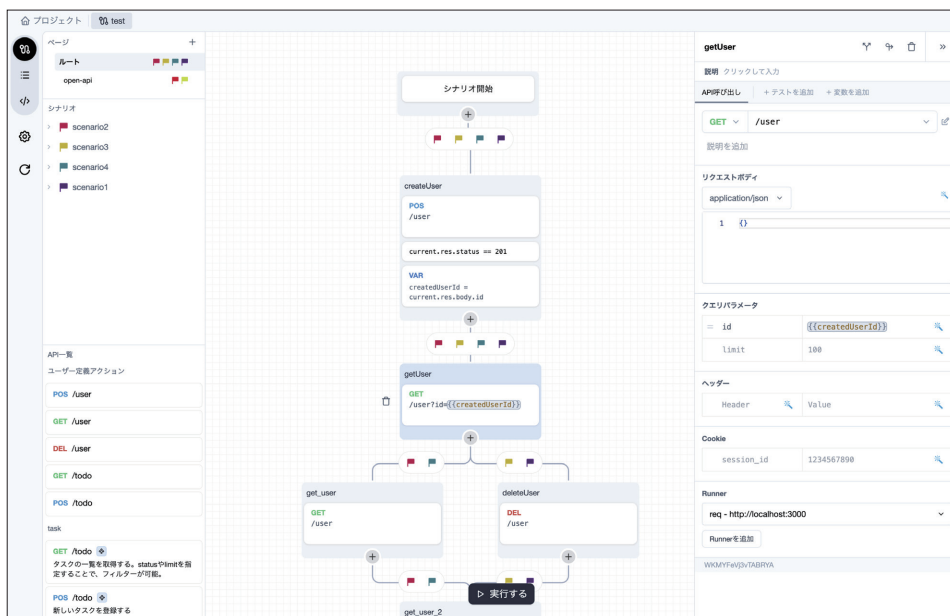


図1：テストシナリオの編集画面

各ブロックはAPI呼び出しやデータベースへのクエリなどのアクションを表す。また、レスポンスに対してテストを追加したり、後続のブロックで利用するための変数を定義できたりする機能も実装している。

作成したテストシナリオは、自動でローカルのYAMLファイルに同期される。このYAMLファイルをGit管理含めてリモート環境にプッシュすることで、CI上でレビューをしたり、テストを実行したりすることも可能である。

本ツールでは、単にシナリオをGUIで作成できるだけでなく、グラフ構造を利用した定義

が可能である。例えば図2を見ると、1つのグラフ構造で3つのシナリオが定義されていることがわかる。一般的なアプリケーションにおいてテストシナリオは枝分かれが多いため、このような表現が適していると考えている。

本ツールは、既存のOSSテストツールであるrunnをサポートしている。本ツールが出力するYAMLファイルは、そのままrunnが解釈可能なフォーマットである。

runnと互換性のあるフォーマットをサポートすることで、runnが持つエコシステムを利用できることや、既にrunnを利用しているプロジェクトに対しての導入ハードルを下げるができるというメリットがある。今後、runn以外のテストツールに対しても対応していきたい。

なお、ツール上で「実行する」のボタンを押すことで、runnを直接実行することなくテストを実行できる機能を備えている。これは、ツールがrunnを代わりに呼び出し、その結果をパースしてUI上に反映させることで実現している（図3）。

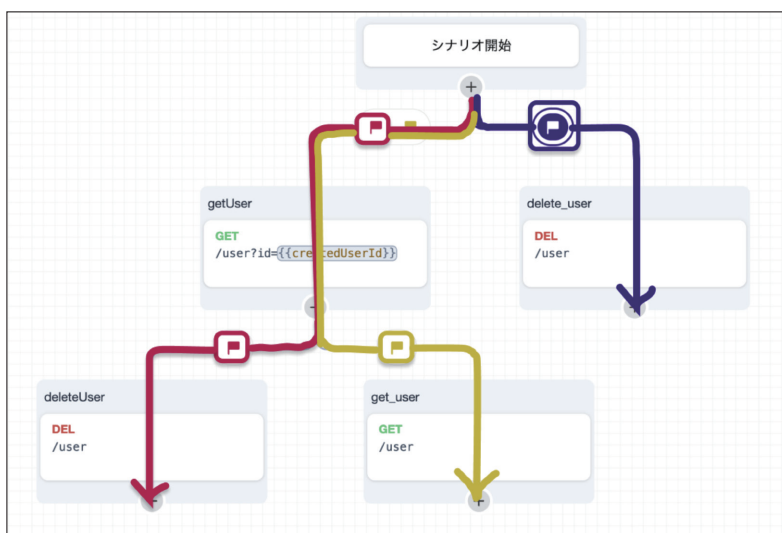


図2：単一のグラフで複数のシナリオが表現されている

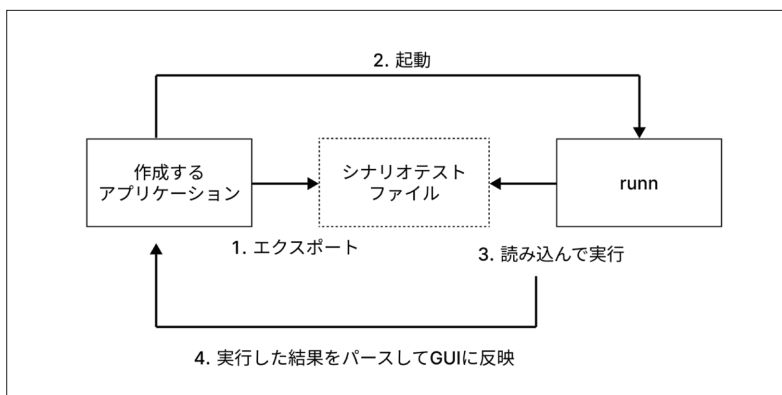


図3：テスト実行のアーキテクチャ

4 従来の技術（または機能）との相違

現在、シナリオテストを記述する方法は、1. プログラミング言語を利用して記述する、2. YAML形式で記述する、3. GUIツールを利用する、の主に3通りの方法に分類される。

しかし、複数のシナリオを単一の画面で表示するグラフ構造を用いたアプローチは多くはない。GUIツールを利用する場合は同等のことが実現可能ではあるものの、YAMLファイルへの書き出しが難しく、CI環境での実行には向いていない場合が多い。

本ツールは、GUIでの操作と、既存のライブラリが読み込み可能な形式のYAMLを出力することによって、これらの問題を解決している。

5 期待される効果

シナリオテストを実施している開発現場において、テストシナリオ管理の効率の向上に寄与できると考えている。特にテストケースに抜け・漏れがないか、仕様と相違がないかなどの確認が容易になると考えられる。また新規参画メンバーにとっても、テストの全体を把握する上で有用なツールになる。

また、GUIでシナリオを構築できるため、コーディングに抵抗があるQA担当者でも積極的にテストケースの策定に関わることができるようになるかもしれない。

6 普及の見通し

まずは、細かいバグ等を潰した上でリリースを目指す。その後、ユーザーフィードバックやインタビュー等を通じて、より使いやすいツールへと改善を続ける予定である。

近況

未踏期間中は技術的な難しさもさることながら、プロジェクトを進める難しさも痛感した一年でした。

その中でも、PMとの議論やチェックポイントごとの会議のなかでの気づきや学びが多く、技術的な側面からプロジェクト的な側面まで多くのものを得ることができました。

現在は医療ドメインの現職にてチームリーダーという立場でプロダクト開発を行っています。もちろんE2EテストやQAにも関わっており、未踏期間以上に現場レベルでの課題や難しさを感じています。私は以前から開発効率化の領域に関心があります。AIにより開発現場が大きく変わる中ではありますが、引き続きその領域に取り組んでいきたいと考えています。

PMの評価

採択時の評価

一定規模以上の開発現場にとって生産性向上と品質向上はともに重要なテーマである。そのためにソースコードに対する各種テストが重要になることは言うまでもない。本提案は、ソースコードだけでなくGUIによる編集も可能なシナリオテストのシナリオ作成ツールを開発することで、テストケースを視覚的かつ俯瞰的に観察・編集できるようにし、テストの網羅性を向上させ、迅速な開発サイクルを実現しようとする点を評価した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、ソフトウェア開発における品質保証の根幹であるシナリオテストの設計・管理に対し、視覚的かつ直感的に扱える新しいアプローチを提示し、その実装を高い完成度で実現した点が高く評価できる。

従来、シナリオテストはYAMLファイルやコードベースで管理されることが多く、視認性が低く、関係者全体での理解やレビューが難しいという課題が存在していた。本プロジェクトでは、シナリオをグラフ構造で表現し、分岐や合流といった複雑なフローを一画面で俯瞰できるUIを構築することで、その課題を根本から解決している。さらに、GUIによる直感的な操作とYAMLコードの双方向同期を実現することで、操作性と柔軟性を両立させている。このような設計思想は、エンジニアに限らず、プロダクトマネージャーや品質管理担当者など、より多くの関係者がテストプロセスに関与できる環境を整えるものであり、ソフトウェア開発チーム全体の品質意識の向上にもつながる。また、出力されるシナリオファイルがOSSのテストランナー（runn）と互換性を持つ形式であるため、Gitベースの運用やCI/CDパイプラインへの組み込みが可能となっており、視覚的に優れたGUIツールでありながらも、実務レベルでの自動化・継続的テストに対応できる点も理にかなっている。これは、既存の開発エコシステムとの親和性を重視した設計であり、現場への導入障壁を低く抑えつつも、新しい価値を提供できるようになっている。

一方で開発の進捗には課題もあり、GraphQLやgRPC対応、さらには生成AIとの連携といった構想していた拡張機能の実装には至らなかったが、それらを見据えて今後の発展が期待される。

総じて、本プロジェクトは、テスト設計という専門的で属人化しやすい分野において、より開かれた、視認性と実用性の高いツールを提供するという点で非常に意義があり、現時点での完成度のみならず、将来的な発展性と波及効果の大きさにおいても、評価できる内容である。

竹迫 良範 PM 担当プロジェクト



竹迫 良範 (たけさこ よしのり)

神山まるごと高等専門学校 デザイン・エンジニアリング学科 教授

■プロフィール

広島市立大学情報科学部卒業、学生時代に日本語検索エンジンNamazu for Win32のオープンソース開発に参加。ドリーム・アーツにて大企業向けパッケージソフトの開発をし、サイボウズ・ラボに入社。Shibuya.pm二代目リーダー、SECCON初代実行委員長、セキュリティ・キャンプ講師総合主査を務め、日本の若手IT人材育成に従事した。リクルートにて新規プロダクト開発と内製エンジニア組織の強化に携わり、アドバンスドテクノロジーラボ所長を勤めながら現職を兼任。

本プロジェクトでは、通常のITソフトウェア開発現場ではなかなか取り組むことができない新しいデジタル音楽表現やネットワーク基幹プログラム、ハードウェア系の開発プロジェクトを主に採択しサポートすることで、それらをライフワークにして継続して開発を続けられる基盤系人材の育成と、技術革新を同時に達成することを狙いとしている。

プロジェクトの採択では、以下の5つの観点から評価を行った。

- (1) 課題設定力：未踏の新領域に進出するための独自性・革新性のあるテーマ設定ができているかどうか
- (2) 問題解決力：自分で設定した課題を解決するために必要な技術力・問題解決力を有しているかどうか
- (3) 技術の幅と深さ：誰にも負けない技術の幅と深さがあり、自分達で開発する意義・優位性があるかどうか
- (4) 将来性：終了後もさらなる発展が望め、社会的インパクトを与える可能性を秘めているかどうか
- (5) 学び：本プロジェクト遂行によって、個人と社会のそれぞれで新しい学びが得られるかどうか

これらは本プロジェクト期間中で完結できるものではないので、プロジェクト終了後も長期的にこれらのテーマに情熱を持って続けられることも重要である。プロジェクト期間中の短期成果として、一時的に評価されることも大事であるが、プロジェクト終了後も個人のライフワークとして継続することで、未踏の領域に挑戦し続ける人材の育成と、社会に対する応援メッセージも同時に伝えていく必要がある。



ジェネラティブVJソフトウェアの 開発を容易にするシステム

椎名 貴太 (大阪電気通信大学 総合情報学部 デジタルゲーム学科 学部4年)

1 背景

本プロジェクトの背景として最も影響しているものは、椎名のプログラマー、VJとしてのキャリアである。椎名はVJというリアルタイム映像表現に大きな魅力を感じ「VJになりたい」という強いモチベーションを持った。さらに、自らVJソフトウェアを開発しVJパフォーマンスを行う人々が居ることを知り、椎名はプログラミングに強い興味を持った。

加えて、その時期に椎名はVRDG+H#1 Keijiro Takahashi × DUB-Russellというライブパフォーマンス動画に出会い強い感動と衝撃を受ける。本ライブパフォーマンスの映像表現は

Unityで実装されており、いわゆるジェネラティブVJである。

これらの出会いにより、椎名はプリレンダVJとジェネラティブVJ、プログラミングに強い興味を持ち、プログラマー、VJとしてのキャリアを歩み始めた。キャリアを歩む中で、VJを広めることで次の世代の人々がVJをきっかけに新たなキャリアを歩めるのではないかと考えた。

まずVJパフォーマンスを行うことの楽しさをより多くの人が体験できないかと考え、市販のVJソフトウェアよりも安価で、かつ本格的なプリレンダVJソフトウェア「SynapseRack」を開発、販売した。

次にジェネラティブVJを始めるための敷居を下げることを目指した。これらが本プロジェクトの背景である。

2 目的

本プロジェクトの目的は以下の3つである。

- ①ジェネラティブVJソフトウェアの開発を容易にすること
- ②ジェネラティブVJの楽しさを多くの人が体験できること
- ③ノンプログラマーが本プロジェクトをきっかけにプログラマーとして成長すること

①はジェネラティブVJソフトウェアを開発するためにはプログラミングに関する知識が必要であるという部分を解決することである。本プロジェクトではノードベースプログラミング環境「Fluss」を実装・提供することで、アーティストやノンプログラマーがノーコードでジェネラティブVJソフトウェアの開発を行えることを目指す。

②は多くの人がVJパフォーマーとして、またはVJパフォーマンスを見るお客さんとしてジェネラティブVJの楽しさを体験できることを意味する。現状、ジェネラティブVJの認知度は低い。こういった問題を、①を通して多くの人を開発者かつVJパフォーマーとして促すこと、さらにVJパフォーマーにはなるつもりがない人にも、2月に開催される成果報告会にて椎名が行うジェネラティブVJのデモと発表内容を通してコンピューター技術を用いたVJの存在と楽しみ方を知ってもらうことを目指す。

③は椎名がVJの感動をきっかけにプログラマーとしてのキャリアを歩んだという経験から、本プロジェクトを通して誰か一人でも椎名と同じようにVJというエンターテインメントから感動を受け、ジェネラティブVJとして活躍し、プログラマーとして成長、キャリアを歩むことを目指す。

3 開発の内容

3.1 ノードベースUIの実装

FlussはUnityから提供されているGraph ViewというノードベースUIを実装するためのAPIを使用し、Unityエディタ拡張としてノードベースプログラミング環境を実現している。図1はプロトタイプのスクリーンショットである。Graph View APIについて調査し、簡単なノードベースプログラミングを実装した。より効率的にノードベースプログラミング環境を実装するためGraph View APIをラップしたライブラリNodeGraphProcessorを使用し開発を続けた。

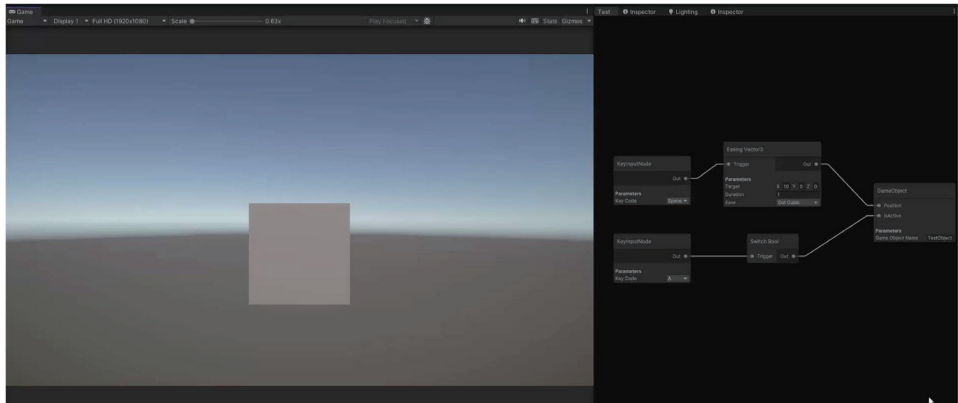


図1：Unityエディタ拡張として実装したノードベースプログラミング環境

3.2 変数を参照する機能の実装

UnityでジェネラティブVJソフトウェアのプログラミングを行うためには、変数と参照が必須である。

Unityで扱われているデータはエディタ上で扱うのか、ランタイム（シーン）で扱うのかで大きく2つに分かれている。Unityの仕様として、これらはライフサイクルが違うため、エディタ上のものをランタイムで参照したり、逆にランタイムでエディタ上のものを参照したりすることは困難である。そのため、ランタイム上にある3Dオブジェクトを、ノードベースプログラミング環境のエディタ上で参照する機能を実装するためには工夫が必要だった。既にUnityVisual Scriptingや、Unity Timelineといったエディタ上の機能がランタイム上のものを参照している機能があったため、それを調査し、変数を参照する機能の実装を行った。

3.3 ホットリロードの実装

Unity C#にはコンパイル時間が長いという欠点がある。逆にほかのノードベースツールではノードをつないだら即座に結果が反映され、プログラミングのイテレーションが早く回せるという利点がある。そこで、本プロジェクトもUnity上でジェネラティブVJソフトウェアの開発のイテレーションを素早く回せるようにし、よりよい開発体験を提供するためにホットリロード機能を実装した。

3.4 様々なノードの実装

ジェネラティブVJソフトウェアの開発に必要な機能を持ったノードを開発していった。実装したノードの一部を挙げると「ランダムな数字を出力するノード」「キーボードの入力を受け付けるノード」「GUIの入力を受け付けるノード」「数値をアニメーションさせるノード」「複数のカメラを切り替えるノード」「3Dオブジェクトの座標を書き換えるノード」などである。

3.5 ノードベースプログラミング環境「Fluss」の完成

図2はUnityに標準で搭載されているノードベースプログラミング環境Unity VisualScriptingで「オブジェクトを回転させる」という実装をした時のスクリーンショットである。対して

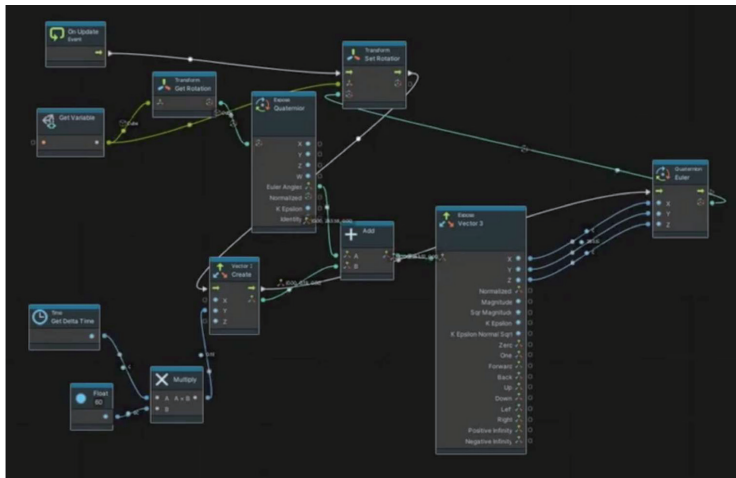


図2：Unity Visual Scripting で実装した様子

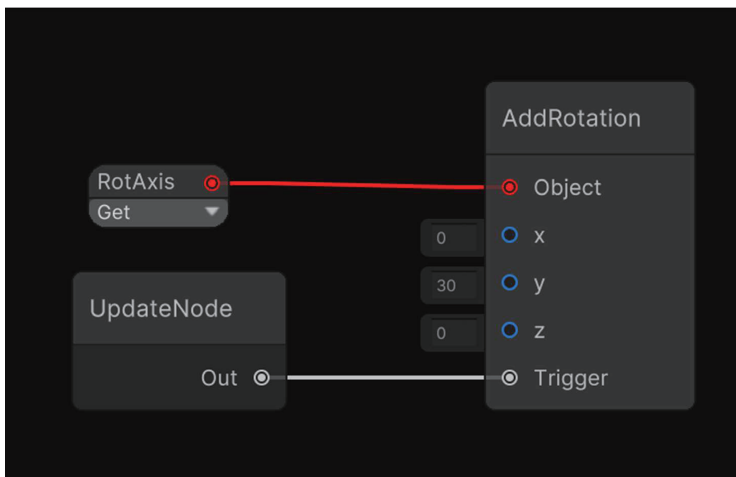


図3：Flussで実装した様子

図3はFlussで同じ動作を実装した時のスクリーンショットである。Unity Visual ScriptingでもジェネラティブVJソフトウェアの開発は行えるが、Flussと比べてノードの数が多く、より複雑になっている。

それに対して本プロジェクトFlussはたった3つのノードで「オブジェクトを回転させる」という実装を行えている。このようにFlussはジェネラティブVJソフトウェアの開発に特化した、ノンプログラマーやアーティストが扱える容易なノードベースプログラミング環境となった。ジェネラティブVJソフトウェア開発においてはソフトウェア開発やゲームプログラミングのように「なんでもできる」必要はないが、容易さを優先した結果「誰が作っても同じような表現になる」ことは問題である。Flussはそのようなバランスを調整し、容易でかつ、プログラマブルであることを実現した。Flussは現在オープンソースソフトウェアとしてMIT License

のもと公開されている。

■ 4 従来の技術（または機能）との相違

本プロジェクト以外にもノードベースプログラミング環境は沢山ある。ジェネラティブVJ表現に使えるものに限ってもTouchDesigner、vuvu、cables.gl、Notchなどが挙げられる。これらとFlussの相違は大きく3つある。

1つ目はノードベースのプログラムがコンパクトであることが挙げられる。これはリアクティブプログラミングというプログラミング手法をベースにノードベースの処理を実装したことによって、ノードベースプログラミングのUIが宣言的であることを有効的にノードベースの処理に活用できたからである。

2つ目はジェネラティブVJ表現に特化しているという点である。一般的なノードベースプログラミング環境では、なんでもできる事を目標にかなり細かい単位の機能を1つのノードとして扱っている。しかし、ジェネラティブVJソフトウェアの開発において「なんでもできる」必要はない。FlussではジェネラティブVJ表現に必要な細かさで機能を分け、VJ表現に特化したうえで、プログラマブルであるという特徴を持っている。

3つ目はユーザーがソフトウェアエンジニアとしてのキャリアを歩む可能性を持っている点である。Flussではカスタムノードを実装することができる。これはユーザーがテンプレートに沿ったC#コードを書くことで、容易に新しい機能を持ったノードを実装することができるこの機能をきっかけにノンプログラマーやアーティストがC#に触れプログラマーとして成長する可能性を秘めている。さらにFlussはUnity上で動作しており、Unityは商業的に使用されることが多い。つまり、ユーザーがこのカスタムノードを実装することで得た知識は商業的に価値があるといえる。

■ 5 期待される効果

本プロジェクトで開発したFlussはUnity上で動作するノードベースプログラミング環境となった。その結果、Unityエンジニアから3Dアーティストまで幅広いユーザーが使用することができる。そういった点で今までプログラマーでかつアーティストである人しか触れることができなかったジェネラティブVJ、ジェネラティブアート、デモシーンといったコンピュータアートカルチャーにより多くの人が参入し盛り上がる効果が期待できる。

また本プロジェクトを期にコンピュータアートに触れたアーティストはプログラマー、エンジニアとしてのキャリアを歩む可能性、逆にプログラマー、エンジニアはアーティストとしてのキャリアを歩む可能性があり、背景にあった椎名の想いである「次の世代の人々がVJをきっかけに新たなキャリアを歩めるのではないか」というモチベーションを達成し、多くの人のキャリアを変える効果も期待できる。

■ 6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトではUnity上で動作するジェネラティブVJソフトウェアの開発に特化したノードベースプログラミング環境「Fluss」を実装することができた。FlussはGitHubにてOSSとして公開しており、UnityやBlender等のDCCツールは使えるがプログラミングはできないといったアーティストがジェネラティブVJを始めるきっかけとして今後機能することを期待

している。そのためにドキュメントの整備や、自身がFlussを使って様々なジェネラティブVJを行うこと、ノードの追加などのジェネラティブVJソフトウェアの開発のための新機能の追加などを考えている。

また、背景でも触れたように、本プロジェクトは自分の人生へ大きな影響を与えたジェネラティブVJという文化へ貢献していきたいという強いモチベーションによる活動のひとつである。引き続きこのモチベーションを元に、ソフトウェア開発に限らず、自身がVJとして活躍し多くの人に感動を与えること、イベント運営者として文化が続いていくための土台を作っていくことなど、人生を通して様々なアプローチを行っていく。

関連URL

開発成果を公開しているWebサイト：<https://mitou.sainakey.com/>

ジェネラティブVJソフトウェアの開発を容易にするシステム「Fluss」のリポジトリ：

<https://github.com/SainaKey/Fluss.BRP-public>

プリレンダVJソフトウェア「SynapseRack」の公式Webサイト：<https://synapserack.com/>

開発者個人Webサイト：<https://www.sainakey.com/>

近況

修了後から約1年、株式会社SynapseRackを設立しました。未踏のデモで使用したプリレンダVJソフトウェア「SynapseRack」を中心に、クリエイティブのためのソフトウェアを開発する法人です。「クリエイティブの手段を増やす」をミッションに、SynapseRackはもちろん、未踏期間中に開発した「Fluss」や各種クリエイティブツールの開発・販売を目標としています。SynapseRackもこの1年で大きく進化し、β1.0ではパフォーマンスの大幅向上と30以上の新機能実装、Mac対応を果たしました。ユーザーも着実に増え、VJシーンの盛り上がりを感じています。主催するジェネラティブVJイベント「draw(tokyo);」をclubasiaで開催できたことも大きな出来事でした。AIにより映像や音楽が容易に生成できる時代だからこそ、AIでは生成できない「生の体験」であるVJやライブパフォーマンスはより重要になると考えています。その体験を支えるソフトウェアをこれからも作り続けていきます。

PMの評価

採択時の評価

本提案は、WebGPUを用いてジェネラティブVJを実現するJavaScriptプログラムを、探索しながら作成できるソフトウェアを開発することである。現状のジェネラティブVJにはノンプログラマーとプログラマーの間には大きな参入障壁があり、本ソフトウェアがこれらの壁を乗り越えることによって、クリエイティブとエンジニアリングの双方をつなぐ存在になると良い。

提案者はUnityでの開発実績やBOOTHでの自作VJソフトの販売実績もあり、ノードベースとコードベースを行き来しながら新しいVJ表現を探索できる価値をよく理解している。プロトタイプの開発では、いくつかのプリミティブな表現を地道に実装していくことになると思うが、このソフトウェアでインパクトのある表現を実現できないと最先端のVJへの導入は難しい。このプロジェクトにおいては、単なる機能の実装だけではなく、新しい表現の引き出しが増えることも必要である。

プロジェクト終了時の評価

成果報告会でデモの実演を行うために、このプロジェクトの成果物である「Fluss」を使用してジェネラティブVJソフトウェア開発した。コンセプトとして、ジェネラティブな表現があること、クラブのような激しい映像の変化があること、また本プロジェクトと直接は関係ないがリアルタイムCGのリッチさを表現することを目指として映像制作のプログラミングを実施した。

最終的にプロジェクト期間中にUnity上で動作するノードベースのジェネラティブVJソフトウェア開発環境「Fluss」を実装することができ、デモも実施することができたので、開発に成功したといえる。FlussはオープンソースソフトウェアとしてMIT LicenseのもとでGitHub上に公開し (<https://github.com/SainaKey/Fluss.BRP-public>)、誰でも使える状態になっている。

提案当初の「WebGPUベースのWeb3D表現ライブラリ開発」や「Webアプリケーション開発」は、技術的な限界や目標達成の難しさから断念し、代わりに、より目的に適したUnityエディタ拡張としての実装に方向転換した。技術選定や機能仕様の検討において、複数のプロトタイプを開発し、進捗報告会議でのフィードバックを通じて検討を重ねた。最終的に、初期計画からプロジェクトをピボットする形となったが、目的達成のために最適と判断したアプローチにたどり着いた。プロジェクト進行する上で、しっかりと技術検証を重ね、目的達成のために当初考えていた手段を変えたといった柔軟な対応ができたことは今後の人生においても重要な経験になったと思う。

2024年度来館IT人材発掘・育成事業

ゼロトラストネットワークアクセスの導入を容易にするクラウド型プロキシの開発 — Revolutionary Zero Trust Service —

小林 麟太郎 (The University of Edinburgh, College of Arts, Humanities and Social Sciences)

デジタル庁公表のゼロトラストアーキテクチャ適用方針に沿ったクラウド型プロキシをフルスクラッチで開発

システムの5つの特徴

1. ユーザのアカウントとデバイスを一元的に管理します。
専用のソフトを通じてデバイスのTPMやBitLockerの状態まで取得し、アクセス制御の要素として利用できます。
2. クラウドサービスへのアクセス制御ポリシーを日本語で自由自在に記述できます。
難しいポリシー記述言語の習得は一切不要です。
3. 社内システムへのアクセス制御ポリシーも日本語で自由自在に記述できます。
専用のトンネリングシステムを通じてルータやファイアウォールの設定なしに安全にインターネットからアクセス可能にします。VPNソフトをインストールする必要はありません。
4. ウェブフィルタリングについても同様に自由な制御ポリシーを作成できます。
デバイスのプロキシ設定から簡単に導入可能。
5. すべてのログを一括管理します。またログを分析し、不審なアクティビティを検知し遮断します。
即時のセキュリティ通知によりお知らせします。

ゼロトラストネットワークアクセスの導入 を容易にするクラウド型プロキシの開発

小林 麟太郎 (The University of Edinburgh, College of Arts,
Humanities and Social Sciences)

1 背景

近年、新型コロナウイルス感染症の蔓延により、我が国においても情報通信技術を活用したテレワークを導入する企業が増加した。こうした情勢の中、認知されているサイバー攻撃の件数が急激に増加していることが明らかとなっており、警察庁はVPN機器からの侵入が71%にのぼると報告する。テレワークの普及により、社外から社内ネットワークへの接続が常態化することで、ネットワーク内外の境界が曖昧となり、脆弱な境界を狙った攻撃が拡大したと推察される。こうした課題に対して有効とされているのが、境界内外問わずアクセスする人間を厳格に検証するゼロトラストネットワークアクセス (Zero Trust Network Access, ZTNA) を含むゼロトラストセキュリティである。このセキュリティモデルは、各情報システムやサービスごとに適切かつ最小権限によるアクセス制御を行うことで、内部脅威を軽減するとともに、

五十嵐 P M

稲見 P M

岡 P M

落合 P M

曾川 P M

竹迫 P M

田中 P M

BYOD (Bring Your Own Device) を想定した柔軟なアクセス管理を行うなど、多くの利点がある。

一方で、民間企業がゼロトラストを導入する際には時間・人材・予算のコスト不足による問題が生じるとされている。特に中小企業や地方自治体など、予算も人手も限られる組織は導入が進みにくい。こうした状況を踏まえ、既存のゼロトラスト関連製品に焦点を当てると、主に4つの課題点が浮かび上がる。

1. ゼロトラストを構成する必須の機能がすべて揃った、オールインワンのサービスが少ない。
2. システムの導入に多額の費用が必要となる。
3. ネットワークや複雑なシステムを運用するために高度な知識理解が要求される。
4. 外国製品への依存度が高い。

2 目的

上記の課題点を解決するため、本プロジェクトにおける主要な目的は次の3つとした。第一の目的は、ゼロトラストアーキテクチャの最低要件を満たした、オールインワンのクラウド型プロキシを開発することである。主要機能すべてをクラウド上で利用可能にすることで、ユーザーは特段煩雑な導入作業をする必要がなくなり、安全なネットワークを簡単に構築できる環境を提供する。これにより、人的資本の規模に関わらず、多くの組織のセキュリティの向上に繋げることができる。第二の目的は、低コストかつ柔軟性の高いシステムを実現することである。ソフトウェア開発では低レイヤーからアプリケーションレイヤまで自前で開発するとともに、サーバーやネットワークの構築を自ら行うことで、ブラックボックスとなりうる要素を排し、柔軟性の高いシステムを目指す。同時に、基盤技術から用意することとなるため、外部への依存を低減することが可能である。第三の目的は、必要最低限の知識で利用できる分かりやすいシステムとすることである。具体的には、ルーターやファイアウォールといった機器の複雑な操作の習得やポリシー記述言語の習得なしで、誰もが運用に携われ、状態を監視することができる状況を整備する。

3 開発の内容

本プロジェクトでは令和4年にデジタル庁が公表した「ゼロトラストアーキテクチャ適用方針」に適合することを前提とし、次の4つのシステムをそれぞれフルスクラッチ開発した。

3.1 ユーザー・デバイス認証基盤システム

ユーザーアカウント・デバイス情報を一元的に管理するためのシステムを、ユーザー管理機能、ユーザーグループ管理機能、デバイス管理機能を中心に開発した。ユーザー管理機能では、組織内メンバに対してユーザーアカウントを発行し管理するとともに、ユーザーグループ管理機能として同じ役職等に属するユーザーどうしをグループとして管理する。これは主にロール管理の用途で利用することを想定している。

デバイス管理機能では、ユーザーが保有するWindowsデバイスの情報を取得し、一元的に管理する。デバイス情報を取得するため、Rust 1.82.0 をベースにネイティブアプリケーションを設計・実装した。これを通じて、搭載OSの詳細情報や接続中のネットワーク情報、Trusted Platform Moduleの有無、BitLockerによりドライブが暗号化されているかどうか、

Windows Helloに対応しているかどうか等のセキュリティ要件情報、位置情報、インストール済みのすべてのアプリケーション情報などを取得する。ここで取得する情報についても、後述するシステムのポリシーの要素として利用することができる。これにより統合エンドポイント管理（Unified Endpoint Management, UEM）の一部機能を代替することが可能である。また位置情報をもとに、ジオフェンシング等に用いることができる。

3.2 アクセス制御ポリシーシステム

ユーザー・デバイス認証基盤システムや外部IDaaS（Identity as a Service）で管理されているユーザーの身元やデバイス情報に基づき、保護リソースに対するアクセスを制御するアクセス制御ポリシーを作成、施行することで安全な接続を実現するシステムを開発した。クラウドサービスへのアクセスを制御するSaaSモード、ファイアウォール等により隔てられ外部からはアクセスすることができない機密性の高い社内システムへのアクセスを制御するトンネリングモードの2つを開発し、多様なニーズに応えられる環境を構築した。

SaaSモードでは、SAML 2.0に基づいて認証を実施しSaaSへのアクセスを制御する。このモードでは、自社のクラウドエンジニアがクラウドサービスにアクセスする際に、クラウドサービスのログイン機能だけでは賄うことができない、高度なアクセス制御を行いたいといったニーズを主に想定している。Googleが提供する大規模言語モデルAPIであるGeminiAPIと連携することで、日本語による自由記述式のアクセス制御ポリシーの作成を実現した。

各アプリに対し、必須条件（～を満たさなければアクセスすることができない）と拒否条件（～を満たしたらアクセスすることができない）を設定することができる。例えば必須条件として「アクセス元の国名が日本であり、所有するデバイスはTPMが有効でドライブがBitLockerにより暗号化されていること」という文章を設定することができる。この場合、外国からのアクセスや、セキュリティ要件の低いデバイス所有者からはアクセスさせたくないという場面に対して有効である。認証フローとしては、本システムがいわゆるIdPプロキシとして動作することで保護リソースに対する認証を実行する（図1）。

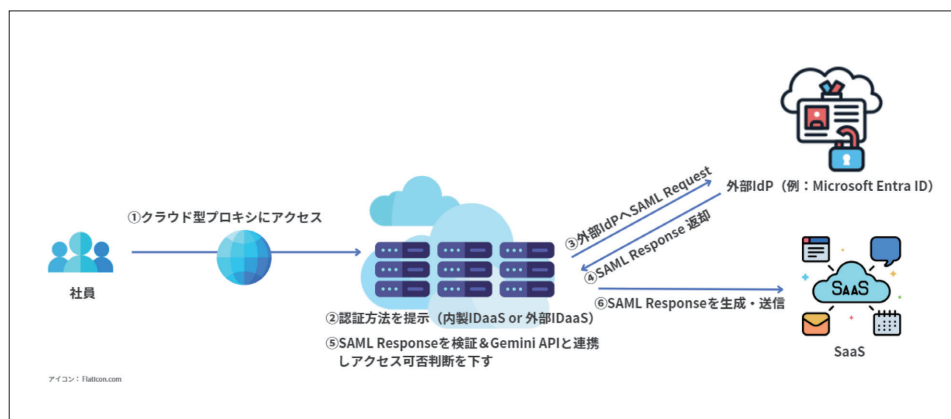


図1：アクセス制御ポリシーシステムSaaSモードの概要図

トンネリングモードにおいては、社内システムへの安全なアクセスを実現するためのトンネリングサーバとエージェントソフトウェアをRust 1.82.0をベースにフルスクラッチで開発した。これらはファイアウォールやNAT超えを同時に実現することで、導入の際にファイアウォールやルーターの設定をする必要がなくなる。またユーザーはVPNソフトウェアをインストールすることなく、ブラウザから簡単にアクセスできる。認証フローはSaaSモードと同じであり、Gemini APIと連携した日本語によるアクセス制御が利用できる。エージェントソフトはCLIとして実装しており、RustのクロスコンパイルによりWindowsの他LinuxおよびmacOS等の環境にも対応している。HTTPアプリケーションへのトンネリングを想定しており、独自ドメインtunneling.meのサブドメインを各トンネルに割り当てることで、ドメインでアクセスできるようにした。加えて、会社等の独自ドメインを用いてアクセスしたいというケースに対応するため、ZeroSSL REST APIと連携することで、アプリ内でSSL/TLS証明書の発行認証から発行・適用までの処理を完結することに成功した。ドメインごとに証明書を発行し割り当てるため、サブドメインのサブドメインなど、ワイルドカードでは保護できない様々な独自ドメイン環境下においてHTTPS化を実現した（図2）。

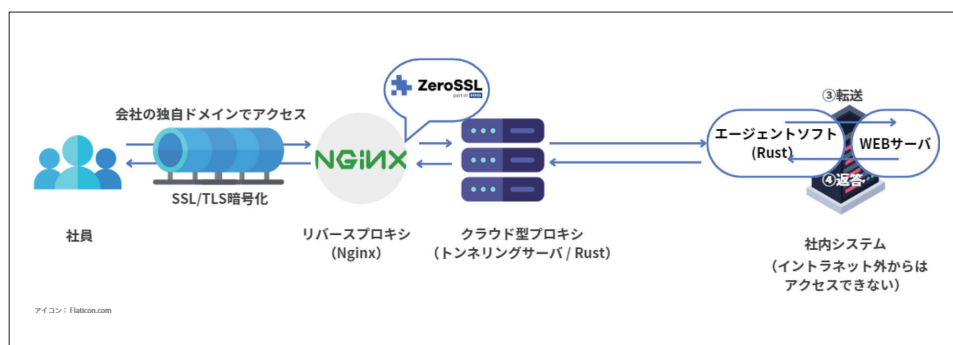


図2：トンネリングモードにおけるトンネリングシステムの概要図

3.3 インターネット制御監視システム

アクセス制御ポリシーシステムが情報資産の入り口側を保護するアプローチであったのに対し、インターネット制御監視システムはユーザー側からインターネット側へのアクセスをアクセス制御ポリシーにより制御する。Rust 1.82.0をベースに実装した（図3）。ポリシーは必須条件と拒否条件を1つずつ設定することができ、日本語による自由記述が可能である。

SOCKS5に対応しているため、デバイスのプロキシ設定に入力することで接続手続きが完了する。「DNSもプロキシを利用する」を選択することで、アクセス先のドメイン名をポリシーの要素として利用することができる。具体的な利用例として、拒否条件に「アクセス先のドメイン名がdeepseek.com であること」を設定すれば、いかなるユーザーもdeepseek.com にアクセスすることはできなくなる。情報漏えいの危険性があるウェブサイトや業務と関係のないウェブサイトアクセスさせたくないというニーズに応える、ウェブフィルタリングの用途で利用することを想定している。

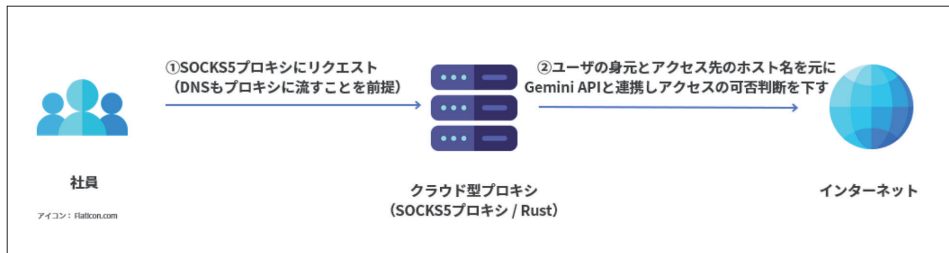


図3：SOCKS5 プロキシの概要図

3.4 アクセスログ総合管理システム

アクセスログ総合管理システムはアクセス制御ポリシーシステムから得られたアクセスログと、インターネット制御監視システムから得られたゲートウェイログを一元的に管理する。

ログとして保管される情報は、アクセス先のアプリ名またはドメイン名（IP アドレス）、アクセス元のユーザーID、アクセスの許可・不許可情報、その理由、アクセスした際に利用した認証方式情報、アクセス元の国名、発生日時である。許可・不許可となった理由については Gemini API により生成される。またログを保管するだけでなく、収集したログをもとに、動的に新規アクセスが不審かどうかを判断する機能についても実装した。具体的には直近10件のアクセスログを随時呼び出し、新規アクセスが疑わしいかどうか Gemini API と連携して判断する。疑わしいと判断された場合は、アクセスが遮断され、当該ユーザーに対してメールによる即時通告を行う。この即時通告では、検出したアクティビティの詳細情報のほか、アクティビティが疑わしいと判断された理由を Gemini API が生成し、合わせて通知する。この機能により、先述のシステムではカバーできていない、いわゆる出口対策についてもある程度有効であると考えられる。

4 従来の技術（または機能）との相違

本プロジェクトの最も特徴的な点のひとつは、ゼロトラストアーキテクチャにおいて重要な役割を果たすアクセス制御ポリシーを日本語で自由に記述できるようにした点である。既存のゼロトラスト製品においては、アクセス制御ポリシーはJSON やYAML、専用のポリシー記述言語など、日常生活で使われていない言語を用いて記述する必要があるため、読み書きできる対象は限られ、人手が足りない組織にとっては大きなハードルであった。当初の目的である、より多くの人がシステムを利用できるようにするという観点から、この機能は有用である。またポリシー記述言語の経験の有無に関わらず、日本語による直感的な操作を可能にしたことで、さらなる利便性の向上が見込まれる。

5 期待される効果

ゼロトラストアーキテクチャを構成する必須の機能が揃った、オールインワンのシステムを実現したとともに、ルーターやファイ尔ウォール、VPN 等の複雑な操作をはじめとする煩雑な導入作業を低減したことにより、ユーザーは各製品の選定や組み合わせの考慮、実際の導入作業等に多くの時間・費用を費やす必要がなくなり、より容易なゼロトラストセキュリティの導入できるが期待される。このようなシステムを通じて、将来的にはイントラネットそのものが不要でなくなる環境を創り上げることができると考える。

■ 6 普及（または活用）の見通し

本件はデジタル庁公表のゼロトラストアーキテクチャ適用方針に適合するよう実装に取り組んだため、こうした適用方針に適合する製品の需要は一定存在すると考えている。また、日本国内においては大手の通信事業者であっても自前でゼロトラストセキュリティソリューションを開発する動きはこれまであまり見られず、JANOG54 Meetingに参加した際には、国内からこうした製品を開発することは重要だとお話しされた企業もあり、今後大いに需要があるものと考えている。この先開発や実証実験を進め、通信事業者との提携や事業化についても目指していきたい。

PMの評価

採択時の評価

近年テレワークが普及した日本において、より安全なセキュリティを担保するために、従来のプライベートネットワーク+VPNによるアクセスではなく、ゼロトラストネットワークアクセス（ZTNA）を新規に導入する企業が増えてきている。ZTNAを実現するソリューションはいくつか存在するが、そのほとんどが外国製のシステムやクラウドサービスを使うことを前提としていることが多い。業務中に謎の通信不具合に遭遇して従業員が困ってしまうケースもあると聞く。このようなソリューションをブラックボックスのまま導入すると、自社の組織で可用性や情報取得・破棄をコントロールできる範囲が限定されてしまうリスクも存在する。

本提案は、令和4年6月30日にデジタル庁が公表したゼロトラストアーキテクチャ適用方針に準拠したアイデンティティ認識型プロキシ（IAP）をフルスクラッチで開発するという野心的なプロジェクトである。サーバやネットワークの構築からソフトウェアの開発導入までをすべて自前で行うことによって、ブラックボックスの要素を極力排除した柔軟性の高いシステムの構築が可能となる。IAPの実現には複数の要素技術を適切に組み合わせる必要があり、同時にパフォーマンス上の課題も解決しなければ現実的な導入は難しくなる。実現のためには多くの試行錯誤が必要となるプロジェクトになると思うが、日本企業へのZTNA普及へ一石を投じる挑戦になることを期待する。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトでは、ゼロトラストアーキテクチャに必要な主要機能を備えたオールインワンのセキュリティシステムをフルスクラッチで開発し、既存の複雑なシステム導入作業の手間を大幅に削減した点が高く評価できる。特に、アクセス制御ポリシーを日本語で直感的に記述できる仕組みを導入したことは、ポリシー記述言語に不慣れなユーザーにとって大きな利便性をもたらし、より多くの人がセキュリティシステムを利用できる環境の構築に貢献できると考えられる。また、システム全体がデジタル庁のゼロトラストアーキテクチャ適用方針に適合していることもあるため、日本国内における市場ニーズに対応した実装がなされている点も評価が高い。こうした成果の社会実装を通じて、将来的にはイントラネットやVPN接続に依存しない、柔軟でセキュアなゼロトラストネットワーク環境の構築が日本中で行われることを期待したい。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

西村陽向（東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科）
高橋伊織（筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類）
成瀬宏亮（東京科学大学 工学院 電気電子系）

トラックボール型3Dマウスの開発

—トラックボール型3DマウスParRotとそのエコシステム—

3Dマウスとは？

モデリングソフトなどで視点操作を行うための左手デバイス

既存の3Dマウスには普及上の課題がある



高価格

- ・ 2万円～5万円
- ・ 操作の直感性不足
- ・ ジョイスティックによる6軸操作の限界
- ・ 市場での限定性
- ・ 製品選択肢があまりに少ない

画像出典: <https://3dconnexion.com/jp/product/spacemouse-wireless/>

<https://3dconnexion.com/jp/product/spacemouse-pro-wireless/>

直感的な操作のためには？

トラックボールの3軸回転を用いることで、
トラックボールの回転と3Dオブジェクトの回転が**一対一**対応

既存の3Dマウスよりも安価で**直感的に操作**できる
トラックボール型3Dマウスを開発

オープンソーストラックボール型3Dマウス ParRot

製作費: 約1万円



トラックボール型3Dマウスの開発

西村 陽向（東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科）

高橋 伊織（筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類）

成瀬 宏亮（東京科学大学 工学院 電気電子系）

1 背景

近年、工業製品の設計においては3DCADなどの3Dモデリングソフトが一般的に使用されるようになった。また、VR・AR分野の拡大により、3Dモデリングは設計・製造業だけでなく一般ユーザーにも広がりを見せている。さらに3Dプリンタの普及に伴い、個人が気軽に3Dモデルを制作する機会が増え、3Dモデリングが趣味やプロダクト制作の一環として行われるようになった。

この流れに対応する形で、3Dモデリングを補助する左手デバイスとして「3Dマウス」が浸透し始めている。代表的な例として、3Dconnexion社のジョイスティック型3Dマウス「SpaceMouse」などが挙げられる。3Dマウスは、通常であれば右手のマウスで行う視点操作を左手に任せることで、モデリング作業を効率化する役割を果たしている。

しかし、こうした3Dマウスの普及が進む一方で、一般的に広く浸透するためには解決すべきいくつかの課題が存在する。

- 代表例である SpaceMouse の価格は2万円以上と高額であり、初心者や個人ユーザーにとって導入のハードルが高い。

- 事実上の競合製品が少なく、ユーザーが3Dマウスを選択する際に実質的な選択肢がほぼ存在しない。

- ジョイスティック型デバイスである SpaceMouse は6軸同時操作が可能な反面、操作習熟に時間がかかり、視点移動の精度や直感性に欠ける場合がある。

ここで、我々はこれらの問題を解決できる新たな3Dマウスを開発しようと考えた。

2 目的

上記の問題を解決するため、本プロジェクトでは既存の3Dマウスよりも安価で直感的に操作できる3Dマウスを開発することを目的とする。既存の3Dマウスで使用されているジョイスティック型ではなく、トラックボールの3軸回転を用いることで、より直感的な視点操作を実現する。

3 開発の内容

3.1 ハードウェア

本プロジェクトで開発した「ParRot」は、直感的な3次元入力を可能にすることを念頭に設計した新しいトラックボール型3Dマウスである（図1）。

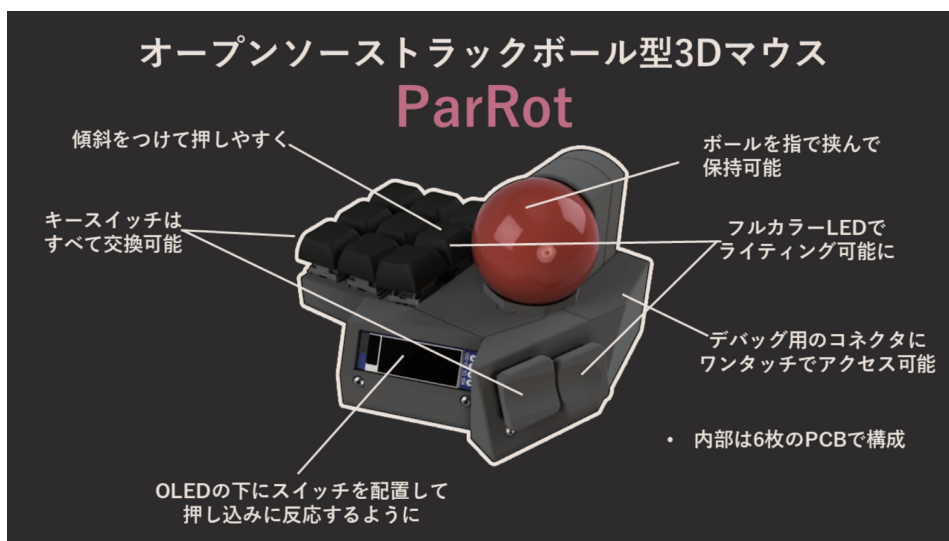


図1：ParRot

トラックボールは側面と底面に光学センサー（PMW3360）を2基配置し、3軸の回転量を高精度に検出する。本体にはRP2040を搭載したメイン基板や複数のキースイッチ、OLED ディ

スプレイ、フルカラーLEDを実装し、操作性と視覚的フィードバックを両立している。加えて、キースイッチや基板間の接続はソケットやコネクタを用いることでメンテナンス性と拡張性を確保している。外装やトラックボール保持部は3Dプリンタで試作を重ね、高い操作感とコンパクトなレイアウトを追求した。さらに、本体各所では磁石やネジ、ジョイント機構を活用することで、カバーや追加キーパッドモジュールなどを着脱・稼働させやすくし、デバッグ用コネクタや基板へのアクセスを工具なしで行える構造を実現している。底面にはゴム足が埋め込まれており、操作時にデバイスが滑りにくくなっているほか、着脱式のキーパッドモジュールは背面のネジを緩めるだけで位置調整が可能となっている。こうした工夫により、ユーザーが独自に改造や調整を加えやすくなっている。

■ 3.2 ファームウェア

ParRotのファームウェアは、HID通信、センサー入力処理、キーボード入力処理、OLEDおよびLEDフィードバックの4つの要素で構成される。

HID通信モジュールはPCとの接続を担当し、独自に設計したDescriptorにより、3次元の回転と平行移動を正確に入力できるようにしている。センサー入力処理モジュールでは、PMW3360光学センサーを2基使用し、トラックボールの回転情報を取得し、PCへ送信する。

キーボード入力処理モジュールでは、キースイッチの入力を検知し、ショートカットキーとして送信する機能を搭載している。これにより、CADソフトの作業効率を向上させることが可能となった。OLED・LEDフィードバックモジュールでは、デバイスの設定情報をOLEDに表示し、LEDの点灯でスイッチの押下状況やモードを可視化することで、ユーザーの操作をサポートする。

HID通信を活用することで、ParRotはPCにMulti Axis Controllerとして認識され、Blenderでは標準機能として使用できる。Autodesk FusionおよびUnityでは専用アドインを通じて視点移動が可能となる。また、レイヤー式キーマップを採用し、ソフトウェアごとに3つのスロットを持ち、それぞれ3つのレイヤーを切り替えることで、最大27通りのキー設定が可能となっている。キーマップの設定は、後述のWebアプリケーション「ParRotNest」から簡単に行えるため、ユーザーは自分好みの操作環境を構築できる。DPIや移動モードの切り替え機能も充実しており、3段階のDPI設定により、細かい操作と大きな視点移動の切り替えが可能となる。さらに、トラックボールの操作を回転移動と平行移動で切り替えられるほか、X/Y/Z軸の固定機能を搭載することで、正確な操作をサポートする。

■ 3.3 アドイン

ParRotによる3次元入力を多様なソフトウェアで活用するため、先述の通りAutodesk FusionとUnity向けのアドインを開発した。Autodesk Fusionのアドインでは、HIDから取得したパケットをQuaternionベースのカメラ操作に変換することで、視点移動や回転操作をシームレスに行える。スクリプト内でスムーズなカメラ挙動を再現するためのパラメータ調整や、ショートカット入力との併用も可能となっている。Unity向けのアドインは、独自のHIDレポートIDを参照してX/Y/Z軸をマッピングし、シーン内のカメラやオブジェクトを直感的に操作できる仕組みを提供する。

3.4 ParRotNest

ParRotのキーマップやDPIなどの設定を直感的に編集できるようにするために開発したWebアプリケーションが「ParRotNest」である（図2）。

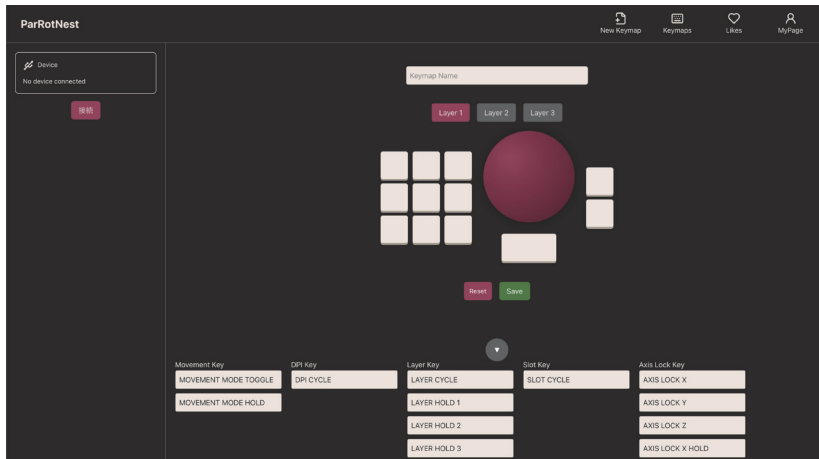


図2：ParRotNest

ブラウザからWebHID APIを利用してParRot本体と直接通信することで、ユーザーはドラッグ＆ドロップ操作でスイッチへのショートカット登録やレイヤー設定を簡単に行える。DPIや回転／平行移動の切り替えなど、ParRot固有の機能もブラウザ上で直接設定できるようになっている。キーマップはユーザーごとのアカウントに紐付けてクラウド上のデータベースに保存され、ユーザーはどこでも保存したキーマップを書き込むことができる。また作成したキーマップは共有リンクを発行することができ、これによりユーザー間でのキーマップの共有が可能となる。

4. 従来の技術（または機能）との相違

本プロジェクトで開発したParRotおよび関連ソフトウェアは、従来の3Dマウスとは異なる新しい操作方式と機能を備えている。従来の3Dマウスは、物理的なジョイスティックを押し込んだり傾けたりすることで視点移動を行う方式であった。これにより6軸同時入力が可能ではあるものの、操作に習熟するまでに時間がかかり、直感的な視点移動が難しいという課題があった。また、既存製品は最低でも2万円以上と高価であり、個人ユーザーや初心者にとって導入のハードルが高かった。

一方ParRotは、ジョイスティック型ではなくトラックボールを用いた3軸回転入力を採用しており、直感的な視点操作が可能である。従来のジョイスティック型3Dマウスとは異なり、手の動きに対してダイレクトに視点移動が連動するため操作の習熟が短期間で済み、より直感的な操作が実現できる。またParRotは材料費約1万円で製作可能であり、従来製品と比較して大幅にコストを抑えることができる。さらに、オープンソースとして設計データをGitHubで公開しているため、誰でも自由にカスタマイズや改造が可能である。

ソフトウェア面でも、既存製品にはない、キーマップをクラウド上に保存してユーザー間で共有できる機能を実装した。これにより、各ユーザーが作成した最適なショートカット設定を

他のユーザーと簡単に共有できるようになり、ノウハウの共有・蓄積が可能となった。

オープンソース化とコミュニティ形成も従来製品とは違う点である。ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアのすべてを公開し、GitHub上でそれらを自由に閲覧・改造できるようにだけでなく、公式Discordコミュニティを開設し、2025年3月時点で180人以上のユーザーが参加している。コミュニティが存在することで、デバイスの改良・アイデアやソフトウェアの拡張・キーマップの共有などが行われ、ParRotがユーザーとともに進化するためのエコシステムが完成する。

以上のように、直感的な操作性・低価格・設定の共有機能・オープンソースによる拡張性・ユーザーコミュニティの形成という点で従来の3Dマウスと異なる。

5 期待される効果

ParRotはトラックボール方式を採用することで、初心者でも短期間で直感的に操作できるため、より幅広いユーザー層が3Dモデリングに参入しやすくなる。特に、3Dプリンターの普及に伴い、個人クリエイターや学生が3Dモデルを作成する機会が増えていることを考慮すると、ParRotの導入は設計・製造業だけでなく趣味や教育分野にも広がる可能性がある。

従来の3Dモデリング環境では難しかった直感的な視点操作が実現され、作業効率の向上が期待される。また、ParRotはGitHub上で設計データを公開しており、ユーザーが自由に基板設計や筐体デザインを改良できるため、新たなカスタマイズ文化を生むことが考えられる。特に、自作キーボード市場のように、ユーザーが独自の機能やデザインを取り入れて派生モデルを作成する動きが活性化することが期待される。これにより、3Dマウス市場が従来の一社独占型から、多様な選択肢を持つオープンな市場へと発展する可能性がある。

6 普及（または活用）の見通し

ParRotはオープンソースとして設計データを公開し、誰でも作成・改造が可能なデバイスであるため、個人ユーザーや企業が自由に利用できるという強みを持つ。そのため、従来のクローズドな3Dマウス市場とは異なり、ユーザーコミュニティを中心に普及が進む可能性が高い。ParRotの公式Discordコミュニティには現在180人以上が参加しており、X（旧Twitter）でのParRot紹介投稿は17万回以上のインプレッションを獲得し1,300件以上の「いいね」を得るなど、すでに大きな関心を集めている。加えて、成果報告会や学会でParRotの発表をした際には「早く売ってほしい」という声が多く寄せられており、ユーザーの需要の高さが明らかになっている。基板発注や3Dプリンタの利用が難しいユーザー向けに、組み立て済みのキットや完成品の頒布を検討しており、これにより技術者以外にもParRotが広がることが期待される。今後、ソフトウェアの機能拡張やコミュニティの成長に伴い、ParRotの普及がさらに加速し、多くの3Dモデリングユーザーに活用される見込みである。

関連URL

オープンソースのトラックボール型3Dマウス「ParRot」のGitHub：

<https://github.com/ParRot-3DMouse>

ParRot のハードウェア — 基板・筐体・機構など物理設計のデータ一式：

<https://github.com/ParRot-3DMouse/ParRotHardware>

ParRot のファームウェア — デバイス上で動く組み込みソフト（トラックボール検出・OLED表示・ホストとの通信）：

<https://github.com/ParRot-3DMouse/ParRotFirmware>

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

近況

西村：現在は大学院に進学し、HCIの研究室で研究に取り組んでいます。学部時代はメカトロニクスをやっていたのですが、未踏事業に参加したことが大きなきっかけとなり、現在のHCI領域の研究へとシフトしました。

高橋：現在は筑波大学の大学院に進学し、落合陽一先生の研究室でHCIの研究をしています。また、企業でのエンジニアインターンや就職活動にも取り組んでいます。未踏で開発したParRotは修了後も続けていて、2025年10月のMaker Faire Tokyo 2025の未踏ブースで展示したり、Boothで基板の販売を行ったりしています。

成瀬：現在、大学院に進学して就職活動を行っています。未踏の経験は就活のアピールになるだけでなく、その経験で培った物事を粘り強く解決する能力は、大学の研究活動などにも生かすことができました。また、未踏で開発したParrotについても、現在バグ修正や要望に応じて随時アップデート中です。お使いの方はぜひDiscordなどでご意見をお聞かせください。

PMの評価

採択時の評価

近年VR/ARやデジタルツインの導入が進んでいるが、3Dモデリングの作業で使う3Dマウスのインターフェイスについてはまだ進化の余地が残っている。提案者らは既に市販のボールを組み合わせていくつかのプロトタイプの開発を進めており、過去の実績もある。

疲れにくさ、ボールの大きさ、個人へのカスタマイズなど、たくさんの試作を高速に繰り返してフィードバックを受ける必要がある。提案時の技術選択やHowの手段にこだわり過ぎることなく、ユーザーへの価値提供を第一にフィードバックを繰り返しながらプロジェクトを推進していくことを期待したい。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトで開発されたトラックボール型3Dマウス「ParRot」は、従来のジョイスティック型3Dマウスが抱えていた操作の直感性の低さや高価格といった課題を解決し、直感的な操作性・低価格・高いカスタマイズ性・オープンソース性を兼ね備えた新しい入力デバイスとして高く評価できる成果を上げた。特に、トラックボールの3軸回転を視点移動に直接対応させることで、操作習熟の負担を大きく軽減し、簡易的なユーザーテストでは従来製品より習得しやすいといった結果が確認できた。また、制作に必要な材料費は約1万円というコストパフォーマンスの高さや、3Dモデル・基板データ・ファームウェアをGitHub上で公開するオープンソースの設計により、個人ユーザーや学生でも手軽に入手・改造・再配布が可能となった。さらに、「ParRotNest」という専用Webアプリケーションを通じてショートカットやDPI設定などを直感的にカスタマイズできるだけでなく、クラウドでのキーマップの共有機能によって、ユーザー間の知見共有やノウハウの蓄積も促進されている。これにより、ハードウェア・ソフトウェア・コミュニティが連動するエコシステムが形成され、ParRotは単なる一製品のプロダクトにとどまらず、継続的な改良や拡張が期待される開発エコシステムの基盤として新しい価値を持つ。SNSでの高い関心や、成果報告会・学会での反響、180人以上が参加するDiscordコミュニティの存在など、ユーザー層の広がりやニーズの強さも感じられた。今後クラウドファンディングなどで販売や資金調達を実施する際にも、世界市場へのインパクトと将来的な普及の可能性を十分に感じさせるプロジェクトとなった。

田中 邦裕 PM 担当プロジェクト



田中 邦裕 (たなか くにひろ)

さくらインターネット株式会社 代表取締役社長

■プロフィール

1996年、舞鶴高専在学中の18歳の時にさくらインターネットを起業。2005年に東証マザーズに上場し、現在はプライム市場。IPA未踏のプロジェクトマネージャーや神山まるごと高専の理事として、若手起業家や学生エンジニアの育成にも携わる。また、複数の社外取締役を務めるほか、ソフトウェア協会会長、日本データセンター協会理事長、日本インターネットプロバイダー協会副会長等として、業界発展のためにも尽力。最近では、関西経済同友会常任幹事、内閣府AI戦略会議及び戦略専門調査会構成員、内閣官房日本成長戦略会議の各種構成員なども担う。

プロジェクト全体の目的は、本事業が目的とする、卓越したIT人材を発掘することと、育成することの2つをベースとして、プログラミング教育が一般化しコンピューターを活用する人材のすそ野が広がる中において、その頂点に立つ人材を選び出し、アイデアと行動力を支援し、育成し、世界を変えるようなプロダクトを生み出すことである。

分野については特に限定せず、将来の可能性が見込まれる多様なプロジェクトを担当することとし、採択から1年弱をかけてクリエイターの成長とプロジェクトの成功のために継続して支援を行った。

プロジェクト進行にあたっては、多様なバックグラウンドを持つプロジェクトマネージャー (PM) 7人が協力し、合同ミーティングや個別のメンタリングを経て、具体的な支援を行った。

新型コロナウイルスの影響による社会様式の変化において、従前はリアルのみで行っていたミーティングも、Zoomを活用したリモート会議が根付いたこともあり、リアルのみ、リモートのみ、ハイブリッドといった、柔軟な開催スタイルで適宜行った。

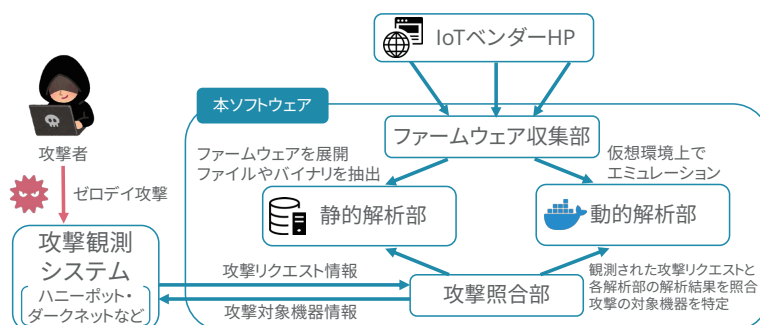
2024年度末踏IT人材発掘・育成事業

ゼロデイ攻撃の対象となるIoT機器を早期特定するシステムの開発

— ファームウェアの大規模収集・解析による早期対策の実現 —

九鬼 琉（横浜国立大学 / 株式会社オプシス）

IoT機器のファームウェアを大規模に収集し、静的解析/動的解析を実施
ゼロデイ攻撃の観測時に解析結果との照合を行うことにより、攻撃の対象機器を特定



ゼロデイ攻撃の対象となるIoT機器を早期特定するシステムの開発

九鬼 琉（横浜国立大学 工学部 数物・電子情報系学科 / 株式会社オプシス）

1 背景

近年、IoT（Internet of Things）機器の急速な普及に伴い、IoT機器に存在するセキュリティ上の欠陥である脆弱性を狙ったサイバー攻撃やマルウェア活動による被害が深刻化している。こうしたIoT機器を狙う攻撃の中には、脆弱性の修正プログラムや緩和策が製品ベンダーから公開される前に攻撃が行われるケースが存在する。このような攻撃のことをゼロデイ攻撃といい、有効な対策手段が存在しない無防備な状態の機器が狙われることになるため非常に大きな脅威となりうる。

こうしたサイバー攻撃の動向を把握し適切な対応へと役立てるため、ダークネット上に届く通信パケットの監視やハニーボットによる観測が行われている。観測した攻撃が公知の脆弱性を狙ったものである場合、インターネット上で公開されている脆弱性情報やエクスプロイトコードを調査することにより対象機器の特定を行うことが可能である。一方で観測した攻撃が未知の脆弱性を狙ったもの（ゼロデイ攻撃）である場合、前述の手法では観測した攻撃がどの機器を狙ったものであるかを特定することが困難であるという問題が存在する。

2 目的

本プロジェクトでは、事前に大規模に収集したIoT機器のファームウェアに対して静的解析および動的解析を実施し、ハニーポットなどのサイバー攻撃観測網で観測されたゼロデイ攻撃と照合することにより、攻撃の標的となっている機器を速やかに特定するシステムを開発し、脆弱性の早期修正並びにサイバー攻撃による被害の拡大抑止に貢献することを目指す。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、事前にIoT機器のファームウェアを大規模に収集・解析し、ゼロデイ攻撃の観測時にファームウェアの解析結果と攻撃情報を照合することにより、観測されたゼロデイ攻撃のターゲットとなっている機器を早期に特定するシステムを開発した。開発したソフトウェアのシステム構成を図1に示す。

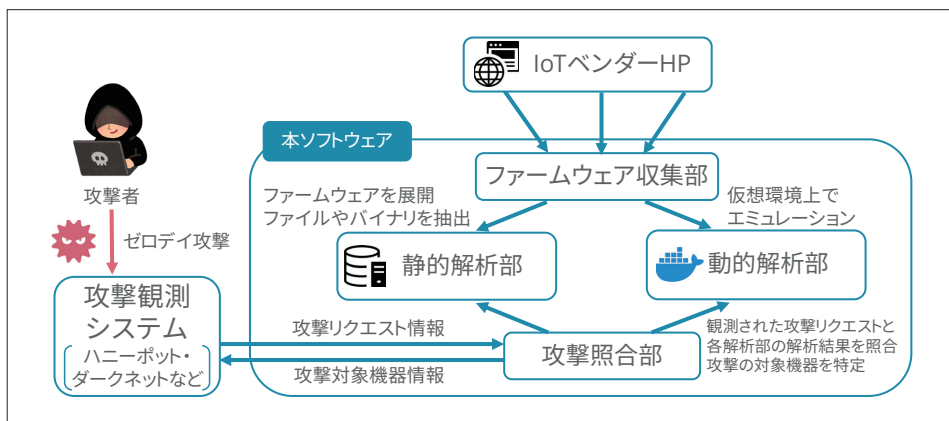


図1：システム構成

ソフトウェア全体の処理の流れは以下の通りである。はじめに、「ファームウェア収集部」にて、IoT機器ベンダーのホームページなどで公開されているファームウェアをスクレイピングによって収集し、機器の型番やバージョンなどのメタ情報とともに保存する。収集したファームウェアは「ファームウェア静的解析部」および「ファームウェア動的解析部」によって解析される。

「ファームウェア静的解析部」では、収集したファームウェアを展開（アンパック）し、ファームウェア内のファイルやバイナリなどを抽出する。さらに、抽出したファイル及びディレクトリ構造の情報を、当該ファームウェア情報と紐づけてデータベースに記録する。

「ファームウェア動的解析部」では、仮想環境上でIoT機器のCPUをエミュレーションし、実際にファームウェアを起動することにより、ネットワークサービスの稼働状況やレスポンスを取得し、データベースに記録する。

最後に「攻撃照合部」では、ハニーポットなどの攻撃観測システムでゼロデイ攻撃が観測された際にその攻撃リクエストの情報を入力することにより、機器の特定に繋がりうる特徴的な情報（宛先ポート番号、リクエストパス、パラメータ名、リクエストヘッダ内のCookieや認証情報など）を攻撃リクエストから抽出し、前述のファームウェアの静的解析及び動的解析の

結果と照合する。これにより、攻撃の標的となっている可能性のある機器を特定し、その機器の型番やベンダー名、ファームウェアの情報などを出力する。さらに、単に対象機器の情報を提供するだけでなく、攻撃を受けている脆弱な実装が存在している可能性のある実装の箇所（具体的なファイルパスや当該箇所周辺の実装内容）を提示する機能や、当該脆弱性の再現や検証などの調査を行うための仮想環境を提供する機能も備える。

4 従来の技術（または機能）との相違

本開発成果の特徴として以下の4点が挙げられる。

- ・ファームウェアを大規模（17万件以上）に収集したことにより、幅広いIoT機器を標的とした攻撃に対応することができる点。
- ・ファームウェアの静的解析と動的解析を併用することにより、攻撃対象機器の特定速度およびカバレッジを大幅に向上させている点。
- ・単に攻撃対象機器を特定するだけでなく、攻撃を受けている脆弱な実装が存在している可能性のある実装の箇所（具体的なファイルパスや当該箇所周辺の実装内容）を推定し提示する機能や、脆弱性の再現や検証のためのより詳しい調査を行うための仮想環境を提供する機能を備えている点。
- ・国内の攻撃観測機関との連携・情報共有を積極的に実施し、実際に未知のゼロデイ攻撃の対象機器を特定し関係機関に報告を実施することで悪用状況の早期周知及び脆弱性の修正に貢献した点。

5 期待される効果

攻撃対象機器が不明なゼロデイ攻撃の観測時に、本ソフトウェアを用いて攻撃の標的となっている機器や脆弱な実装をいち早く特定することにより、当該IoT機器のベンダーや開発者に対してゼロデイ脆弱性の存在とその悪用状況を報告することができ、脆弱性を修正するためのファームウェアアップデートやセキュリティパッチの早期提供に貢献することができる（図2）。

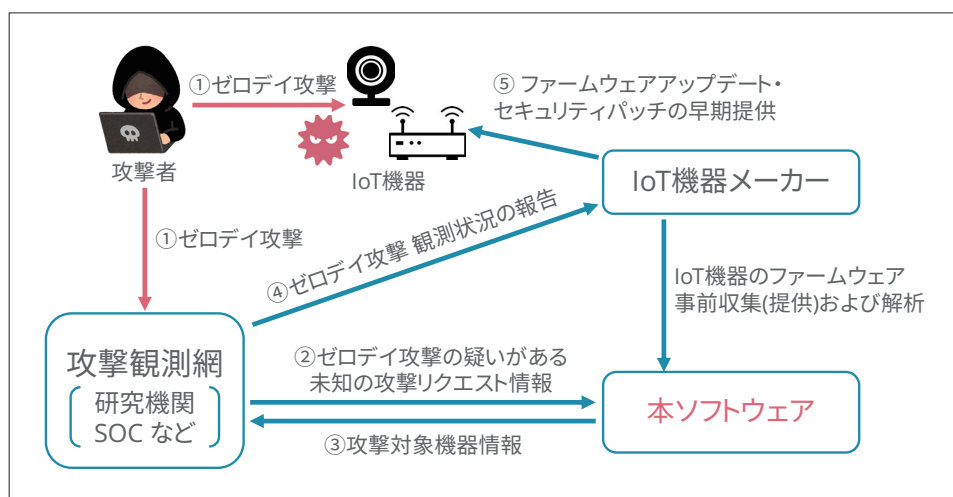


図2 本ソフトウェアの活用シナリオ

実際に、開発したシステムを国内で観測された未知の攻撃の分析に活用し、これまでに計4件のゼロデイ攻撃の対象機器の候補を特定しており、今後も継続的な運用を通じてIoT機器の脆弱性の早期修正およびサイバー攻撃による被害の拡大防止に寄与することが期待される。

6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトはその社会的意義からプロジェクト終了後も継続して取り組む価値があることから、今後の展開に向けた技術的および運用面での課題を整理し、ソフトウェアの改善と国内外の攻撃観測網およびIoT機器ベンダーとの連携強化を進めていくことにより、より社会貢献性の高いシステムとして活用していくことを目指す。

近況

未踏事業では、ゼロデイ攻撃の標的となり得るIoT機器を早期に特定することを目指し、IoT機器のファームウェアを大規模に収集・解析し、攻撃観測情報と照合するシステムの開発に取り組みました。

現在は、未踏での開発成果を実際のサイバー攻撃対策に活用するため、外部機関との連携や実運用に向けた検証の準備を進めています。

今後は博士後期課程に進学し、未踏での経験や学びを活かしながら、サイバーセキュリティ分野で実践と学術の両面から最先端の研究開発に取り組んでいきたいと考えています。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、ゼロデイ攻撃の標的となるIoT機器を特定するシステムを開発するという、セキュリティ分野における極めて革新的なアプローチを提案しており、未踏的な技術挑戦として高く評価した。本プロジェクトは大規模なファームウェア解析と攻撃ログの相関分析を組み合わせ、未知の脆弱性を狙う攻撃のターゲットを早期特定するという新しい視点を導入している。また、静的解析と動的解析を融合させた高度な分析手法により、ゼロデイ攻撃の検出精度を飛躍的に向上させることを目指しており、技術的な独自性が高い。提案者は、既に大学で関連研究を進めており、実現可能性が高く、プロジェクトを通じたさらなる成長が期待された。

さらに、IPAやNISCなどの政府機関との連携を視野に入れることで、産業界や公共セクターにおいて実用的な影響を与える可能性が高い。本プロジェクトの成功は、IoT機器のセキュリティ強化のみならず、サイバーセキュリティの新たな標準を築く契機となることが期待された。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、IoT機器を対象としたゼロデイ攻撃の分析・特定に向けた解析基盤を、実運用に耐える水準でまとめ上げた点で高く評価できる。各構成要素において、目的に即した技術選定と設計の工夫が随所に見られ、処理の精度と効率の両立が意識されていた。特に収集の自動化では、LLMによるコード生成を導入することで、多様なサイト構造への対応力と保守性が確保されており、実装のスケーラビリティに対する視野が感じられた。ツール開発にとどまらず、観測・照合・再現というサイバー攻撃対応の一連の流れを自動化した点に、本プロジェクトの独自性と実践的価値が集約されている。

また、技術的な完成度に加え、既に国内の観測機関と連携して実際に4件のゼロデイ攻撃対象機器候補を特定・報告しており、成果の実証性と社会的波及性も高い。今後の拡張可能性についても、他プロトコルへの適用や外部連携APIの整備、非公開ファームウェアへの対応に向けたベンダー交渉の構想まで視野に入っており、継続発展に向けた道筋が明確に描かれている。

開発体制についても、実質的に一人で収集・解析・連携・検証までを担っており、単なる研究開発にとどまらない高い遂行力が発揮されている。総じて、本プロジェクトは、現在の成果のみならず今後の展開可能性も含めて、極めて高い水準に達していると判断する。

2024年度未踏IT人材発掘・育成事業

ANNECT

今野佑星(はこだて未来大学) 吉田海翔(函館高専専攻科) 川尻千遥(はこだて未来大学)

スマートフォンを活用して
理想のデジタルペットを
作成するためのプラットフォーム

- スマホとつながる、あなただけの癒しの存在 -

デジタルペットとは

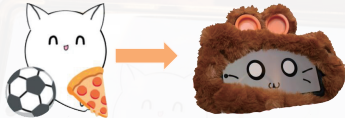


飼育の負担なく癒しを提供

しかし...

- × 高額(約5万円~50万円)
- × ユーザーがデザインできない

本プロジェクトの特徴



低コスト化のため
スマホを活用！

スマホの魂が乗り移る、
カスタマイズ可能な
デジタルペット

スマートフォンを活用して 理想のデジタルペットを作成するための プラットフォーム

今野 佑星 (公立はこだて未来大学 システム情報科学部
情報アーキテクチャ学科 情報システムコース)

川尻 千遥 (公立はこだて未来大学 システム情報科学部
情報アーキテクチャ学科 情報システムコース)

吉田 海翔 (函館工業高等専門学校 生産システム工学専攻)

1 背景

ペットのデメリットである飼育の大変さを解消し、ペットのような見た目と動きで人々に癒しを提供するロボットとして、デジタルペットが存在している。これはペットを飼いたくても何らかの事情で飼うことができない人のためのペットの代わりとなり、セラピー効果があるこ

ともわかっている。

これまでに開発された既製品では、動物らしさや癒しを与える事を追求して再現しているため、価格は高額で、入手しやすいとは言えない。また、安価なデジタルペットでは、バーチャル空間のみで育成するものがあるが、手触りや感触から得られる癒しの体験が薄れてしまう課題がある。

さらに、今までは生命をもつペットであっても、デジタルペットであったとしても、与えられた選択肢からしか選ぶことができず、自身で作り出す事はできなかった。それでは各個人の最も癒されると感じる動物が選択肢の中には存在しない課題も存在する。

2 目的

これらの背景、課題から本プロジェクトでは、各個人が理想とする最も癒される存在を簡単に作り出すことのできる世の中を実現するために、低価格でかつ様々な動物や架空の生物をデジタルペットとして作成するためのプラットフォームを開発する事を目的とする。本プロジェクトではこのプラットフォームを「デジタルペットプラットフォーム」と呼称する。

なお、本プロジェクトは、2023年に新雪プログラムの支援を受けてプロトタイプの開発を行ったプロジェクト「現実と仮想空間を繋ぐデジタルペットプラットフォームANNECTの開発プロジェクト」を継続・発展させるものである。

3 開発の内容

3.1 システム全体の概要

本システムは、スマートフォンを中心とした、デジタルペットプラットフォームである。スマートフォンには魂が宿っているという世界観のもと、スマートフォンアプリケーションとしてデジタルペットを実装した。本プロジェクトでは、その魂の宿ったデジタルペットを「あにま」と呼称する。ユーザーがペットロボットにあにまが動作しているスマートフォンを組み込んだ際、あにまがロボットに乗り移ったように振る舞うことで、ユーザーはスマートフォンの中でも現実世界でもペットと触れ合うことができる。

本システムのユーザーインターフェイスは、あにまが暮らす部屋をのぞき見することができるスマートフォン上の画面（以降「ホーム画面」、図1）と、あにまがロボットに憑依する振る舞いを示すことでユーザーが現実世界であにまと触れ合うことができるモード（以降「コネクトモード」、図2）の2つの状態で構成される。



図1：ホーム画面



図2：コネクトモード

本システム全体の技術構成を図3に示す。本システムはAndroidスマートフォン上のアプリケーションを中心とし、それがArduino UNOやM5Stamp S3といったマイコンとシリアル通信をすることで、ロボットの耳や尻尾を動かすためのハードウェアを制御する。

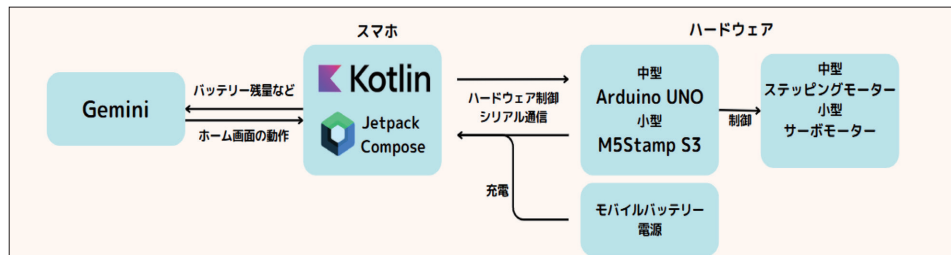


図3：システム全体の構成図

3.2 ソフトウェア

ホーム画面では、ユーザーがパーツを組み合わせて作成したあにまが表示される。あにまは、スマートフォンのバッテリー残量によって表情・動き・絵文字が変化する。例えば、バッテリー残量が少ないときはベッドで眠る動きをし（図4）、多いときはおもちゃを持って楽しそうな表情で飛び跳ねる動きを見せる（図5）。

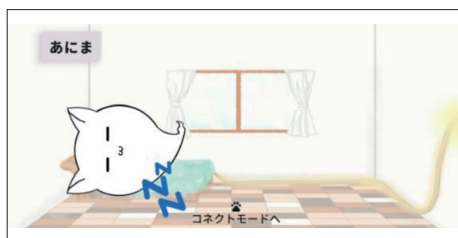


図4：眠っているあにま



図5：飛び跳ねているあにま

コネクトモードでは、ユーザーが画面をタップしたりロボットを撫でたりすることで、あにまの感情が変化する。感情は通常、笑顔、リラックス、怒る、眠い、の5種類を設定している。リラックスの時（図6）は眠たそうな顔になり耳がゆっくり動き、怒っているとき（図7）は目が吊り上がり耳はキビキビと動くなど、感情に合わせて表情や動きが変化する。



図6：リラックス時の表情



図7：怒っている時の表情

3.3 ハードウェア

ハードウェアは、フェイクファーで製作された外装に覆われており、3Dプリンターによって印刷された本体、マイコン（M5Stamp S3）、サーボモーター（FS0307）から構成されている。3Dプリンターによって印刷された耳の着せ替えパーツや、任意のフェイクファーなどで製作した外装を取り付けることで、ユーザーの好みの見た目のカスタマイズができるようになっている（図8）。



図8：ファーの付け替えが可能なパーツ

また、耳の取り付け角度を45°傾けることで、左右の動きだけでなく感情の表現も可能となっている。なお、パーツの取り付け部分はジョイント化がなされており、簡単につけ外しが可能である（図9、図10）。

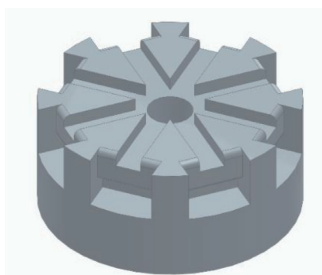


図9：パーツのジョイント（本体側）

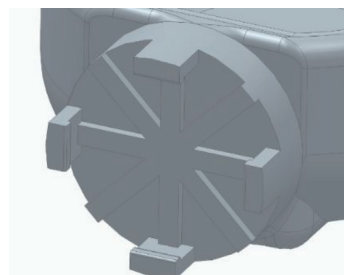


図10：パーツのジョイント（パーツ側）

さらに、尻尾として2口同時充電可能なUSBケーブルが出ており、電源を接続することでサーボモーターとスマートフォンへ電力供給ができるため、スマートフォンを充電しながらのロボットの使用が可能となっている。

4 従来の技術（または機能）との相違

本システムの特徴として、大きく以下の4つが挙げられる。

1 デジタルと現実世界の垣根を越えてあらゆる場所に存在できる

飼育対象であるあにまは、スマートフォン内での生活の様子はアプリケーションを通して見ることができ、現実世界ではロボットを通して触れ合うことができる。そのため、既存のデジタルペットでは不可能であったデジタルの世界と現実世界の双方に存在することができる。これにより、ユーザーはどんな場面においてもペットとの触れ合いから癒しを得ることが可能となる。

2 カスタマイズ性が高い

既存のペットロボットは1つの機種で1種類のペットを飼うことしかできない。本製品

では、毛皮を変え、あにまをカスタマイズすることができる。例えば、犬や猫だけでなく、ユニコーンのような現実には存在しない生き物にカスタマイズすることも可能であり、ユーザーの理想のデジタルペットと触れ合うことができる。

3 飼育対象が魂

ロボットはただの機械ではなく、あにまという魂を持った存在として設計している。そのため、ユーザーは外装を変更しても同じ存在として接することができる。これにより、ユーザーは気軽に外装を取り換えながら同じあにまと長く付き合うことが可能となる。また、修理やアップグレードをする際の心理的ハードルを下げるができる。

4 低コスト

スマートフォンをロボットに接続して使用することで、スマートフォンに搭載されているセンサや機能をそのまま利用することができる。そのため、ロボットに搭載する機能を少なくすることができ、低コスト化が実現できる。実際に、小型ロボットの製造コストは、原価のみで約5,400円であり、既存のペットロボットと比べて安価に作成できる。そのため、複数のデジタルペットを所有することも容易となる。

5 期待される効果

本システムによって、様々な問題によってペットを飼育できない人々や、世の中の飼育可能な範囲では理想とするペットがいない人々にとって最も癒しを得られるデジタルペットが、各自のスマートフォンと安価なロボットで手軽に飼育できるようになる。また、見た目のカスタマイズ性に富んでいることでオリジナリティを持たせることができるため、各個人のデジタルペットであると認識しやすく、誰でも手軽に自分だけのデジタルペットが飼育できるようになる。

さらに、スマートフォン内でもロボットでも癒しを得られるので、癒しを求めるその時にすぐに癒しを得ることが可能となる。このことにより、癒しを得ることがより手軽になるだろう。

6 普及（または活用）の見通し

本システムを普及させるために、現在のソフトウェアではAndroidのみの対応のため、Bluetooth化を行い、iOSへの対応を進めたい。これによってほぼすべてのスマートフォンユーザーがアプリケーションを使用可能となる。また、ハードウェアも内部設計や素子を見直してより安価で安全に改良していくことで製造を容易にし、量産を進めて販売していきたい。

製造に関しては、おもちゃメーカーに本システムのロボットの開発を委託してロボットを販売し、アプリケーションの利用の一部からライセンス料を徴収することによる利益と合わせて、それらを元手にすることで開発や製造を持続的に続けていくことが可能になると考えている。

近況

3名とも開発経験を活かして就職することができました。新生活で忙しく満足に動いているわけではありませんが、商品化のためのクラウドファンディングに向けて調査などを進めています。現在は主にリファクタリングを行っています。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、スマートフォンを活用し、ユーザーが自由にカスタマイズ可能なデジタルペットを作成できるプラットフォームを開発するという、斬新なアイデアを提案しており、「癒し」や「愛着」といった感情に着目したアプローチを特に高く評価した。本プロジェクトは、スマートフォンをペットロボットの一部として活用することで低価格化を実現し、手触りや実体を伴うペット体験を提供するという独自性の高い手法を採用している。また、ユーザーが自由にペットロボットの外見やデジタルペットの性格をカスタマイズできる点も魅力であり、個々の理想のペットを生み出せる新しい体験価値を創出する。既存のロボット技術の延長ではなく、感情表現の自由度を高める新しいデジタルペットの概念を提示したことが、未踏性の高さとして評価した。今後、プラットフォームの完成度向上や市場展開を進めることで、デジタルペットの新たなスタンダードを確立する可能性があり、感情面からのアプローチによる「人の心を動かす技術の開発」が期待された。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、スマートフォンを活用してユーザーの理想のデジタルペットを作成するためのプラットフォームを開発し、ソフトウェアとハードウェアの両面で、当初目標に対する到達度の高い成果を得た。ソフトウェア面では、ホーム画面の動作・表情の多様化、生成AI「Gemini」による自動的な動作パターンの選択、ML Kitを活用したデジタルペットの目の追従機能、感情変化機能、振動検知機能の実装によるインタラクションの多様性と自然さを高め、ユーザーとの継続的な関わりを促進する仕組みを実現した。コネクトモードでは、ユーザーがペットロボットと現実世界で触れ合う際の一体感を高めるアニメーションが追加され、密結合だったプロトタイプ構造をリファクタリングして拡張性・保守性を向上させた。ハードウェア面では、小型・大型ロボットの製作、パーツのジョイント化、毛皮の張替え機能の導入によって、カスタマイズ性とメンテナンス性が強化された。特に小型ロボットは、ねじを極力使用しない設計や、サーボモータの角度調整など、細部まで工夫が施され、設計・実装両面において、表現力と製造コストのバランスを高水準で実現した。結果として、製造コストを約5,400円に抑えながら、個別性の高いデジタルペット体験を実現可能とした点は、本プロジェクトの実装成果として特筆される。今後、iOS対応やBluetooth通信の導入、さらなるカスタマイズパーツの拡充、量産化による価格の低廉化が計画されており、デジタルペットプラットフォームとしての完成度がさらに高まることが期待される。

五十嵐 P M
稲見 P M
岡 P M
落合 P M
曾川 P M
竹迫 P M
田中 P M

RISC-Vの拡張を仮想化できるハイパーバイザの開発
 - ハイパーバイザによるエミュレーションとSailによる実装の自動生成 -

高名 典雅 (筑波大学 理工情報生命学術院)

2024年度 未踏IT人材発掘・育成事業

プロジェクトの背景：RISC-Vの拡張の乱立
 オープンソースで公開されている命令セットアーキテクチャ (ISA) である RISC-V では、仕様を「拡張」という単位でモジュール化している。
 「拡張」の策定自体は盛んに行われているが、これらがハードウェアに実装されることは少なく吊り下りの状態になっているものが多数存在する。

利用されている拡張：35/122
 とにかく策定する
 策定される拡張の数
 実際に使われる拡張の数
 策定されても使われない

RISC-V の「拡張」をハイパーバイザでエミュレーションする

ファームウェアと OS の間に「ハイパーバイザ」と呼ばれるソフトウェアを導入し、例外発生時にエミュレーションすることでハードウェアが「拡張」をサポートしているように見せかける。

ここでエミュレーション処理をする。

システムがもたらす恩恵

- 拡張を容易に導入できることで今まで使われてこなかった既存の拡張を活用できる。
- 仕様策定の際に迅速にソフトウェアの開発者やユーザーに環境を提供することでフィードバックを得やすくし、エコシステムの開発を促進する。

<https://github.com/Alignof/hikami>

実装の自動化：Sail の活用 [1]: <https://github.com/rem-s-project/sail>
 ISA の仕様を記述できる言語 **Sail** ^[1] を活用してデコーダとハイパーバイザモジュールの雛形を自動生成するツールを実装した。
 これにより、実装の手間が大幅に削減され、バグや実装漏れを低減できるシステムの構築に成功した。

<https://github.com/Alignof/ozora>

RISC-V の拡張を仮想化できる ハイパーバイザの開発

高名 典雅 (筑波大学 理工情報生命学術院)

1 背景

オープンソースの命令セットアーキテクチャである RISC-V では仕様を「拡張」という単位でモジュール化しており、設計者はこの拡張を組み合わせることで無駄な機能を入れずに仕様を作ることができる。

拡張は盛んに策定されており、2024年末までに122個策定されている。一方で実際に利用されている数は、実際にハードウェアの仕様書を調べたところ35個にとどまっている。

このような状況は RISC-V コミュニティ全体にとって大きな損失である。

2 目的

本プロジェクトの目的は、拡張をサポートした環境を手軽にハードウェアへ導入できるようにすることである。

これにより、

- 今まで使われてこなかった拡張の活用を可能にする。

- ・仕様策定の際に迅速にソフトウェアの開発者やユーザーに環境を提供することでフィードバックを得やすくし、エコシステムの開発を促進させる。
- ・という2つの狙いを達成することを目指す。

3 開発の内容

3.1 ハイパーバイザ

RISC-V H 拡張向けの Type-1 ハイパーバイザをフルクラッチで開発した。また、ハイパーバイザ内で利用するデコーダやアロケータについてもフルクラッチで開発した。

ハイパーバイザの概要を図1に示す。

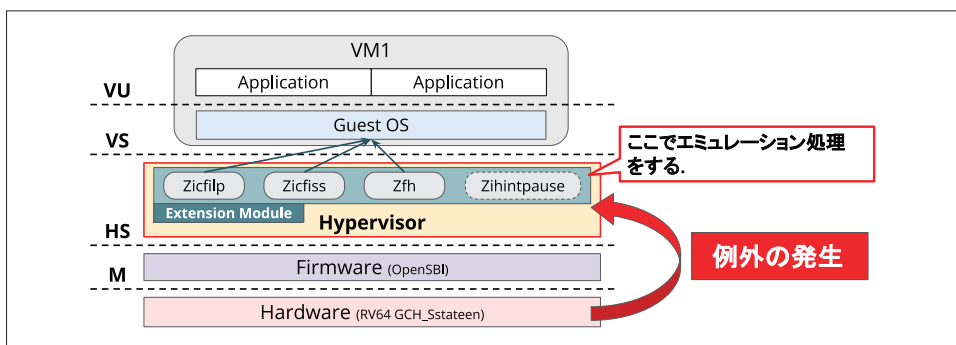


図1：ハイパーバイザの概要

このハイパーバイザはゲストを1つだけ持ち、拡張の振る舞いをエミュレーションするための機能を有する。エミュレーションはハードウェアが出す例外を利用して行う。

例えば、拡張で新しく定義されている命令を実行しようとする、ハードウェアはそのような命令について知らないで図2のように“Illegal Instruction”という例外を送出する。

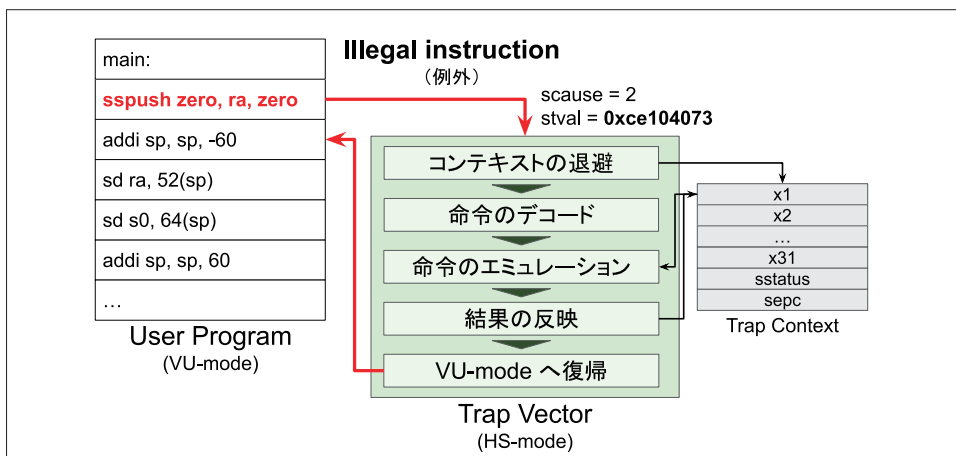


図2：例外のトラップによる命令のエミュレーション

このとき、例外処理をハイパーバイザのトラップベクタに移譲するように設定することでハイパーバイザ側で任意の処理を行うことができる。

命令のエミュレーションの場合、デコードによってエミュレーション対象となる命令を解析し、ハイパーバイザ側で演算をしメモリやレジスタの更新をした後、例外を起こした命令の次の命令に復帰することでゲストから見ると正しく命令が実行されたかのように見せかけることができる。

その他、CSRや例外のエミュレーションを行うことで、拡張の振る舞いを再現することに成功した。

エミュレーション処理はハイパーバイザモジュールとして実装されており、拡張と1対1で対応しているので、ユーザーは導入したい拡張に対応したモジュールをインストールするだけで環境を構築できる。

3.2 自動生成ツール

拡張を新たに追加する際には仕様書に沿ってデコーダやハイパーバイザモジュールを作成する必要があり、これが導入の障壁になるという懸念があった。

また、命令を解釈するデコーダや拡張に記述された仕様をエミュレーションするハイパーバイザモジュールはシステムの根本に関わる部分であるため、バグや実装漏れは許されない。もし仮にこの部分に脆弱性やバックドアが存在するとハイパーバイザが動作しているよりも上のレイヤに重大な影響を与えてしまう。

実装負荷の低減と実装ミス防止の双方を達成するためにデコーダの実装とハイパーバイザモジュールの雛形を自動で生成するツールを開発した。

自動生成ツールの概要を図3に示す。

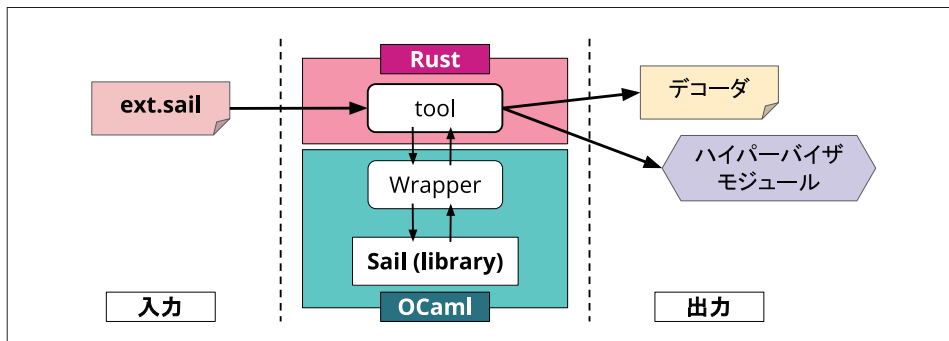


図3：自動生成ツールの概要

ツールを作成するにあたりSailという言葉¹に着目した。SailはISAの意味論を記述するための言語で、既にRISC-Vの仕様策定でも一部利用されている。

このSailによって記述された拡張の仕様が書かれたファイルを入力にし、Sailの処理系からASTを取得して、デコーダの実装やハイパーバイザモジュールの雛形を自動で出力するようにした。

デコーダは完全に実装を自動化し、自動生成の正しさある程度保証するためにデコーダ自

¹ <https://github.com/remis-project/sail>

身のユニットテストまで自動生成することに成功した。

ハイパーバイザモジュールはグローバル変数の宣言や構造体の定義、traitの実装など全拡張に共通するコードを自動で生成し、それぞれの拡張に依存する処理をtodoマクロで指示することで漸進的に実装を進められるようにした。

4 従来の技術との相違

本プロジェクトはRISC-Vの拡張をハイパーバイザのレイヤーでエミュレーションする初の試みである。RISC-V H拡張によるハードウェアの支援を受けることでファームウェアレベルのエミュレーションよりも高速に処理を実現可能である。

また、Sailを用いてデコーダの実装とハイパーバイザモジュールの雛形の自動生成についても取り組み、フルスクラッチ実装の利点を活かして深い連携による高機能な生成を実現した。

5 期待される効果

本システムによって手軽に拡張を使えるようになれば、今まで策定されるだけされて使われてこなかった拡張を有効活用することができる。

手軽に拡張を利用できる環境を作ることで、ユーザーはボードが販売される前に拡張を試すことができる。

ソフトウェア開発者は実機の上で検証ができる上、ユーザーに使ってもらうことでフィードバックを得ながら開発を進めやすい。

ハードウェア開発者はハードウェアの動作に不可欠なソフトウェアツールチェーンが整いやすく、ユーザーの動向を見て需要を予測しやすい。

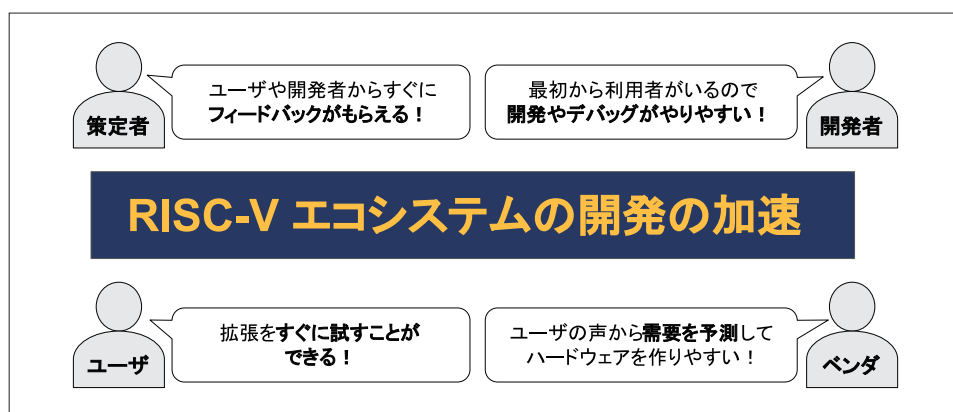


図4：本システムによるRISC-Vエコシステムの開発の加速

これにより、RISC-Vエコシステムの根本的な問題であった開発サイクルが上手く回らないという問題を解決することができる（図4）。本成果は、単にRISC-Vの拡張が使えるようになるというだけでなく、エコシステムのあり方に一石を投じるシステムとなっている。

6 普及の見通し

本プロジェクトの成果はすべてMITライセンス²で公開済みである。オープンソースなのでRISC-Vとの相性が良い。コミュニティに積極的に働きかけることでシステムの周知と普及を進めていきたい。

また、RISC-V H拡張の実機は今年の2月頃からユーザーに届き始めており、これに対応するハイパーバイザは少ないことから今が普及のチャンスだと考えている。

本ハイパーバイザが要求するH拡張やSsstateen拡張がRISC-Vのプロファイルに昨年入ったので、今後どんどん対応する実機が出てくるはずであり、さらなるシステムの普及が期待できる。より多くの機能や実機に対応することでこの機会を活かしていきたい。

関連URL

ハイパーバイザ：<https://github.com/Alignof/hikami>

デコーダ：<https://crates.io/crates/raki>

アロケータ：<https://github.com/Alignof/wild-screen-alloc>

自動生成ツール：<https://github.com/Alignof/ozora>

近況

成果報告会後も実機での評価や自動生成システムの拡充を進め、成果をまとめた論文が国際会議に採択されました。2026年6月にアメリカで発表予定です。

RISC-Vの拡張の数は増え続けており、コミュニティは更なる盛り上がりを見せています。買うことのできるボードの数も増えてきました。

ハイパーバイザ周りの環境も、未踏期間中はエミュレータでのみ環境が存在したIOMMUや、仕様のみが存在したAIAがようやく実機に搭載され実用の域に達しました。当時『普及の見通し』に書いた予言が的中した形です。まさにRISC-V仮想化元年といってもよいのではないのでしょうか。

私個人の近況としては、博士後期課程に進学しRISC-Vやシステムソフトウェアに関連する研究を続けています。

最近は多忙で大規模なシステムソフトウェアを書けていないので、また時間を取って大きなものを書きたいです。

Hikami: A Lightweight Hypervisor for Emulating RISC-V Extension Semantics with Sail-Driven Auto-generation

Who: Norimasa Takano, Yoshihiro Oyama
Track: LCTES 2026

ⓘ This program is tentative and subject to change.

When: Tue 16 Jun 2026 11:24 - 11:46 at Flatiron 3 - Session 3: Formal Methods and Systems Reliability chairs: Sangeeta Prasad

Abstract
The rapid expansion of RISC-V extension specifications frequently outpaces hardware availability. This lag severely bottlenecks the development and validation of software stacks, which ultimately hinders the feedback loop necessary for actual hardware implementations. To address this challenge, we propose a lightweight Type-1 Hypervisor that leverages the RISC-V Hypervisor extension to emulate the semantics of unimplemented RISC-V extensions. By trapping and emulating only the target instructions and control and status registers (CSR) accesses, our system allows guest software to run natively for all supported instructions. Furthermore, to guarantee the correctness of the emulation toolchain and minimize manual effort, we introduce a novel auto-generation framework. We automatically derive the instruction decoders and hypervisor module templates directly from Sail, the formal semantics specification of the RISC-V ISA, thereby eliminating manual implementation errors. We evaluated our approach on a real RISC-V hardware platform (MikV Megrez). Experimental results demonstrate that our system outperforms a widely-used full-system emulator (QEMU) in realistic workloads, achieving faster execution times when emulated instructions account for 0.1% or less of the total execution. Additionally, our hypervisor maintains 99.4% of native performance for non-target workloads and restricts interrupt latency to under 1 microsecond. This formally-supported virtualization approach provides a practical, high-performance foundation for validating software against emerging RISC-V extensions prior to silicon availability.

DOI: <https://doi.org/10.1145/3814943.3816171>



Norimasa Takano
University of Tsukuba
Japan



Yoshihiro Oyama
University of Tsukuba
Japan

² <https://opensource.org/license/mit>

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、RISC-Vの拡張を仮想化し、容易に管理・運用できるハイパーバイザを開発するという新しい視点から、RISC-Vのエコシステムの発展を加速させる取り組みとして高く評価した。RISC-Vはオープンアーキテクチャとして多くの拡張が策定されているものの、ハードウェア実装が追いついておらず、利活用されないままの拡張が多い。本プロジェクトは、拡張を仮想環境上のモジュールとして提供し、ユーザーが手元のハードウェア上で容易に試験・利用できる仕組みを構築するという点で、非常に独自性の高い提案となっていた。

特に、ハードウェアの制約を超え、ソフトウェアベースでRISC-V拡張の導入を可能にするアプローチは、開発者や研究者にとって大きな利点となる。また、提案者は低レイヤー技術への深い理解と強い関心を持ち、未踏プロジェクトを通じて国内外のRISCVコミュニティに対し、新たな標準やエコシステムの形成に影響を与える可能性がある。本プロジェクトの成功により、拡張機能の試験・普及が加速し、最終的にはRISC-Vのハードウェア実装が進むことが期待された。この挑戦は、単なる技術開発にとどまらず、RISC-Vの未来を切り拓くものとして、大きな意義を持つと考えた。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、RISC-Vの拡張機能をソフトウェアモジュールとして仮想化し、ハードウェアの実装に依存せず、柔軟に拡張機能を導入・運用できる環境の提供を実現した点で非常に高く評価できる。

本プロジェクトでは、RISC-VのISA拡張およびNon-ISA拡張を分類・整理し、それぞれに対応する仮想化モジュールの設計・開発が行われた。モジュール設計の工夫により、複数の拡張を同時に導入する際の構成管理が簡便であり、将来的な競合管理機構の拡張にも備えた構造になっている。

また、Sail言語を活用した自動生成ツールの導入により、拡張モジュールの迅速な開発と導入が可能になった点も大きな成果である。さらに、CLIベースで拡張モジュールの管理が可能となっており、開発者だけでなく非エンジニアのユーザーも直感的に拡張機能の導入・管理ができる環境が整えられ、将来的にはGUI対応の拡張も視野に入る。仮想環境での動作検証、競合時の自動切り替え、エラー発生時のリカバリー処理など、各フェーズで丁寧な検証と最適化が行われ、着実に開発目標を達成した点も評価できる。

ミトウのキセキ

2024年度 未踏IT人材発掘・育成事業 成果報告書集

2026年7月24日 第1版発行

企画・編集・制作・発行

独立行政法人情報処理推進機構（IPA）
イノベーション部 未踏グループ

〒113-6591 東京都文京区本駒込二丁目28番8号
文京グリーンコートセンターオフィス17階
<https://www.ipa.go.jp/>

Copyright © 2026 Innovation Platform Agency, Japan.

