

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、及びサービス名は、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、いまでも続いているのが未踏事業である。だから、今年2024年で四半世紀を迎えたことになる。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て初めてのことだ。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2023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。

2023年度もまた、新たな才能が世界に羽ばたいていきました。

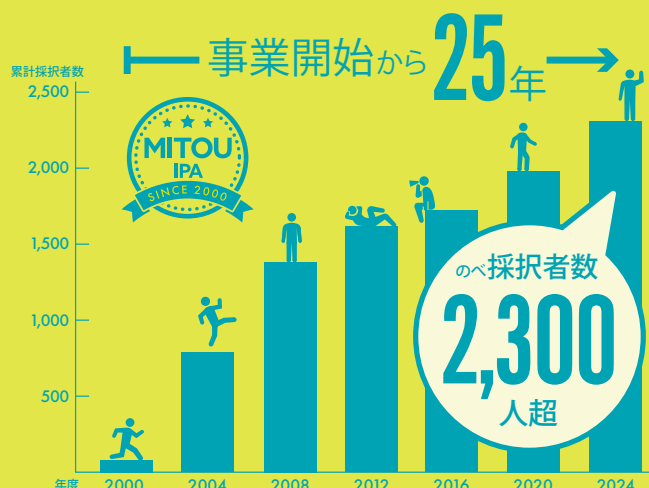
夢をカタチにし続けてきた未踏事業についてご紹介します。



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2,300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

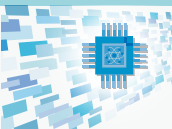


次世代IT (量子コンピューティング・リザーコンピューティング) を活用したい方



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

お茶の水女子大学 理学部
情報科学科 准教授



いなみ 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

筑波大学 システム情報系
准教授



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



たけさこ 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 くにとろ
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

※掲載PMは2023年度、2024年度、2025年度の担当です。

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 288 万円
未踏アドバンスト事業	最大 1,504 万円
未踏ターゲット事業	最大 378 万円

※2024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）」

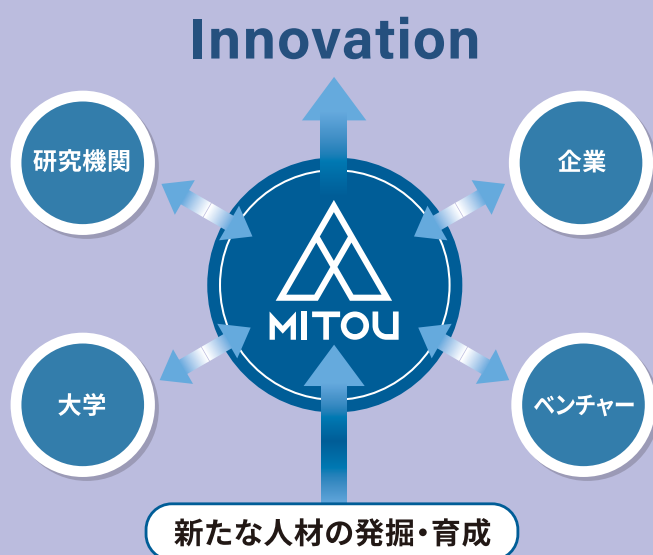
https://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/innovation_policy/bayh_dole_act.html

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。



のぼり たいゆう

登 大遊 さん (2003年度)

VPN開発の世界的第一人者。コロナ禍に「シン・テレワークシステム」を開発。全国のテレワーク普及に貢献。



なかむら ひろみ

中村 裕美 さん (2010年度)

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。



ほんだ たつや

本多 達也 さん (2014年度)

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。

2023年度 未踏IT人材発掘・育成事業

2023年度「未踏IT人材発掘・育成事業」には**153件**の応募があり、**21件(36人)**が採択されました。

公募期間：2022年11月18日～2023年3月15日

人材育成／開発期間：2023年6月19日～2024年3月8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(2023年6月24日、25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。

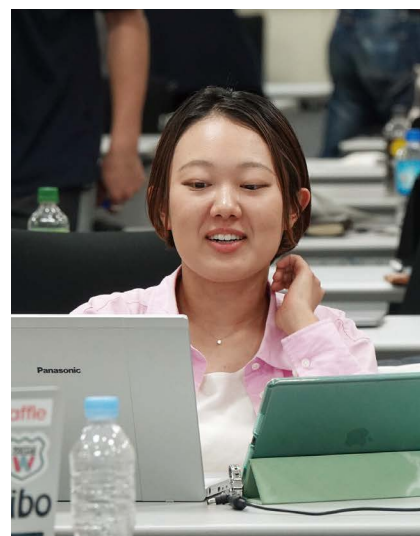
・八合目会議(2023年11月25日、26日)

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(2024年2月17日、18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
サッカーのゴールキーパーのための練習データ分析システム	2
ロボット記述言語に基づくドローン開発支援ツール	10
みんなで遊べる競技かるた	17
稲見 昌彦PM 担当プロジェクト	23
五感情報を記録・共有するセンサリーマップの開発	24
視線とキーボードで完結する高速なGUIポインティングシステム	30
手話認識による逆引き検索が可能なクラウド型手話辞典の開発	37
ぬいぐるみ専用の組み込みAIモジュールの開発	43
岡 瑞起PM 担当プロジェクト	51
GPSと合成音声による防犯スマートフォンアプリケーションの開発	52
月経中のストレス緩和を目的としたショーツ型経血量測定デバイス	58
テーマパークでの満足度を最大化するためのプラン作成支援アプリケーション	63
落合 陽一PM 担当プロジェクト	71
対話可能な選択的機械除草ロボットの開発	72
乳化量最大化を目指したエスプレッソ抽出制御システムの開発	79
曾川 景介PM 担当プロジェクト	85
Wasmを実行するunikernelとWasmコンパイラ	86
生成AIを使った制作システムで実現する循環型プラットフォーム	92

竹迫 良範PM 担当プロジェクト 99

Pythonにトランスパイル可能な静的型付けプログラミング言語の開発 100

空間を奏でる電子楽器の開発 106

TEEを用いたセキュアかつ高性能なデータベースシステムの開発 113

田中 邦裕PM 担当プロジェクト 119

自作マイコンの開発を容易にする開発環境 120

RISC-V ベースのプロセッサを自動生成するシステムの開発 126

魚群や動物プランクトンの空間分布を可視化するシステムの開発 134

Capabilityを主軸とするマイクロカーネル 139

Column クリエータの生の声

未踏の経験を振り返る 50

未踏で得られたもの 70

未踏の良いところ 98

※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づ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。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業 成果報告会

https://youtube.com/playlist?list=PLi57U_f9scLyBgIYKcJixGLs-o0bshhD



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

■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未踏プロジェクトマネージャー兼任。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。情報処理学会会誌編集長。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行うことを意識した。ダイバーシティの重要性は世の中でも訴えられており、未踏クリエイター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ー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。

2023年度末路IT人材発掘・育成事業

王 方成（東京大学） 松尾勇吾（東京大学） 染谷大河（東京大学）

サッカーのゴールキーパーのための練習データ分析システム
ー 2台の魚眼カメラによる3次元トラッキングー





視点を変える

上下左右、相手からなど
どの視点からでも振り返られる



比較する

お手本となるプレーと比較して
自分の動きを分析できる



データで気づく

練習データを蓄積し、
客観的な振り返りを可能に

サッカーのゴールキーパーのための 練習データ分析システム

王 方成（東京大学 理学部 物理学科）

松尾 勇吾（東京大学 理学部 生物情報学科）

染谷 大河（東京大学 大学院総合文化研究科 言語情報科学専攻）

1 背景

ゴールキーパーはサッカーにおいて特殊なポジションである。11人のプレイヤーの中で唯一手を使ってプレーすることが許され、その指導には特別な知識と経験が必要である。このような背景から、多くのアマチュアチームでは専属のコーチがつかず、練習を振り返ることで自分自身にフィードバックをしつつ、成長しなければならないポジションである。実際に、2021年度のJFAのチーム登録数と指導者登録数、ゴールキーパーライセンスの取得数を見ると、1チームあたりに指導者登録数は3人以上いるのに対し、ゴールキーパーライセンス取得者はわずか10チームに1人である。またプロ選手においても、自分のプレーを振り返ることはさらなる競技力の向上のために非常に重要である。

2 目的

このような背景から、我々は練習や振り返りの質を高め、選手の競技力向上をサポートするツールが必要であると考えた。具体的には、ゴールキーパーの骨格情報とボールの位置情報を3次元で捉え、それを3DCG上に再構成して自由な視点から振り返りが行えるようにすることで、先述の練習振り返りの質の向上に大きく寄与できると考えた。本プロジェクトは、2台のカメラをゴールに取り付けるだけで、ゴールキーパー及びフィールドプレイヤーの3次元トラッキングを可能にすることを目指す。3次元で選手の骨格情報を取得する技術はすでに実用化されている一方、スタジアムに設置した10台以上のカメラを用いた、数億円規模の莫大なコストを必要とするシステムである。これに対し、本プロジェクトでは、ゴールにカメラを取り付けることで多様な練習環境に対応し、十万円程度の安価で高精度なデータ取得を可能にするシステムを開発することを通して、プロ・アマ問わず練習の振り返りの質を格段に向上にさせることを目指した。

3 開発の内容

本プロジェクトは、2台のカメラをゴールに取り付けるだけで、ゴールキーパー及びフィールドプレイヤーの3次元トラッキングを可能にするSmart Goalというシステムを開発した。以下に、実際の使用の流れに沿ってSmart Goalの機能の概要を説明する。

3.1 練習動画の撮影

Smart Goalでは、魚眼レンズ（GoPro Max Lens Mod 2.0）を接続したアクションカメラ（GoPro9）を用いて撮影を行う。Smart Goalではサッカーゴールにカメラを設置する必要があるが、一般に市販されている粘着型マウントでは、接着力が弱い・毎回の設置が面倒・設置するたびに位置と角度が変わる・ボールの衝突時にカメラに大きな衝撃が加わるなどの問題がある。そのため、図1,2に示すような磁石型のマウントを独自に開発した。

これにより、ユーザーは意識せずともカメラを磁石マウントに近づけるだけで、毎回同じ位置、同じ角度でカメラを設置でき、設置時にかかる時間もおよそ3秒程度となっている。



図1：磁石型のマウント



図2：カメラの設置時の様子

3.2 動画の取り込み・撮影機器の充電

我々は、日々の練習の撮影におけるユーザーの負担を軽減し、継続してシステムを利用できるようにするためにSmart Goal Dockを開発した。Smart Goal Dockは、ユーザーがカメラを接続するだけで、カメラの左右を認識してカメラ内の動画を自動でサーバーの適切なフォルダ

ーにアップロードし、カメラ内の動画を消去すると同時に、カメラの充電を完了して再使用可能な状態とする（図3）。これにより、ユーザーはカメラの容量や残バッテリーを機にすることなく、継続してシステムを利用することが可能になる。



図3：Smart Goal Dock

3.3 3次元姿勢推定

まず、各カメラにおいてそのカメラに写っている選手の姿勢推定とボールの位置推定を行う。この時、選手の姿勢推定とボールの位置推定はそれぞれ4DHumans（Goel et al., ICCV 2023）とYOLOv8（Jocher et al., 2023）を用いた。次に、各カメラに対して骨格推定とボールの位置推定から得たキーポイントのピクセル座標の情報と、2つのカメラの内部パラメーター、外部パラメーターの情報を組み合わせることによって、各キーポイントからの光線がどのような角度でカメラに対して入射したかを計算する。これを両方のカメラに対して計算し、光線の交点を計算することで、3次元の座標を再構成することができる（図4）。

厳密には2つの光線は交差しないため、光線の交点は右カメラと左カメラからの光線同士の距離が最小になるようなそれぞれの光線上の点を結んだ半直線の中点を採用している。また、取得した3次元トラッキングデータが自然な動作となるように、移動平均を用いた平滑化を行っている。

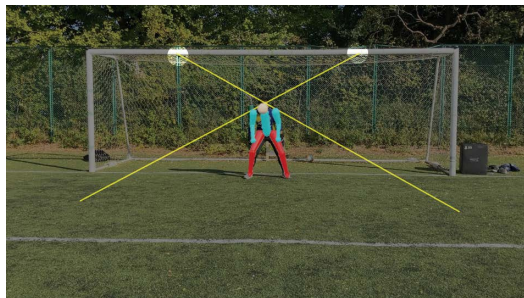


図4：光線の交点による3次元座標再構成の模式図

3.4 3DCGを通した練習振り返り

取得された3次元データは、以下のようなWebアプリケーション上で確認が可能になっている（図5）。

Smart Goalを用いると、ユーザーは1) 多様な視点からの振り返りや、2) 自分のプレーと他の人のプレーの比較、そして3) データに基づいて自分のプレーを客観的に把握することができる。これら3点について、以下で項目を分けて説明を行う。

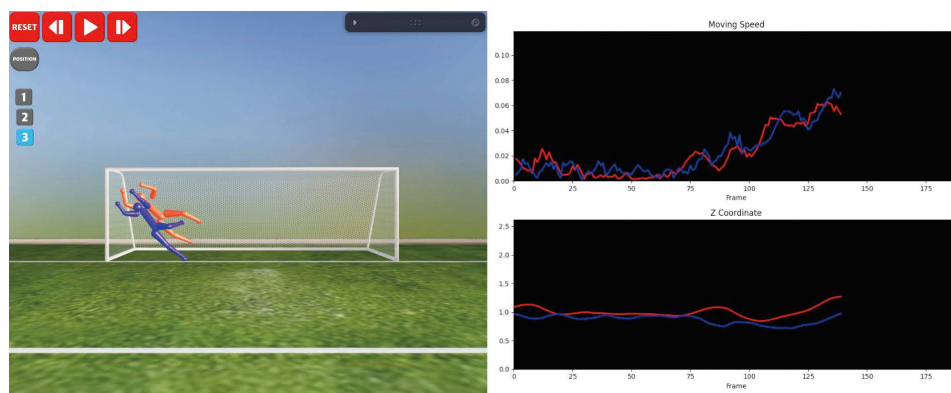


図5：Webアプリケーションのサンプル画面

■視点を变える

Smart Goalを用いると、ユーザーは3DCG上で自由な位置から、自由な角度で自らのプレーを確認することができる。例えば、図6のように多様な視点に自由に動かしてプレーを確認することができる。

注目すべきは、鳥瞰図など普通のカメラで撮影した映像を用いた振り返りでは絶対には得られない視点からの振り返りが行うことができる点である。特に、シュートした選手からの視点のような一人称視点が得られると、ゴールキーパーにとっては、自分のポジショニングが正しいのか、自分が相手にどれだけのプレッシャーをかけられているのかなどを客観的に見ることができ、今までにない振り返りシステムである。また、3DCGであることを活かし、図7のように補助線を引いてポジションを確認することも可能である。

このように、選手がプレーを振り返る際に様々なオプションを提供することによって、詳細な振り返りを可能にすることは、Smart Goalの大きな特徴の一つである。

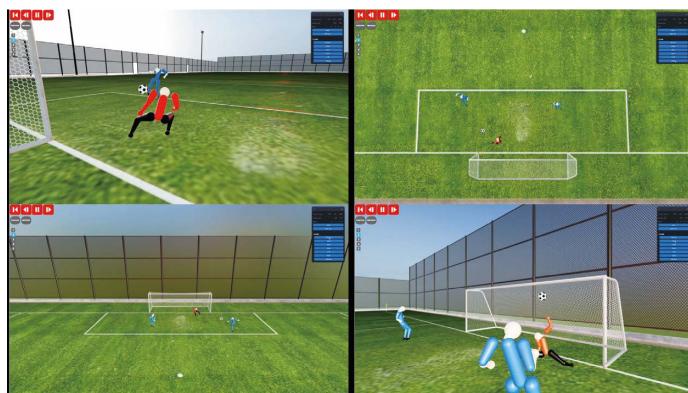


図6：多様な視点からのプレーの振り返り

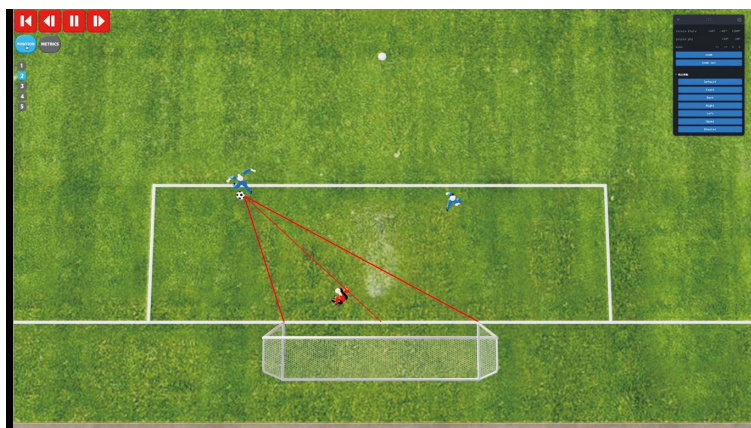


図7：補助線によるポジショニングの確認

■比較する

また、複数のプレー動画とデータを蓄積することで、複数のプレー間の比較を行うことができる。

同じ練習や、類似した状況下でのプレーについて、3DCGを重ねて表示する機能である。例えば図8では、異なる2人の選手のプレーを表示しており、動作のタイミングや方向、体の沈み具合、足の関節の角度や腕の動き方の違いなどを視点の変更を交えて確認することができる。

これにより、自分よりレベルの高い選手など、参考にしたい選手との比較や過去の自分のプレーとの比較を詳細に行うことができる。CGを重ねて表示することで、1点からの動画だけでは認識が困難な細かい動作比較を可能にしており、解決すべき課題や練習による改善の度合いを客観的に確認できると考えられる。

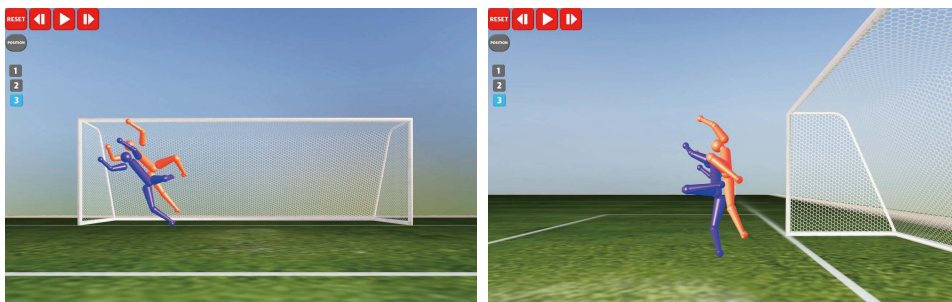


図8：正面（左図）と横（右図）からの比較

■データで気づく

さらに、Smart Goalでは3DCGを構成する際に、選手の各関節の角度や動き方をデータとして取得している。このデータを用いることにより、3DCGを用いた多視点からの振り返り、重ね合わせによる比較を行っても必ずしも得ることができない示唆を、データを通して得ることができる。図9に、3人のアマチュア選手と1人のプロ選手（青で表示）の横方向へのダイビン

グ動作を比較した例を示す。左画面で行われる目視での動作比較では、各選手の動作の違いは必ずしも感じられないが、実際に横方向（X軸方向）の移動スピードを比べてみると、プロ選手の方がボールが蹴られた直後の移動速度が速く、ボールが蹴られた直後にスムーズに移動できていることがわかる。

また、継続してSmart Goalを使用することにより、各選手ごとのエリア別失点データなどといった、統計データを取得することもできる。これにより、各ゴールキーパーがどのような場合に失点する傾向にあるのかなど、各選手の苦手なポイントが把握でき、より効率的なトレーニングが可能になると考えられる（図10）。

このように、Smart Goalでは、自由な視点からの振り返りや比較だけではなく、目視の比較では必ずしも得られない示唆を蓄積されたデータから得ることができる。

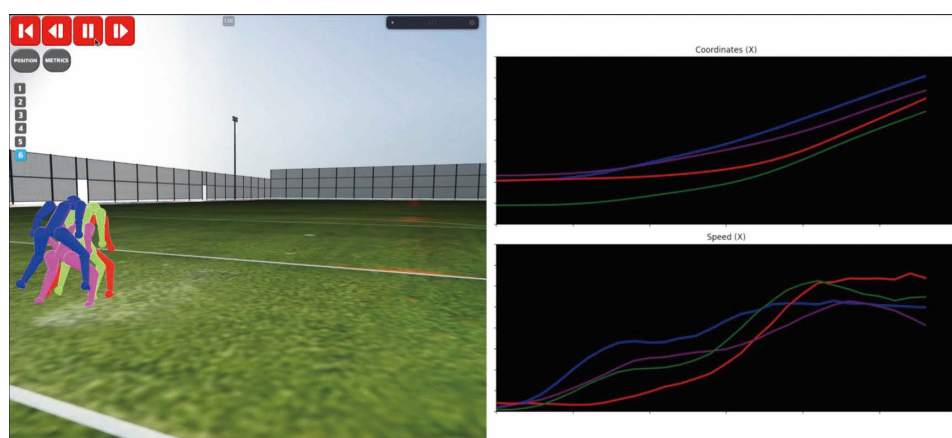


図9：3人のアマチュア選手と1人のプロ選手（紫で表示）の動作（左）と各選手の横方向（X軸方向）の速度と座標のデータ（右）

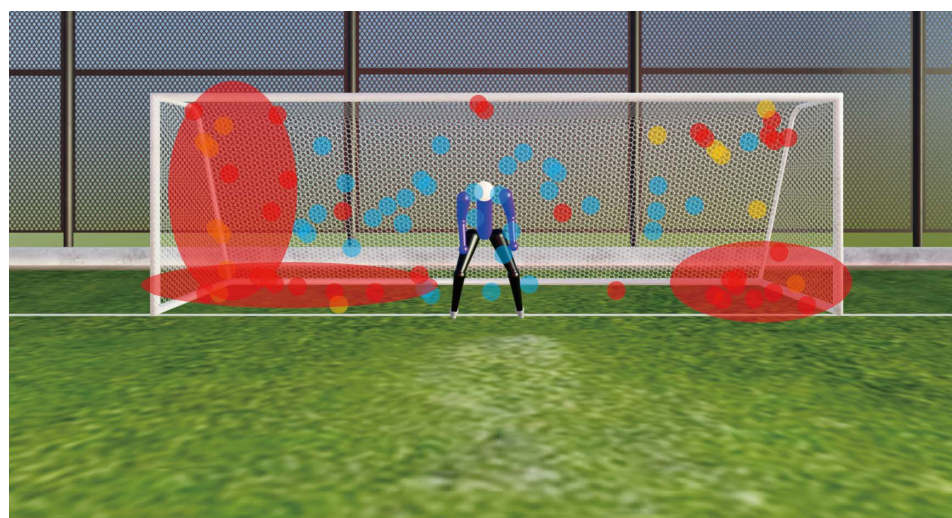


図10：エリア別失点データの例

■4 従来の技術との相違

3次元で選手の骨格情報を取得する技術はすでに実用化されており、実際2022年のカタールワールドカップにおいては、スタジアムに設置された12台のカメラを用いて、試合中の選手の骨格情報を取得し、オフサイドの半自動検出等を行っていた。このように、試合用のデータ分析システムは数多く存在するが、1試合でゴールキーパーが受ける枠内シュート数は平均5〜7本程度であり、ゴールキーパーのプレー改善に十分な情報を得られない。また、試合用のシステムは練習で使用するにはコストが大きく、様々な形状でグラウンドを使用する練習の多様性にも対応できない。我々は、ゴールとプレーエリアの寸法が定まっていることなどを上手く利用することで、これらの練習でのデータ取得の課題を解決しつつ、練習から安価で手軽に、それでいて高精度なデータ取得を可能とした。Smart Goalはゴール前に限り、詳細な練習データを大量で安価に取得することができ、練習の多様性にも対応できる。これにより、ゴールキーパーのデータを数百倍のコストパフォーマンスで取得することができる。さらに、出場機会の少ないゴールキーパーのデータも取得可能となる。

■5 期待される効果

従来は、どのレベルの選手であっても、基本的にはピッチ中央やゴール裏から撮影された一つの映像から練習の振り返りを行っていた。しかし、このように撮影された動画では、他の選手と被ってしまつてうまく動作が確認できなかったり、ある一つの画角からしか動作を確認できなかったりする課題があった。Smart Goalは、3DCGを作成することにより自分の動作を多様な画角から確認したり、また各関節の角度など定量的なデータを元に分析したりすることを可能にする。これにより、精緻な動作分析を元に更なる競技力向上を目指すプロ選手や、専属コーチがいない中で技術向上を目指すアマチュア選手にとって、普段の練習の振り返りの価値を格段に向上させることができるシステムとなっている。

■6 普及の見通し

まず本プロジェクトの成果は、製品化してプロサッカーチームを中心に普及させたいと考えている。海外を含めゴールキーパーに特化した同様のシステムは存在していないため、大きなシェアを獲得できる可能性がある。また、先述した他のスポーツへの拡大やフィールド全体への適用が進めば、さらに大きな市場価値を持つ製品となると考えられる。また、今後の機能拡張として大きく3つの方向性を考えている。1つ目は、筋骨格推定の技術を使用した、詳細な身体運動データの提示である。現状でも、骨格情報による体の動きを3次元で把握できるが、筋骨格推定を行うことにより、さらに詳細な動作解析、怪我予防への活用が期待される。2つ目は、ゴール前のシーンだけでなく、フィールドプレーヤーも含めた全選手の3次元トラッキングである。これはフィールドの周囲全体にカメラを配置することで実現できると考えており、スタジアムでの設備を必要とする現状のシステムより圧倒的に安価で導入が可能となる可能性がある。3つ目は、他のスポーツへ拡張である。

実際に本プロジェクト期間中には、サッカーだけでなくバスケットボールへの応用を行った。その他にも、バレーボールやハンドボールをはじめとしたゴール型やネット型球技はフィールド内に規格化された構造物を持つため、容易に転用が可能であると考えている。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、サッカーのゴールキーパーに特化した練習データ分析システムの提案である。ゴールキーパーに特化したこと、練習におけるゴール前の守備データを集中して取得し利用することからデータ量を増やすことができ、AIで分析可能になる。ゴールキーパーがフィールドプレイヤーに比べて数的な不利な問題を技術的に解決していくという点に期待して採択とした。

提案者自身がゴールキーパーであり、技術のこともゴールキーパーのこともよくわかっている彼らだからこそ、選手にとって本当に使えるシステムを開発してくれるだろうと多くのPMが期待するプロジェクトである。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトでは、市販のカメラをゴールにつけるだけ、専用ドックで充電するだけで手軽に3DCGを利用して振り返りができるシステムを作り上げた点を評価する。また、現場検証やインタビューを行い、ユーザーのニーズに合致した機能を実装することができた点も評価する。実際に、開発したシステムを見せたインタビューでは選手たちから高評価を得ている。

プロダクト開発の進め方についても、当初はプロジェクト内で分担して開発をしないのかプロジェクトマネージャーとしては若干心配してはいたが、序盤にメンバー全員で同じ課題について取り組んだことで、お互いの実装について把握できているというメリットが得られ、それが後半の開発を一気に進められた要因の一つと考えられる。プロジェクト全体を見渡して、よくメンバーで話し合い、プロジェクトの方針を意識しながら、開発を続けてきた点を評価する。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

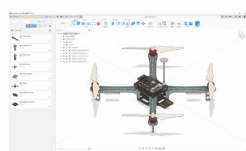
ロボット記述言語に基づくドローン開発支援ツール

ー Tobas: 全てのドローンのためのフライトコントローラー

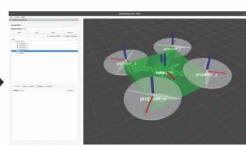
土肥 正義 (フリーランス)



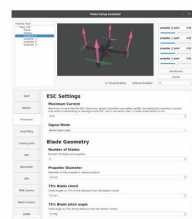
詳細な機体構造に基づく飛行制御



モデリング



URDF作成



Setup Assistant



実機試験



シミュレーション

ロボット記述言語に基づく ドローン開発支援ツール

土肥 正義 (フリーランス)

1 背景

近年の産業用ドローン市場規模の急速な拡大の背景には、ドローンの頭脳であるフライトコントローラーの発展がある。PixhawkなどのオープンソースハードウェアとPX4やArduPilotなどのオープンソースソフトウェアの発展により、専門知識を持たない人でもドローンの開発が可能になったが、従来のフライトコントローラーには飛ばせる機体形状が限られているという課題がある。

図1は従来のフライトコントローラーで飛ばせる機体と飛ばせない機体を平面図にまとめたものである。黒線がフレーム、色付き線がプロペラ、白黒の円が重心を表す。ソースファイルを直接編集することなく飛ばせる機体は、図1左のように重心が中央にあり、等しい大きさのプロペラが重心回りに均等に配置されている。それに対し、図1中央のように重心が中央から

外れている機体や異なる大きさのプロペラを用いている機体は従来のフライトコントローラーでは扱いづらく、飛ばすためにはユーザー自身が多少の物理演算を行う必要がある。さらに、図1右のようにプロペラが大きく傾いている機体や飛行中に重心が変化する機体は従来のフライトコントローラーの設定範囲を超えており、特異な機体構造を最大限利用することはできない。

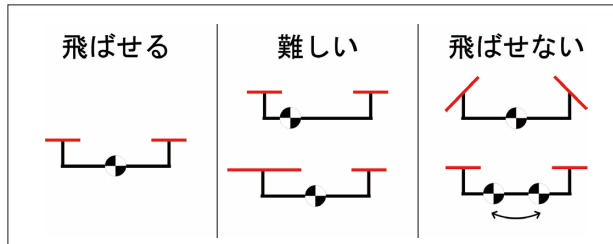


図1：マルチコプターの様々な機体形状の模式図。
黒線がフレーム、色付き線がプロペラ、白黒の円が重心を表す

図1中央や右のような機体構造をもつドローンが飛行可能になると、超音波センサーを搭載したマルチコプターによる構造物の非破壊検査や傾け厳禁の荷物の搬送など、従来は困難であった様々なミッションが遂行可能になる。ドローンの活用範囲が広がる中、それらを可能にするフライトコントローラーの開発は日本のドローン産業の発展に大きく貢献すると考えられる。

2 目的

本プロジェクトの目的は、上記のようなドローンでも安定して飛行させられるようなフライトコントローラーを開発することと、それを力学や制御工学に関する専門知識をもたない人でも使えるようにすることである。

3 開発の内容

以上の目的を達成するため、本プロジェクトではドローン開発支援ツール「Tobas」を開発した。Tobasの主要要素は機体制御器、Gazebo プラグイン、Setup Assistant の3つである (図2)。

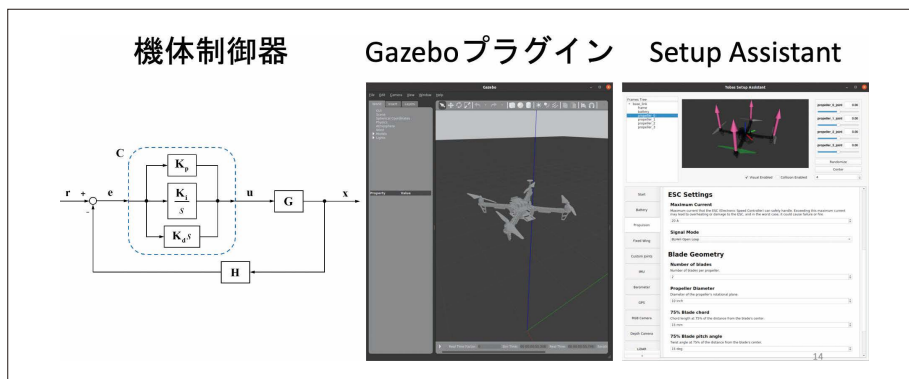


図2：Tobasの構成要素

3.1 機体制御器

機体制御器は、機体の位置姿勢の安定化および目標値に追従させる機能を持つ実行ファイル群である。

図3は機体制御の流れを簡単に表した図である。印加電圧からモーターのダイナミクスに従って回転が発生し、そこから空気力学に従ってプロペラの推力が発生し、そこから運動方程式に従って機体の角加速度が発生し、それが時間積分されて機体の姿勢が変化するという因果関係が存在するが、本プロジェクトではその過程を詳しくモデル化することで、様々な機体形状に対応させている。運動方程式からモーターのダイナミクスまでの部分は機体設計段階で推定可能であり、正しく設定することでモデル化誤差を減少させ、それに伴い飛行性能を向上させることができる。

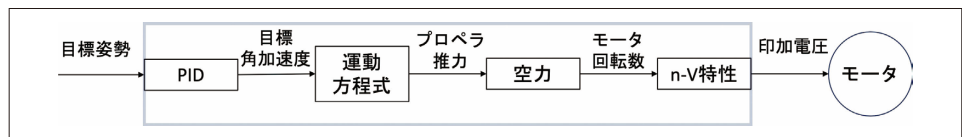


図3：機体制御において、目標姿勢がモーターの印加電圧に変換されるまでの流れ

3.2 Gazebo プラグイン

Gazebo プラグインは、ドローンを構成する各要素をGazebo上でシミュレーションするための共有ライブラリーである。

シミュレーションする内容は以下である：

- ・センサー系：6軸IMU、地磁気、気圧、GNSS
- ・駆動系：バッテリー、ESC、モーター、プロペラ、固定翼
- ・環境系：定常風、突風、乱流
- ・その他：モデル化誤差

センサー系のノイズモデル（図4）や駆動系のダイナミクスに加え、過電流によるESCの発火、離陸時の電圧降下、突風などの事故に繋がる要素を再現している（図5）。また、空力系の定数にはある程度のモデル化誤差が発生することを想定し、シミュレーション内でロバスト性を評価できるようにしている。

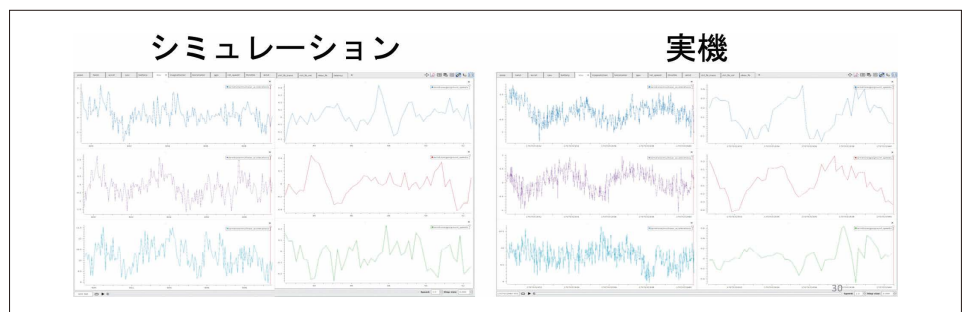


図4：センサーのノイズモデルの再現

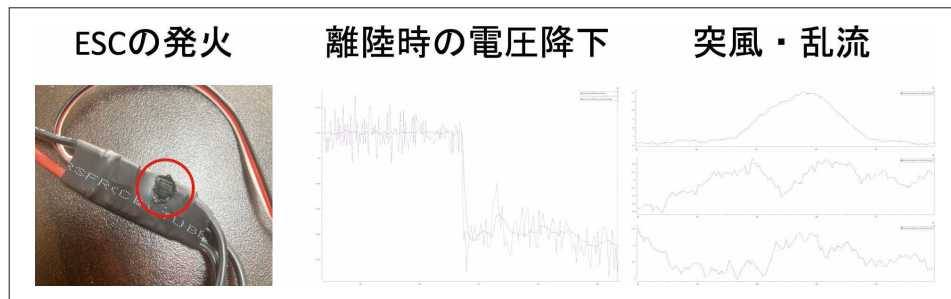


図5：事故に繋がる要素の再現

3.3 Setup Assistant

Setup Assistantは、Tobasのソフトウェアを使用するのに必要な設定ファイルを作成するためのGUIである。URDF (Uni.ed Robotics Description Format、ロボット記述言語) からドローンの機体構造を取得し、URDFには表現されていないドローン特有の設定を行い、Tobas Configuration Packageという設定ファイル群を出力する (図6)。この仕組みはロボットアームのソフトウェアとしてよく知られているMoveIt!を参考に行っている。

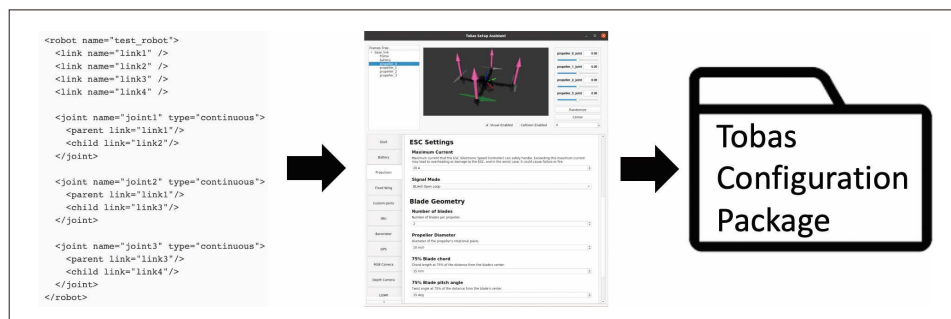


図6：Tobas Setup Assistantの役割。URDFを読み込み、設定ファイル群を出力する

4 従来の技術との相違

従来のフライトコントローラーとTobasの最大の違いは、機体の運動を決めるダイナミクスを詳細にモデル化していることである。従来のフライトコントローラーは機体の回転運動を決める重要なパラメーターである慣性モーメントを過度に簡略化しているのに対し、TobasではURDFを読み込むことで完全な力学パラメーターとその時間変化を考慮する。また、従来のフライトコントローラーを使用する場合はまず与えられた機体形状の中から1つ選ぶのに対し、TobasではURDFに表現されてさえいればあらゆる機体形状を試することができる。さらに、従来のフライトコントローラーではモーターの内部抵抗を無視していたのに対し、TobasではGUIの設定からモーターとプロペラを組み合わせたときの非線形のダイナミクスを推定し、飛行制御に利用している。

5 期待される効果

Tobasにより期待される効果は大きく分けて4つあると考えている。

1つ目は、機体設計の自由度が増加することである。従来のフライトコントローラーを使用する場合は、フレームリストに載っている型から1つ選び、フライトコントローラーで飛ばせるようにドローンを作るのが基本である。それに対し、Tobasを使うことで可動部を持つ機体や非平面ローター配置の機体など、ミッションに合わせてあらゆる機体を試すことができる。本プロジェクトでは非平面ローター配置かつロボットアームを搭載した機体（図7）を飛ばすことでその有効性を示した。

2つ目は、飛行性能が向上することである。これは特に基本的な対称型から外れたドローンで顕著であり、上に挙げたような力学パラメーターや推進系のモデル化誤差が減少することで、制御ゲインを上げて安定性を保てるようになる。

3つ目は、ゲイン調整の手間が省けることである。機体のダイナミクスを詳しくモデリングすることでPID制御の部分を機体に非依存な形で取り出すことができ、飛行前に解析的に無難なゲインを決定することができるようになる。

4つ目は、実機に即したシミュレーションが可能になることである。機体の詳細な情報を取得し、実機で起こりうる現象をシミュレーションで再現することで、実機試験にかかる時間的、金銭的なコストを減少させることができる。



図7：非平面ローター配置かつロボットアームにより飛行中に重心が変化するドローン

6 普及・活用の見通し

今後はTobasを国内外の機体メーカーに売り込み、フィードバックを得ながら機能改善を行っていく。2024年3月時点で複数のメーカーからの前向きな評価を得ており、UIやライセン

ス管理が整えば年内の実用化も可能だと考えている。

しかし、今の所Tobasの利点として着目されていることは主にゲイン調整の手間が省けることと現実在即したシミュレーションができることであり、機体設計の自由度の増加に関しては、未だ積極的に活用したいという意見は聞いていない。これは、それによって可能になるアプリケーションが見えないことが原因だと考えている。そこで、私自身Tobasを用いて従来のフライトコントローラーでは困難だったミッションを可能にすることで、Tobasの有効性を示していく予定である。

関連URL

ドキュメント：<https://tobas-wiki.readthedocs.io>

X：<https://twitter.com/dronewotobas>

PMの評価

採択時の評価

本提案は、ドローンのリンク構造や質量特性を取得して、それに基づいて制御器を構築することで、既存のフライトコントローラーの拡張性の低さを解決し、読み込んだドローンを元に現実に即したシミュレーションができる環境を提供するというものである。ドローン自作機の開発をしているユーザーが感じている課題を明確にし、それを解決する支援ツールの実現を目指すもので、シミュレーションの粒度を少し粗くしているもののそれでもそれなりの難易度があり、未踏の挑戦がある。実装可能性も高く、社会的意義が大きいと期待して採択した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトでは、これまでのフライトコントローラーでは飛ばすことが難しいとされていた形状のドローンを安定して飛行させることができるようなドローン開発支援ツール「Tobas」を開発した。Tobasは機体制御器、Gazebo プラグイン、Setup Assistant から成り、力学や制御工学に関する専門知識をもたない人でも使えるように仕上がっている。

従来のフライトコントローラーでは飛ばすことが難しい形として、可動部を持つ機体や非平面ローター配置の機体などが挙げられるが、Tobas を使って自由に設計して試すことができるようになった。実際にプロジェクト期間中に非平面ローター配置かつロボットアームを搭載した機体を Tobas で設計し、飛行中に重心が変化するようなドローンでも実際に飛ばすことで、有効性を示したことは評価に値する。

また、Tobas で設計することで、力学パラメーターや推進系のモデル化誤差が減少するようにでき、制御ゲインを上げても安定性を保てるようになった。実機に即したシミュレーションも可能となり、実機で起こりうる現象をシミュレーションで再現することで、実機試験にかかる時間的なコスト、金銭的なコストを減少させることができるようになった。

Tobas では、機体制御器、Gazebo プラグイン、Setup Assistant を開発したが、どれも力学や制御工学に関する専門知識をもたない人でも使えるように仕上がっている。従来飛ばせなかった機体形状でも飛ばすことができるという、世の中の常識を変えることができるような技術・仕組みを提案し、実装して具体化させ、産業用のドローン開発を加速させる可能性を見せた点を評価する。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

みんなで遊べる競技かるた — VRで、多様な人々が一緒に楽しめる世界へ —

丸山 礼華（津田塾大学）

背景・目的

競技かるたは、百人一首の札を早く取ることを競うゲームである。百人一首の和歌を覚えているかどうかや、取る動作への慣れの影響によって札を取るまでの時間に大きな違いが現れてしまうため、一緒に楽しめる人が制限される。本プロジェクトの目的はVR技術によって、多様な人々が一緒に競技かるたを楽しむことができるようにすることである。

みんなで遊べる競技かるたアプリケーション

競技かるたにまつわる一連の体験を、VR空間で本格的に体験することができる。また、プレイヤーごとに設定できる様々な支援を用いることで、競技かるたの知識やスキル・年齢・身体特性・文化的背景・居住地などが多様な人々が一緒に楽しめる体験を実現している。これらの支援を可能な限り「互いに知覚困難」かつ「自己知覚困難」にすることで、お互いが自分にとって最適な環境を選びやすい。



みんなで遊べる競技かるた

丸山 礼華（津田塾大学 理学研究科 情報科学専攻）

1 背景

「競技かるた」は、百人一首の札を早く取ることを競うゲームである。丸山は高校・大学と競技かるた部に所属していたが、部活でかるたを行う以外にも、妹や親戚、学校の友人、かるた体験会の参加者とかかるたを行う機会があった。早く取る楽しさや、札を払う楽しさを一緒に感じられる、と嬉しく思っていたのだが、百人一首の和歌を覚えているかどうかや、取る動作への慣れが札を取るまでの時間に大きく影響してしまうかるたでは、かるたが好きなもの同士にも関わらず一緒に楽しむことがとても難しく、悩んだ。素朴な解決方法として、ハンデをつけることも試したが、ルールを変えたり、実力を制限したりすることになり、双方にやりづらさや申し訳なさ、遠慮が生まれてしまった。そこでお互いがハンデを意識しなくていいようなスキル調整をすることができれば、多様な人々が一緒にかるたを楽しむことができるようにな

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

るのではないかと考えた。

2 目的

本プロジェクトの目的は、スキルの差に関係なく一緒に楽しめる、VR空間内での競技かるたシステムを開発することである。VRを用いることで、視覚や聴覚の情報をプレイヤーごとに変化させることが可能になり、スキル調整が行える。またハンデの存在がプレイヤー自身や相手方に知覚しにくくなり、双方のプレイヤーの意識をハンデに向きにくくすることができる。さらに、現実空間では行うことが難しい支援を行うことも可能になる。

3 開発の内容

Meta Quest2および3で動作するVR競技かるたアプリケーションを開発した。

3.1 競技かるたアプリケーションの開発

本プロジェクトでは百人一首かるたの中でも、高度なルール構造をもつ「競技かるた」をVRアプリケーションとして実装した。競技かるたは札の多様な取り方、自陣と相手陣の概念、送り札と呼ばれるプロセスなど、複雑な要素により構成される。そこで、競技かるたのあるタイミングでの場の状況を表す「ゲーム状況」、およびゲーム全体の進行を状態遷移図で表した際に、それぞれの状態を表す「フェーズ」を定義することで、競技かるたのゲームの構造を表すことにした。競技かるたの「ゲーム状況」は札の位置情報、和歌の読み順、既に読まれた和歌の数から成る。「フェーズ」は、準備フェーズ、暗記フェーズ、序歌読み上げフェーズ、下の句読み上げフェーズ、上の句読み上げフェーズ、札移動フェーズ、試合終了フェーズからなる（図1）。

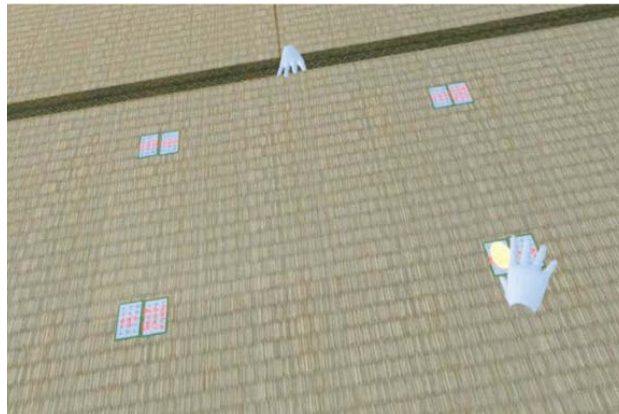


図1：プレイヤーが動かす札を選んでいる様子

このゲーム構造の定義をもとに、競技かるたゲームを実装し、和歌の読み上げ開始タイミングの判断、取りの判定、札の移動、プレイヤー間の通信の機能を実装した。

3.2 インクルーシブな競技かるたの実現のための支援

多様な人々が一緒に楽しめる競技かるたを目指す上で特に課題であると感じるのが、「スキル」による問題と「環境」による問題である。そこで、スキル差を埋めるための「スキル調整」(図2)と言語や身体などの個人の特徴に対応するための「環境調整」(図3)を行う。これらの調整を、双方のプレイヤーにそれぞれが必要とする支援を行い、双方のプレイヤーが快適かつ全力を出せる環境でプレイできるようにすることで実現する。スキル調整においては、札を取るまでのプロセスを(1)和歌が読まれ始めてから記憶をたよりに取るべき札を想起する、(2)配置されている複数の札から取るべき札を検索する、(3)その札に手を動かして触れる、という3つの要素に分解し、それぞれのプロセスへの支援を実装した。また、アプリケーションを体験してもらう中で、プレイヤーだけではなく「観客」も一緒に楽しむ工夫や、競技かるたのルールを知らない初心者への支援の重要性を感じ、観客のインクルージョンや初心者への支援も実装した。



図2：スキル調整の例



図3：環境調整の例（字幕表示、床の高さ調整、支援文字の色変更）

また、スキル調整を行う際に、双方のプレイヤーが快適にゲームを行うためには、相手の環境に影響を与えにくいこと、支援をされて違和感がないことが重要であると考えている。そこで、お互いに意識しにくいスキル調整の性質とはどのようなものであるのかの検討を行った。性質には大きく「互いに知覚困難」と「自己知覚困難」の2つがある（図4）。これらの性質は、相手の環境への考慮なしに、自分が最もプレイしやすい環境を作るためにも重要な性質であり、適切な環境調整を行う上でも必要不可欠である。

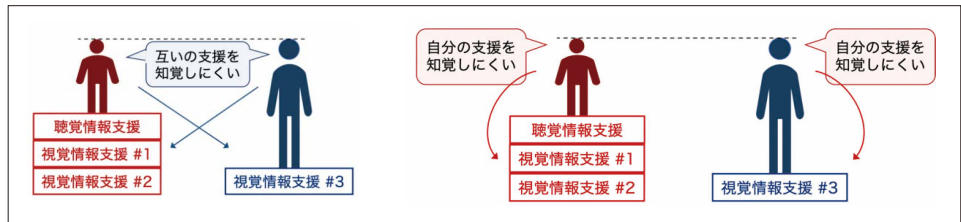


図4：支援が互いに知覚困難な様子（左）、支援が自己知覚困難な様子（右）

さらに、ゲームを改変するにあたり、保存する要素と改変する要素の検討を行った（図5）。円はそれぞれのプレイヤーがプレイしているゲーム要素の集合体を表しており、円の重なった部分がプレイヤー同士で共有しているゲーム要素を表している。点線からの距離が、あるゲームの本来のルールや環境からの距離であり、今回は競技かるたを基準としている。

本プロジェクトではゲームの改変を行うが、競技かるたの本来のルールや環境をなるべく保存しやすい位置において、B程度の「同じゲームを行っている」という認識を共有できる円の重なり具合を維持したいと考えた。これは今回、和歌のある空間、理想のタイミングで札を取った時の嬉しさや相手との意図の読み合いの共有を重視したいと考えたためである。

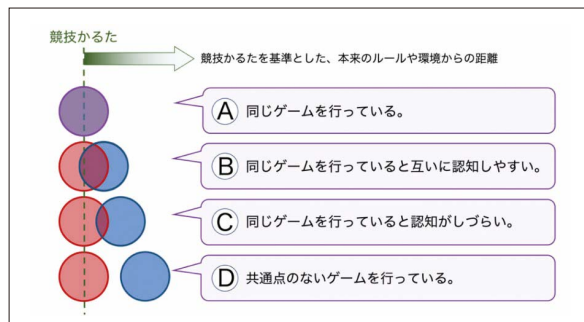


図5：ゲームの改変の度合いとそこから現れる特徴

3.3 楽しいを共有できるコンテンツ

楽しいを共有することを目的とした本プロジェクトにおいて、まずはクリエイター自身の体験してほしい、和歌のある空間、理想のタイミングで札を取った時の嬉しさや相手との意図の読み合いを、プレイヤーの知識によらず共有しやすくするためのコンテンツを作成した。例えば、図6は和歌のニュアンスを感じられるようにすることを目的としたコンテンツである。また、

同じように楽しさを共有したいと思うユーザーが楽しさを共有するための仕組みを提供できるようにした。

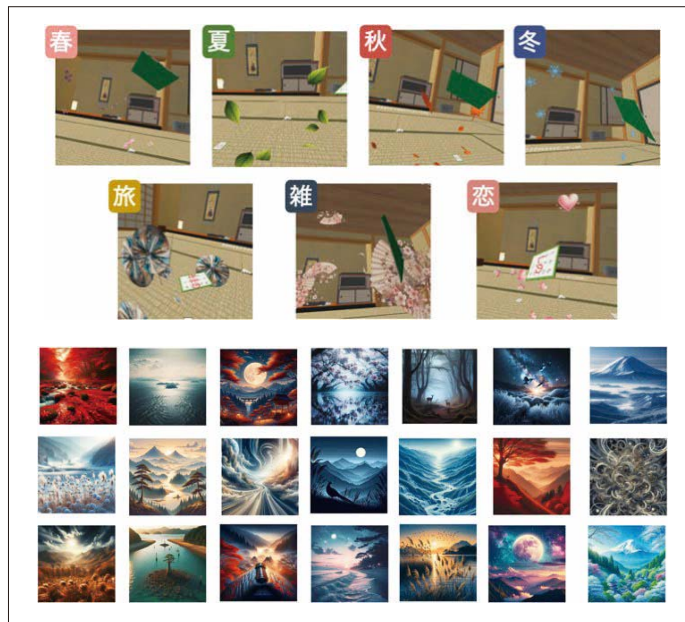


図6：和歌のニュアンスを感じられるコンテンツ

4 従来の技術（または機能）との相違

スマートフォンアプリなどで競技かるたゲームは存在するが、競技かるたの体験の一部を抽出し平面的なデバイス上で模擬するものであった。競技かるたにまつわる一連の体験を、よりリアリティの高いVR空間で本格的に楽しめるのは本プロジェクト果の独自性である。また、ヒューマンコンピュータインタラクション研究分野の専門性を生かすなど、独自の手法を含む様々なモダリティでの支援をプレイヤーごとに行うことができる。

5 期待される効果

様々な支援を用いることで、競技かるたの知識やスキル・年齢・身体特性・文化的背景・居住地などが多様な人々と一緒に楽しめる体験を実現している。また様々なコンテンツにより、魅力ある日本文化の一つである競技かるたと和歌の世界について、背景知識の有無によらずに、体験を通じて豊かさを感じられる。さらに、エンドユーザーが体験を通じて感じた価値を他者と共有することができる。

6 普及（または活用）の見通し

標準的なVRゴーグルであるMetaQuestシリーズ上で動作するため、普及のための敷居が低い。一般公開と並行して、果物を用いた体験会やワークショップの実施による果普及活動を引き続き実施する予定である。

PMの評価

採択時の評価

本提案は、競技かるたにおいてVRを用いて相手に見えない部分でスキル調整を行い、ハンディキャップをつけることで初心者と上級者が対等に遊ぶことができるようにするという面白い提案であり、インクルーシブを目指した点が素晴らしいと評価した。競技かるたを題材にしているが、スキル調整可能なVRというコンセプトは他のゲームにも応用できる概念であり、「かるた」という形で国境や身体性を超えたゲームを作れる可能性を感じて採択とした。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトでは「できない人がこのシステムを使ってできるようになる」という、いわば自転車の補助輪的な使い方を想定していない。ゲーム改変にあたっては「ゲームデザイン」を何度も検討し、競技かるたを誰もが経験やスキルの差を気にせず楽しめるようにすることを目指してきた。本プロジェクトでは「競技かるた」を題材としているが、ゲームデザインを考慮したスキル調整・環境調整については、他のゲーム等にも今後応用可能である点を評価する。

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。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

五感情報を記録・共有するセンサリーマップの開発

ー 感覚過敏の人々の外出をサポート ー

加藤 路瑛 / 安東 鷹亮 / 寺崎 優葵



感覚過敏の当事者とその家族を対象にしたアンケートでは、
81.9% の人が「感覚過敏を理由に外出をあきらめた経験がある」と回答しています。

刺激が多いこの社会で、五感の過敏な人々が外出やレジャー、社会活動をあきらめなくていい社会の実現を目指して

広域センサリーマップを開発しました！



<https://kokocheese.com/>



五感情報を記録・共有する センサリーマップの開発

加藤 路瑛 (学校法人角川ドワンゴ学園 S 高等学校／株式会社クリスタルロード代表取締役)

安東 鷹亮 (フリーランス)

寺崎 優葵 (情報経営イノベーション専門職大学／特定非営利活動法人サクラテンベスタ理事長／合同会社 Redigiform 代表社員)

1 背景

感覚過敏は、日常生活における多くの困難の原因となる。視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚などの諸感覚が過敏になることで、学校や職場、一般的な社会生活においても、通常の活動が困難になる。医学的アプローチによる解決が望まれる分野でもあるが、現時点において感覚過敏のメカニズムは解明の途上である。感覚過敏者の日常生活、特に外出や通学・就労、レジャーといった外出を伴う社会的活動の支援においては、社会モデル構築が急務である。

2 目的

本プロジェクトの目的は、感覚過敏で日常生活に多くの困難を抱える人々が外出時に直面する困難を軽減し、社会参加を支援する「センサリーマップ」の開発にある。センサリーマップ

は、公共施設や商業施設などでの感覚過敏者が直面する可能性のある刺激を事前に把握し、適切な対策を講じることを可能にするツールである。本プロジェクトを通して、日本におけるセンサーマップの普及と発展、および、それを通じて感覚過敏者がより自立した社会生活を送ることができるよう支援することを目指している。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、街や施設内の光、音、ニオイ、混雑などの五感に関わる情報と、静かな場所や推奨される休憩スポットなどセンサーフレンドリーなスポットを地図上で共有できるWebアプリケーション「ここちーズ」を開発した（図1）。

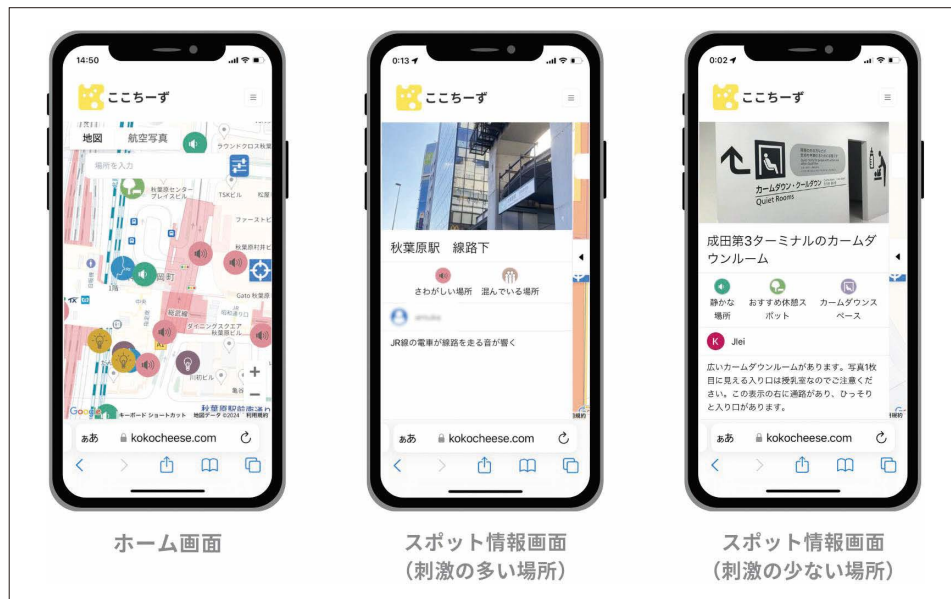


図1:「ここちーズ」のホーム画面とスポット情報画面

3.1 投稿機能

以下のように、ユーザーが直感的に五感に関わる情報を投稿できるように、投稿機能を設計した。

- (1) ユーザーは図2左に示す画面上で「五感を使って投稿しよう」をクリックする。
- (2) ユーザーは図2中央に示す画面中央に表示される十字ボタンを使用して投稿したい位置を決定する。その後、「座標確定」ボタンをクリックする。
- (3) ユーザーは図2右に示す投稿フォームで、スポット名やコメントを入力する。また、投稿に関連する写真をアップロードすることもできる。これにより、ユーザーは簡単にスポット情報を投稿できる。

投稿されたスポット情報は図1の中央および右のように表示される。



図2：スポット情報投稿方法

3.2 感覚カテゴリー

本プロジェクトでは、スポット投稿時に選択可能なカテゴリーの充実を図り、ユーザーが体験した感覚情報をより正確に表現できるようにした。具体的には、「さわがしい場所」「まぶしい場所」「ニオイのある場所」「混んでいる場所」「しずかな場所」「まぶしくない場所」「おすすめの休憩スポット」「カームダウンスペース」「センサリールーム」「クワイエットアワー」「感覚に配慮したサービス」「その他」といった12種類の感覚に関連するカテゴリーを設定した(図3)。これによって、五感情報を地図上で可視化させることを実現した。この機能によって、ユーザーは地図上に表示される五感マークやスポット情報ページに記録された五感マークを確認し、外出時の対策やアクセス方法を検討することが容易となった。



図3：「ココちーず」が提供する感覚カテゴリー

3.3 情報検索および絞り込み機能

ユーザーは地図上に表示される図4で示すような五感マークをタップすることによって、他のユーザーが投稿した情報を閲覧することができる。地図上に表示される五感マークが多い場合には、図4に示す絞り込み機能を利用することで、ユーザーは必要とする五感情報を有するスポット情報を容易に探すことができる。



図4：感覚カテゴリーの絞り込み機能

4 従来の技術との相違

地図上の座標やスポットに口コミ投稿するサービスは複数存在するが、感覚を主題にしたマップサービスは我々の調査範囲では見つからない。また、海外においては、博物館や動物園など各施設が主体になって施設内センサリーマップの提供を行なっている事例はあるものの、Webアプリケーションとしての広域を対象にしたセンサリーマップの事例は見当たらない。

感覚過敏者が抱える問題を解決する方法は医学領域においても福祉領域においても確立できておらず、本プロジェクトは社会的未踏の取り組みと自負している。

5 期待される効果

感覚過敏者やその家族が、「こちーず」を利用することによって、外出前に行き先周辺の環境や対策方法、回避ルートなどの見立てを行い、外出や社会活動がしやすくなることが、期待される最大の効果である。これまで社会活動に制約があった人々の社会参加を後押しする本サービスは、感覚過敏者の生活の質（QOL）を向上させることに貢献できる。

さらには、本サービスの普及により、照明やBGMに配慮した時間帯であるクワイエットアワーや、感覚刺激からの避難所であるカームダウンスペースなどの導入施設や店舗が増えることが期待できる。「こちーず」でユーザーが登録するセンサリーフレンドリースポットが増えることによって、社会全体がセンサリーアクセシビリティを考えるきっかけとなり、より柔軟な多様性社会の実現に貢献できるであろう。

■6 普及（または活用）の見通し

2024年春に「ここちーズ」の正式リリースを計画している。本プロジェクトメンバーの加藤が運営する感覚過敏当事者コミュニティ「かびんの森」の参加者を中心に、「ここちーズ」の利用を呼びかけたい。

さらには、ユーザー拡大を目指した取り組みも計画している。一つは、参加者同士で感覚情報を話し合いながら「ここちーズ」に五感情報を投稿していく、街歩きイベントを定期的に行い、ユーザー数とともにファン層の拡大を目指す。もう一つの方法は、「駅」、「コンビニ」、「喫煙所」などスポット情報登録を呼びかけるクエスト機能を導入することで、SNSを通じて参加者増大を目指す。

同時に機能面での今後の挑戦として、施設内のセンサリーマップを作成できる機能や、センサリーフレンドリースポットや音や光などの環境アラートを、ビーコンやIoTを利用して通知する機能の実装などを視野に入れながら、サービス拡大を目指す。

関連URL

ここちーズ： <https://kokocheese.com/>

PMの評価

採択時の評価

都市生活は様々な刺激に溢れている。しかしながら過度の刺激を忌諱し、屋外での行動に不自由を感じる人々がいる。このプロジェクトは感覚過敏の人々のための特定の場所での五感情報を示すマップの構築を目指した提案であり、社会的意義のあるプロジェクトである。

リアルタイムの騒音や光その他の過敏原因に関する情報収集には課題があるが、過去にもチクチクしない服の開発などプロジェクト運営の実績も豊富にあり、感覚過敏の当事者コミュニティの構築など、応募時の提案に留まらないプロジェクトの進展を期待し採択とした。

プロジェクト終了時の評価

このプロジェクトでは、感覚過敏の人々が外出時に直面する困難を軽減し、社会参加を支援することを目的としたセンサリーマップを提供するWebアプリケーション「ここちず」を開発した。感覚過敏者がスポットの五感情報を投稿し共有できる仕組みを持ち、地図上に視覚的に情報を表示することで、外出前に周辺環境を事前に把握し、対策を立てやすくなった。

投稿機能では、簡単な操作でスポット情報を投稿でき、12種類の感覚カテゴリーから該当するものを選択できるようにした。これにより、五感情報を地図上で可視化することに成功した。また、絞り込み機能を使えば、必要な五感情報を持つスポットを探しやすくなった。

従来の口コミサービスとは異なり、感覚を主題としたマップサービスは他に例がなく、感覚過敏者支援において社会的に新しい取り組みとなった。感覚過敏者の社会参加の促進とQOL向上が期待でき、さらにはセンサリーアクセシビリティの意識向上にも寄与できるだろう。

これまであまり着目されてこなかった感覚過敏者への配慮を、テクノロジーを活用して実現しようとする斬新な試みであり、社会に大きなインパクトを与える可能性を秘めたプロジェクトだと評価できる。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

泉 和哉（筑波大学）

視線とキーボードで完結する高速なGUIポインティングシステム — アイトラッキングからアイインタラクションへ —

アイトラッキング技術

ヒトの瞳孔を検知し、何を見ているかを追跡する技術
見ている場所の分析やインタラクションに活用



しかし 今のアイトラッキングを使ったGUI操作は使いづらい



ユーザにとって使いやすく・気持ちいい
アイインタラクションの構築

視線とキーボードで完結する 高速なGUIポインティングシステム

泉 和哉（筑波大学 人間総合科学学術院 人間総合科学研究群 情報学学位プログラム）

1 背景

アイトラッキング技術は、人の視線の情報を計測し、分析や対話などに活用する技術である。特に計算機との対話においては、眼球運動の高速さや「ユーザーの見ている場所をそのままポインティングできる」という観点から「如何にグラフィカルユーザーインターフェイス（GUI）におけるポインティング操作を代替できるか？」という問いについて長年議論されてきていた。

しかし、アイトラッキング技術を用いたGUI操作は、まだ一般的な計算機との対話手法としては採用されていない。その理由として、高速な操作は可能である一方で細かな操作におけるエラーが多くなってしまうことや、ユーザーの意図しない視線の移動が入力として検知してしまうマイダスタッチ問題と呼ばれる問題のような、ユーザーの体験を著しく損なうアイトラッキング特有の問題がある。GUIにおいてアイトラッキングを活用していくためには、ただボー

ンティング操作を代替するだけでなく、より視線にあったインタラクションとは何かを検討していく必要がある。

2 目的

本プロジェクトの提案当初の目的は「GUI操作のボトルネックであるポインティング操作の代替手段として、視線による『高速な』操作を実現すること」であった。しかし、プロジェクトを遂行していく中でただポインティング操作を代替するだけではユーザー体験の良いインタラクションは提供できないと判断し、「そもそも視線によるユーザー体験の良い、『気持ちいい』インタラクションとは何か？」を検討する方針に舵を切った。これより、先述の視線インタラクションの体験を損なう問題を解決し、視線による使いやすい・気持ちいいインタラクションを提案することを新たな目的として、「Project Eye Interaction Design (EyeXD)」の名の下で新たな視線インタラクションのデザインおよび実装、インタラクションデザインのガイドラインの整備を行った。本システムを通して一般の人でも視線によるインタラクションのデザインを行えるようにし、視線インタラクションデザインの実装及び議論のためのプラットフォームの確立を行っていくことが本プロジェクトの最終的な目標となる。

3 開発の内容

Project EyeXDはGUI操作における視線を用いた使いやすいインタラクションデザイン及びデザイン指針と、そのインタラクションを実現するシステムEyeXDやEyeXDを用いた連携デモアプリケーションで構成される。

3.1 視線インタラクションデザインの検討

視線インタラクションがポインティング操作に向いていない理由は、先述の細かい操作に向いていない点やマイダスタッチ問題に加え、ユーザーがポインティング操作が完了するまで対象を見続けなければいけない点、そして周辺視野内で表示の変化が起きた時にどうしても視線がそちらに向いてしまう点にある。これらの視線特有の問題を解決しなければ、視線による計算機とのインタラクションはユーザーにとって使いづらいものであり続ける。そこで本プロジェクトでは、視線インタラクションをユーザーが視線で入力を行うインタラクションとユーザーの視線をシステムが誘導するインタラクションに分けて整理した。ユーザーの視線を入力に使うだけでなく、ユーザーの視線や注意を誘導することで、ユーザーの注意が他方に行かないようにしたり、アプリの処理が完了したときにユーザーの注意をそちらに向かせるようなワークフロー最適化を行ったり、誘導した先で新たな視線入力インタラクションを実行したりできる。このようなユーザーによる視線の入力とシステムによる視線の誘導を繰り返すインタラクションデザインにより、これまでの視線インタラクションよりも自然なユーザー体験が実現できると考えた。以上の新たな視線によるインタラクションをアイインタラクションと命名した。視線の誘導方法には画面全体を薄暗くし、ユーザーの注意を誘導したい箇所をハイライトさせ、場合によって点滅や移動などを行う形を採用した。

3.2 アイインタラクションシステムEyeXDの開発

このインタラクションデザインをベースに、アイインタラクションシステムEyeXDを開発

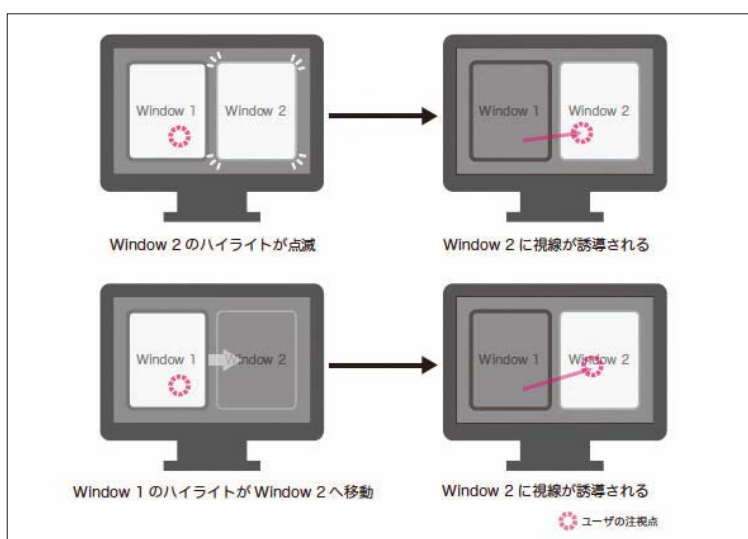


図1：画面のハイライトによる視線誘導の例

した。ユーザーは自身のモニターにアイトラッカーと呼ばれる専用デバイスを設置し、本システムをインストールすることで使用できる。EyeXDは画面を見ているユーザーの注視点、キーボードやマウスなどのユーザーの入力と画面に表示されている要素やウインドウの操作、ハイライト操作による視線誘導を繋げる基盤システムである。これにより、EyeXDでは「見ているウインドウをホットキーによりフォーカスする」といった従来の視線によるGUI操作に加え、「あるアプリ内で処理が完了したらユーザーの視線を自身に誘導する」、「誘導に従ってユーザーがアプリを見たときにそのアプリに自動でフォーカスされる」といったアイインタラクションも実現している。また、別のアプリとEyeXDを連携させ、アプリ内でアイインタラクションを実現できる機能も実装した。実際に未踏期間ではChrome拡張機能としてWebブラウザやAIチャットアプリでアイインタラクションを行うデモアプリケーションを開発し、プログラマに試してもらった。

3.3 アイインタラクションのデザインガイドラインの策定

これらのシステム開発、プロトタイプやデモアプリケーションの実装を通して、これまでの視線によるインタラクションとEyeXDでのインタラクションを整理し、アイインタラクションのデザインガイドラインを策定した。アイインタラクションでは、まずシステムの介入の段階、すなわちユーザーがある操作を行おうとしたときにシステムがどの段階で介入するかによりインタラクションを以下の3段階に分類する。

- レベル1 ユーザーは対象を見て、キー入力やマウス操作などの明示的な操作を行う
- レベル2 ユーザーが対象を見た時に、システムがユーザーの意図を判定して自動で操作を行う
- レベル3 ユーザーに特定の対象を見るように注意を促し、システムが行いたい操作へと誘導する

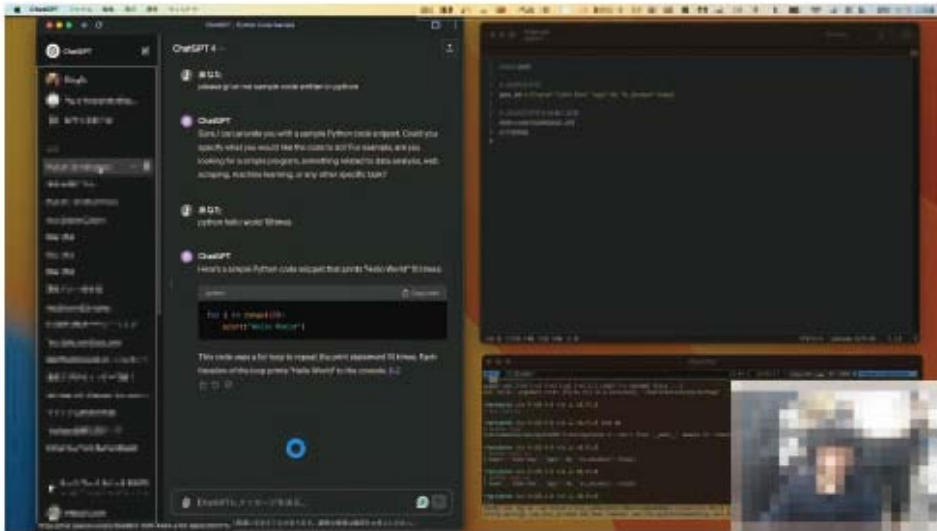


図2：ユーザーに実際に使ってもらっている様子

この介入の段階のレベルが高いと、ユーザーの操作負担が低くなる一方で、システムの介入が大きくなるため、ユーザーの意図を正確に判定する必要があり、またユーザーのペースを妨げないような配慮が必要となる。特にレベル3で視線を誘導するインタラクションについては、ユーザーの視線の誘導の仕方について注意深く検討する必要がある。そこで、Project EyeXDでは視線を誘導するインタラクションデザインにおいて以下の4つのパターンを定義した。

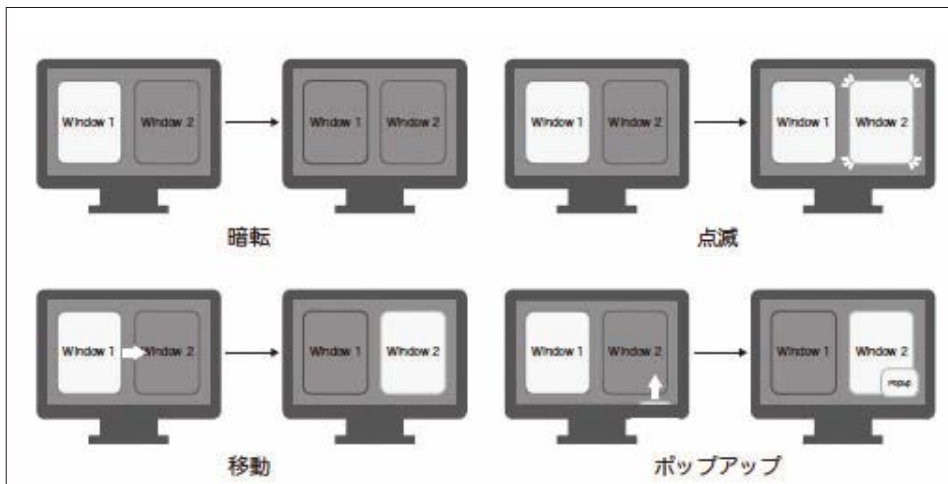


図3：視線誘導インタラクションのデザインパターン

また、アイインタラクションにおいてシステムが適切にユーザーの操作に介入できるように、ユーザーの注意場所の変化に着目したステートマシンによるインタラクションの整理手法を提

案した。

インタラクションデザイナーは、これらのデザインガイドラインをもとにアイインタラクションのデザインを行っていく。

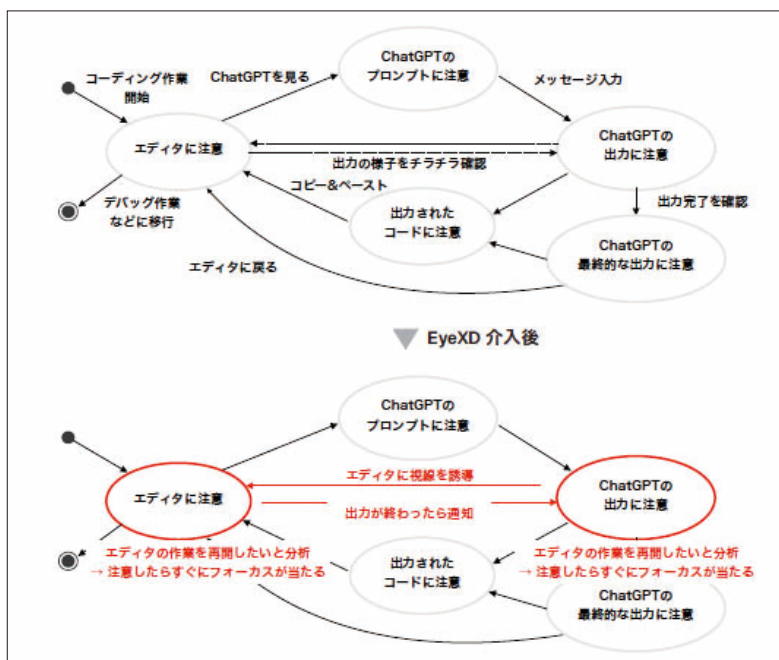


図4：ChatGPTとの共同コーディング作業における、ユーザーの行動とそれによるユーザーの注意場所の変化のステートマシン。EyeXDにおけるアイインタラクションはステートマシン上で整理できる

4 従来の技術との相違

従来のGUIでの視線インタラクションシステムはユーザーがどこを見ているかのみ考慮してポインティング操作を代替する手法が主であった。これではユーザーの体験を向上し作業を効率化させるにあたり限界が生じると考え、システムがユーザーの視線を誘導するインタラクションを検討し、アイインタラクションを提案した。ユーザーによる視線の入力とシステムによる視線の誘導を繰り返すインタラクションデザインにより、ユーザーはより自然に計算機との目でのやり取りが達成でき、使いやすい視線のインタラクションを実現できると考えている。また、アイインタラクションを実現できるシステム、アイインタラクションデザインのガイドラインの提案により、インタラクションデザイナーはアイトラッカーがあれば直ちに本システムを体験し、インタラクションデザインの議論を行うことができる。これにより、Project EyeXDが今後の視線による人と計算機のインタラクションに関する議論のプラットフォームとなっていくことを目指している。

5 期待される効果

アイトラッキング技術基盤は成熟を遂げつつある中で、視線による人と計算機との対話はまだ一般には浸透していない。これはユーザーにとって使いやすいインタラクションがデザイン

されていない側面が大きい。本プロジェクトで提案したインタラクションデザインやシステムは視線インタラクションをより一般に普及させることに貢献することが期待される。そして視線による計算機との対話が一般化した先では、スマートフォンアプリのUIデザインがよりタッチインターフェイスに適したものとして確立されていったように、PCのUIも目で見て対話することを前提としたより直感的かつ効率的なUIとなっていくだろう。

6 普及の見通し

まずはシステムの機能の拡充を行い、EyeXDがユーザーにとってより使いやすく気持ちいいものにしていく。そしてEyeXDによる視線インタラクションを普及させていく事始めとして、クリエイター自身含め生産性向上を謳うPCツールを好むユーザーに向けてアプリをリリースしていきたいと考えている。そのためには、機能の拡充と並行し、スマートフォンによるアイトラッキングシステムも開発し、導入障壁を下げることでより多くのユーザーがEyeXDを使用できるように進めていくことも肝要である。

また、現在のデザインガイドラインを拡張していき、視線インタラクションの新たなデザインスペースを構築を行い、ヒューマンコンピューターインタラクションの学会での発表を通して提案する予定である。これにより、Project EyeXDを視線インタラクションデザインにおける議論プラットフォームとしてより強固なものとしていく。

関連URL

ティザーサイト：<https://eye-interaction.design>

ソースコード：<https://github.com/Eye-Interaction-Design>

PMの評価

採択時の評価

視線インターフェイスの歴史は古い。しかしながらカメラや計算能力の向上により、従来よりも簡便なシステムでそれなりの精度で視線検出を行うことが可能となりつつある。泉氏は従来のポインティングデバイスに代えて視線を用いるインターフェイスの実現を目指している。

先行事例を挙げることはたやすいが、歴史を踏まえつつもカメラ付きのPC／スマートフォンが普及し機械学習機をカジュアルに使える現在の技術インフラで、誰もが使いたくなるようなインタラクションデザインにどこまでチャレンジできるかに期待しつつ採択とした。

プロジェクト終了時の評価

このプロジェクトでは、視線によるGUIでの効率的で使いやすいインタラクションを実現することを目的とした。従来の視線インタラクションでは、マウスポインタの代替にとどまり、ユーザー体験の向上には課題があった。

そこで本プロジェクトでは、「アイインタラクション」と呼ばれる新しいインタラクションデザインを提案した。ユーザーの視線入力に加え、システムがユーザーの視線を能動的に誘導することで、作業の流れに合わせてスムーズにフォーカスを移動させたり、新たな操作を促したりすることができるようになった。

具体的な開発成果として、アイインタラクションシステム「EyeXD」とそのデザインガイドラインが作られた。EyeXDではアイトラッカーを使い、視線の入力と誘導を連携させたアプリケーションが実装可能になった。また、視線誘導のパターンやシステム介入レベルなどのガイドラインが策定された。

従来の視線インタラクションとは異なり、ユーザーの自然な視線の動きに合わせてシステムが介入するため、より使いやすく気持ちの良いインタラクションが実現できると期待された。PC操作におけるUI/UXの新たな可能性を切り拓く斬新な試みであり、今後のヒューマンコンピュータインタラクションの発展に寄与すると評価できた。

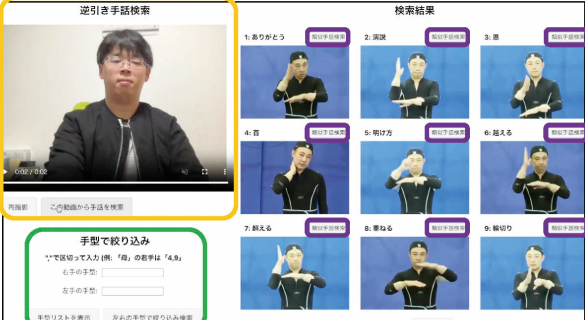
当初の目的とは方向性の異なるピボットがなされ、またクリエイターの個人的な事情によりプロジェクトに時間を割けなかった時期もあったものの、以上のように視線インタラクションの新たな地平を切り拓くユニークで先進的なプロジェクトであると評価できる。

2023年度末踏IT人材発掘・育成事業

手話認識による逆引き検索が可能なクラウド型手話辞典の開発 — 手話の逆引き検索の自立を実現 —

高橋 亮太(慶應義塾大学大学院)

約3700語彙の手話単語が登録された、日本手話の大規模な逆引き検索システムを開発しました。本システムは「手話学習者が手話動作から日本語の意味を自身で調べられない」という問題を手話認識技術を用いることで解決しただけでなく、「直感的」・「網羅的」・「連鎖的」な3種類の逆引き検索機能の実装により手話学習者に新たな学習体験を提供します。



動画による逆引き検索

撮影した動画から手話を検索
「直感的」な検索機能

手型による絞り込み

左右の手型をもとに絞り込み
「網羅的」な検索機能

類似手話検索

似ている手話を複数表示
「連作的」な検索機能

※本プロジェクトでは国立情報学研究所のIDRデータセット提供サービスにより工学院大学から提供を受けた「工学院大学 多用途型日本手話言語データベース(KoSign)」を利用しました。

手話認識による逆引き検索が可能な クラウド型手話辞典の開発

高橋 亮太 (慶應義塾大学 大学院)

1 背景

手話は独自の文法をもつ自然言語であり主に聴覚障害者のコミュニティで用いられている。つまり、よく誤解されがちであるが手話はジェスチャーではなく、日本手話と日本語は別言語である。また、地域によっても手話は異なる。これは日本手話とアメリカ手話の間の言語的な違いだけでなく、方言による語彙の違い、さらにはコミュニティ間や個人間での手話形の違いなど様々である。

このような手話の多様性が理由で「手話辞典で勉強した手話とろう者が使用する手話が異なるため、ろう者との会話中に相手の手話を読み取ることができない」という状況がよく発生する。さらに、手話の世界では手話動作から日本語の意味を検索できるような逆引き手話辞典が存在しないため「手話学習者が手話動作から日本語の意味を自身で調べられない」という深刻

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

な問題に直面している。本プロジェクトのクリエイタの高橋は、学部時代に所属していた手話サークルでの経験から、この問題が多くの手話学習者の挫折を生み出していると考え、逆引き検索可能な手話辞典の必要性を痛感した。

2 目的

手話認識による逆引き検索が可能なクラウド型手話辞典を開発することで「手話学習者が手話動作から日本語の意味を自身で調べられない」という問題を解決する。本システムの開発と普及を通じて、手話動作から日本語の意味を知るためには有識者に直接尋ねるしか方法がないという現状を改善し、手話の逆引き検索の自立を目指す。

3 開発の内容

図1は開発した逆引き検索システムのWebアプリケーションのスクリーンショットである。本システムには約3700語彙の手話単語を含む大規模な日本手話データセットで学習した手話認識モデルが搭載されており、ユーザーは撮影した動画から手話の意味を逆引き検索することが可能である。また、本システムには直感的な「動画による逆引き検索機能」、網羅的な「手型による絞り込み機能」、連鎖的な「類似手話検索機能」の3種類の手話検索機能が実装されている。本プロジェクトで開発した手話認識による大規模な逆引き検索システムは「豊富な語彙が登録された手話データベース」と「直感的・網羅的・連鎖的な逆引き検索機能」の両立により手話学習者に新たな学習体験を提供する。

1つ目の「動画による逆引き検索機能」は、撮影した動画から手話を検索する機能である。まず、図1の「①手話動画撮影」でユーザーは意味を調べたい手話の動画を撮影して検索ボタ



図1：開発した逆引き検索システムのWebアプリケーションのスクリーンショット

ンを押すと手話認識による逆引き検索が開始される。その後、手話認識により予測されたスコアが高い順にデータベースに登録されている手話動画とその手話の意味が「②予測結果表示」

に複数表示され、それらの手話動画が全てループ再生される。これにより、ユーザーは表示された複数の手話動画の候補と自分の手話動作を比較するだけで手話の意味を調べることができる。つまり、「動画による逆引き検索機能」は直感的な検索方法であると言える。

2つ目の「手型による絞り込み機能」は、左右の手型を入力することで逆引き検索の結果を絞り込むことができる機能である。ユーザーが図1の「③手型で絞り込み」で左右の手型の情報を入力して検索ボタンを押すと「②予測結果表示」の候補が更新され、既に表示されている候補の順序を維持したまま入力した左右の手型の情報と同じ手話動画のみが表示される。

図2は、「学生」の手話を「動画による逆引き検索機能」により検索した後に「手型による絞り込み機能」による絞り込み検索を行った例である。手話認識モデルの出力では「学生」の手話は2,312番目の候補として予測されており、動画による逆引き検索では257ページ目に表示されることになるため、ユーザーは「学生」の手話を発見することが困難である。しかし、手型による絞り込みを行うことで1ページ目に「学生」の手話を表示することができている。このように、ユーザーは「動画による逆引き検索機能」による候補の中に調べたい手話動作が見つからなかった場合でも、「手型による絞り込み機能」を用いることで最終的に調べたい手話動作の意味を発見することができる。つまり、「手型による絞り込み機能」は網羅的な手話検索機能であると言える。



図2：「学生」の手話の検索結果の比較

3つ目の「類似手話検索機能」は、予測結果に表示されている手話と動作が似ている手話を検索する機能であり、手話学習者の知的好奇心を刺激して学習効果を高める役割がある。ユーザーが図1の「④類似手話検索」のボタンを押すことで、撮影した動画の代わりに選択した手話動画を入力として「動画による逆引き検索機能」の結果が表示される。そして、「類似手話検索機能」は図3のように繰り返し実行可能であり、ユーザーは興味が尽きるまで似ている手話を調べ続けることができる。動作が似ている手話は語彙の意味が関連していることが多いため、動作が似ている手話を連鎖的に検索することが可能な本機能は、非常に高い学習効果が期待される。

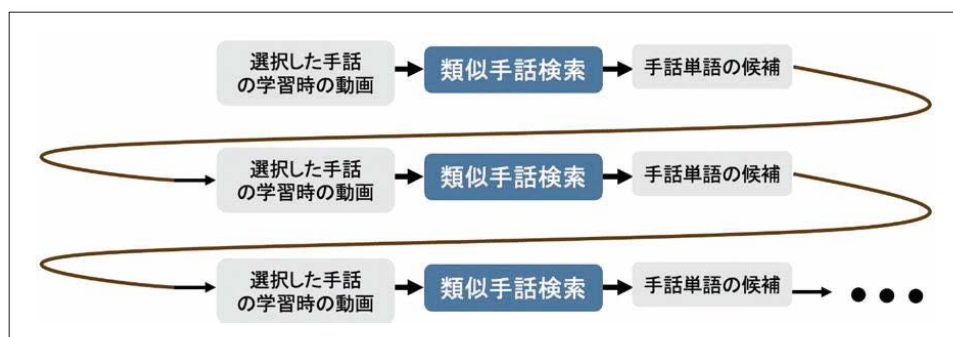


図3:「類似手話検索機能」を用いた連鎖的な検索のイメージ

本システムの有効性を検証するために、2月上旬に男女2名の協力者にヒアリングを行い、手話の逆引きに関する悩みや本システムの感想を伺った。本システムの使用前のヒアリングでは、2名とも手話の逆引きを行えない現状について問題意識を持っていた。また、男性の協力者はヒアリングの実施日の1週間前に「声なし交流会」と言う、聴者と聴覚障害者が集まり、声を用いずに手話や筆談などの手段によって互いに交流を行う交流会に参加していた。その際に話し相手の手話が分からないことがあったが、複数人で交流を行っていたため相手に直接手話の意味を聞くことができず、結局手話の意味が分からないまま話が進んでいってしまった、とその男性協力者は悩みを打ち明けた。この体験談からも有識者に直接手話の意味を尋ねることは心理的ハードルが高いことがわかる。そして、実際にその分からなかった手話である「趣味」という手話動作を本システムに入力したところ、1番目の候補として出力され、2名の協力者は驚愕していた。また、2名の協力者が連鎖的な類似手話検索機能を繰り返し用いて積極的に手話を学習していく様子も観察することができた。システムの使用後、2名の協力者から「(「趣味」の手話の意味を) 声なし交流会の時に知りたかった」という声や「本システムを早く公開してほしい」という声を頂いた。また、「PCだと外出時に使用することや調べたい時にすぐに使用することが難しいので、本システムをスマートフォンでも使用できるようにしてほしい」というシステムの改善案についてのフィードバックも頂いた。

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手話認識による大規模な逆引き検索システムの最大の価値は「豊富な語彙が登録された手話データベース」と「直感的・網羅的・連鎖的な逆引き検索機能」の両立である。既存サービスはどちらか一方しか存在しなかった。例えば、クラウド型手話辞典は豊富な語彙が登録されているものの逆引き検索機能が不十分であり、手話認識を活用したサービスは登録されている語彙が少ないためユーザーが手話辞典として使用することができなかった。本プロジェクトでは、約3700種類の手話単語を含む日本手話データセットを使用し、わずかなデータセットから頑健な手話認識モデルを学習する手法を確立することでこれらの両立を実現した。さらに、本システムは単に手話の逆引きが可能だけでなく、直感的・網羅的・連鎖的な逆引き検索機能の実現により新たな手話学習体験をユーザーに提供することに成功している。

5 期待される効果

本プロジェクトで開発した手話認識による大規模な逆引き検索システムは手話学習者の逆引き検索の自立を実現するとともに新たな学習体験を提供する。手話学習者にとっては自分が分からない手話の意味をろう者や有識者に何度も尋ねるのは心理的なハードルが高く、ろう者にとっても何度も話を遮ってまで手話の意味を尋ねられるのは心理的な負担が大きい。有識者の協力に依存しない本システムの逆引き検索機能は、心理的な要因によりこれまで無意識下で失われていたであろう手話の学習機会を手話学習者に提供することが可能であり、これは手話の普及や語彙の定着に貢献すると考えられる。また、本システムは任意の手話単語データセットを追加することで様々な国や地域の手話に対応することが可能であり、手話の地域性・国際性・専門性に関する様々な課題の解決に応用可能である。

学術的な観点から見ても、開発した「わずかなデータセットから学習可能な手話認識モデル」は手話認識分野の発展に大きく貢献した。本プロジェクトでは手話単語の逆引き検索に限定した上で語彙の大規模化に焦点を当てたが、その応用性として大規模な手話フレーズ認識や大規模な自動手話翻訳が挙げられる。

6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクトで使用したデータセットである「工学院大学多用途型日本手話言語データベース（KoSign）」は学術研究目的での使用に限定されていた為、プロジェクト期間中は本システムの公開を行わなかった。本プロジェクトを通じて、各語彙についてわずかな手話動画のサンプルがあれば大規模な逆引き検索システムを構築可能であることが分かったので、今後は大規模な手話データセットを持つ機関と連携することで手話認識による逆引き検索システムの社会実装を目指していく予定である。

謝辞

本プロジェクトでは、国立情報学研究所のIDRデータセット提供サービスにより工学院大学から提供を受けた「工学院大学多用途型日本手話言語データベース（KoSign）」を利用した。

PMの評価

採択時の評価

英和辞典と和英辞典が存在するように、手話翻訳にも順引きと逆引きがある。高橋氏は大学の手話サークルに所属し、手話理解の困難さが初学者にとっての大きなボトルネックとなっていることに気付いたとのことである。手話は残念ながら日本手話、アメリカ手話、イギリス手話など地域ごとに分かれている。さらには同じ日本手話でも差があると言われており、プロジェクトの実現のためのハードルは高い。

しかしながら、高橋氏は手話認識・翻訳するためのシステムをライフワークとしても取り組みたいという強い熱意を有しており、その熱意を応援する気持ちも込めて採択した。

プロジェクト終了時の評価

高橋氏は、語彙の手話単語を含む大規模な日本手話データセットを用いて学習した手話認識モデルを開発し、動画から手話の意味を逆引き検索できるWebアプリケーションを実装した。これは問題解決に直結する適切なアプローチであった。さらに、手型による絞り込み機能や類似手話検索機能など、ユーザーの利便性を考慮した機能が追加されており、システムの使いやすさと学習効果の向上に寄与するものと評価できる。

協力者からのヒアリングにおいて、システムへの高い評価が得られたことは、開発されたシステムが手話学習者のニーズに合致していることを示している。また、協力者からのフィードバックを踏まえ、スマートフォンへの対応を進めることで、システムのアクセシビリティと利便性をさらに高めることが期待される。

本システムを通じて、これまで無意識下で失われていた手話の学習機会を提供し、手話の普及と定着に貢献できる可能性が示された。さらに、手話の地域性・国際性・専門性など、様々な課題解決にも応用可能であることから、今後の発展的な研究・開発が期待される。

以上のように、本プロジェクトは、手話学習者が直面する問題を的確に捉え、適切なアプローチでシステムを開発し、ユーザーのニーズに合致するソリューションを提供することに成功した。開発されたシステムは、手話学習者の学習機会を拡大し、手話の普及と定着に寄与する可能性を持っている。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

ぬいぐるみ専用の組み込みAIモジュールの開発
—あらゆるぬいぐるみに さらなる命を吹き込む—

小山 高（東京大学）

Mohutics

もふていくす

あなたの好きなぬいぐるみをロボット化
現代の生活に即した新たな癒やしを

骨格

もふこあ

MohuCore

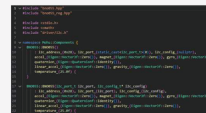
毛皮

もふかわ

MohuKawa

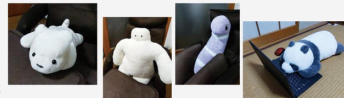
知能

もふあい

MohuAI

共通の骨格モジュールと
好きなぬいぐるみの毛皮を合体

のそのそ



もぞもぞ

ぬいぐるみロボットが簡単に作れる！

ぬいぐるみ専用の 組み込みAIモジュールの開発

小山 高（東京大学 大学院情報理工学系研究科）

1 背景

情報化が進んだ現代においても、一人暮らしなどで人が孤独を感じることは多い。心の癒やしとしてペットの飼育が考えられるが、一人暮らしで世話を行うことは難しい。そういった背景も踏まえてか、近年では愛玩用ロボットなども販売され始めている。しかし、これらは工業製品であるがゆえに同じ製品ならば見た目はどれも同じであり、オンリーワンの要素に乏しい。

そこで本プロジェクトでは、人が適度な距離感で触れ合え、かつ多様な種類が存在するぬいぐるみに注目する。そして、ぬいぐるみをロボット化することで現代の生活に即した心の癒やしを生み出そうと考えた。しかし、ユーザーの好みに応えるべく多くの種類が存在するぬいぐるみをすべてロボット化することは開発コストの観点から難しい。

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

2 目的

そこで本プロジェクトでは、ぬいぐるみのロボット化に特化した組み込みAIモジュールを開発し、ぬいぐるみの骨格の規格化を目指す。具体的には、多くの種類のぬいぐるみを効率的にロボット化するために、ぬいぐるみロボットを機械的・電氣的要素を含む共通の内部骨格と換装可能なぬいぐるみ部分に分割する。これにより、ユーザーはロボットの骨格と好きな種類のぬいぐるみを組み合わせることで、たとえぬいぐるみが犬型であっても熊型であっても、同じ骨格を組み込むことで好みの見た目のぬいぐるみロボットを簡単に手にすることが可能となる（図1）。本プロジェクトではロボットの共通化された内部骨格と、それに対応する複数のぬいぐるみを実際に製作し、毛皮の換装可能なぬいぐるみロボットシステムの実現を目指す。

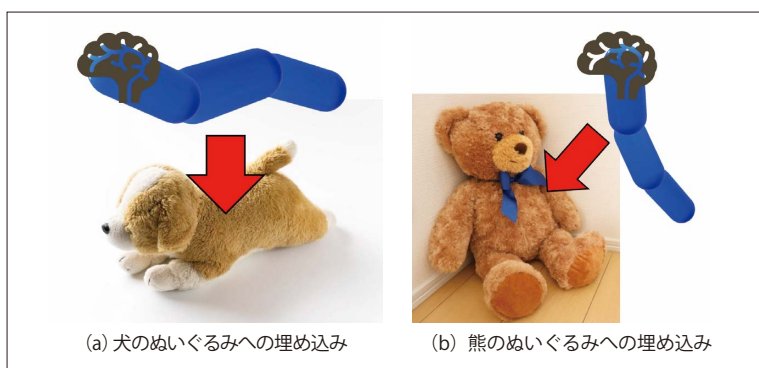


図1：共通骨格を異なるぬいぐるみに埋め込む概念図

3 開発の内容

3.1 ぬいぐるみロボットの内部骨格

本システムでは共通の内部骨格として、5関節を持つ直径約8cm、全長約40cmのシリアルリンクロボットを製作した（図2、図3）。ロボットとしては簡素な構造であるが、本物の動物のように四肢を正確に動かすのではなく、様々なぬいぐるみに対応するぬいぐるみロボットとして必要十分な機能を備えることに重点を置いた。この骨格にはESP32マイクロコントローラーやサーボモーター、姿勢センサー、感圧センサー等が取り付けられている。そして、Wi-Fiを経由してインターネット上からプログラムを取得し、ロボットが動作する。なお、感圧センサーを12個使用したため、メインCPUとは別にPICマイコンを使用してアナログ入力端子の不足を補うなどしている。

3.2 ぬいぐるみロボットに対応するぬいぐるみ

ぬいぐるみの骨格に取り付けられるぬいぐるみとして、本プロジェクトでは完全新規設計のものと市販品を改造したものを製作した。本システムの骨格の性能を十分に活かすにはぬいぐるみも骨格に合わせて設計することが望ましい。一方で世の中にはすでに多くのぬいぐるみが出回っており、自分の好きな既製品のぬいぐるみに少し手を加えてロボットにしたいユーザーも一定数いると考えられるため、市販品を改造したものも用意した。

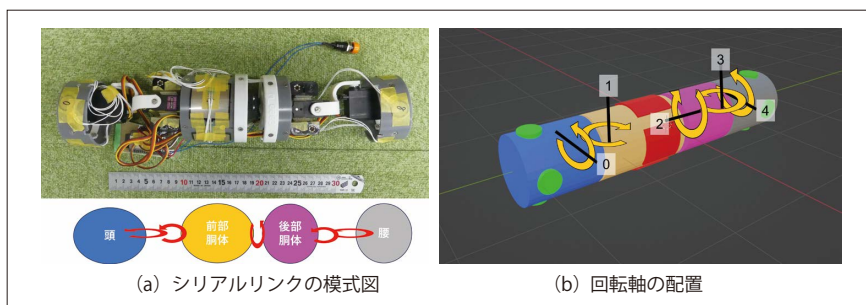


図2：内部骨格のシリアルリンクの構造と回転軸の配置

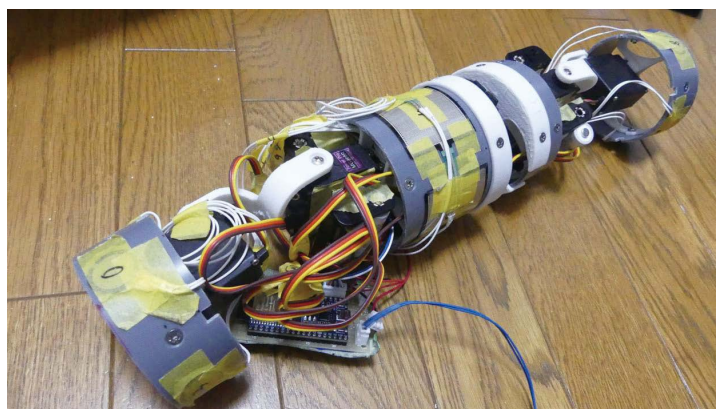


図3：内部骨格の外観

完全新規設計のぬいぐるみについては、まず3DCGソフトウェアで犬型のぬいぐるみをモデリングした（図4）。そして、UV展開機能を用いて展開図を出力し、それに合わせて型紙を作成し生地を裁断・縫製するなどして（図5）のような犬型のぬいぐるみを製作した。

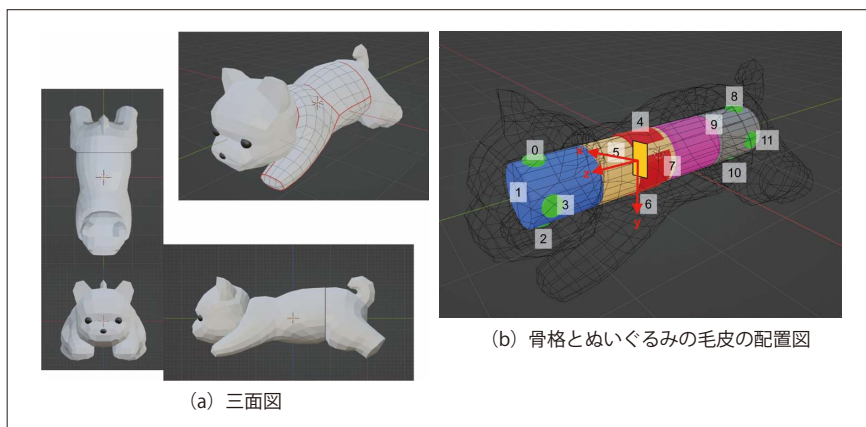


図4：3DCGソフトウェアによる犬のぬいぐるみのモデリング



図5：完全新規設計のぬいぐるみ

さらに、市販品を改造したぬいぐるみについては、一度ぬいぐるみを切り開いたのちにぬいぐるみ内部に空洞を作るように布をあてがい、再度綿を詰めるなどの加工を施した。そして、本システムに対応する人型・アナゴ型・パンダ型のぬいぐるみを用意した (図6)。

製作した骨格とぬいぐるみは工具を使わずに手で簡単に組み立てられる。いずれのぬいぐるみについても、およそ1分30秒でぬいぐるみを骨格に取り付けることが可能であった (図7、図8)。



図6：市販品を改造して製作されたMohuKawa

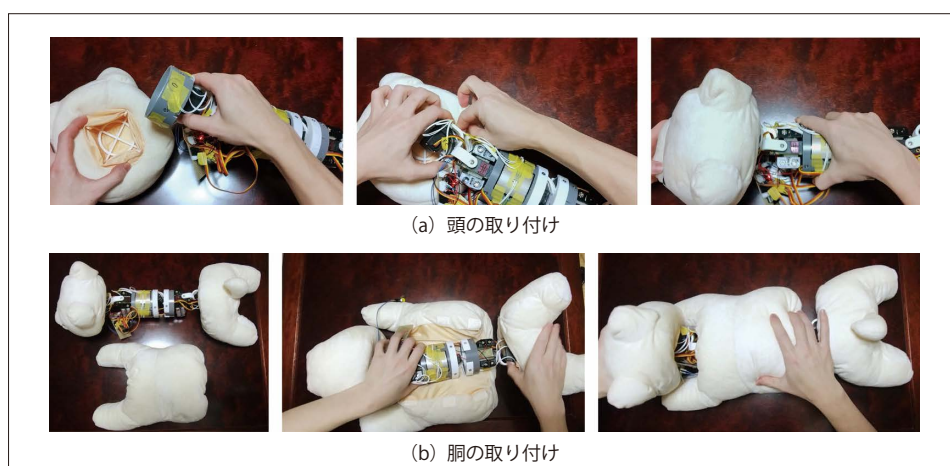


図7：犬型のぬいぐるみロボットの組み立て



図8：人型のぬいぐるみロボットの組み立て

3.3 ソフトウェア

ロボットに書き込むソフトウェアの作成にあたり、ぬいぐるみロボットの骨格は共通化されているため、ぬいぐるみの種類によらないハードウェアに近いプログラムとぬいぐるみや機能ごとに異なるプログラムはソースコードを分割し作業の効率化を図った。ハードウェアに近い部分のプログラムとしては姿勢センサー等のライブラリーの実装や感圧センサーで使用するPICマイコンのソースコードなどを含む。さらに、ロボットの機能としては、ユーザーがロボットに触れたときに、その外力に抗うように動いて応答する機能などを盛り込んでいる。

また、ぬいぐるみロボットを外部のPCと接続することで、ぬいぐるみロボットに対する人のインタラクション傾向の分析も行った（図9）。この分析では、ぬいぐるみロボットに埋め込まれたセンサーの情報をPCに送信し、人がぬいぐるみロボットに対してどのようなインタラクションを行うのか測定した。結果としてはぬいぐるみの種類ごとに形状や容姿から持ち方や触り方などの傾向に差が生まれ、PyTorchによる深層学習と組み合わせることで、センサーの値のみからユーザーが用意されたぬいぐるみのうちどの種類のぬいぐるみを抱いているかを分類できるようになった。本検証は試験的なものであるが、今後改良を加えることで、ぬいぐるみロボットが抱き方の傾向から持ち主のみに特定の応答を示すなどの機能が実装できると期待される。

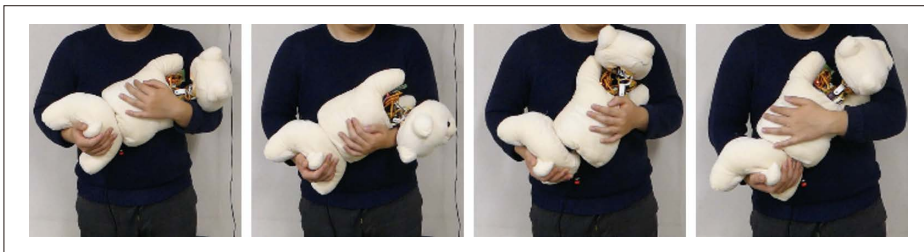


図9：人と犬型のぬいぐるみロボットとのインタラクション傾向の分析の様子

4 従来の技術との相違

本システムが従来の愛玩用ロボットと異なる点として、ユーザーが簡単に自分の好きな見た目のぬいぐるみロボットを簡単に組み立てられる点が挙げられる。従来の愛玩用ロボットでは製品ごとにロボットの姿が定まっており、ユーザーが自分の気に入った姿のロボットを選ぶこ

とは難しかった。本システムによって、今までロボットメーカーが愛玩対象のあらゆる機能や仕様を規定し管理していた段階から、ユーザーが主体となって自分の好みに寄り添った愛玩用ロボットを迎えられる状況に近づいたといえる。

また、ぬいぐるみと人とのインタラクションに注目し、それを制御に利用した点も重要である。例えば、ペットではしばしば動物が能動的に人に働きかける。一方で、本システムのぬいぐるみロボットでは人が自ら触れ合うことで初めてぬいぐるみロボットに刺激や情報を与えられ、それにロボットが応答してコミュニケーションが始まるという流れが実現できる。ペットもぬいぐるみロボットもともに愛玩対象であるが、その立ち位置には差異があり、ぬいぐるみと人という独特の距離感を活かした本システムはコミュニケーション形式の一つとしても価値があると言える。

5 期待される効果

本システムによって、今まで手軽な愛玩対象を探していた人やぬいぐるみにさらなる愛着を求める人が、ぬいぐるみロボットという形で自分の好みに合う愛玩用ロボットを容易に入手し、癒やし得ることが可能となる。例えば、子どもが誕生日などの大きなイベントで骨格を買ってもらい、旅先の動物園や水族館などで対応するぬいぐるみを土産に買ってもらうなどすれば、そのぬいぐるみロボットは旅の思い出も相まって唯一無二の存在となるだろう。さらに、ぬいぐるみロボットが人と触れ合いやすい点を活かして、将来的には本システムを仮想空間に自身のペットとして持ち込んだり、ぬいぐるみを介して遠方の相手とインタラクションを行ったりするなどの利用が考えられる。

このように、本システムは日常に溶け込むロボットとしていち早く人々の生活空間に普及し、社会のロボットへの関心を高めることにも貢献すると期待される。

6 普及・活用の見通し

本システムを普及させるために、将来的なロボットの設計図及びソースコードのオープンソース化を検討している。より多くのユーザーが手に取り、様々なユーザーが自らソースコードを修正し自分の求める機能を追加できる余地を残すことが、ぬいぐるみロボットという発展途上の分野を育む上で重要だと考えるからである。また、第三者による保守の可能なオープンソースとすることで、ユーザーがぬいぐるみロボットという長期にわたって愛されうる存在を安心して迎えられることにもつながる。

さらに、本システムの特長として、ロボットとぬいぐるみという全く異なるノウハウが必要な開発を分割して行える点がある。従って、様々なぬいぐるみメーカーに本システムに対応するぬいぐるみの製造を委託し、その際に本システム対応を謳うためのライセンス料を徴収し、その資金をロボットの骨格の開発費の一部に充てるというサイクルを構築できれば、ぬいぐるみの種類を増やししながら本システムを持続的に開発できると考えている。

関連URL

X（プロジェクトの進捗を随時掲載予定）：<https://twitter.com/mohutics>

GitHub（ソースコード公開時に利用予定）：<https://github.com/mohutics>

PMの評価

採択時の評価

ぬいぐるみ愛に溢れた提案である。ぬいぐるみ型のロボットに関する事例は多数あるが、このプロジェクトは様々なぬいぐるみに適用可能な駆動部としての骨格と、その制御ソフトウェアの開発を目指している。隆盛を誇る生成系AI等も駆使することで、ペットの代替でない、ぬいぐるみならではの新たなインタラクションを構築することが期待できるため、採択と判断した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、ぬいぐるみ専用の組み込みAIモジュールを開発し、あらゆる種類のぬいぐるみにロボティクスを適用することで、幅広いぬいぐるみに効率的に知能を埋め込むためのプラットフォームの構築を目指したものである。現代社会におけるペット飼育の課題を踏まえ、機能を抑えつつも違和感を最小限に止めたペットロボットの開発に取り組んだ点は高く評価できる。

ぬいぐるみとは自身を投影する対象であり、外見には人それぞれ好みがあるという課題に対して、ぬいぐるみのロボット化に特化した組み込みAIモジュールを開発し、ぬいぐるみの骨格の規格化を目指すとともに、毛皮と骨格の開発過程を分離することで、幅広いぬいぐるみに効率的に知能を埋め込むための土台を築いた点は独創的であり、評価に値する。

また、共通の内部骨格の開発や、完全新規設計および市販品を改造したぬいぐるみの製作、ソフトウェアの効率的な作成など、プロジェクトの各段階において適切な工夫がなされている。さらに、ぬいぐるみロボットに対する人のインタラクション傾向の分析にも取り組んでおり、今後の発展可能性を示唆するものとなっている。

従来の愛玩用ロボットとは異なり、ユーザーが自分の好みに合わせてぬいぐるみロボットを組み立てられる点や、ぬいぐるみと人との独特の距離感を活かしたコミュニケーション形式を実現した点は、本プロジェクトの強みであり、新たな価値創出につながるものと期待される。

以上により、本プロジェクトは、現代社会におけるペット飼育の課題に対する独自のアプローチにより、ぬいぐるみロボットという新たな可能性を切り拓いた点で評価できる。

未踏の経験を振り返る

未踏でどんな経験をしたのか、クリエイターたちに聞きました。

●同年代とつながることができた

情報系の学部に進学しなかったことで、自分と同じくプログラミングに情熱を傾ける同年代の人たちとリアルで交流したのはほとんど初めての経験だった。非常に刺激的で得難い経験ができたと思う。

同世代のつながりができる点でとても刺激的だった。特に同じPMのもとにいるプロジェクトには「負けたくない」という競争心もあり、成長できた一年だった。

●本格的なプロジェクトの実施

技術面の成長だけでなく、プロジェクト進行の経験も得ることができた。限られた期間内に、開発の優先度を決めながら成果報告会で見せられるものを作るというのは少しプレッシャーが大きかった。しかし、毎月のPMとの進捗ミーティングで的確なアドバイスを受けることができたおかげで、採択時に考えていたもの以上に良いプロダクトが作成できたと考えている。

本格的な開発経験が乏しかった中で、チームメンバーやPMの支えがあって技術面で大きく成長を遂げることができた。ある程度決まったスケジュールがあることで、適度な外圧が加わり自らの出力を高められ、自信にもなった。

当初の想定以上のソフトウェア開発ができた。またソフトウェア開発にとどまらず、事業化を前提とした市場機会の探索を行うことができた。

これまでハッカソンやコンペなどでプロトタイプを作ることはあっても、実際に自分たちでユーザーに声を聞いたり、どのようにしたらより多くの人に知ってもらえるか？使ってもらえるか？についてまで考え、実践する機会はほぼなかった。プロダクトの開発及びプログラミングだけではなしえないサービスづくりの上で大事な点を経験できたことは、自分にとって大きな学びになった。

●他者の視点がある中での開発

未踏事業を通じて、どんな環境に身を置くかが非常に大切だと感じた。ブースト会議の各チームのプレゼンはどれも素晴らしく、自分たちと比較して焦った。毎月のミーティングでは、多くのクリエイターやPMから新しいアイデアや改善点をフィードバックしてもらい、大きな推進力となった。

岡 瑞起 PM 担当プロジェクト



岡 瑞起 (おか みずき)

筑波大学 システム情報系 准教授

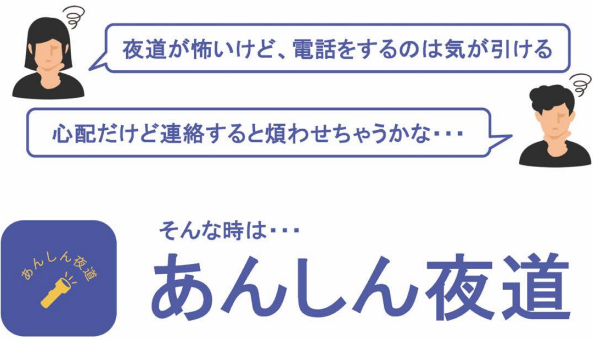
■プロフィール

研究者。筑波大学システム情報系 准教授/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 | 人工生命より生命的なAIへ」（ピー・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。

2023年度は、3つのプロジェクトを採択した。これらのプロジェクトは、社会的課題の解決や生活の質の向上を目指しつつ、革新的な技術を活用している点が共通している。採択した3つのプロジェクトは、育成期間中にプロトタイプの開発や実証実験を通じて、ユーザーからの評価を得ながら改善を重ねた。プロジェクト終了後も継続的な開発や社会実装に向けた取り組みが計画されており、今後の発展が期待される。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

GPSと合成音声による防犯スマートフォンアプリケーションの開発
— 夜道での女性を見守る、家族やパートナーの連携アプリケーション「あんしん夜道」 —
石戸谷 由梨(お茶の水女子大学), 江畑 敬太(東京理科大学), 金城 拓登(沖縄工業高等専門学校, かまちっかい株式会社)



そんな時は...

あんしん夜道

家族やパートナーで連携して夜道のお互いの不安を解消！



GPSと合成音声による防犯スマートフォンアプリケーションの開発

石戸谷 由梨 (お茶の水女子大学 理学部 情報科学科)

金城 拓登 (沖縄工業高等専門学校 メディア情報工学科／かまちっかい株式会社)

江畑 敬太 (東京理科大学 大学院先進工学研究科 電子システム工学専攻)

1 背景

夜道を歩く際、多くの女性は道の明るさや人通りの有無、不審者に遭遇した場合の対処方法など、様々な安全対策を無意識のうちに考慮しながら移動している。男性と比較して、女性が抱える夜道における不安は顕著であり、この現状を我々は「夜道のジェンダーギャップ」と定義する。女性の安全を確保するために駆け付けサービスや防犯アプリケーションの利用、日常的な警戒心の持続などの解決策が存在するが、それでもなお多くの女性が不安を感じながら夜道を歩いている。

2 目的

本プロジェクトでは、未だに多くの女性が夜道に不安を抱えている原因を探り、夜道のジェンダーギャップを解消することを目的としている。また、そのためのアプリケーションを開発し、それと通じて女性が男性と同様に安心して夜道を歩ける社会を実現することを最終的な目標としている。

3 開発の内容

本プロジェクトは、女性が夜道で感じる不安を軽減するアプリケーションを開発した。最初はプロトタイプとして、夜道で電話をしているふりをするための機能をWebアプリケーションとして開発するところからスタートしたが、開発中のユーザーフィードバックを受けてiOSアプリケーション（以降アプリ）へと発展した。これにより機能も、GPSと合成音声を使用した防犯機能を備えたものに進化した。さらなる調査で、夜道での不安を軽減するには家族やパートナーとの連携が重要であることが明らかになり、方針を転換した。最終的には、女性が安心して夜道を歩けるよう、家族やパートナーと連携する機能に焦点を当てたアプリケーションの開発に至った。開発したアプリ「あんしん夜道」の機能について、以下に説明する。

3.1 帰宅見守り機能

帰宅見守り機能は、見守られる側のユーザーが指定した範囲（例えば最寄り駅から自宅までの半径）に入ると、見守る側のユーザーに自動通知と進行状況を送信するものである（図1、図2）。見守られる側のユーザーは位置情報をその特定区間内でのみ共有し、見守る側のユーザーはその情報の確認が可能となる。また見守る側がどこまで位置情報を確認したのかを見守られる側のユーザーが確認できる（図3、図4）。これにより、帰宅時の安全を確認しつつ、連絡の手間を減らし、家族やパートナーは必要な時にすぐに帰宅状況を把握できる

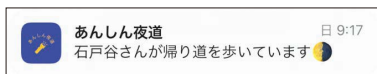


図1：帰宅開始時の通知

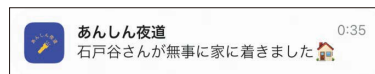


図2：帰宅終了時の通知



図3：見守る側が見守られる側の帰宅状況をまだ確認していない状態での見守られる側の画面



図4：途中で帰宅情報を確認した状態の画面

3.2 アニメーション機能

アニメーション機能は、見守られる側のユーザーが帰宅をするために夜道を歩き始めたことを、見守る側・見守られる側の両方にアニメーションで共有する（図5、図6）。夜道で不安を抱いているキャラクターをアニメーションさせることで、見守る側が見守られる側の不安に寄り添えるようにしている。



図5：見守る側の画面上でのアニメーション

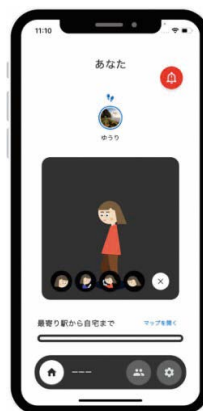


図6：見守られる側の画面上でのアニメーション

3.3 連絡機能

見守られる側のユーザーが不安を共有したり、見守る側のユーザーが見守られる側の安全を確認しやすくしたりするために、お互いに連絡が取れる機能として通話機能・チャット機能・リアクション機能を備えている。通話機能は音声で、チャット機能はテキストで意思の疎通を図っているが（図7）、リアクション機能ではより手軽にスタンプでコミュニケーションができる（図8）。



図7：通話とチャットができる画面

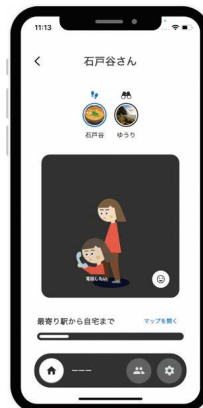


図8：リアクションが送られてきている様子

3.4 緊急事態ツール

緊急事態ツールは、見守られる側のユーザーが不審者に遭遇した場合など、緊急で対応が必要な場合に使用できる、安全を確保するための機能である（図9）。緊急通報、防犯ブザー、フェイク通話の機能を揃えている。緊急通報機能は、図10に示すように見守る側にユーザー名と緊急事態に見舞われた場所を通知する。



図9：緊急事態ツールが表示されている画面

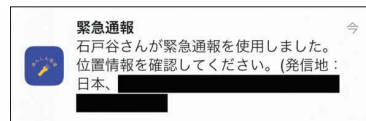


図10：見守られる側の緊急事態の通知

4 従来の技術（または機能）との相違

あんしん夜道は、従来の防犯アプリケーションと異なり、一度設定すれば自動で対象者の帰宅を見守ることができる。ユーザーは設定変更や操作の手間を省け、指定区間のみの位置情報共有によりプライバシーを守りつつセキュリティを強化できる。加えて、家族やパートナーとのコミュニケーションを促進する機能を備え、夜道で不安を感じる女性のサポート体系を改善している。これらの新機能により、ユーザーのニーズに応える新しいソリューションとなっている。

5 期待される効果

本プロジェクトは、夜道を歩く女性が直面する不安を家族やパートナーと共有しやすくすることを目指している。あんしん夜道によって、女性は夜道で感じる不安を気軽に伝えることが可能となり、家族やパートナーは過剰な保護や束縛感を与えることなく、適切なサポートを提供できる。具体的な効果としては、下記が挙げられる。

・精神的負担の軽減

夜道を歩く女性の不安感が軽減されることで、精神的な安心感が増し、日常生活の質が向上する。

・共同体の安全意識の向上

あんしん夜道の普及により、夜道を歩く女性に対する地域社会の見守り体制が強化され、総合的な安全意識が高まる。

- ・防犯意識の促進

あんしん夜道が夜道の防犯における新たな基準となり、それを使用することで個人の安全が確保されるという認識が広がる。

これらの効果は、女性だけでなく、家族、パートナー、地域社会全体にとっても、より安全で安心できる環境を実現するための重要なステップとなりうる。

■6 普及（または活用）の見通し

あんしん夜道の普及戦略として、初期段階での利用者獲得に焦点を当てる。具体的には、アプリ開発に際してヒアリング協力を得た約300人の女性に向けて直接宣伝を行う。さらに、石戸谷が所属するお茶の水女子大学の現役生とOGを含む約2,600人のコミュニティにも積極的にアプローチする。

あんしん夜道は、夜道で不安を感じる女性だけでなく、彼女たちを支える家族やパートナーにも利用してもらうことを目指す。そのため、直接的な利用者基盤は女性に限定されず、より広範なユーザー層への普及が見込まれる。

さらに、この取り組みを通じて、ジェンダーギャップに対する認識の向上も目指す。あんしん夜道の普及が進むにつれ、性別による不平等や安全性の問題に対する社会的な理解を深めることができると考えている。

関連URL

あんしん夜道の公式サイト：<https://anshinyomichi.studio.site/>

PMの評価

採択時の評価

女性の安全という社会的課題に対して、GPSと合成音声を組み合わせた独自のアプローチで解決を目指す点を評価した。

プロジェクト終了時の評価

「あんしん夜道」は、女性の安全という社会的課題に対して、家族やパートナーとの連携に着目し、GPSやコミュニケーション機能を活用した独自のアプローチで解決を目指す点が高く評価できる。特に、自動的な帰宅見守り機能と、状況を共感するためのアニメーション表現は、ユーザーのニーズを的確に捉えた革新的な試みである。

また、開発プロセスにおいて、プロトタイプ段階からユーザーの声に真摯に耳を傾け、当初の方針を大胆に転換したことは、ユーザー中心の開発姿勢の表れといえる。実際のユーザーを交えた実証実験を通じて、機能やUIの改善を重ねた点も高く評価したい。

一方で、プライバシーやセキュリティの確保、バッテリー消費の最適化など、実用化に向けた課題も残されている。しかし、本プロジェクトで培ったユーザー目線の開発アプローチは、これらの課題の解決にも活かされるものと期待される。

総じて、「あんしん夜道」は、女性の抱える夜道の不安という問題に対して、技術とユーザー理解を融合させた新しいソリューションを提示した点で大いに評価できる。今後の展開に注目したい。

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

月経中のストレス緩和を目的としたショーツ型経血量測定デバイス

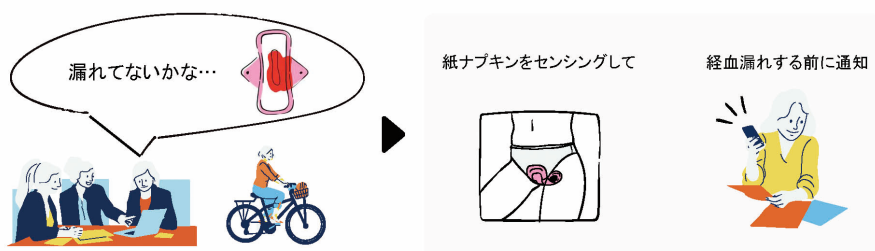
— UNLEAK: 経血の分布を可視化し、経血漏れをお知らせする —

吉田 紗彩 (東京工業大学) 高安 優多 (東京工業大学)

常次 舞 (東京工業大学) 能崎 直紀 (東京工業大学)

生理のとき、多くの女性が思うこと

UNLEAKを履けば大丈夫！



月経中のストレス緩和を目的とした ショーツ型経血量測定デバイス

吉田 紗彩 (東京工業大学 生命理工学院 生命理工学系 2年)

高安 優多 (東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 4年)

常次 舞 (東京工業大学 工学院機械系 2年)

能崎 直紀 (東京工業大学 工学院機械系 4年)

1 背景

月経に悩みを抱えている女性は多く存在する。本企画は生理用品の悩みに注目し、その多くを占める「経血の漏れ」の解決を試みる。経血量が多い日の活動時は紙ナプキンを交換するタイミングが計りにくく、経血がショーツに付着する可能性が高い。

2 目的

本プロジェクトは、月経中の女性のストレスを減らすことが究極の目的である。そのために、いつでも経血の分布を可視化できるデバイスとアプリケーションの開発を行う。これらを使用することによって、経血の状態を確認するためにトイレに行くというストレスや、常に経血の状態が脳のメモリーを消費する潜在的なストレスの緩和を目指す。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、ショーツが汚れる前に経血を察知するためデバイスと、その状況を通知するスマートフォンアプリケーションで構成されるシステム「アンリークショーツ」を開発した。アンリークショーツのデバイスは、コントロールセグメントとセンサーセグメントの2つで構成されている。スマートフォンのアプリケーションを含めたシステムの概略を図1に記載する。

センサーセグメント及び、コントロールセグメントについて、以下で詳述する。



図1：システムの概略

3.1 センサーセグメント

センサーセグメントは、ショーツに縫い付けられている。紙ナプキンに向けて基板に点在するLEDから紙ナプキンに向けて光を照射し、紙ナプキンの反射光をカラーセンサーが読み取る。なおセンサーセグメントは、ショーツと一緒に洗うことが可能である。

3.2 コントロールセグメント

コントロールセグメントはカラーセンサーの値の前処理を行い、BLE通信でスマートフォンにデータを送る役割を果たす。また、バッテリーもコントロールセグメントに搭載されている。

ここでショーツ・紙ナプキン・デバイスの位置関係を図2に示す。なお、コントロールセグメントとセンサーセグメントはマグネットコネクターで接続しており、容易に脱着することができる（図3）。

ユーザーが準備することとしては、以下の2つのみである。

- (1) アンリークショーツに紙ナプキンを取り付ける
- (2) コントロールセグメントに電源を入れ、スマートフォンとBLE接続を行う

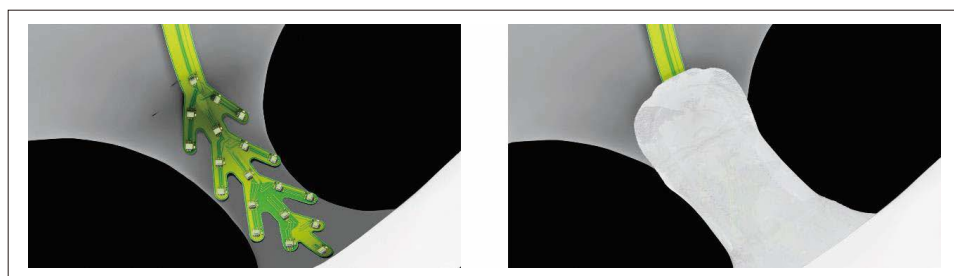


図2：紙ナプキン・デバイスの位置関係

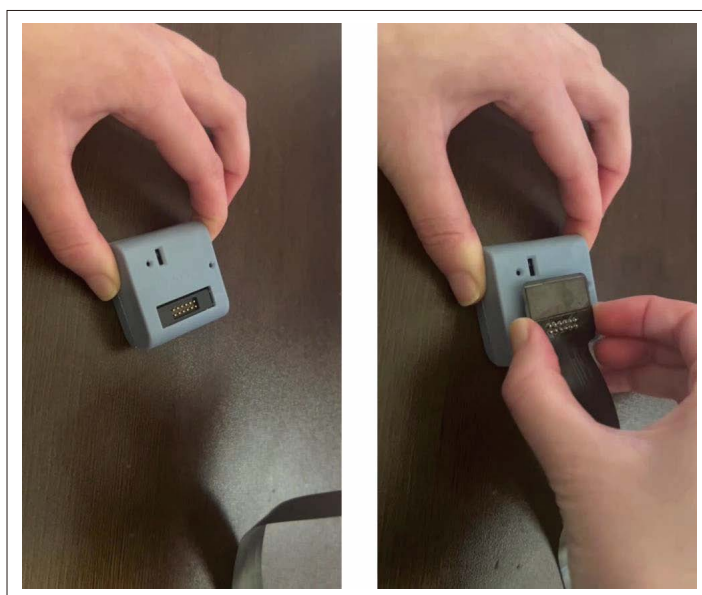


図3：マグネットコネクタの脱着の様子

ユーザーはこの後、経血の分布をスマートフォンのアプリを開いて確認することができる（図4左）。これは周りに人がいない場合を想定している。また周りに人がいるときに生理のアプリケーションを開くことを躊躇する人もいるため、バイブレーションや通知で知らせることも可能である。（図4右）。

■ 4 従来の技術（または機能）との相違

従来技術として、経血量を測定できるBe-A Japanとミツフジが共同開発した経血量を計測できる吸水ショーツやウェアラブルおむつセンサーがある。しかし、洗いやすさや汗の判別に問題がある。一方、アンリークショーツでは、洗うことも可能であり、カラーセンサーを用いているため、汗との区別も可能である。

■ 5 期待される効果

アンリークショーツを使用することによって、経血が可視化され、月経中の生理で悩む女性

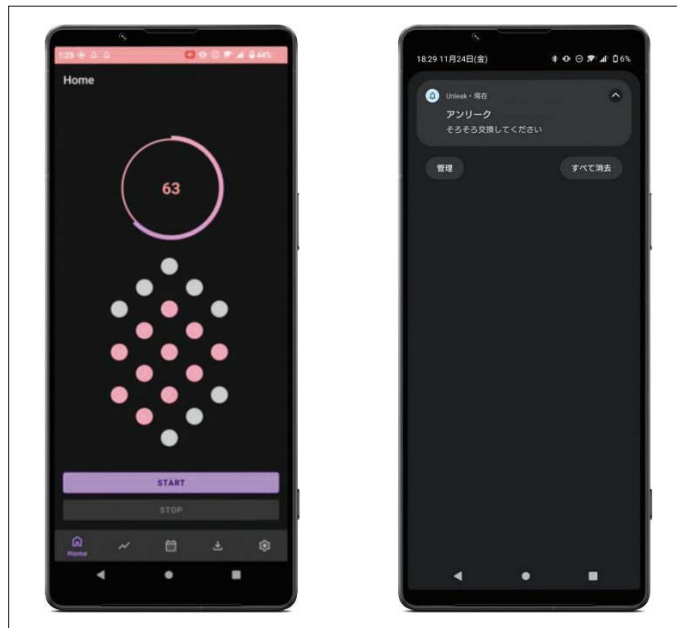


図4：経血の分布の例（左）と通知の例（右）

がトイレに行って確認するストレスや、漏れているかいないか常に悩むストレスから解放されることによって、生産性の向上が期待できる。また、経血の検知技術を尿漏れにも応用の可能性がある。

6. 普及（または活用）の見通し

耐久性向上や小型化に向けて開発を続けていく予定である。またアプリケーションの機能として、生理日予測や、カレンダーの機能を充実させていきたい。ターゲットユーザーは経血量の多い女性であるため、少しでも重い気分を軽くするUXにしていきたい。

関連URL

ティザーサイト：<https://unleakshorts.com/wp/>

YouTube公式チャンネル：<https://www.youtube.com/channel/UCitLirryGaHQoqrOUPKfgGA>

PMの評価

採択時の評価

月経中の女性のストレス緩和という明確なユーザーニーズに対して、ハードウェアとソフトウェアを融合した革新的なソリューションを提案している点を評価した。

プロジェクト終了時の評価

「アンリークショーツ」は、月経中の女性が抱える切実な悩みに着目し、IoTとモバイルアプリを組み合わせた独自のソリューションを提示した点が高く評価できる。特に、ショーツに違和感なく装着できる薄型のセンサーデバイスの開発は、ハードウェア設計における優れた工夫の表れといえる。

また、開発プロセスにおいて、当事者であるユーザーの声に真摯に耳を傾け、それを設計に反映させた姿勢も評価したい。機能の選定やUIデザインなど、随所にユーザー目線でのものづくりへのこだわりが感じられる。実証実験を通じて得られた知見を迅速に開発にフィードバックしている点も、アジャイルな開発体制の構築ができていることの証左だろう。

一方で、実用化に向けては、さらなる小型化や電池持続時間の向上、アプリの使い勝手の改善など、技術的・UI的な課題も残されている。しかし、本プロジェクトで培った技術力とユーザー理解があれば、十分に克服できるものと期待される。

総じて、「アンリークショーツ」は、女性のQOL向上という社会的意義の高い課題に対して、斬新なアプローチで挑んだ意欲作である。ウェアラブルデバイスとヘルスケアという、今後の発展が大いに期待される分野の先鞭をつけるプロジェクトとして高く評価できる。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

小島聡太 竹味和輝 刀禰有紀彦

テーマパークでの満足度を最大化するためのプラン作成支援アプリケーション

東京ディズニーリゾートを誰でも玄人のように回ることができるアプリ TDL/TDS AIナビ



TDL/TDS AI ナビ

東京ディズニーランド / 東京ディズニーシーでの
待ち時間と歩く距離を
グッと短くできる唯一のアプリ

希望の体験と条件を入力するだけ。
たったこれだけのステップで、待ち時間と歩く距離の短い
プランを提案。また、当日は様々な機能がサポート。
誰でも、充実したテーマパークでの体験を実現できます。



※東京ディズニーリゾート、東京ディズニーランド、東京ディズニーシーは
ディズニー・エンタープライゼス・インクの登録商標です

テーマパークでの満足度を最大化するための プラン作成支援アプリケーション

竹味 和輝 (名古屋工業大学 情報工学系 プログラム修士課程 1年)

小島 聡太 (名古屋市立大学 経済学部 マネジメントシステム学科 4年)

刀禰 有紀彦 (名古屋大学 情報学研究科 知能システム学専攻 修士課程 2年)

1 背景

テーマパークを訪れる際の主要な課題は、長時間の待機と1日を通じた疲労感にある。特に、東京ディズニーリゾートのような大規模な施設では、これらの課題が顕著である。加えて、多くの訪問者はテーマパークにおけるこれらの問題を「当たり前」と受け入れ、それ自体を忘れてしまう傾向にある。一方、テーマパークを頻繁に訪れ、深い知識を有する人々（以下、玄人と呼ぶ）は、自らの経験に基づき、1日のプランニングを行うことで、混雑の少ないタイミングでアトラクションを楽しむなど、前述の問題を解決している。すなわち、1日の計画を立てることは、これらの課題に対する有効な解決策である。

テーマパークでの計画を立てる上で中心となる要素は、アトラクションの待ち時間の傾向を理解することである。待ち時間はイベントや気象条件によって大きく影響を受けるため、訪問

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

者自身で最適なプランを策定することは一般に困難である。例えば、本プロジェクトメンバーの1人である竹味は、ディズニーリゾートへの訪問経験が67回に及び、待ち時間の傾向やアトラクションを効率よく回る方法に関する豊富な知識と経験を有している。しかし、待ち時間の傾向は絶えず変動するため、竹味でさえも最新情報の確認や情報の更新を必要とする。

このことから、テーマパークの訪問経験が少ない人々にとって、効果的なプランを立てることは一層困難である。無計画にアトラクションを選択してしまうと、混雑している時間帯に長時間待たされたり、無駄な移動によって疲労が増大したりすることが多い。

2 目的

このような背景から、特にテーマパークに不慣れな来場者でも、彼らの希望する体験を簡単に入力するだけで、待ち時間や移動時間を最小限に抑えた効率的なプランを提案するサービスの必要性が高まっている。この要望に応えるため、本プロジェクトでは、待ち時間の予測に基づいて所要時間及び移動時間を最小化する経路を探索し、最適化された1日のプランを提案するアプリケーションの開発を行った。開発したアプリケーションは、テーマパーク内での使用に適したインターフェイスを有するスマートフォンアプリケーションとして設計されており、ユーザーは最適化されたプランの提案を受けるだけでなく、各アトラクションの混雑状況をリアルタイムで確認したり、体験のレコメンドを受けたりすることが可能である。

このアプリケーションの開発により、経験の浅い来場者でも、経験豊富な来場者と同様にテーマパークを最大限に楽しむことが可能となることを目指した。特に、日本を代表するテーマパークである東京ディズニーリゾートを対象としたアプリケーションの開発を進めており、このアプリケーションを通じて、来場者1人ひとりがそれぞれのニーズに合った、より満足度の高いテーマパーク体験を実現できるよう取り組んだ。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、東京ディズニーリゾートを訪れる利用者に対して、彼らの訪問体験を最大化するための効率的なアトラクションの回り方を提案するアプリケーションを開発した。本アプリケーションでは、特に利用者の好みと要求に応じて2つの異なるユーザー層を想定し、それぞれに最適化された機能を提供している。

1つ目のユーザー層は「効率重視派」と定義する。これらのユーザーは時間を有効に活用し、可能な限り多くのアトラクションを体験したいと考える。このユーザー層を対象に、アプリケーションは高度なルート提案機能を搭載している。この機能は、最新の機械学習技術を用いてアトラクションの待ち時間を予測し、進化計算というアルゴリズムを駆使して、待ち時間が最小限になるようなアトラクションの訪問ルートを計算する。これにより、ユーザーは待ち時間を減らしながら、より多くのアトラクションを体験することが可能になる。

ルート提案は、ユーザーが図1のような入力画面を通じて、彼らが体験したいアクティビティを選択することから始まる。アプリケーションはこれらの情報を基に、図2のようなユーザー一人ひとりに合わせたカスタマイズされた訪問ルートを提供する。

2つ目のユーザー層は、「自由度を重視するユーザー層」と定義する。これらのユーザーは計画に縛られることなく、園内を自由に探索したいと望む。自由度を重視するユーザー層向けには、ルート提案機能に加え、予測待ち時間情報の表示機能とレコメンド機能を提供する。ユ



図1：体験の入力画面



図2：提案ルートを表示画面

ユーザーは予測待ち時間を確認できるようになることにより、ユーザー自らの意思で次の行動を選択する際にも、待ち時間がより少なくなるような行動を選択することが可能になる。

レコメンド機能は、ユーザーが指定した条件に基づき、最適な体験を提案するシステムである。ユーザーは、図3のように、利用可能な空き時間の長さや、求める体験の種類など、自分のニーズに合わせた条件を設定することで、最適な体験のレコメンドをマップ上で確認することができる。レコメンドアルゴリズムは、ユーザーの設定条件だけでなく、現在地からの距離、混雑状況といった複数の要因を総合的に考慮し、最適な体験を選定する。また、この機能は、ショーの開始時刻など、決まった時刻までの限られた空き時間を持つユーザーや、提案されたプラン内での自由時間を有効に使いたいユーザーにとっても価値のあるサービスとして提供されている。

総じて、このレコメンド機能と予測待ち時間情報を組み合わせることにより、自由度を重視するユーザーは自分のペースでパークを楽しみつつ、スムーズにアトラクションを体験することができるようになる。

使用技術としては、アトラクションの待ち時間の予測には機械学習を用いた。東京ディズニーランド・シーの50以上のアトラクション・グリーティングに対して予測している。これには、実際にディズニーリゾートに行く際に待ち時間予測をしている竹味の経験を特徴量生成に反映することで精度を高めている。

次にルートの最適化には進化計算を用いて少ない待ち時間で回れるルートを計算し、その結果を候補としてユーザーに複数提案することをしている。進化計算を採用した理由としては、



図3：体験のレコメンド機能

アルゴリズムの性質上、解（ルート）が偏りにくいことや複雑な制約を考慮しやすいことにある。

また、進化計算で最適化を実装するにあたって、シミュレーターが必要である。そのため東京ディズニーリゾートにおける希望する体験を入力すると、それに要する待ち時間、移動時間を算出できるシミュレーターを自作した。進化計算とは、ダーウィンの進化論にはじまる生物の進化の過程を模倣しアルゴリズムに落とし込んだ手法の一つであり、本プロジェクトではシミュレーターにより評価値を算出できるようになるので、あるルートに対してルートの一部を変えたルート候補を複数生成した後、シミュレーターで算出した評価値が良いものを採用し、そこから更に複数のルート候補を生成する。これを数千回・数万回繰り返すことで最終的に生き残った解を最良の解とみなすということを実装している。また、アトラクションやグリーティングなどの場所が一定で時間の制約がないものについては容易に扱うことができるが、ショーやパレード、予約したレストランなど、テーマパーク体験の中には時間の制約があるものや場所が一定でないものが存在する。そのため、それらの体験についても考慮したシミュレートができるようにシミュレーターを自作した点は、本開発期間を通して力を入れたことのひとつでもある。

4 従来の技術との相違

従来の東京ディズニーリゾート内で活用されているアプリケーションでは、アトラクションの最新の待ち時間情報の提供が主な機能であった。この情報により、ユーザーはアトラクションの現在の混雑状況を把握することができるが、未来の時間帯において各アトラクションがどの程度混雑するか、あるいは空くかという予測は提供されていない。このため、ユーザーは自

身の経験や推測に頼って計画を立てる必要があり、その結果、効率的なプランの立案は困難であるという問題が存在していた。

本プロジェクトで開発されたアプリケーションでは、この問題を解決するために、アトラクションの待ち時間を予測し、その予測結果を基にしてユーザーが待ち時間及び移動距離を最小限に抑えることができるような最適化を行う。これにより、ユーザーは時間を有効に活用し、効率的にアトラクションを楽しむことが可能となるおすすめのプランを提案される。

さらに、本プロジェクトではアトラクションの巡回に関する問題を解決するために、従来より知られているルート探索の問題、すなわち巡回セールスマン問題の枠組みを利用する。しかし、従来の巡回セールスマン問題の解法は、待ち時間が一定という前提に基づいているため、本プロジェクトで扱うような変動する待ち時間の状況には適用が困難である。このため、変動する待ち時間や様々な制約を考慮しつつ、効率的なルートを提案できる新たなアルゴリズムの開発と実装を行った。これにより、従来の技術では対応不可能であった問題に対処し、ユーザーにとってより価値の高いサービスの提供を実現した。

5 期待される効果

従来、遊園地やテーマパークにおける1日の訪問計画は、様々な要因によってその複雑さが増していた。これらの要因には、アトラクションの待ち時間の傾向、パーク内の地理的な位置関係、そしてその日の特定の状況などが含まれる。これらの要素を総合的に考慮し、効率的な訪問計画を立てることは、長年にわたってパークに度々訪れた経験豊富な一部の訪問者に限られた能力であったと言える。

しかしながら、本アプリケーションが提供するプラン提案機能により、これらの複雑な要因をシステムが自動的に解析し、利用者は単に条件を入力するだけで、待ち時間を最小限に抑えることが可能な訪問プランを容易に作成することができるようになる。これにより、初心者から経験者まで、どのような訪問者でも、待ち時間を有効に管理しながら、より多くのアトラクションを楽しむことが可能となると期待される。これは、テーマパークの体験をより充実させ、訪問者の満足度を向上させることに寄与するだろう。

さらに、本アプリケーションでは、プランの更新や編集が直感的に行えるように設計されており、待ち時間の予測も高精度で提供されている。この機能により、訪問者は次にどのアトラクションへ行くかを瞬時に決定できるだけでなく、訪れたい場所の長い待ち時間に関する不安を減少させることができる。このように、プランの柔軟な編集機能と正確な待ち時間の予測により、訪問者はパーク内での時間を最大限に活用し、不必要なストレスから解放されることが期待される。これは、訪問者がテーマパークでの体験をより一層楽しむための重要な要素であると言える。

6 普及の見通し

リリースされたアプリケーションは現時点^{*}で約18,000ダウンロードを達成しており、一定の市場ニーズが存在することが示されている。しかしながら、現在のアプリケーションは訪問者がテーマパークを訪れるという非常に限定的なシチュエーションに特化しているため、その利用機会は限られている。この状況を踏まえ、アプリケーションの普及とサービス価値の向上を図るためには、プラン提案の機能をさらに充実させるとともに、日常生活においても利用可

能な機能の開発を行うことが必要である。今後、プラン提案機能の改善に努めると共に、ユーザーが日常的に利用できる多様な機能の提供にも注力する予定である。

さらに、本アプリケーションに搭載されているプラン提案技術は、他のテーマパークやさまざまな観光施設においても有効である可能性が高い。このため、現在のテーマパークに限定されず、他のテーマパークや観光施設への展開を積極的に推進することで、さらなる市場の拡大とアプリケーションの普及を図る。このような展開により、多くのユーザーにとって有益なサービスを提供し、結果としてアプリケーションの価値を高めることが期待される。

※2024年2月時点

関連URL

AppStore ダウンロード URL :

<https://apps.apple.com/jp/app/待ち時間予測-ルート提案-tdl-tds-aiナビ/id6444205829>

Google Play Store ダウンロード URL :

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tsugitasu.ai_navi&hl=ja

PMの評価

採択時の評価

遺伝的アルゴリズムを用いた最適ルート探索など、AI技術を活用してユーザー体験の向上を目指す点を評価した。

プロジェクト終了時の評価

「TDL/TDS AIナビ」は、東京ディズニーリゾートという世界的にも人気の高いテーマパークに、AIやデータ分析の技術を導入した野心的なプロジェクトとして高く評価できる。また、個人の嗜好に寄り添った提案と、グループ全体の満足度向上という、時に相反しうる課題に対し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適解を導出するアプローチは、問題設定の独自性と技術的な完成度の高さを感じさせる。加えて、パークの世界観を大切にしつつ、ストレスフリーなUXを実現したフロントエンド実装も秀逸である。

ただし、東京ディズニーリゾートという強固なIPを扱う上では、知的財産権の保護に細心の注意を払う必要がある。今後の開発においては、この点への最大限の配慮が求められる。

総じて、本プロジェクトは、エンタテインメント業界におけるデジタルトランスフォーメーションの可能性を示す、極めて示唆に富む成果であったと評価したい。ここで得られた知見は、他のテーマパークやレジャー施設にも広く応用可能であり、業界全体の発展に寄与することが大いに期待される。

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

未踏で得られたもの

未踏を経験して得られたものは何か、クリエイターたちに聞きました。

●技術力・プレゼン能力

採択前と終了後では、まったく違う人間になったのではないかと思うほど、成長させてもらった気がする。成果物を他人に説明するプロセスによって、思考力とプレゼンテーションスキルが大きく向上した。

●自信

未踏事業では、9ヶ月間の長い期間全力を出し続けるという自分にとっては極限に近い状態で限界を超えるような挑戦ができた。途中で折れることがなかったのも、チームメンバーやPM、同期の皆さんの刺激や支えがあったから。自分がこんなに頑張ることができる人間だと思っていたなかったので、自分に自信がついたことが一番の収穫かもしれない。

自分は計画的に物事を進めることが得意なタイプではないが、PMや未踏関係者の方々の助けを得て、プロジェクトを期間内に完遂することができた。頑張れば物事を完遂できるという前例ができたのは、価値のある良い経験だった。自分の能力に基づいた限界をある程度理解できたことは、今後の判断材料として非常に役立つと感じている。

●胆力

採択が決まった頃の自分に比べると、“胆力”がついたと思う。どんなことがあってもプロジェクトを必ず前進させるという胆力。つべこべ言わずに今実装して検証しろと手を動かし始める胆力。本当に新しいことをやる時には正解がまだないから自分を正解にするため努力する胆力。未踏から全て学んだ。今後は起業家として未踏で得た胆力を生かし、楽しみながら社会を良くしていきたい。

●人とのつながり

未踏PM陣とのつながりは、修了後も様々な形で生かされており、自分にとって未踏事業は大きな転換期となった。

初めて「実装」に精通した人々に会い、どういった視点で問題を解決するのか、どういった技術を使うとより良いのかといった新たな知識を得ることができた。これまで触れてきたデザイン分野とは全く違う言葉で会話することで、自分の中のボキャブラリーも増え、より広い範囲でものづくりに関われるようになった。

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 デジタルネイチャー開発研究センター センター長

■プロフィール

1987年生まれ、東京大学大学院学際情報学府博士課程修了（学際情報学府初の早期修了）、博士（学際情報学）。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、准教授・JSTCRESTxDiversityプロジェクト研究代表。IPA認定スーパークリエイター/天才プログラマー。ピクシーダスト テクノロジーズ 代表取締役。

プロジェクト全体を総括すると、本プロジェクトは私が掲げる「デジタルネイチャー」というビジョン、すなわち計算機技術と自然環境の融合による新たな世界観の探求とその創発的な生活・ライフワークの具現化を目指す試みに合致するものを採択した。

今回採択した2つのプロジェクトは、一見すると農業とコーヒーという異なる分野を扱っているが、いずれも人間と自然とテクノロジーの関係性を根本から問い直す挑戦だった。「対話可能な選択的機械除草ロボットの開発」は、AIを活用して自然と共生する新しい農業の形を提案するものである。単に効率化を追求するのではなく、生物多様性の維持や環境負荷の低減にも配慮した、持続可能な営農モデルの確立を目指した。一方、「乳化量最大化を目指したエスプレッソ抽出制御システムの開発」は、匠の技を最先端のセンシング・機械学習技術で再現することで、誰もが一貫した高品質なコーヒー体験を味わえる未来を描いた。職人技の民主化とも言えるべきこの試みは、食文化とテクノロジーの新しい関係性を切り拓くものである。

これらのプロジェクトに通底するのは、人間中心主義的な発想を超え、機械と自然と人間が調和的に共進化していくビジョンである。クリエイターたちは、最先端のAI技術を縦横無尽に駆使しながら、同時に自然への畏敬の念と、ユーザーへの深い共感を忘れなかった。機械の合理性と人間の感性、そして自然の力動性。それらを統合的に捉え、新しい価値創造につなげるプロジェクトであった。

2023年度末踏IT人材発掘・育成事業

対話可能な選択的機械除草ロボットの開発

— 自給的暮らしを彩る農業ロボット —

子安 竜司（北海道大学 農学院）



言葉による指示



自動で作物列追従

対話可能な選択的機械除草ロボットの開発

子安 竜司（北海道大学 農学院）

1 背景

農業の生産体系は常に時代の技術の影響を受けてきた。あらゆる分野における技術的革新が有機的に結びつくことで農業の生産体系が躍進する。近年注目されているスマート農業は、農用トラクタの自動操舵技術に発端し、センシング技術や深層学習、ロボティクス、ゲノム編集といったあらゆる技術の結晶によって農業の無人化や労働生産性・土地生産性の向上を実現する「夢の技術」である。提案者はこのスマート農業を日本で先導する研究室に所属しているが、この夢の技術に対して現場との連携不足や実用化の難しさといった大きな障壁を痛感してきた。少子高齢化や後継者不足、世界的な人口増加や食糧難に対する解決策の一つがスマート農業であることに疑う余地はない。しかし、その技術の応用の仕方一つで人々の食に対する関わり方、ひいては暮らしの様式や地域の在り方が大きく左右されることもまた自明である。グ

ランドセオリーとして「人々の幸福」を指定したときに、現状のスマート農業研究がどれほどその大前提に則っているのかを推しはかると心許ない。

一方で、技術が未発達であるが故に様々な犠牲が生じると考えることもできる。本プロジェクト立ち上げのトリガーとなったのは、学習済みTransformerモデルの登場と性能の飛躍である。大規模言語モデルによって人とロボットのインターフェイスがより自然になり、農学の知見が誰でも知ることができ、ビジョンAIによってより柔軟なタスクを実行できるようになると考えた。この技術の発達によって創発される新しいスマート農業の在り方とは何か？ どのようにしたらより自然と共生しながら農業を営めるのか？ 我々日本人は農耕民族であるが、これからの時代どのように生きるのが幸福か？ そういった看過されてきた視点を再び取り戻して世界観を描きつつ、ロボットとして実装すること、つまりスマート農業のオルタナティブをノンフィクション・ストーリーとして示すことは極めて意義深い。

2 目的

本プロジェクトでは、ここ1年で進捗速度が滝上がりしているAIの技術を農業ロボットに積極的に取り込むこと、および自然と人間とロボットとの持続可能な共生をテーマにする。まずAI技術に関しては、大規模言語モデル（LLM）やビジョンを含む大規模マルチモーダルモデル（LMM）等の活用である。これらをロボットにどのように応用するかを設計して、実用に耐えうるシステムを開発する。

次に後者に関して、雑草をキーワードに取り上げる。即ち、雑草を全て除草剤で駆除するのではなく、選択的な機械除草をすることを試みたい。これによって環境負荷低減や土壌性改善、生物多様性の向上や食用利用といった価値を生み出す。では、選択的除草をするメカはどのような形態を取るのか？ それはどのようなソフトウェアで実現できるか？ 実際にロボットを開発して農耕民に使ってもらおう中で、自然と人間とロボットが生き生きと共生する未来を描いてみたい。

3. 開発の内容

本プロジェクトでは、対話型の除草ロボット「OHANA-ROBOT」を開発した（図1）。

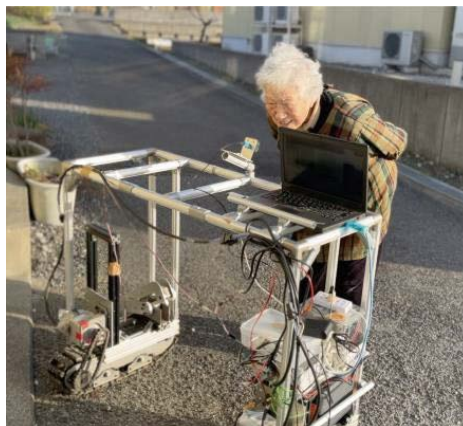


図1：OHANA-ROBOTに言葉で指示を出しているところ

3.1 ハードウェア

小型二輪クローラーを採用し、それをアルミフレームで骨格を作った。その形状は、一列の畝を跨げるように設計しており、幅や高さはフレーム長を変えるだけで柔軟に変更することができる。また、除草ユニットとして3軸マニピュレーターを作成し、エンドエフェクタには芝刈り用のバリカンを改造して取り付けた。これらはホームセンター等で誰でも購入できる部材を用いており、開発手法のドキュメントを作成してオープンソース化した。これによって、誰にとっても開発・修理・カスタマイズ可能なロボットを実現した。このクローラーは多少の段差や傾斜、草藪、小石を走破する能力がある。除草マニピュレーターは畝の形状にフィットするように3自由度になっている。バリカンで畝や地面を除草することができる（図2）。



図2：畝の傾斜に合わせてバリカンで除草しているところ

3.2 ソフトウェア

ロボットの制御や通信にはUbuntu22.04上で動作するROS 2 Humbleを用いている。メインセンサーは単眼カメラで、言語とコントローラーによるロボット操縦を実現した。

3.2.1 言葉による指示

ロボットが実行可能な2つのコマンド“GO_TO()”と“GO_ALONG()”を実装した。ユーザーの言葉をそのコマンドに変換することで、自然言語のインターフェイスでロボットの操縦ができる。故に、子供から爺婆までマニピュレーションが可能である。“GO_TO()”は、引数で指定されたオブジェクトの方へ向かうコマンドである（図3）。これにより、目印まで進んだり人追従したりする機能を実現した。“GO_ALONG()”は道や作物列といった、それに沿って進むためのコマンドである（図4）。OpenAI APIのSpeech-to-TextモデルとLLMを用いてコマンドに変換する。撮影された画像は全てGoogle Cloud Pub/Subを経由してサーバーに送信し、サーバー上で画像処理をしている。画像処理では、基盤モデルを積極的に活用し、物体検出モデル（Grounding DINO）とセグメンテーションモデル（Segment Anything Model）、および深度推定モデル（ZoeDepth）等を利用している。



図3：人追従の様子。「ついてきて」などの指示を出すと、GO_TO("person")というコマンドに変換され、元画像（左）から人の検出・セグメンテーション（中）と深度推定（右）を実行する



図4：作物列追従の様子。「この作物列を進んで」などの指示を出すと、GO_ALONG("crop row")というコマンドに変換され、作物列の検出・セグメンテーションと深度推定を実行する

3.2.2 植物の解説実況

ユーザーはカメラに写った植物の解説をラジオ感覚で聞くことができる。

Pl@ntNet APIを用いて植物種を同定し、OpenAI APIのLLMで解説文を生成し、Text-to-Speechモデルで音声化している。

3.2.3 除草マニピュレータ

ROS 2のMoveit 2を用いた制御をしている。あらかじめ操縦コントローラーのボタンにそれぞれのアームの姿勢を割り振っておき、操縦コントローラーでアームを駆動するようなシステムにした。

4 従来の技術（または機能）との相違

そもそも対象としている農業の体系がスマート農業では扱われなかったものなので、比較の対象になるロボットはないのだが、あえて従来のスマート農業研究や農業ロボットの体系の中に位置付けてみる。ただし、比較対象としてハウス等の屋内で動作するロボットは除外している。

4.1 ハードウェアのカスタマイズ性

個人でも入手・加工可能な部材を用いてオープンソースにしたことで、誰でも制作可能なロボットになっている。個人でも修理できるため、耐久性が多少低くても問題ない。従来の農業ロボットは故障したら半年修理待ちや買い替えのような事態になるために耐久性が重要視されているが、本ロボットは修復可能性を高めることでこれを解決した。また、これは除草ロボットという体裁をとっておきながらも、カゴを付けて運搬ロボットに変化したり、老婆のシルバーカートに変化したり、スピーカーやライトをつけて場を盛り上げるメディアに変化したりと、

カスタマイズ性に富んだ設計になっている。専用の機能がない代わりに、汎用的に使える農業ロボットというコンセプトを実現した。

4.2 自律性

従来の農業ロボットは、RTK-GNSSとIMUのセンサーフュージョンによる自動操舵が一般的である。しかし、基地局のインフラに依存することやFix解が得られない状況下がある場合は利用できない。LiDARやカメラ等のビジョンセンサーを用いたSLAM等による自律移動や、GNSSとカメラ等のセンサーフュージョンによる自律移動の研究も盛んであるが、どちらも研究段階にとどまっている印象が強い。本プロジェクトでは、発想の転換を行なって、自律性を犠牲にする代わりに人間との距離が近いロボットを目指した。作物列を追従しながら除草するのは自動でできるが、圃場までの移動は人間が操縦するか人間を追従する、ということにしている。人間追従だけでなく、基盤モデルで検出できる物体や動物なら何でも追従できる点が特長だ。

4.3 対話可能性

LLMを農業ロボットに応用した研究例は極めて少ない。対して室内のロボットではここ1年で数多の研究例が報告されており、本プロジェクトでも積極的に取り入れるよう工夫した。言葉による指示を可能にしたことで、人間とロボットとの距離が近くなった。植物の解説をすることで人間と自然の距離も近くなった。

4.4 選択的機械除草

機械的な除草としてはホーやタインといった除草機や中耕除草機などが一般的である。選択的な除草としては、雑草を検知してピンポイントで除草剤を噴霧したり、レーザーを照射したりという方法が商用レベルの方法で確立されている。小規模の農家の間でよく用いられる芝刈りバリカンを選択し、畝の形状にフィットした角度に調整するような3軸アームを搭載している。雑草との共生を目指すべく、このような一つの生産体系を作る試みをしている。

5 期待される効果

スマート農業や大規模効率化していく農業が主流の中で、それとは対極にある自然派の農業や自給的農業に、最先端の情報技術を活用した知能的な道具を開発した。特に、LLMやLVM等のモデルを積極的に活用することを試みた。従来のスマート農業研究では、研究機関が限定的な種類の大規模なデータセットを構築することで、特定の地域・作物における特定の種類の雑草検出器モデルを開発するのが主流であった。そうではなくて、基盤モデルを下流タスクに適用することで、現場の人が自身の環境に合う形でカスタマイズすることができる。従来のスマート農業の恩恵を受けられないような農業形態に良い影響を与えられる可能性がある。スマート農業研究のオルタナティブを示すことで、その研究の発展にも寄与するだろう。

6 普及（または活用）の見通し

自分が第一の利用者である。今年は実験するための畑を見つけて、その地域のコミュニティに入り、OHANA-ROBOTあるライフスタイルを送り、それを発信する。そのような人が今後3

年で5人くらいに増えれば面白い。各人は、それぞれの地域において自給的暮らしをOHANA-ROBOTとともに過ごす。このライフスタイルはパトロン制度によって成立し、パトロンは収穫体験等の恩恵を受けることができる。OHANA-ROBOTのある自給的暮らしを営むコミュニティは、農家、エンジニアにとどまらず、地元の人や古民家、シェフといった人が関わっており、地方の活性化にもつながる。

関連URL

OHANA-ROBOTのホームページ

<https://ryujikoyasu.github.io/ohana-robot/>

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトの採択にあたっては、クリエイターがライフワークとして取り組めるかを最も重視した。今回選んだ2つのプロジェクトは、いずれもこの理念に合致するものだった。選択的除草ロボット「OHANA-ROBOT」は、AIと農業の融合によって、自然と共生する新しい営農モデルを提案するものである。単なる効率化ではなく、生物多様性の維持や、人間と自然との豊かな関わり合いを重視する点に、深い哲学を感じた。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、先端のAI・ロボティクス技術を農業分野の課題解決に開発者である子安氏本人が参与観察しながら適用し、新たな価値を創出した点で高く評価できる。単なる除草の自動化にとどまらず、農家とロボットの共生を通じて、持続可能な農業の実現を目指す姿勢は、未踏事業の理念とも合致するものであった。特に、LLMを活用した対話システムは、ロボットを「道具」から「パートナー」へと昇華させるアプローチだと言える。柔軟なタスク指示や、状況に応じた細やかなすり合わせを可能にする点で、その開発プロセスは手作りの外観とは裏腹に従来のロボットを上回る可能性を秘めている。またハードウェア面でも、徹底したオープン化・モジュール化を進めた点は特筆に値する。開発プロセスにおいては、未踏ならではのスピード感とダイナミズムを持ちつつ、それを確実に成果に結び付けていく実行力は、子安氏の大きな強みだと言える。加えて、積極的なコミュニティとのインタラクションを通じて、常にユーザー視点に立った開発を心がける姿勢も印象的だった。

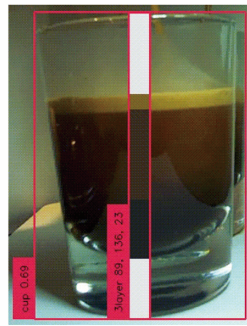
2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

岡田 拓真(立命館大学)

乳化量最大化を目指したエスプレッソ抽出制御システムの開発
マシンを制御し質を評価するシステム“Connoisseur.”

エスプレッソマシン自動制御ソフトConnoisseur.の特長

- ◆ 緻密な制御: Connoisseurは、精密温度制御・自動ポンプ制御によって、抽出条件を精密に制御することで、エスプレッソの品質を一貫させます。
- ◆ 泡の評価: 泡の量の数値化に成功。泡の量の変動の有意差の確認にも成功。



乳化量最大化を目指した エスプレッソ抽出制御システムの開発

岡田 拓真 (立命館大学)

1 背景

エスプレッソの抽出は特定の圧力と温度を用いて短時間で行われるものである。この方法により、コーヒーから濃厚な風味を引き出すことができるが、温度や圧力の微妙な変化によって品質が大きく左右される問題が存在する。家庭用エスプレッソマシンは多くの場合、アナログ制御により温度の一貫性が確保できず、その結果として品質にばらつきが生じる。一方で、業務用マシンでは温度設定は可能であるものの、実際にどのような温度で抽出されているかを知る手段がない。これらの課題は、エスプレッソの品質を向上させること、そしてバリスタの技術を向上させることによって大きな障害となっている。

2 目的

本プロジェクトでは、エスプレッソマシンの精密な制御と、抽出品質の客観的な評価を可能にするソフトウェアを開発することを目的としている。このソフトウェアによって、エスプレッソの抽出温度をリアルタイムで監視・制御し、抽出されたエスプレッソの品質を画像解析によって評価することができるようになる。このようなアプローチにより、バリスタは抽出プロセスをより細かく制御し、一貫した高品質なエスプレッソを提供できるようになる。また、この技術は家庭用と業務用の両方のエスプレッソマシンに適用可能であり、エスプレッソの品質向上とバリスタの能力拡張の両方に寄与する。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、エスプレッソマシンの完全自動制御とエスプレッソの品質評価をコンピュータによって行うシステム「Connoisseur.」を開発した。機能面では、精密な温度制御、自動ポンプ操作、直感的な情報表示、スタンドアローンでの運用、泡の量を分析する機能を実装した。

結果として、自作の基板を使用した制御システムを構築し、抽出温度と乳化量の制御において顕著な改善を実現した。さらに、システムを利用して温度を変更することで、エスプレッソの風味を一貫して変化させることに成功した。

本プロジェクトで開発したものは以下の3つである。システムの概略図を図1に示す。

- ・自動制御ソフトウェア
- ・ハードウェアと制御基板
- ・乳化量解析システム

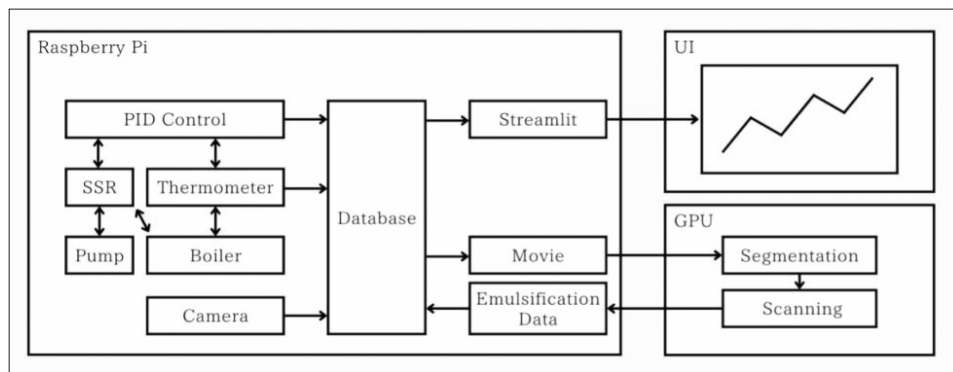


図1：システム概略図

3.1 自動制御ソフトウェア

Raspberry PiとStreamlitを用いた自動制御ソフトウェア（図2）には抽出状況の可視化や設定値の変更の機能がある。また、本体に取り付けたディスプレイだけでなくブラウザからその情報を閲覧することが可能である。

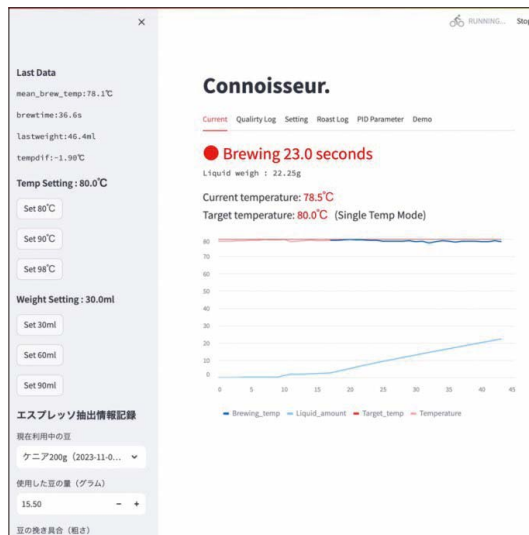


図2：自動制御ソフトウェア

3.2 ハードウェアと制御基板

Rancilio社Silviaというシングルボイラーマシン（図3）に半導体スイッチング素子を接続し、ヒーターとポンプを制御している。また、抽出状況の可視化のため、重量計、カメラ、温度計を使用している。そして、それらを制御する基板（図4）を作成した。



図3：ハードウェア



図4：作成した基板

3.3 乳化量解析システム

Webアプリケーションを通して乳化量を解析することができるシステムを開発した。自動制御ソフトウェアのボタンを押すことで、抽出したエスプレッソの動画を外部サーバーへ送信し、処理した動画を受け取ることができる（図5）。

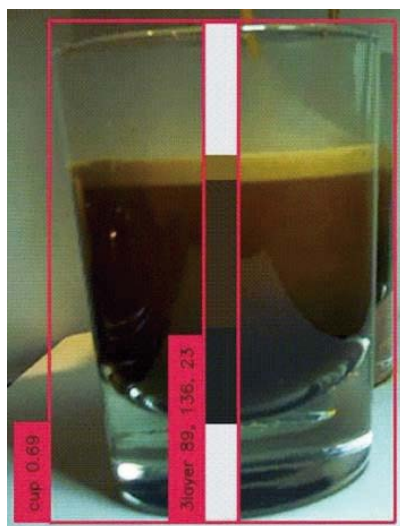


図5：乳化量の解析システム

4 従来の技術（または機能）との相違

Connoisseur. は、エスプレッソマシンの自動制御と品質評価の分野において、類似のソフトウェアと比較して評価と拡張性の面での新規性と優位性を持っている。これらの特徴により、Connoisseur. は従来の技術や機能と比較して、エスプレッソの抽出と品質管理における新たなスタンダードを提供する。その結果、エスプレッソマシンの使用経験を大きく向上させ、コーヒー産業における品質と効率の新たな基準を設定することが期待される。

4.1 画像解析による品質評価

Connoisseur. は、抽出されたエスプレッソの画像を分析し、泡の量を基に品質を評価する機能を持つ。これまでの製品では見られなかった、泡の量の変動を統計的に有意な差を持って捉えることが可能であるため、エスプレッソの品質を新たなレベルで客観的に評価することができる。

4.2 Raspberry Piを使用した拡張性と接続性

Connoisseur. はRaspberry Piを利用して開発されており、これによりセンサーの拡張やクラウド接続、API連携が容易になる。これは、ユーザーがシステムをカスタマイズしやすくし、さらにはデータをリアルタイムで分析・共有することを可能にする。

5 期待される効果

Connoisseur. によって、エスプレッソの抽出と評価に関わる複数の分野において、以下の様な効果が期待される。

・バリスタの作業の数値化

バリスタは抽出条件を数値データとしてリアルタイムにモニタリングし、調整することが可

能になる。これにより、抽出過程の精密な制御が可能となり、一貫して高品質なエスプレッソを提供できるようになることが期待される。

・品質評価機能による安定性

抽出されたエスプレッソの品質を画像解析によって客観的に評価する機能は、製品の品質を安定させる上で重要な役割を果たす。これにより、バリスタの技術に依存することなく、一定の品質基準を満たすエスプレッソの提供が可能になる。

・コーヒーマシン業界のスマート化

Connoisseur.の導入は、エスプレッソマシンにおけるスマート技術の利用を加速する。センサーの拡張やクラウド接続、データの共有と分析により、業界全体の技術革新が促進されることが予測される。

・バリスタ技能の普及

バリスタの高度な技術が一般化され、より多くの人が高品質なコーヒー体験を享受できるようになる。バリスタに必要な技能の敷居が低くなることで、コーヒー文化の裾野が広がることが期待される。

・データ科学および機械学習分野の活性化

エスプレッソの抽出データと品質評価データの収集・分析により、コーヒー抽出の最適化、品質予測モデルの開発、個人の好みに合わせたカスタマイズ推薦など、データ科学と機械学習の応用が進む。これにより、消費者一人ひとりに最適なコーヒー体験の提供が可能になることが期待される。

以上のように、Connoisseur.の開発によってもたらされる効果は、バリスタの作業の数値化、品質の安定化、業界のスマート化、バリスタ技能の普及、データ科学および機械学習分野の活性化に及び、これらの変化はエスプレッソの提供方法および消費者体験に革命をもたらすことが期待される。

6 普及（または活用）の見通し

・事業者向け提供

Connoisseur.は、高品質なコーヒー豆とセットでカフェやレストランなどの事業者へ提供される予定である。これにより、事業者は継続的に高品質なエスプレッソを提供できるようになり、顧客満足度の向上とリピーターの増加が見込まれる。

・消費者向け販売

家庭用市場においては、オンライン通販を通じてConnoisseur.を消費者に販売する計画である。簡単な操作性と低コストでの導入可能性が、家庭用エスプレッソマシン市場における新たな選択肢として注目されることが期待される。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトの採択にあたっては、クリエイターがライフワークとして取り組めるかを最も重視した。今回選んだ2つのプロジェクトは、いずれもこの理念に合致するものだった。エスプレッソ抽出制御システム「Connoisseur」は、匠の技をデジタル技術で再現することで、食文化とテクノロジーの新しい関係性を切り拓く野心的な試みである。当人が中学生からエスプレッソマシンにのめり込んでいったという人生経験は付け焼き刃では成立し得ないものであると考える。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、職人技の可視化と再現という、一般的な飲食IT化プロジェクトの共通課題に正面から挑んだ意欲作だと言える。エスプレッソ抽出という一見ニッチな領域ながら、そこから導き出される知見は、他の様々な分野への応用可能性を秘めている。エスプレッソの品質を定量的に議論できるようになるのみならず、品質改善のサイクルを素早く回せるようになるだろう。加えて、抽出プロセスの可視化は、バリスタの教育や、消費者とのコミュニケーションにも大きく役立つと期待される。

開発手法においては、ユーザー参加型のアプローチを採用した点が印象的であった。実際のバリスタの意見を積極的に取り入れ、そこから得られた知見をモデル構築にフィードバックする。そうした現場密着型の姿勢は、システムの実用性を大きく高めたのではないかと推察する。クリエイター自身がバリスタとしての経験を持っていた点も、生きた知見の吸い上げに役立ったものと思われる。

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。

曾川は未踏IT人材発掘・育成事業（以下、未踏IT）に、2023年度からプロジェクトマネージャー（以下、PM）として落合PMと共に就任した。未踏ITはIT周辺分野の卓越した人材・才能を発掘し育成することを目的とする。曾川自身も未踏クリエイタとして採択された経験を持ち、未踏を通じて出会った仲間と共にプロダクトや会社を作る機会に恵まれた。多様な才能を発掘し、支援、育成することで、未踏コミュニティが継続的に社会により良い影響を与えていくことを目指している。

以下のようなプロジェクトやクリエイタを採択したいと考えている。

- 社会の課題を解決したり、新しい社会のあり方を提案したりするような、大きなビジョンを持って目の前にある課題の解決から始めるような提案。
- 自分自身のやりたいことを叶える提案が誰かのやりたいことを叶えてくれる提案。
- 時代を捉えたテーマを扱うもの。循環型社会、Climate Tech、D&I、Web3。
- 何の課題も解決しないし、何の役にたつかわからない、それでもクリエイタが情熱を持ち、熱中し、熱狂するような熱い提案。

今回、採択したプロジェクトは「Wasmを実行するunikernelとWasmコンパイラー」「生成AIを使った制作システムで実現する循環型プラットフォーム」の2つである。いずれのプロジェクトについても非常に面白い成果を残すことができ、その後もプロジェクトをさらに発展させるべく活動中である。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

Wasmを実行するunikernelとWasmコンパイラ ー クラウド上でのWasmの実行を最適化 ー

上田 蒼一郎(京都大学)
野崎 愛 (東京大学大学院)

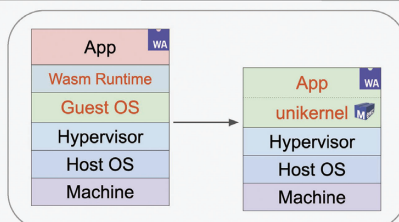
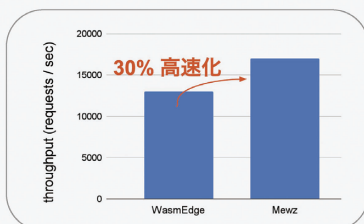


Mewz

Wasmの実行に特化したunikernel

<https://github.com/mewz-project/mewz>

MewzはWasmの実行に特化したOSです。
Mewzは**単一のWasmアプリケーションのみ**を
実行する**unikernel**という設計方式を取っていま
す。これによりMewzが持つ**機能を最低限に絞り**
パフォーマンスを向上させています。



Mewzはクラウド上でWasmを実行する際に、
セキュリティのために必要な仮想マシンによる
隔離性を維持しつつ、**高パフォーマンス**に
Wasmを実行することを目的に開発されました。

Wasmを実行する unikernelとWasmコンパイラ

上田 蒼一郎 (京都大学 工学部 情報学科)

野崎 愛 (東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻)

1 背景

1.1 WebAssembly (Wasm)

WebAssembly (Wasm) とはWebブラウザ上で実行可能な仮想命令セットである。従来ブラウザ上で実行されるプログラムにはJavaScriptがデファクトスタンダードとして用いられてきた。しかしJavaScriptにはパフォーマンス上の問題があったため、より高速な実行形態を求めてWasmが開発された。近年ではWasmの実行環境はブラウザにとどまらず、各種OS上で直接実行するランタイムが登場している。Wasmの様々なプログラミング言語からコンパイル可能で、CPUやOSに依存しないポータブルなバイナリー形式であるといった特徴を持ち、応用範囲はIoTやサーバーレスコンピューティングなど多岐にわたる。

1.2 コンテナの代替としてのWasm

Wasmはコンテナに代わる次のアプリケーションの実行環境として期待されている。図1に仮想化技術とその管理単位の変遷を示す。まず以前から仮想化技術として広く使われていたのは仮想マシンである。仮想マシンとはハイパーバイザというソフトウェアによってエミュレートされる仮想的なコンピューターである。アプリケーション毎に仮想マシン上でゲストOSを動作させ、その上でライブラリーやアプリケーションを実行する。続いて現代のアプリケーション開発の場で広く用いられているのがコンテナである。コンテナではホスト上のファイルシステムやネットワークなどのリソースを名前空間ごとに隔離することで仮想化を実現する。各コンテナはホストカーネルを共有したままライブラリーやアプリケーションのみを隔離するため、ゲストOSが必要な仮想マシンよりも軽量である。しかしコンテナの中には実行するアプリケーションの他に、依存するライブラリーや言語ランタイムといった多くのソフトウェアが含まれている。

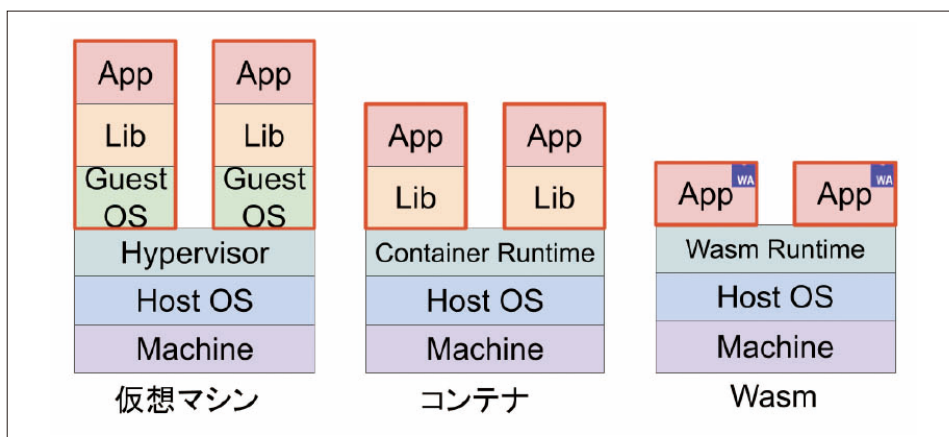


図1: 仮想マシン、コンテナ、Wasmの仮想化技術とその管理単位

一方Wasmでは、図1 (右図) に示すように、アプリケーションは単一のスタンドアロンなWasmバイナリーにビルドされる。この生成されたWasmバイナリーはWasmランタイムさえあれば他のライブラリー等を必要とせずそのまま実行できる。つまりWasmバイナリーにはそのソフトウェアが実行されるのに必要十分なコードが含まれている。そのためWasmはコンテナと比較してライブラリーなどの依存ソフトウェアがない分、軽量であると言える。

1.3 unikernel

unikernelは軽量のカーネルの構成方法の一種である。unikernelでは単一のアプリケーションがビルド時にカーネルと静的にリンクされ、1つのカーネルイメージにまとめられる。よってunikernel上では1つのアプリケーションのみ実行し、カーネルもアプリケーションも単一のアドレス空間でカーネルモードで動作する。汎用性を重視したLinuxやWindowsなどの一般的なOSと比較して、unikernelはコードサイズやメモリーフットプリントの小ささ、常にカーネルモードで動作することによる実行速度の向上、起動時間が短いといった利点を持つ。

2 目的

1.2節ではWasmの軽量性について述べたが、パブリッククラウド上ではこの軽量性について課題がある。それは、パブリッククラウド上では隔離性のためWasmを仮想マシン上で実行しなければならないことである。パブリッククラウド上では多くのユーザーがクラウドベンダーの用意したデータセンター上でワークロードを実行するが、ユーザー間の干渉を防止するためにそれぞれのワークロードを十分に隔離しなければならない。多くのクラウドベンダーでは、ハイパーバイザを用いて仮想マシンとして計算リソースを分離することでこれを実現している。そのため、Wasmをパブリッククラウド上で実行する際には、図1とは異なり、仮想マシン上で実行する必要がある。しかしこのような状況では、1.2節で述べた軽量性とは裏腹に、仮想マシンのレイヤーまで含めた実行環境全体は軽量ではなくなる。そのため実行環境の大きさゆえに性能のオーバーヘッドが発生するという問題がある。

本プロジェクトはパブリッククラウド上で仮想マシンによる隔離性を維持したまま、実行環境のオーバーヘッドを削減してWasmを実行することを目的とする。

3 開発の内容

本プロジェクトではWasmの実行に特化したunikernel「Mewz」を開発した。従来サーバー上でWasmを実行する際には、図2（左図）のように、Linuxなどの汎用的なOSの上でWasmランタイムを動作させることでWasmを実行していた。一方でMewzはunikernelであるため、図2（右図）のようにカーネルの内部でWasmが実行される。またMewzにはLinuxなどの汎用的なカーネルとは異なりWasmを実行するのに最低限の機能しか持たない。そのためMewzによってWasmをunikernelとして仮想マシン上で動かすことで、ゲストカーネルのオーバーヘッドを削減することができる。このようにして2節で述べた、仮想マシン上でWasmを動かす際のオーバーヘッドを削減する。

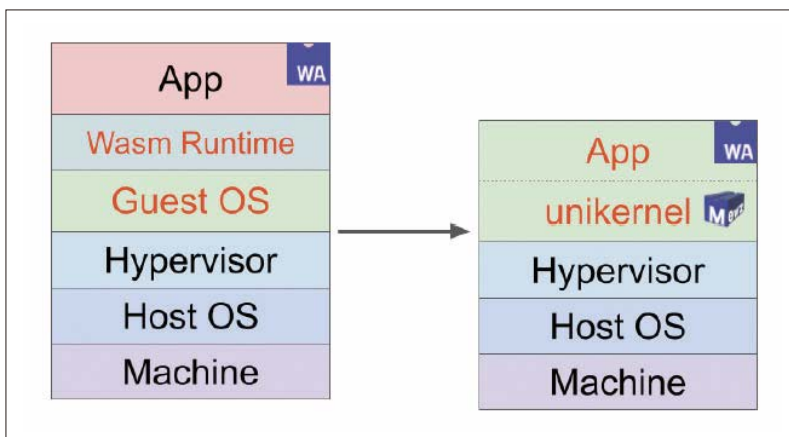


図2：仮想マシン上でWasmを実行するアーキテクチャーの比較

またMewz上でWasmを実行するために、Wasmバイナリーをターゲットマシン上のネイティブコードに変換するAoT (Ahead-of-Time) コンパイラー「Wasker」を開発した。Waskerは1つのWasmバイナリーから1つのオブジェクトファイルを出力する。この際、Wasmから

呼び出されている WASI (WebAssembly System Interface) の関数を未解決シンボルにそのままにしておく。WASI とは Wasm にシステムのリソースを提供する API の仕様であり、Wasm におけるシステムコールのような役割を持つものである。こうすることによって、図3に示すように Mewz が提供する WASI の関数と Wasm からの WASI の関数への呼び出しをリンク時に結びつけることができる。

さらに、Kubernetes などのコンテナ管理ソフトウェアで Mewz を管理することを可能にするソフトウェア「containerd-shim-mewz」を開発した。

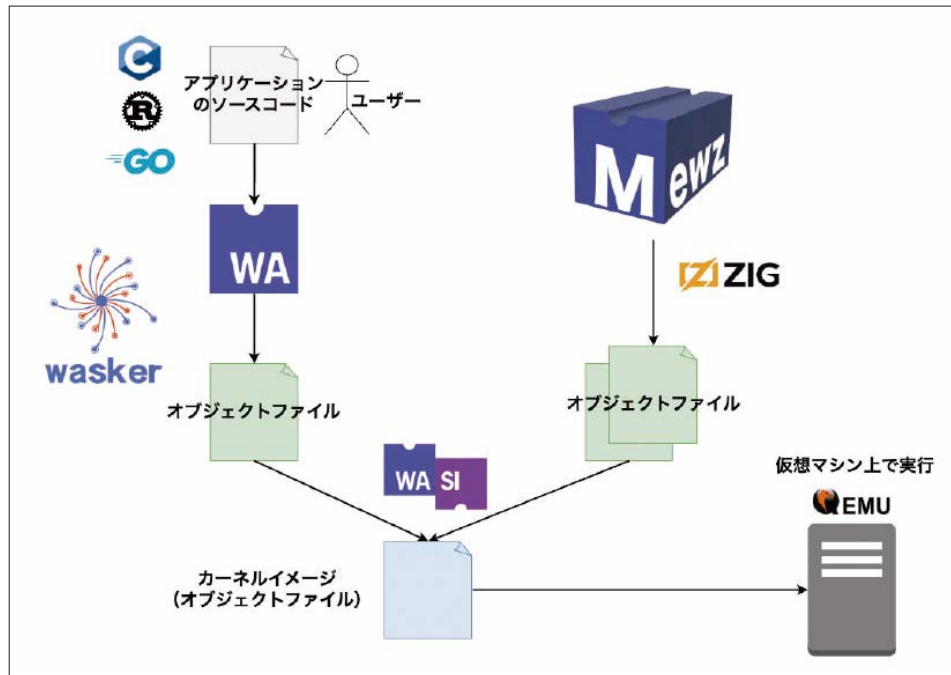


図3：MewzとWaskerが動作する様子

4 従来の技術との相違

既存のWasmランタイムの多くは、Linuxなどの汎用的なカーネル上でユーザープロセスとして動作する。そのためWASIを呼び出す度にシステムコールを発行し、カーネルモードからユーザーモードへの切り替えが発生する。一方、Mewzは常にカーネルモードで動作するため、WASIの実行は関数呼び出しという形で呼び出され、その際に大きなオーバーヘッドは発生しない。実際にWasmEdgeという既存のWasmランタイムを仮想マシン上で実行する場合との比較を行い、静的ファイル配信のワークロードにおいて、Mewzは約30%のスループットの向上を確認した。

既存のunikernelは互換性と軽量さのトレードオフがある。アプリケーションに対して独自のAPIを提供するunikernelは、互換性のためのレイヤーを削減できるが、アプリケーションの移植性が低い。一方Linuxなどとの互換を提供するunikernelは、300以上のシステムコールや標準Cライブラリーとの互換を保つための実装が必要であり、unikernelの利点である軽

量さが損なわれる。MewzではWASIをカーネルインターフェイスとして採用しているため、Linuxのシステムコールよりも少ないWASIを実装することで、アプリケーションに対してWASIという仕様で定められた互換性の提供が可能である。

■ 5 期待される効果

Mewzは隔離性を維持しつつ高パフォーマンスにWasmを実行することができる。パブリッククラウドなど隔離性が求められる場所でWasmを実行する需要は今後も高まると考えられ、Mewzはその実行基盤として一つの選択肢となることが期待される。

Waskerの仕組みはMewzのみならず任意のOS上でWasmを実行することを可能にする。WaskerによってWASI互換なOSの開発が容易になるため、カーネルインターフェイスとしてWASIが普及することへの貢献が期待される。

■ 6 普及の見通し

本プロジェクトの成果をカンファレンスや論文での発表を通じてWasmコミュニティに発信し、Wasmという技術全体の発展に貢献する。また、これらの活動を通して新たなユーザーやコントリビューターを獲得し、OSSプロジェクトとして発展させていく。

関連URL

Mewzのソースコード：<https://github.com/mewz-project/mewz>

Waskerのソースコード：<https://github.com/mewz-project/wasker>

PMの評価

採択時の評価

本提案はWasm（WebAssembly）の実行に特化したunikernelと、独自のWASI（WebAssembly System Interface）実装をWasmバイナリーに挿入できるWasmコンパイラーを開発するものである。これにより、PaaSプラットフォームやサーバーレスコンピューティングでの活用の可能性やFunctional as a Serviceなどのクラウドコンピューティングに新しい実装形態をもたらす可能性がある点を評価した。コンテナレイヤーにおけるLinuxカーネル依存からの脱却、あるいはLinuxカーネルへの依存度の低いプログラムをLinuxカーネル上で実行することのオーバーヘッドの削減する可能性がある。

さらに具体的な成果物以外にももう一つの重要な成果が生まれると考える。本提案の実装を通じてシステムインターフェイスの標準化にも貢献できる可能性もある。

プロジェクト終了時の評価

unikernelにWasmを組み合わせる大胆な構想の提案を、外部公開できるレベルでアウトプットを達成した。加えてグローバルなコミュニティに対してもリーチアウトを行い、認知を得ることに成功した。作るものが非常に多かったが2人のチームワークでぎりぎり間に合わせることができたことも良かった。

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

加藤優 森口 椋太 木付 碧

生成AIを使った制作システムで実現する循環型プラットフォーム — 全ての人がリメイクを楽しめる制作システムの実現 —



概要

最終的なデザインのイメージがなくても
パズルのように制作ができる
リメイクデザインシステム

本プロジェクトの特徴

アルゴリズムによる服の再構築によるデザイン生成
とイメージが湧きづらいリメイクデザインの
3Dシミュレーションを表示

生成AIを使った制作システムで実現する 循環型プラットフォーム

加藤 優（フリーランス）

森口 椋太（東京大学 理学系研究科 物理学専攻／株式会社a.s.ist 代表取締役）

木付 碧（千葉大学 大学院融合理工学府創成工学専攻 建築学コース）

1 背景

近年、廃棄物問題は世界的な社会問題として注目されている。多くのブランドがリメイク製品や再生可能素材を用いた製品開発に力を入れており、個人でリメイク製品を作る人もいる。これらの取り組みは年々増加しているものの、まだ普及しておらず広範な社会問題の解決には至っていない。現状のリメイク製品の魅力は、一点物や少量生産による希少性と意外性に加えて元々の素材の特徴が一部継承されるという点にある。しかし、これらの製品のデザインには独創的なアイデアと素材に関する深い知識が必要となる。結果として、リメイク製品の制作ができる企業や人は限られている。ファストファッションのような従来の消費行動を変え、全ての人がリメイクを楽しむためには、誰もがリメイク製品を制作できるようなシステムが必要である。

2 目的

本プロジェクトは、服のリメイクデザイン制作システムと循環型プラットフォームの開発を目的としている。このシステムを通じて、非デザイナーでも独自のデザインを作成することを可能にする。本プラットフォームでは、廃棄予定の素材や他のユーザーのリメイクで発生した残布を利用して、ユーザーが自分好みのリメイクデザインを制作できるようにする。制作されたデザインに関連する廃材や他のユーザーから提供される素材を循環させることで、ユーザーと環境の両方に価値を創出する。このシステムとプラットフォームの普及により、新しいデザインを楽しむという従来の消費の楽しさを保ちながら、大量生産・大量消費を減らし、環境問題や廃棄物問題の解決に寄与することを目指している。ユーザーは、自分の好きなデザインを廃棄予定の素材から制作する楽しさを通じて、無意識のうちに廃棄問題の解決に貢献することができる世界を目指す。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、プラットフォームに必要な服のリメイクデザイン制作システムの開発を行った。システムは、以下の3つの機能を持つ。

- ・洋服のパーツを用いたデザイン制作
- ・リメイクに使用するパーツ検索
- ・デザインの3D縫製シミュレーション

これらシステムの全体の流れは図1のようになる。

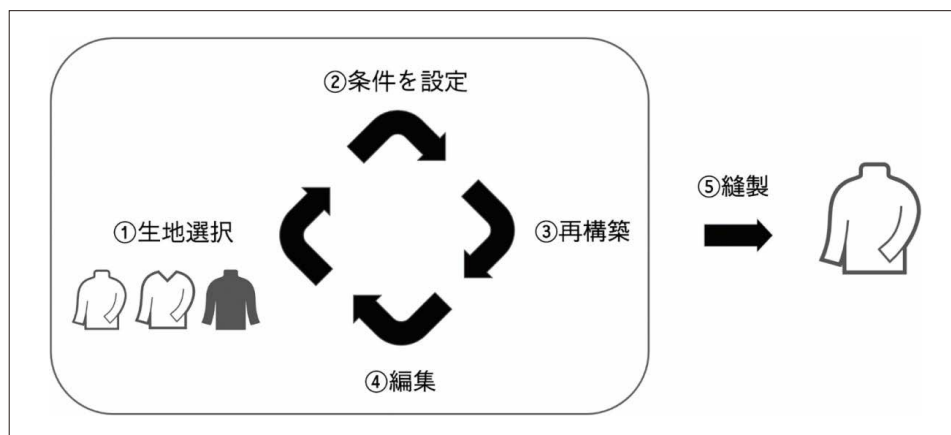


図1：システム全体の流れの概念図

本システムでは、ユーザーは図1の①「生地選択」と②「条件を設定」という項目によって使用するパーツ検索の条件を設定し、③「再構築」という項目で数値最適化によってデザインを制作する。④「編集」の部分でデザインの微修正と縫製シミュレーションによるデザインの確認を行う。

システムでは、ユーザーは図1の①生地選択、②条件を設定という項目によって使用するパーツ検索の条件を設定し、③再構築という項目で数値最適化によってデザインを制作する。④編集の部分でデザインの微修正と縫製シミュレーションによるデザインの確認を行う。

①では、ユーザーがリメイクに使用する服を一つ選択した後、(円)で追加する生地 conditions として、配色パターンと追加パーツ数を選択する。そして、最後にそれらのパーツを用いて制作する服を決める。ここで、選択された色に基づいて生地検索アルゴリズムが自動でその色の生地をデータベースから使用パーツ数だけ検索し、追加する。③では、②でユーザーが決定した「制作する服」の形状になるようにパーツの配置を最適化する。

ユーザーは、図2に示す本システムの画面の左側で、最適化のプレビューを確認することができる。

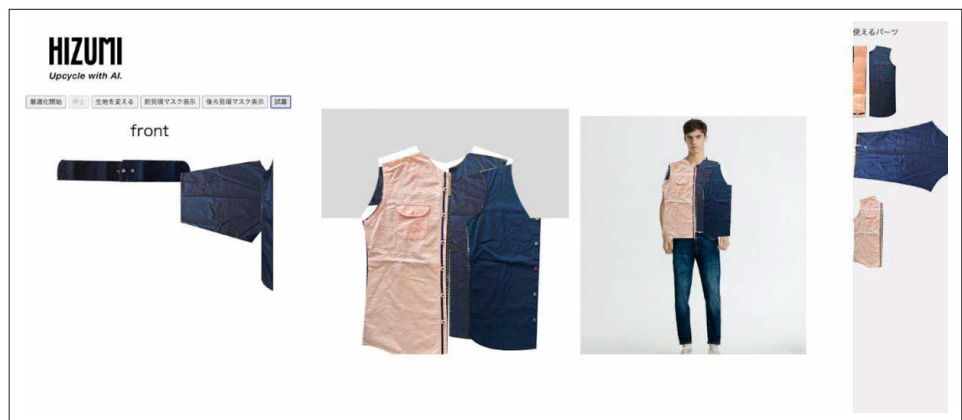


図2：パーツの配置最適化とデザインの微修正を行う画面

図2の画面（右）はデザインのプレビュー画面で、ユーザーはパーツの位置をずらしたり、ドラッグ&ドロップでパーツを追加したりすることで(水)のデザインの編集を行う。デザインの編集後に、ユーザーは縫製シミュレーションで最終的なシルエットを図3のように3Dデータで確認する。



図3：デザインに基づいた3Dシミュレーション画像と実際のリメイク服の画像

4 従来の技術との相違

本プラットフォームは、以下の2つの観点でこれまでのソフトウェアとは異なる。

- ・既存の服と紐づいたデザイン制作
- ・非ファッションデザイナーでも扱いやすいフロー

ファッション分野の生成AIによるデザイン制作という観点では、現在はMidjourneyやStable Diffusionなどの画像生成モデルを用いた事例が多い。これらは、ファッションブランドの新たな製品のデザインを考える際には使用できるが、リメイクデザインのような素材が決定されている状態での制作に使用するのには難しい。さらに、画像生成モデルによってリメイクデザインが制作できたとしても縫製に関する情報はないためデザイン画の域を出ず、型紙の作成などで多くの人の手を介在させる必要がある。一方で我々のシステムでは、パーツの位置などをデータとして保持しているため、ある程度縫製の工数を減らすことが可能である。

加えて、洋服の3D CADツールとしてCLO 3Dなどがあるが、デザイナー向けツールであり非ファッションデザイナーには扱いづらい。我々のシステムは、条件を選択して数値最適化によりデザインを制作した後、ドラッグ&ドロップなどのマウス操作で修正を行うというシンプルな構造になっている。そのため、非ファッションデザイナーでも扱えて好きなデザインを制作することができる。

5 期待される効果

本プロジェクトのリメイクデザイン制作システムによって、既にある服を素材として再利用する循環型プラットフォームの実現が近づいたと考える。我々のプラットフォームが実現されれば、主に以下の2つの効果が期待される。

1. 衣服の購入体験が根本的に変わる
2. 誰もが作り手になることで、サーキュラーエコノミーが実現

1つ目の効果について、現在の衣服購入の選択肢は主に新品と中古が存在する。我々が提案する既存の服を再びデザインして購入するという選択肢は、従来の選択肢とは異なり、自分の欲しい服を自分の服や他者の服を組み合わせ作り購入することである（図4）。

2つ目の効果について、我々の提案するシステムでは、ユーザー一人ひとりが好みのデザインを制作する際に、本プラットフォーム上にあるユーザーの服や他のユーザーの使わなくなった服、余った生地などが新たな服の素材となる。これにより、ゴミがゴミではなくなる。我々のプラットフォームが実現されれば、あらゆる廃材がゴミとしてではなく素材として扱われるサーキュラーエコノミーが実現される。それに加えて、ユーザー一人ひとりの好みの探求も行えることから、ユーザーと環境の双方に価値をもたらすプラットフォームになることが期待される。

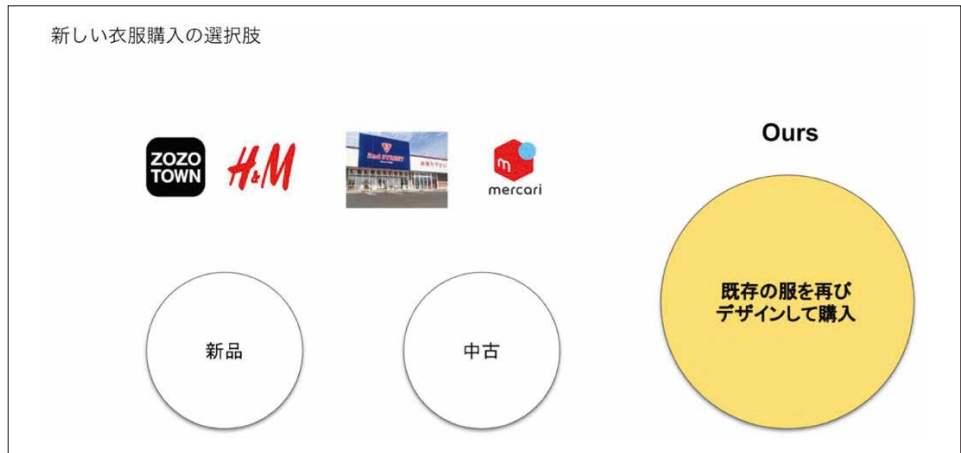


図4：衣服購入の選択肢の図

6 普及の見通し

後は実際にユーザーの服と企業から廃棄される服を使用した小規模のワークショップなどを行い、そこでシステムの検証と改善を行う予定である。

PMの評価

採択時の評価

本提案は、生成AIを使った服のデザイン制作アシスタントシステムと循環型プラットフォームを開発するものである。ファッションの世界では、大量生産と大量廃棄という社会的に大きな問題を挑戦する提案であることを評価した。ファッション業界は環境負荷が高いのはもちろんだが、安い労働力を求めてグローバル資本による人権の侵害が行われるなど複数の倫理的な課題を抱えている。本提案では、生成AIを活用することで既存の衣服から新しいデザインを作り出し、さらにプラットフォームを通じて消費者と製造者が力を合わせて、限りある資源を大切に活用する世界の実現を目指すものである。

またフリマアプリなどを通じたりサイクルにも限界があり、全ての衣類を有効に活用できている状態には至っていない。もちろん本提案のみで全ての問題は解決することは難しく、ロジスティックスやスケールにも課題が多いと考える。しかし、手元にある衣類を少しでも長く使い、また楽しむためにアップサイクルの実現を目指すという野望は挑戦してみる価値がある。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトが素晴らしかった点は、最初の方針にとらわれず何度も方針を変更して、その度に新しいアイデアを試し続けたことである。使用する技術は生成AIから始まり、テキストベース、画像ベース、それらを組み合わせたものと、次々と形を変えていった。最終的には数理最適化を使ったもので成果報告会を迎えたが、試したアイデアは今後の服作りに生かせる引き出しになっていると思う。

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

未踏の良いところ

未踏の良いところはどんなところか、クリエイターたちに聞きました。

●深く考え、問い直す機会

自分が作っているものが世界にどう影響を与えるのか、世界でどういうものが求められているのかということについて深く考える機会になったのが良かった。

合同ミーティングや全体ミーティングの度に「自分たちの開発によって今の世の中に存在するどのような問題を解決したいのか」というのを問い直すこととなった。後から思うとこの試行錯誤を繰り返したことがプロジェクトを前進させる一番の原動力だった。

●未踏コミュニティの存在

多くの先輩たちが形作る未踏コミュニティの素晴らしさを身をもって感じる事ができた。今後は、このコミュニティを作る側として貢献したいという気持ちが強まった。

特にブースト会議と八合目会議を通じて、異なる分野の専門家の方から自分のプロジェクトにアドバイスをいただけたのが非常に良かった。素晴らしい成果を上げている未踏修了生と気軽に交流することができ、ざっくばらんにプロジェクトや技術の話はもちろん、キャリアの相談など個人的な話もさせてもらえたのはとても貴重な時間だった。

コミュニティとして最高の居場所だと感じている。やりたいことに全力で向き合えるかつそれを全力で応援してくれるコミュニティはなかなかないと思う。

未踏という後ろ盾があったことで、より多くの分野の方と議論できたり発表の場をいただいたりと、得られる機会が多かったと感じる。

未踏事業を通して最も価値があったのは、間違いなく人脈形成である。未踏という肩書を通じて、同じ大学、類似テーマを持つ人々、さらには知り合いの知り合いに至るまで、多岐にわたる未踏修了生とコネクションを築けたことは非常に有益だった。

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低レイヤー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・問題解決力を持っているかどうか
- (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) まなび：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。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

Pythonにトランスパイル可能な静的型付けプログラミング言語の開発

— Erg Programming Language —

芝山駿介(早稲田大学先進理工学部物理学科)



<https://github.com/erg-lang/erg>

- 強力な静的型システムを持つ言語**Erg**を開発
 - Pythonの問題点を克服する新言語
- 静的に型付けされたPython APIをそのまま呼び出し可能
- 開発を支援するツール群も実装
 - Language Server
 - パッケージマネージャ
 - パッケージレジストリ
 - インストーラ (バージョンマネージャ)

```
# Control-flow based type analysis
f(opt_i: Int or NoneType) =
  log opt_i + 1 # ERROR
  if opt_i != None, do:
    log opt_i + 1 # OK

# Dependent types
concat|T: Type, M: Nat, N: Nat|(
  l: [T; M], r: [T; N]
): [T; M + N] = l + r

l: [Nat; 6] = concat [1, 2, 3], [4, 5, 6]
```

Pythonにトランスパイル可能な 静的型付けプログラミング言語の開発

芝山 駿介 (早稲田大学 先進理工学部 物理学科)

1 背景

Pythonは、産業用・教育用途を問わず世界中で幅広く利用されている汎用プログラミング言語である。特に、機械学習やデータ分析の分野での利用が増加しており、その需要は今後も続くと予想される。

しかし、Pythonは実行時にコードの正当性を検証する動的型付け言語であるため、静的型付け言語に比べてバグの発見が遅れ、開発効率が低下するという傾向がある。また、Pythonはそのシェアの大きさにも関わらず、公式の提供する開発環境が不十分であるという問題もある。

動的型付け言語のデメリットを解消するべく、動的型付け言語に静的型システムを導入したプログラミング言語を開発するというプロジェクトがある。代表的なものがTypeScriptである。

TypeScriptは近年大きな注目を集めており、Pythonに対して静的型システムを導入したプログラミング言語を開発することも潜在的に大きな需要があると考えられる。

Pythonをトランスパイル（変換）ターゲットとするプログラミング言語はいくつか存在するが、その多くは動的型付け言語であり、Pythonの問題をそのまま引き継いでいる。Pythonとの互換性を謳う静的型付け言語もあるが、Python APIの静的型付け化を指向しているとは言い難い。

Pythonには型アノテーションの文法があるため、これを用いて擬似的に静的型付けを行おうとするプロジェクトもある。しかし、Python自体が静的解析を考慮していない設計のため、このアプローチにも根本的な限界がある。

2 目的

前章上で説明した問題を解決するために、本プロジェクトではPythonにトランスパイル可能な静的型付けプログラミング言語「Erg」およびその開発ツール群を開発する。Erg言語はPythonにトランスパイルされるためPythonのコード資産をそのまま再利用でき、また静的型システムによる高い静的検証能力を持つ。また開発ツール群をコマンド一つで呼び出せるようにすることで、低い環境構築コストと高い再現性を実現する。

3 開発内容

Ergは以下の設計思想に基づいて設計されている。

- ・強い静的型付け
- ・ミニマルな基礎文法
- ・高い表現能力
- ・PythonAPIとの互換性
- ・高い開発効率

以上に基づき、コンパイラー、LanguageServer、パッケージマネージャー、インストーラー、パッケージレジストリー、パッケージレジストリーサイトなどの開発を行った。

3.1 コンパイラー

ErgコンパイラーはRustで実装されており、MIT/Apache 2.0ライセンスで公開されている。ErgコンパイラーはErg言語のソースコードを解析・検査し、Pythonバイトコードに変換する（図1）。

コンパイルの各ステージで発生したエラーは収集され、一度にユーザーに報告される。エラーは該当箇所のコードとともに提示され、エラーメッセージもユーザーにとって理解しやすいものとなるよう努めた。

3.2 PythonパッケージとしてのErgコンパイラー

Ergコンパイラーは、PythonパッケージとしてPythonインタプリタが動的に呼び出すこともできるようにした。これにより、Ergモジュールを実行時に読み込んだり、Ergコードの

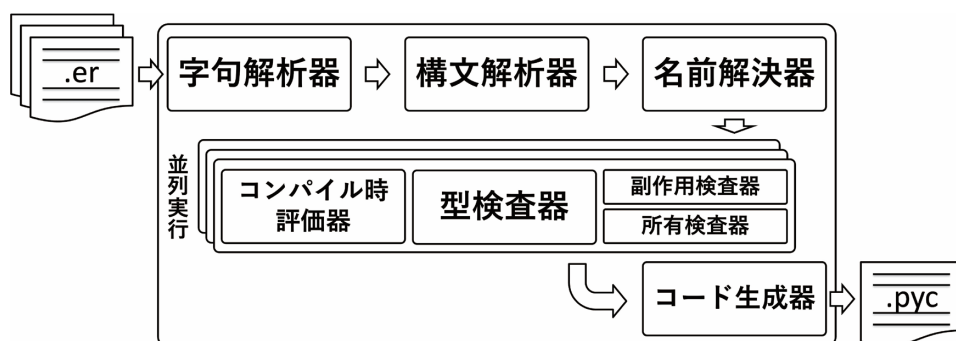


図1：コンパイラの概説図

ASTを直接操作したりすることが可能になる。APIの型定義も行ったので、ErgからErgコンパイラーを操作することも可能である。

3.3 Language Server

Language Server (Erg Language Server) も Rust で実装されており、コンパイラーと同じライセンスで公開されている。LanguageServer とは、対象言語のコーディングを支援する機能（エラー表示、補完機能、定義ジャンプなど）をエディターに提供するためのソフトウェアである。Language Server Protocol (LSP) と呼ばれるプロトコルに対応することでエディターとの通信を可能にする。

3.4 パッケージマネージャー

パッケージマネージャー（開発コードネーム：poise）は Erg 自身を用いて実装し、コンパイラーと同じライセンスで公開されている。パッケージの作成・ビルド・テスト・公開・インストールなどパッケージ開発のライフサイクル全般を管理することができる。

3.5 インストーラー

インストーラーは、Erg 言語のコンパイラー、パッケージマネージャー等を一括でインストールするためのスクリプトである。インストール先コンピュータのアーキテクチャーに適合するコンパイラーのバイナリーと標準ライブラリーを GitHub release から取得する。また、パッケージマネージャーは、ソースコードを取得しコンパイルすることでインストールする。

3.6 パッケージレジストリー

パッケージレジストリーは、コードホスティングサイト GitHub を用いて構築した。パッケージマネージャーは、パッケージレジストリーのリポジトリーへ圧縮されたパッケージを Pull Request として送信し、メンテナの確認ののち merge することでパッケージの登録を行う。

3.7 パッケージレジストリーサイト

パッケージレジストリーに登録されたパッケージの情報を閲覧するための Web サイトを構築した（図2）。この Web サイトは <https://package.erg-lang.org> で公開されており、パッケー

ジの検索やメタデータの閲覧が可能である。

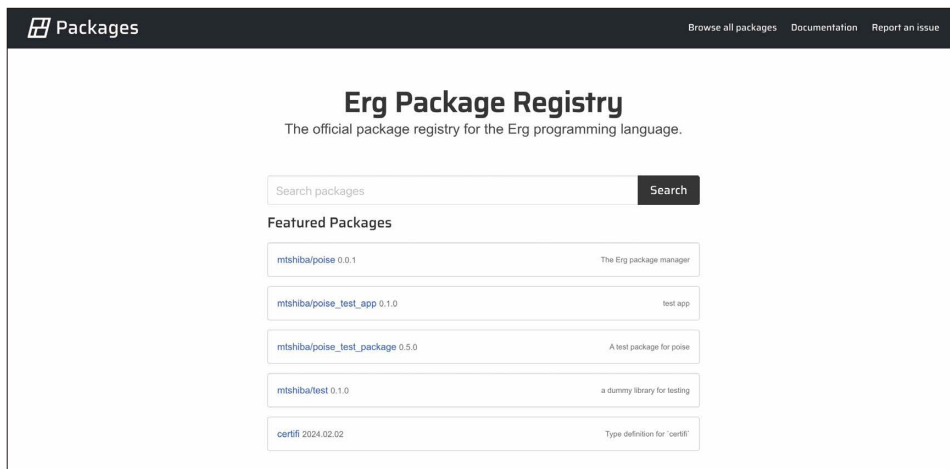


図2：パッケージレジストリーサイトのスクリーンショット

3.8 著名なPythonパッケージの型定義パッケージ群

Erg コンパイラーはPythonの組み込みAPIや標準ライブラリーの型定義を同梱しているが、サードパーティのPythonパッケージの型定義はErgパッケージとしてユーザーにオンデマンドで提供されるか、ユーザー自身で型定義ファイルを記述する方式になっている。

このうち著名なサードパーティのPythonパッケージについては、型定義パッケージを用意しレジストリーに登録した。これらの型定義はpytypesというリポジトリで管理されている。

4 従来の技術（または機能）との相違

ErgはPythonにトランスパイル可能・あるいは互換性を持つとされる他の言語と比べ、完全に静的型付けであり、Python APIの型定義を自前で行っている点が特徴である。また、Ergの強力な型システムにより、Python APIはその使用感をほとんど損なわない形で型定義されている。先行するHyやCoconut、Juliaなどの言語は動的型付けであり、本プロジェクトの解決したい問題に応えるものではない。Mojoは2023年に発表されたPythonとの互換性を謳う静的型付け言語であるが、実際のAPIはMojo独自のものが多く、また開発環境も整備されていない。

本プロジェクトではコンパイラー本体に加えて、Language Server、パッケージマネージャー、インストーラー、パッケージレジストリー、パッケージレジストリーサイトなどの周辺ツールも開発した。Erg言語は単なる概念実証ではなく、実用言語としての基盤を持っていると言える。

5 期待される効果

ソフトウェア開発においてPythonの代わりにErgを用いることで、Pythonのコード資産をそのまま再利用しつつ、静的型付けによるバグの早期発見、そしてLanguage Serverによる豊富なコーディング支援を得ることができる。標準で付属するパッケージマネージャーはパッケージを開発・公開するに必要な十分な機能を持っており、開発者は環境の構築に時間を費やすこ

となく、簡単にパッケージを開発・公開することができる。

■ 6 普及（または活用）の見通し

Erg コンパイラーのGitHub リポジトリは既にスター数が2,500近くあり、多くのプログラマーが興味を持っていることが伺える。Erg 言語はまだまだ発展途上であるものの、本プロジェクトの完遂によって実用言語としての基盤が整ったと言えるので、ユーザー獲得へ向けて広報活動を実施していきたいと考える。PythonやRustなどプログラミング言語系のコミュニティの主催するカンファレンスに参加して登壇したり、ある程度Ergを学習したいというユーザーが集まればワークショップを開催などしたいと考えている。

関連URL

公式サイト：<https://erg-lang.org>

パッケージレジストリーサイト：<https://package.erg-lang.org>

GitHub リポジトリ：<https://github.com/erg-lang/erg>

公式ドキュメント：<https://erg-lang.org/the-erg-book/>

PMの評価

採択時の評価

Pythonは広く普及しているプログラミング言語だが、実行時にコードを検査する動的型付けを採用しているため、実行するまでバグに気づきにくく、実行効率が悪いなどといったデメリットがある。本提案はPythonにトランスパイル可能な静的型付けプログラミング言語とその周辺ツールを開発するという野心的なプロジェクトである。Rust風Pythonというアイデアは、既に2023年5月にMojoというプロジェクトによっても取り上げられており、業界内で非常に注目され、話題となっている。静的型システムを動的型付けプログラミング言語に導入する試みは、以前にJavaScriptでTypeScriptが登場したことや、今までの未踏プロジェクトでもLaTeXの代替を目指す静的型付け組版システムSATySFi、シェルスクリプトの代替を目指すCotowaliという先例があり、プログラマーの生産性向上に大きく貢献している。最近は高速なPython処理系の実装も増えてきていることから、多様なバックエンドの選択肢も増えている。さらにネイティブコード実装をすることで高速化の他にライブラリーのバージョン依存関係をコンパイル時に確定することでシングルバイナリーとしての再現・再配布が用意となるメリットもある。過去のPythonライブラリーの資産を活用できれば、エコシステム全体にも好影響を与えることになるだろう。JuliaやScalaなど過去の先人達の設計や実装もリスペクトしつつ、TypeScriptのPython版のようなものが生まれることを期待して本提案を採択した。

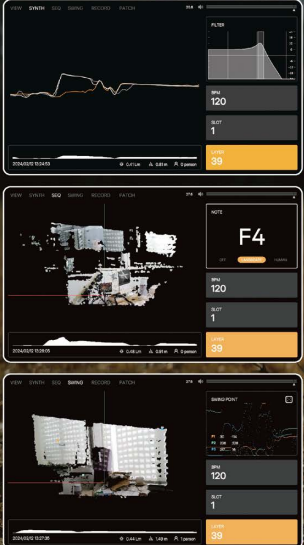
プロジェクト終了時の評価

開発したプログラミング言語Ergは、Pythonにトランスパイル可能でありながら完全に静的型付けを実現し、Python APIの型定義を利用することで既存ライブラリーの資産を簡単に呼び出すことができるようになった。世の中の先行する自作言語と比較して、Ergは実用プログラミング言語をかなり意識して開発され、コンパイラー、Language Server、パッケージマネージャー、インストーラー、パッケージレジストリー、パッケージレジストリーサイトなどの周辺ツールもしっかり開発整備された。Erg言語が単なる概念実証にとどまらず、実際の開発プロセスで利用可能な実用性を備えていると言える。

当初プロジェクトの計画ではネイティブコードバックエンドとPythonインタプリタとのバインディング機構の実装に重点を置く予定であった。しかし、パッケージマネージャーの開発途中でpycバックエンドやLanguage Serverに多くのバグや改善点が見つかり、これらの修正にプロジェクトの重心を移し品質を高めた。結果として、実用プログラミング言語としてのクオリティが向上した。

phonoma は、Depth Camera から捉えた空間のデータを
音楽要素に割り当てることができるカメラ型の電子楽器である

2023 年度末 踏 IT 人材発掘・育成事業
空間を奏でる電子楽器の開発 - 長谷川 泰斗



音色の合成 SYNTH
空間から得られる起伏形状、色味や明るさ、人の配置といった要素を、音色の各要素に対してリアルタイムに合成し、時空間的な変化のある音色を作り出す機能。

旋律の構成 SEQUENCE
捉えた空間に存在するオブジェクトや人の位置や大きさといった特徴からノートナンバーに変換し、永続的なメロディを作り出す機能。

保存 / 応用 TAKE
好きな空間を記録することができる機能。上記の機能を再利用が可能。LAN・Bluetoothを用いて外部のソフトウェアに送り、VR等での没入的な表現にも利用可能。

phonoma



<https://youtu.be/NY14DH402uw>

空間を奏でる電子楽器の開発

長谷川 泰斗 (筑波大学 人間総合科学学術院 人間総合科学研究群 博士前期課程1年
デザイン学学位プログラム)

1 背景

今日の電子楽器市場では、小型化・堅牢化が進み、自宅やスタジオに据え置くだけでなく様々な場所に持ち運んで演奏が可能な製品がリリースされている。電子楽器を様々な環境に置いて即興で作曲・演奏を行う Field Music と呼ばれるスタイルも生まれ、ストリーミング配信やライブ演奏に続く新たな音楽表現・流通の形として確立しつつある。

Field Music の特徴として、演奏する環境に対して演奏者が独自に解釈し、音色やメロディといった要素に反映させていく過程にある。このプロセスは限りなく演奏者の感性によって左右され、「誰が」「どこで」「いつ」演奏するかによって全く異なる音楽が生まれる。

演奏者が空間を自己解釈して音楽へと昇華させるプロセスに対し、長谷川は楽器自体も空間を演奏者とは別の視点で解釈し音楽として演奏者へフィードバックすることはできないかと考

えた。これにより、演奏者が捉えきれなかった空間の要素への気づきや発想を与え、演奏者・楽器・空間のより深い関係性を持った音楽表現が可能となるだろう。

2 目的

本プロジェクトでは、空間をリアルタイムに捉え、音に変える機能を持ったポータブルな電子楽器を開発する。空間と深い関わりを持つ楽器を作り出すことで、即興演奏の幅をさらに広げ、配信音楽にはない「生で聴くこと」「視聴者がその場にいること」の価値を高め、音楽の時空間芸術性を深めることを最大の目的とする。

3 開発の内容

空間の様子をデータとして取得し、リアルタイムに音楽要素に反映させることで即興演奏が可能なハード・ソフト一体型の電子楽器「phonomaTM」(図1)の開発を行った。phonomaは、カメラのように構えて演奏するのが最大の特徴であり、様々な環境に持ち運び、その場その瞬間で生まれる音色・旋律との一期一会を楽しむことができる。搭載された目(Depth Camera)によって捉えた空間の明るさや色味、人・オブジェクトの数といった複数のデータによってダイレクトに反映させることができ、演奏者が捉えきれない空間要素を楽器自身が拾い上げ、演奏者にフィードバックする。これにより、演奏者と楽器の間に協奏状態を生み出し、より多彩な即興演奏が可能となっている。



図1：phonoma (<https://youtu.be/NYi4Dh402uw>)

3.1 ハードウェア

phonomaは90W電力供給によって動作するスタンドアロンデバイスである。ハードウェアの構成は以下のようになっている。

- (1) Luxionis OAK-D Pro (Depth Camera)

- (2) LattePanda Sigma (メイン CPU)
- (3) Pro micro (コントロール基板用 CPU)
- (4) コントロール基板
- (5) 7inch タッチディスプレイ

搭載されたDepth Cameraによって捉えた空間を点群・カラーイメージとして取得し、リアルタイムに以下のようなデータを出力続ける。このデータを元に後述するソフトウェアにて音響処理を行う流れである。

- (1) 空間の形状 (xyz点群)
- (2) 色味
- (3) 明るさ
- (4) 空間の最大・最小・平均距離
- (5) 人・オブジェクトの数
- (6) 色温度
- (7) 空間の荒れ具合

筐体はカメラのような意匠にまとめ、空間に対して楽器を「構える」ように設計した。また、片手でも操作しやすいよう、操作系や内部パーツは持ち手側に寄せた構造にすることで長く構えていても疲れないプロダクトとして設計した (図2)。



図2：phonomaを持った様子

3.2 ソフトウェア

phonoma では、実際のパフォーマンスを念頭に「音色の合成旋律の構成・演奏保存・応用」という3つの大きな流れに沿って各処理部を開発していった。

3.2.1 音色の合成SYNTH機能

取得した空間の形状 (xyz点群) を元に、任意のz軸の距離データリストを合成波形として利用する (図3)。この距離データリストは空間を上から見た時の断面形状としてみなすことができ、空間が変化するたびに常に新たな合成波形を取得できる (図4)。

合成波形に対し、さらに音色を操作するために一般的なシンセサイザーには、フィルターやADSR、リバーブ、ディレイ、ピッチといったパラメーターが提供されている。phonomaではこのようなパラメーターに対し、a～gのデータをPATCH機能によって動的に反映させることができるようになっている (図5)。例えば、明るさのパラメーターをフィルター値に割り当てれば、明るいほど開放感のある音色、暗いほど閉鎖感のある音色にするといった環境の状況に応じてリアルタイムに変化する音色を実現可能としている。

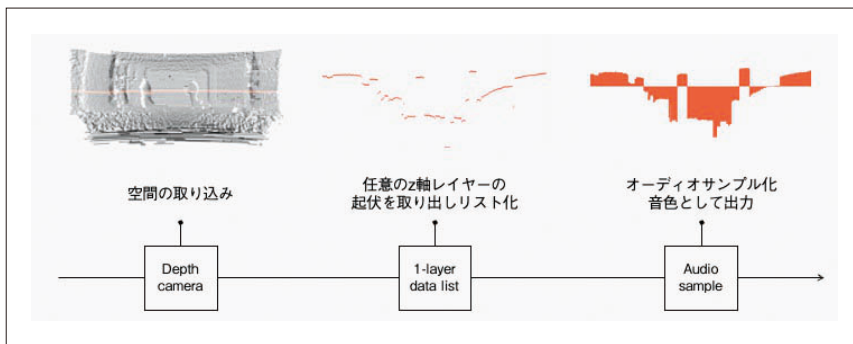


図3：合成波形の生成プロセス



図4：SYNTH機能 (<https://youtu.be/-veCN9WGFAY>)



図5：PATCH機能 (<https://youtu.be/mMrEXs2kMqo>)

3.2.2 旋律の構成・演奏SEQUENCE機能

phonoma は、空間の要素を用いてメロディを生み出す機能が2つ搭載されている。

(1) 景色でメロディを作る Landscape Sequence

景色の様子からメロディを生成する機能である。主に一人で景色を眺めながら旋律を作り出

すことに適した機能である。phonomaを景色に向けると、自動的にクラスタリングが開始され、捉えたオブジェクトのサイズや距離をノートナンバーに変換することで永続的なメロディが生まれる（図6）。ノートナンバーの順番はphonomaが捉えた順に自動的に予約されるため、演奏者は構えるだけでメロディを作り出すことが可能となっている。

(2) 人でメロディを作る Human Sequence

人の骨格からメロディを生成する機能である。主に複数人で協力しながらパフォーマンスするシーンにおいて適した機能である。phonomaは、目の前に映った人間の骨格を検出する。

検出された人に対して順番に番号を割り当て、頭、手、肩、腰、足の位置をノートナンバーに変換することで演奏が可能となっている（図7）。複数人で声を掛け合いながら意図したメロディになるように立ち位置を変えたり、ダンサーのような体を動かすパフォーマーを捉えながらメロディを作ったりすることが可能である。

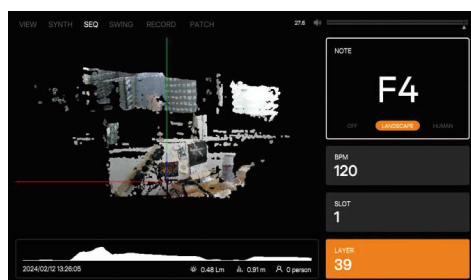


図6：Landscape Sequence
(<https://youtu.be/9Xf5V4Akz2w>)



図7：Human Sequence
(<https://youtu.be/SreLNrFoaQc>)

3.2.3 保存・応用 TAKE 機能

phonomaは、空間のデータをつにパッケージしたphonoという記録形式で保存することが可能である。搭載されたシャッターボタンを押すと、その瞬間の空間のデータを保存し、再利用することができる（図8）。またこのデータはここまで記述した各機能において再利用することが可能になっている（図9）。ミュージシャンが旅行先で気に入った空間をphonoとして保存し、再度時間を遡って音色を生成するといった利用が可能となる。また、このデータはphonomaのLANポートからUDP通信を通して取得することができるため、TouchDesignerTMなどのビジュアル表現に特化したソフトウェアと連携して点群を用いたVJなどのパフォーマンスに応用することもできる。

4 従来の技術（または機能）との相違

空間情報を音楽表現と結びつける、一つのプロダクトとしてパッケージ化された市場でも数少ないタイプの楽器を開発した。特に以下の3点が既存の電子楽器と比べて特徴的である。

- (1) カメラのように構えて使う据え置きではない演奏方式
- (2) 空間のデータを直接音色パラメーターに反映可能
- (3) 音色生成だけでなく、旋律や保存といった統合的な演奏機能の提供



図8：シャッターボタンで保存する様子

図9：保存したphonoを見返す様子
(<https://youtu.be/LYqRjGIQvEw>)

また、完全に他の楽器と一線を成す独立した楽器ではなく、USB-MIDIポートを活用して既存の楽器との連携も取りやすい点も市場に組み込む上での特徴と言えるだろう。

空間から操る楽器としてテルミンが代表例として挙げられるが、アンテナと手の距離変化といった1次元的な変化だけでなく、3次元的な変化を捉えられる点においてより表現力が向上した電子楽器と言える。

5 期待される効果

phonomaを使うことで、空間と音楽に深い結びつきのある新たな音楽表現が可能となる。また、ミュージシャンだけでなく、カメラマンやダンサーといった空間や身体を用いたクリエイターを音楽そのものに直接取り込み、より総合的な音楽表現を押し広げることにつながるだろう。また、視覚や聴覚を統合的に扱うことで、音楽に障壁を持つ人でも、視覚的な導入であれば踏み込めるといった新たな参入の余地を生み出すこともできると期待している。

6 普及（または活用）の見通し

長期的な展望として、これをユニークな楽器として終わらせるのではなく、一般的な楽器として普及させたい。小ロットからでも量産を行い、フィールドミュージックを活動の中心と置いているミュージシャンや、周辺領域であるカメラマン、ダンサーなどにも販売し、新たな音楽表現を生み出す道具として確立させることを最終的な目標とする。

関連URL

phonoma動画一覧：

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLboajj3UVKqo0acZKvcR1XybdreE6vdB59>

PMの評価

採択時の評価

空間から音を生み出す電子楽器を開発し、実際の音楽シーンに投入できるレベルの楽器に仕上げ、空間と音のコラボレーションによる新たな音楽表現を生み出すことを目標としたプロジェクトである。現段階での試作機ではLiDARから取得したデータをそのままオーディオ波形にしているだけだが、空間をセンシングすることで3次元のリアル空間の細かな変化を音楽表現にどう落とし込み、楽器のインターフェイスとしてどう成り立たせるかという深い探求も求められる。演奏者だけではなく、同じ空間に存在する聴衆の動きがリアルタイムに音楽表現に反映されるようになると、演奏者と聴衆が一体感を持った新しい音楽演奏体験が実現できる可能性があり、新しい音楽表現としても将来性があると評価した。古来のアナログシンセの音作り、FM音源の音作り、シンセサイザーのつまみやスライダーによる音色表現の変化や、リズムマシンやアルペジオなどの音楽表現についても幅広くかつ深く研究した上で、従来の演奏者にも幅広く受け入れられる直感的で表現力豊かなLiDARインターフェイスの実現を期待して採択した。

プロジェクト終了時の評価

空間情報と音楽表現を結びつける一つのプロダクトとして市場でも数少ないユニークなタイプの楽器が開発できた。カメラのように構えて使う演奏方式で、空間のデータを直接音色パラメーターに反映可能で、音色生成だけでなく統合的な演奏機能を提供できた。

プロジェクトの当初の目標では、PCで動作するメインのソフトウェアとそれを操作するためのハードウェアインターフェイスをそれぞれ開発する想定だったが、スタンドアロン化の重要性を強く意識し、電源供給のみで動作する単体の楽器として仕上げる事ができた。また、外部のMIDIキーボード等を接続することで拡張性も担保した設計にできた。各アワードへ応募することで外部からもこのプロダクトが評価される機会を得た。

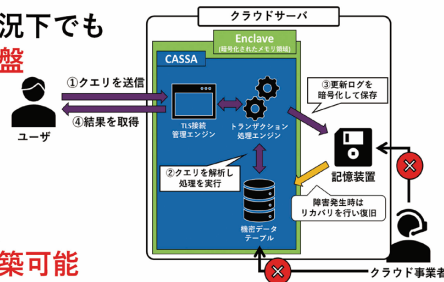
2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

福山 将英 (慶應義塾大学)

TEEを用いたセキュアかつ高性能なデータベースシステムの開発

- CASSA: 機密性と性能を両立するデータ基盤 -

- クラウド事業者が信頼できない状況下でも
機密性と性能を両立するデータ基盤
- Intel SGXを活用することで
機密性と真正性を保証
- Intel SGX特有の複雑さを抽象化し、
容易に機密性の高いシステムを構築可能



機密データを扱う任意の分野に応用可能

オープンソースで公開中

<https://github.com/Noxy3301/CASSA>

TEEを用いたセキュアかつ高性能なデータベースシステムの開発

福山 将英 (慶應義塾大学 環境情報学部 環境情報学科)

1 背景

クラウドの利用は増加の一途を辿っている。Google、Microsoft、Amazonなど、様々な企業がインターネットを介して計算資源を貸し出すクラウドサービスを提供している。それらは外部からの攻撃に対する様々な策を講じているため、安全であると考えられている。しかし、それにはクラウドサービスを提供するクラウド事業者が信頼できるという前提がある。クラウドでは、外部からの不正アクセスに対する防御措置に加えて、クラウド事業者自身が不正アクセスを行わないかを考慮する必要がある。なぜなら、クラウド事業者は計算資源の管理者権限を有しているため、メモリー上のデータを読み取ることができるからである。

クラウド事業者により可能な攻撃手法を、図1に示す。クラウド事業者に悪意がある場合、主に2つのシナリオが考えられる。

五十嵐 PM

稲見 PM

岡 PM

落合 PM

曾川 PM

竹迫 PM

田中 PM

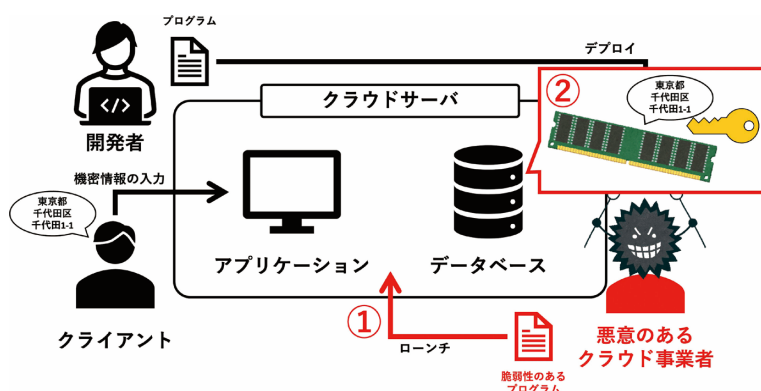


図1：クラウド事業者に悪意がある場合

1つ目のシナリオは、クラウド事業者が開発者から受け取ったプログラムを意図的に改ざんすることである。図1の①は、開発者が提供したプログラムを、クラウド事業者が保有する計算資源上で実行することで、サービスを公開している。この過程でクラウド事業者は、開発者が提供したプログラムを意図的に改ざんしたり、既知の脆弱性を修正するためのパッチを適用しないなどの不正行為を行う可能性がある。この改ざんにより、システム内にセキュリティーホールを作成し、それを悪用して情報を奪取したり、漏えいさせる可能性がある。クラウド事業者が、脆弱性のパッチを適用せずに古い状態を保持することでも、同様のリスクが生じる。

2つ目のシナリオは、管理者権限の悪用である。図1の②では、クラウド事業者が有する計算資源上でアプリケーションを実行し、クライアントにサービスを公開している。クライアントはサービスと通信を行い、必要に応じて情報を提供する。アプリケーションの実行中は、プログラムとデータがメモリー上に展開され、CPUが適宜データを処理する。クライアントが提供したデータもこのプロセスに含まれる。データは通常、転送や保存時に暗号化されているため、機密性は保証されている。しかし、データが処理されている際には状況が異なる。一般的なCPUはデータを暗号化したまま演算できないため、データを処理するときは一時的に復号したデータをメモリー上に配置し、CPUで演算を行った後、その結果をメモリーに書き戻し、再度暗号化してストレージに保存するというプロセスが必要である。このプロセス中、メモリー上には復号されたデータが存在するため、クラウド事業者は管理者権限を悪用することで、メモリー上のデータを読み取り、機密データを盗み出すことが可能である。クラウドでは上記の理由から、そのような機密情報の機密性は保証されていない。

2 目的

クラウドの恩恵を受けるためには、クラウド事業者に依存しない形で機密性の保証が必要である。これは、ソフトウェアレベルの保護だけでは不十分である。データは処理する際、復号されなければならないため、管理者権限を悪用しメモリー上のデータを読み取ることが可能なクラウド事業者に対しては、ソフトウェアレベルの保護は効力を発揮しない。本プロジェクトでは、クラウド事業者が信頼できない条件下でもクラウド上の機密性を保証できるシステムを構築する。

3 開発の内容

本プロジェクトで開発した「CASSA (Cloud-Adapted Secure Silo Architecture)」は、クラウド事業者が信頼できない状況下でも、機密性と性能を両立するデータ基盤である。CASSAのアーキテクチャーを図2に示す。

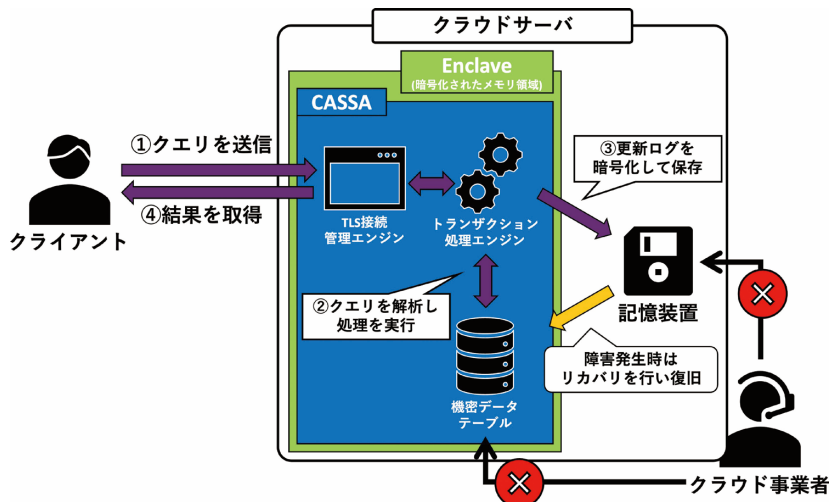


図2：CASSAアーキテクチャー

このシステムは、Intel SGXの1つである「Scalable-SGX」を用いて隔離実行環境（Enclave）のメモリー制限を緩和し、トランザクション処理プロトコルにはSiloを、索引にはMasstreeを採用している。これにより、データの処理性能と機密性を向上させる。さらに、Intel SGXの機能である「Remote Attestation」を活用し、意図した通信相手がEnclave内で正しいプログラムを実行していることを保証しつつ、TLSセッションを確立することで、通信相手と通信経路の機密性と真正性を保証する。システムの耐故障性付与のためのログに関しても、暗号化して保存することで、クラウド事業者による不正な観測や操作を防ぐ。信頼できないストレージ上のログデータは欠損するリスクがあり、完全性保証のため、CASSAはログ改ざん検知プロトコルを導入している。これにより、ログの欠損や改ざんを検知可能にし、システムの完全性と真正性を保証する。

クライアントは、TLSセッションを通じて、CASSAにクエリを送信する（図2の①）。CASSAはクエリを解析し、SiloとMasstreeを用いてデータの検索、更新を行う（図2の②）。クエリによるデータベースの改変内容は、必要に応じてログを作成し、暗号化してストレージに書き込みを行う（図2の③）。ログ書き込み後、クライアントに結果を返送する（図2の④）。全体として常にデータの機密性が保証されているのが本システムの特徴である。CASSAのコンポーネントは以下の通りである。

・Silo並行性制御システム

「Silo」は、メニーコアと大容量メモリーを活用できるように設計されたトランザクション

処理システムである。CASSAにおける、トランザクション処理を担当する。

- **Masstree**

「Masstree」は、B+木の順序維持性、トライ木のプレフィックスマッチングによる迅速な検索を組み合わせた並行索引木である。CASSAにおける、高速データアクセスを担当する。

- **CASSA リカバリシステム**

リカバリシステムは、システム障害や予期せぬシャットダウンからの迅速な復旧を可能にする機能である。CASSAにおける、データの完全性と一貫性の保証を担当する。

- **ECDSA Attestation**

「ECDSA Attestation」は、Intel SGXが提供するRemote Attestation方式の1つで、Intel SGXが有効なプラットフォームで、適切にインスタンス化されたEnclave内で、既知のセキュリティ構成のシステム上で実行されていることを遠隔から検証する機能である。CASSAにおける、通信相手の真正性検証とセキュアなTLSセッション確立を担当する。

- **クエリパーサ**

クエリパーサはクライアントからのクエリ内容を解析し、トランザクション処理システムが扱える形式へ変換する機構である。CASSAにおける、データ互換性の付与を担当する。

- **TLS 接続管理エンジン**

TLS 接続管理エンジンは、複数のクライアントが同時にアクセスする際に確立されたTLSセッションを効率的に管理する機能である。CASSAにおけるセキュアな通信の維持と管理を担当する。

■ 4 従来の技術との相違

- **EnclaveDB**

「EnclaveDB」は、データとクエリの機密性と完全性を保証するデータベース管理システムである。SQL Serverを拡張し、Enclave内での機密データの処理及び管理を行うことで、OSやハイパーバイザからの不正アクセスや改ざんを防ぐ。EnclaveDBは逐次ロギングを採用しており、並列ロギングを採用していない点がCASSAと異なる。

- **ShieldStore**

「ShieldStore」は、Intel SGXを活用し、インメモリーキーバリューストアを保護するために設計されたシステムである。ShieldStoreは旧式SGXに基づくためメモリー制限が128MBである一方、CASSAのメモリー制限はCPU1基当たり最大512GBである。

- **Always Encrypted**

「Always Encrypted」は、SQL Server データベースに保存された機密情報の保護を目的とし

た機能である。この機能は、データに対する操作をEnclave内で行うことにより機密性を保証するが、取得したデータを用いた分析などを行うことは考慮されていない。

• MONOMI

「MONOMI」は暗号化されたデータを復号化せずに分析可能なシステムである。MONOMIは準同型暗号を用いる一方、CASSAはEnclaveを用いる点が異なる。

• AMD SEV、Intel TDX

「AMD SEV」と「Intel TDX」は、仮想マシン全体を暗号化して保護するTEE技術である。これにより、仮想化された環境下でのデータと実行コードの機密性は保証されるが、OSを含むVM全体が保護の対象となるため、OSを信頼する必要がある。CASSAはIntel SGXを用いるため、OSを信頼する必要はない。

• ARM TrustZone

「ARM TrustZone」は、特定のメモリー領域を隔離し、保護することに特化したTEE技術である。TrustZoneはメモリー隔離に注力しており、隔離実行環境のメモリー暗号化をしない。CASSAは、Intel SGXを活用することにより、隔離実行環境のメモリー暗号化を実現する。

5 期待される効果

CASSAは、Intel SGXの不親切な仕様や煩雑な部分を抽象化している。CASSAを使えばそのような困難に直面することなく、データの機密性と真正性が保証されたデータ基盤を構築可能である。また、CASSAは高い処理能力を実現し、クラウド上での高速なデータ処理を可能にする。これにより、仮にクラウド環境を十全に信用できない状況であっても、機密データの安全管理と高速なデータ処理を行うことができるため、機密データを扱う任意の分野での応用が期待される。

6 普及の見通し

このデータ基盤は、機密性と性能を両立するため、金融、医療等、機密データを扱う任意の分野に応用可能である。例えば、医療データの分析では、準同型暗号を用いた秘密計算が実施されているが、計算オーバーヘッドによる性能低下が懸念されている。CASSAが提供するセキュアなデータ管理環境は、現実的な時間内での複雑なデータ処理を実現する。

関連URL

ソースコード：<https://github.com/Noxy3301/CASSA>

PMの評価

採択時の評価

Intel SGX v2を用いて、KVS インターフェイスを持つセキュアで高性能なデータベースシステムを自作するという野心的なプロジェクトである。従来のインメモリーデータベースで使われていたSiloというトランザクション処理技法をTEE上の隔離実行環境の中で動かすことで、セキュリティと高性能を両立させることを狙っている。似たようなコンセプトでオープンソースとして公開されている従来の実装としてはShieldStoreがあるが、古いIntel SGX v1で開発されており、128MBのメモリーサイズ上限が存在するため、インメモリーデータベースを実装するには不適当なアーキテクチャーである。今回開発する実装はIntel SGX v2のため512GBまで対応が可能になる見込みである。ログは暗号化した状態でWALを行い、並列ログ書き込みできるのであれば他システムと比べても優位性があると考えられる。セキュアなトランザクション処理技法については、論文上でいくつかの提案はあるが、ソースが公開されていないものも多い。本プロジェクトによって新しくIntel SGX v2で実装したTEE上のSiloデータベースシステムがオープンソースとして公開され、セキュアで高性能なデータベースシステムの実用性が向上することを期待し、本提案を採択した。

プロジェクト終了時の評価

Intel SGXが提供する隔離実行環境内のEnclaveで動作する、性能と機密性を両立するデータベースシステムを構築できた。Intel SGXの複雑性を抽象化し、システムに開発者がIntel SGXの制約下で任意の処理を実装できる仕組みを別途用意することができた。当初の設計では、各クライアントがサーバー上で独自のデータベースシステムを運用する想定だったが、クライアントとサーバーのアプリケーションを個別に実装し、ECDSA Attestationによる真正性保証付きTLSセッションを確立することで、1対多のシステムを構築可能にした。これによって、データの保存だけでなく、処理を含む幅広い応用が可能になった。開発したシステムのベンチマークを測定したところ、YCSB-A ワークロードで60トランザクション並列処理時、最大228万tpsの処理能力を達成した。Intel SGX特有の煩雑さを抽象化しつつ、機密性と性能を両立できた。

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、アイモバイルやi-plug、ABEJA等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、AI戦略会議構成員なども担う。

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。

昨年度とは異なり、新型コロナウイルスによる社会的な影響が低減するなか、リアルとリモートの両面を活用しながら、合同、個別のミーティングやメンタリングを行うこととした。

採択したプロジェクトは、「自作マイコンの開発を容易にする開発環境」「RISC-Vベースのプロセッサを自動生成するシステムの開発」「魚群や動物プランクトンの空間分布を可視化するシステムの開発」「Capabilityを主軸とするマイクロカーネル」の4つである。

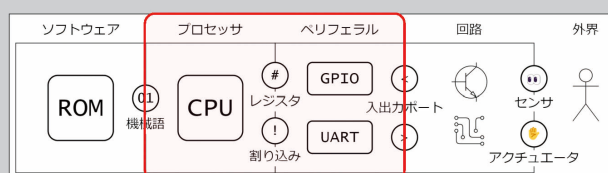
プロジェクトについては、十分でないものも見られたが、概ね今後につながる成果が出せたものと考えている。

2023年度未踏人材発掘・育成事業

自作マイコンの開発を容易にする開発環境

- マイコンを使うから作るへ : NextMicon -

太田 涼介 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)



数あるマイコンから
要求に応じて選定

汎用マイコンの場合

自分で設計！

自作マイコンの場合

自作マイコンは開発が大変？
→ NextMiconなら簡単！

自作マイコンの開発を容易にする開発環境

太田 涼介 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科)

1 背景

マイクロコンピューター、通称マイコンは、一つの半導体部品上にコンピューターに必要な機能を集約したもので、現代社会において幅広く利用されている。家電製品、自動車、スマートフォンなど、多岐にわたる電子機器がマイコンを搭載し、これによって高度な制御や情報処理が実現されている。

これらの製品に搭載されているマイコンは、大まかに汎用マイコンと専用マイコンの2種類に分類される。汎用マイコンは、マイコンメーカーが広く販売しているものであり、広範なアプリケーションに使用される。対照的に、専用マイコンは特定の製品やシステムに特化して開発されたものであり、回路がアプリケーションに合わせて最適化されている。

専用マイコンの有名な例として、ファミコンがある。ファミコンには、音楽生成回路などゲ

ーム機に特化した回路を盛り込んだ専用マイコンが搭載されている。このような、製品の機能に特化した回路を搭載した専用マイコンは、製品の高速化、省電力化、コスト削減などに貢献する。

専用マイコンの開発は開発コストが膨大であるため、大規模な製造業に限られてきた。しかし、FPGA（Field Programmable Gate Array）を使えば、同様の開発を個人の趣味レベルでも行うことは可能である。FPGAはユーザーが内部回路を書き換えられる集積回路であり、FPGAにマイコンの回路を書き込むことで自作のマイコンを作ることができる。

近年、Maker Movementのような潮流の中で、電子工作を趣味とする人が増加している。彼らは主にArduinoやRaspberry Piなどの市販のマイコンボードを利用しモノを作っているが、マイコンから自作している例はまだ少ない。その一因として、FPGA開発に必要なスキルや知識のレベルが高いことが考えられる。

しかし、FPGAを使うことで、個人の趣味プロジェクトでも独自のマイコンを開発できるようになる。自分の作品に特化した回路を搭載し、高速化、省電力化などのメリットを享受できる。何よりも、マイコンから作ることで、組込開発に対するより深い理解と達成感が得られる。

2 目的

そこで、本プロジェクトでは、マイコンから作る組込開発の敷居を下げるべく、FPGAを使った自作マイコンの開発とそれを使ったアプリケーション開発を容易にする開発環境を作る。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、手軽にマイコンを設計し使用できる「NextMiconIDE」を開発した。NextMiconIDEを使用した開発フローを「Hello World」と「Lチカ」を例に示す。

3.1 開発フロー

ステップ1：マイコンの回路を設計

NextMiconIDEを使ったマイコン開発では、最初に、マイコンの回路を設計する。マイコンの設計はIDEのマイコンエディター（図1）を用いてグラフィカルに行うことができる。

マイコンエディター（図1）の画面左側にはパッケージパレットがあり、マイコンの回路で使用可能な部品の一覧が表示されている。画面右側には回路図があり、設計中のマイコンが表示されている。ユーザーは左側のパッケージパレットから自分のマイコンに追加したい機能パッケージを選択し、右側の回路図に配置し、パッケージ間を配線するという操作を繰り返して、独自のマイコンを設計する。

マイコンの設計には、様々な種類の部品が使用できる。例えば、図1では「Serial」というシリアル通信を行うための部品のインスタンス「serial」を作成している。そして、serialの送受信を行う通信ポートをFPGAのピンに接続している。これにより、マイコンにシリアル通信を行うための専用回路（ペリフェラル）が追加される。また、図1の「serial」の下には「ledout」という名前のブロックがあるが、これはGPIOのインスタンスである。

ステップ2：マイコンで動かすプログラムを実装

マイコンで動かすソフトウェアを、IDEのソフトウェアエディター（図2）で実装する。マ

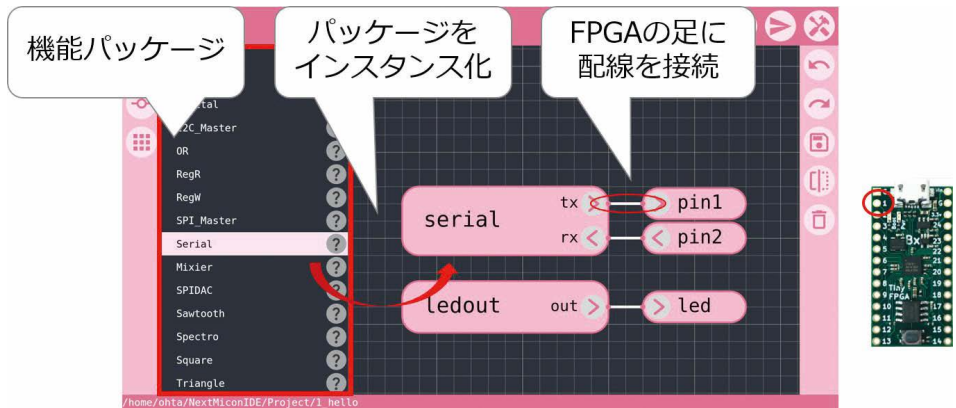


図1：IDEのハードウェア編集画面上でマイコンの回路を設計する

アイコンをプログラミングするには、ハードウェアを制御するためのライブラリー（ファームウェア）が必要となる。NextMiconIDEは図1で設計したマイコンに対応するファームウェアを自動生成する。生成されたファームウェアのメソッド一覧表が、ソフトウェアエディター（図2）の画面左側に表示される。ユーザーはこれらのメソッドを使用して、画面右側のテキストエディターでプログラミングする。例えば、図2ではserialのメソッドprintを使って、シリアル通信で「Hello FPGA!」と文字列を送信している。また、ledoutのメソッドwriteを使って、LEDを点滅するプログラムを実装している。

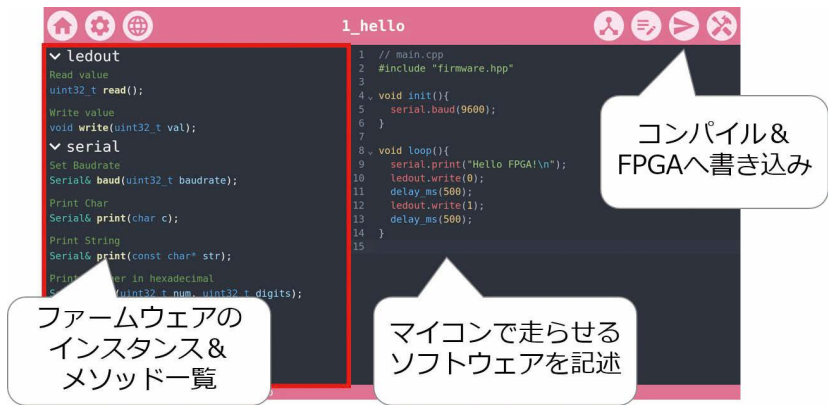


図2：IDEのソフトウェア編集画面でプログラムを実装する

ステップ3：FPGAに書き込む

ユーザーは最後に、FPGAを接続し、実行ボタン（図2の右上）を押す。マイコンのハードウェアの論理合成と、ソフトウェアのコンパイルが行われ、バイナリーがFPGAに書き込まれる。すると、ハードウェアエディター（図1）で設計したマイコンがFPGA上に構築され、ソフトウェアエディター（図2）で実装したプログラムがそのマイコン上で実行される。

3.2 作品例：音源付きマイコン

NextMiconを使った電子工作の例として、音源回路を搭載したマイコンを作成した。図3は作成したマイコンの回路図である。4チャンネルの方形波発振回路で音の信号が生成され、ミキサで合成され、DACから出力される。FPGAは任意のデジタルを実装することはできるがアナログ回路を実装することはできないため、FPGAにDAC ICを外付けし、FPGAにはDAC ICとの通信を行う回路を実装した。

実際に作成した回路基板を図4に示す。FPGAボード、ブレイクアウトボード、拡張基板の3種類から構成されている。FPGAボードにはLattice社製のiCE40 FPGAを使用したTinyFPGA BXというボードを使用した。ブレイクアウトボードは、FPGAボードと拡張基板を接続するための基板である。拡張基板は、FPGAに外付けし機能を拡張する基板である。図4の例では、スイッチ基板、USBシリアル変換基板、DAC基板、ADC基板の4種類が接続されている。

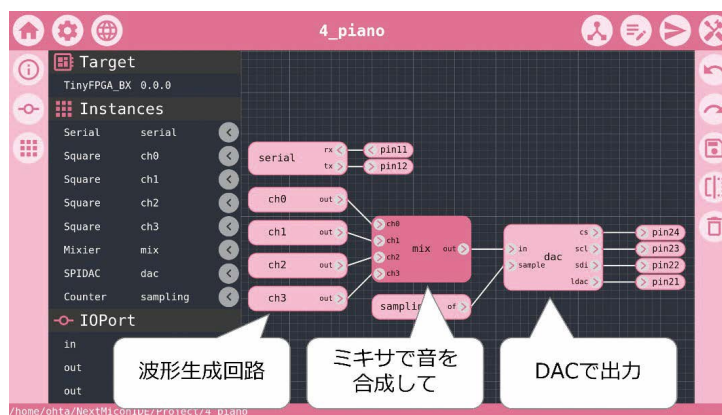


図3：音源付きマイコン

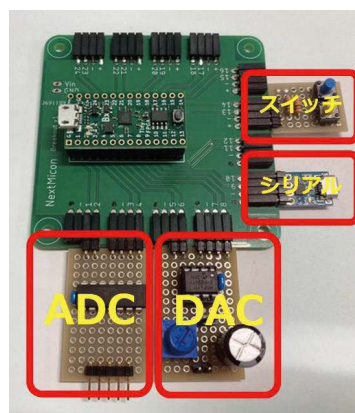


図4：作成した回路基板

4 従来の技術（または機能）との相違

NextMiconIDEは、FPGA 初心者にとっても容易にマイコンを開発することができる開発環境である。既存のFPGA開発ツールにも、GUIで回路を編集できるものや、マイコンを生成す

ることができるものは存在している。しかし、それらを一体のIDEという形でまとめ、初心者でもわかりやすいUIでラップしたという点は、従来のFPGA開発ツールにはないNextMiconIDEの強みである。

■ 5 期待される効果

これまで、FPGA開発には複雑なベンダー製のIDEを使用する必要があり、FPGA初学者にとって負担となっていた。一方、NextMiconIDEを使用すればFPGA初心者でも簡単にFPGAを使った組込開発を始められるようになる。Arduinoがマイコンの敷居を下げたようにNextMiconがFPGAの敷居を下げ、電子工作においてFPGAという選択肢がより一般的なものとなることを期待している。

■ 6 普及（または活用）の見通し

今後IDEの改良を進め、チュートリアルやマニュアルを整備し、リリースする予定である。その後、ものづくり系のイベントやワークショップを通じて、積極的にユーザーを増やしていきたいと考えている。また、大学・高専での授業で使いたいという声を頂いており、そのための教材作成などにも取り組んでいきたい。

関連URL

NextMiconのGitHubリポジトリ：<https://github.com/NextMicon>

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、Field-Programmable Gate Array (FPGA) を用いて、自作マイコンを簡単に開発するための開発環境「NextMicon」の構築を目的としている。すでに世の中には多くのマイコンが存在するが、I/Oの数やメモリーの容量などを自由に設計できることによりカスタマイズされたマイコンを作れることや、電子工学、コンピュータアーキテクチャー、プログラミングなど広く学べることなど、自らの手でマイコン開発をするメリットは数多くある。クリエイター自身がロボコン出身者であり、自らの過去のプロジェクトにおいて、既存のマイコンでは不便を感じたことから、新たなマイコンを簡単に作れることへの必要性を感じてプロジェクトが考案された。

このプロジェクトでは、検証用自作マイコン「my-micon」の開発、マイコン構成言語 (MCL) の開発、および統合開発環境「NextMiconIDE」の開発を行った。これらの成果物により、FPGAを用いたマイコン開発が容易になり、電子工作や組み込みシステム開発へのアクセスが広がることが期待される。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトは、当初予定されていた内容を十分に果たし、大きな成果を達成したと考えられる。特に、ソフトウェアの開発において、非常に使いやすい統合開発環境が提供されており、ユーザーが直感的にマイコンの設計を行えるようになったことは、プロジェクトの大きな成功点と言える。

パッケージ共有サーバーおよびパッケージマネージャーの開発は進行中であるが、プロジェクトの大きな目標である簡単にマイコンを作成できる環境の構築という面では、十分な達成となった。

総じて、本プロジェクトは、FPGAを用いた自作マイコンの開発を大きく前進させ、技術教育や組み込みシステム開発の分野において重要な貢献をしていると評価でき、今後のボード開発の進展にも期待できる。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

RISC-Vベースのプロセッサを自動生成するシステム

～ FPGA 開発の新しいアプローチ “Logic as Software” ～



中神悠太

背景

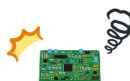
現在, FPGA への期待度が高まりつつある

- 高速にアプリケーションを実行したい
- アプリケーションの構成に特化した実行基盤
⇒ オリジナルアーキテクチャを実現したい!



開発において多くの課題が存在する

- ハードウェアを含むアプリケーション開発の難しさ
- HDLによる回路設計の難しさ
- 要求される知識・経験の多さ



FPGA

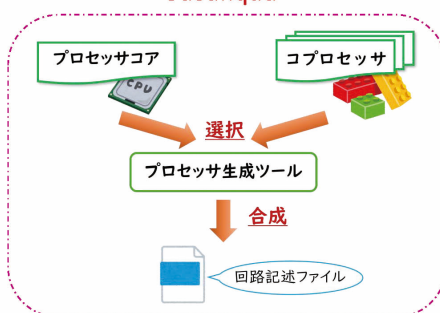
- ☞ 何度でも書き換え可能な集積回路
- ☞ HDLを使用してコーディングを行う



開発内容

個人開発者をターゲットとして「選択」「合成」「実装」の3つのステップで, FPGA 上で動作するプロセッサを生成することができるシステム “Sasanqua” を開発した

さざんか
Sasanqua



RISC-Vベースのプロセッサを自動生成するシステムの開発

中神 悠太 (筑波大学 情報学群情報メディア創成学類)

1 背景

FPGA (Field Programmable Gate Array) とは、論理回路を集積したデバイスであり、開発者の要求に応じて自由に配線を変更することができるものである。開発者は、デバイスに搭載された論理回路の規模の制限内において自由に回路を構成することができる。実際のハードウェア上に回路を構成するため、高速動作を望むことができるのが特徴である。他にも、回路の構成にあたっては、HDL (Hardware Description Language) という一般的なプログラミング言語に似た構文をもつ言語を用いて行えることが特徴的である。このような点を活かし、FPGAは音声処理や画像処理などの分野において、特定の処理を高速に行いたいというニーズに应运ってきた。

近年では、生成AIなどの発展により、FPGAの利活用についての関心がさらに高まりつつあ

る。これはFPGAを用いた高速なデータ処理や、FPGAを用いた高速な機械学習などが期待されているためである。また、近年「自作CPU」や「自作OS」といったキーワードを含む書籍が多く発行されていたり、それに関連するイベントに多くの参加者がいたりすることから、FPGAを用いたプロセッサの開発にも関心が高まっている。生成AIや自作CPUといった分野での利用は企業での利用が多いと考えられがちであるが、各種SNSを観察すると学生をはじめとする個人開発者からの関心が高いことがわかる。

しかし、FPGAを用いた開発には論理回路・ハードウェア開発に関連する知識・経験や、構成した回路を利用するために低レイヤーと呼ばれる分野のソフトウェア知識が要求されることから、通常の開発者にとっては敷居の高いものとなってしまう。加えて、開発した回路の検証が難しく、関連分野の知識・経験があったとしても扱いきれない事例が多い。

2 目的

本プロジェクトでは、学生など個人開発者をターゲットとしてFPGA開発に関する問題を解決しようとするアプローチを取る。FPGA開発に関する問題やHDLによる回路設計に関する問題を解決するためには、次にあげる事柄を達成する必要がある。現状では、これらを達成するための環境は、企業に属さない個人開発者にとって十分に整っているとは言えない。

- ・FPGA開発に関する知識や経験を有している指導者の代替の実現
- ・FPGA開発を学べる環境の実現
- ・HDLに関する深い知識を要求しない開発環境の実現

本プロジェクトでは図1に示すような環境を実現することを目指す。個人開発者をターゲットとして「選択」「合成」「実装」の3つのステップを経て、FPGA上で動作するRISC-Vプロセッサを生成することができる環境を提供する。「選択」はソフトウェア開発においてライブラリーを選択するようにして、FPGA上で動作する回路の構成を選択するというステップのことを指す。「合成」は選択された回路を合成するというステップのことを、「実装」は合成された結果として得られる回路をFPGAに実装するというステップのことを指す。この3ステップからなる環境を個人開発者に向けて提供することで、FPGA開発に関する問題を解決し、FPGA開発を利活用できる環境を実現することを目指す。

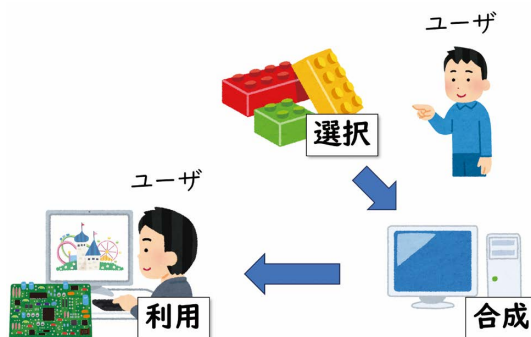


図1：プロジェクトが実現すること

3 開発の内容

3.1 概要

本プロジェクトではFPGA開発に関する開発を容易に行えるようになることを目指し、「選択」「合成」「実装」の3つのステップを経て、FPGA上で動作するRISC-Vプロセッサを生成することができるシステム「Sasanqua（さざんか）」を開発した。具体的には、FPGA上で動作するプロセッサの核となる「プロセッサコア」、プロセッサコアを拡張するための回路である「コプロセッサ」、プロセッサコアとコプロセッサを適切に合成するための「プロセッサ生成ツール」を開発した。Sasanquaシステムに含まれる回路およびソフトウェアの関係性を表した図を図2に示す。Sasanquaシステムを使用することによって、暗号化や数値計算といった処理に特化した命令やユーザーオリジナルの回路を制御する命令を持つように、ユーザーが自由にプロセッサを構成し生成することができる。

さらに、本プロジェクトでは独自に“Logic as Software”なる語を作成した。これは既存の語であるIaaS（Infrastructure-as-a-Service）やPaaS（Platform-as-a-Service）を基に作成した語であり、回路をまるでソフトウェアのように扱うことができるという意味を持つ。ソフトウェアの特性である再利用性や拡張性、変更の容易さを回路にも持ち込むことを目指し、本プロジェクトでは、回路およびソフトウェアの開発を行った。

本プロジェクトの開発は、Digilent社が開発および提供するZYNQ Zybo-Z710評価ボードを用いて行った。

ZYNQ Zybo-Z710評価ボードは、Xilinx社のZYNQ-7000シリーズを搭載した評価ボードであり、FPGAとARMプロセッサを1つのチップに搭載するものである。ZYNQ Zybo-Z710評価ボードの外観を図3に示す。

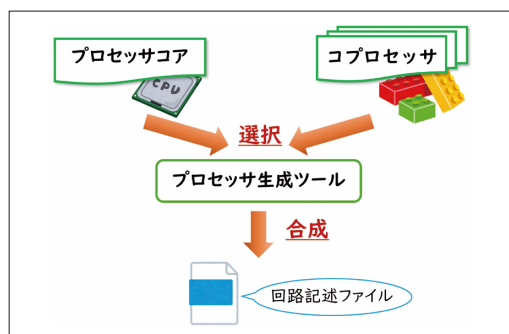


図2：Sasanqua システム

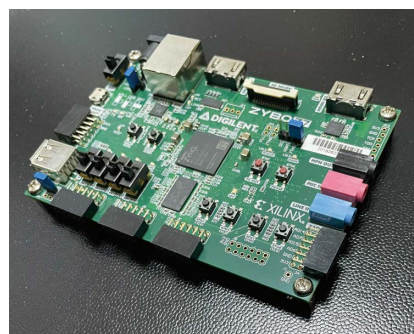


図3：ZYNQ Zybo-Z710評価ボード

3.2 プロセッサコア、コプロセッサ

プロセッサコアはISAとしてRISC-Vを採用し、基本命令としてRV32Iを実装した。RISC-Vには様々な拡張命令が存在するが、本プロジェクトでは基本命令のみを実装した。プロセッサコアは、RV32Iの基本命令を実装することで汎用的なプロセッサとしての機能の実装のみに注力させ、拡張命令は後述するコプロセッサで実装する。プロセッサコアの設計にあたっては、基本的なRISCプロセッサおよび既存実装として設計が公開されている

RISC-V プロセッサの設計を参考にした。また、本プロジェクトの根底にある“Logic as Software”のコンセプトに基づき、プロセッサコアを構成する各部のモジュール化及びインターフェイスの統一化を実施することで、プロセッサコアの設計においてもソフトウェアの特性を持たせることを意識した。プロセッサコアの実装はHDLの一種であるVerilog HDLを用いて行った。

コプロセッサは、プロセッサコアが持つRV32Iの基本命令に対して拡張命令を提供するためのモジュールである。コプロセッサはプロセッサコアと同様に、RISC-VのISAに基づくものとし、この制限において自由に拡張命令を実装できるようにした。また、RISC-Vは独自命令用にカスタム命令フィールドを持つため、このフィールドを使用して拡張命令を実装することができる。

コプロセッサの利用については「RISC-V 拡張としての実装」、「並列動作を前提とした実装」、「専用データの入力による実装」の3つのパターンが考えられる。RISC-V 拡張として実装する場合、プロセッサコアが持たない命令（RV32Iに規定されない拡張命令）をコプロセッサ側に実装することで、プロセッサコアが持つ命令セットを拡張することができる。並列動作を前提として実装する場合、コプロセッサが持つ命令をある種の制御コマンドのような構成とすることで、コプロセッサが持つ機能であったりさらに追加で接続される回路を制御することができる。専用データの入力による実装をする場合、命令実行開始時にあるまとまったデータを渡すことによって、それに対してコプロセッサ側でデータの加工処理などを行うことができる。

3.3 プロセッサ生成ツール

プロセッサ生成ツールは、先に述べたプロセッサコアとコプロセッサを組み合わせ、FPGA上で動作するプロセッサを生成するためのツールである。具体的には、プロセッサ生成ツールはプロセッサコアとコプロセッサの設定ファイルを入力とし、これに基づいてプロセッサコアとコプロセッサを組み合わせた回路を生成する。なお、プロセッサコアに対してコプロセッサを複数の接続を行えるように設計を行っている。ユーザーは、自身の要求に応じてプロセッサ生成ツールに組み合わせを指示することによって、専用の構成を持つプロセッサを生成する。生成される回路は実際にはVerilogで記述されたプログラムファイルの形で出力されるため、これをVivadoなどのFPGA開発ツールで読み込み、合成および配置配線を行うことでFPGA上でプロセッサを動作させることができる。

プロセッサコアおよびコプロセッサは接続のための専用インターフェイスを持つため、プロセッサ生成ツールはこれを適切に接続するように回路を生成する。このとき、プロセッサコアとコプロセッサを単にワイヤを用いて接続するだけではなく、間に「調停回路」という専用の回路を挟むことで、プロセッサコアとコプロセッサの間での独自の通信制御を行うようにする。調停回路はプロセッサコアからの信号を受け取り、これを適切にコプロセッサに伝え、またその逆の働きもする。例えば、プロセッサコアに複数のコプロセッサが接続されている場合、プロセッサコアから渡される命令を分配する必要があるほか、コプロセッサの応答を適切に選択してプロセッサコアに返す必要がある。これらの制御を調停回路が担当する。

プロセッサ生成ツールはRust言語（以下、Rust）を用いて実装した。プロセッサ生成

ツールは、インターフェイスとして Rust の内部 DSL を提供する。そのため、ユーザーはプロセッサ生成ツールが提供するトレイトや構造体、関数を使用することによって、プロセッサコアおよびコプロセッサの組み合わせ指示を行う。内部 DSL として提供されることから、ユーザーはエディター上での補完や、型システムによる静的検証といった機能を活用しながら構成系を使用することができるという利点がある。実際に、プロセッサ生成ツールを使用するためのコード例を以下に示す（一部を「...」で省略している）。

```

1 #[derive(Debug)]
2 pub struct Rv32iMini;
3
4 impl CopProfile for Rv32iMini {
5     fn opcodes(&self) → Vec<(&'static str, OpCode)> {
6         vec![("INST_ADD", OpCode::new(0b0110011, 0b000, 0b00000000)), ...]
7     }
8
9     fn body(&self) → CopImpl {
10         CopImplTemplate::from(&Rv32iMini)
11             .set_ready(include_str!("ready.v"))
12             .set_exec(include_str!("exec.v"))
13     }
14 }

```

■ 4 従来の技術との相違

■ 4.1 ハードウェアレイヤーの隠蔽

本プロジェクトでは、このアプローチおよび考え方のことを“Logic as Software”と銘打ち、これをプロジェクトのコンセプトとして掲げ、開発を実施した。このコンセプトは C や Java といった一般的に使用されるプログラミング言語に親しんできた開発者にとって易しく、FPGA 開発に対するハードルを下げることができる。このような既存言語ではモジュールやクラスといった概念が標準で存在し、開発者は自然とこのような概念を習得している。本プロジェクトでは、この習得度をそのまま FPGA 開発の文脈に持ち込むことができるように、プロセッサコアやプロセッサ生成ツールの設計を工夫している。

具体的には、FPGA の回路を記述するための HDL とそれを管理するための Rust プログラムを組み合わせるアプローチを採用した。このアプローチにより、FPGA 開発におけるハードウェアレイヤーの隠蔽が実現される。従来の FPGA 開発では、ハードウェアの詳細に深く関与する必要があり、これが開発の複雑さと時間の増大を招いていた。しかし、本プロジェクトにおいて採用した方法では、Rust プログラムがハードウェアレイヤーを抽象化するような回路を自動生成するため、開発者がより高いレベルでの設計と制御に集中できるようになった。これに

より、開発プロセスが簡素化され効率化が図られる。

4.2 FPGA開発に必要な工程の削減

これまで、FPGA開発としていけば一からHDLを記述し、さらにそれを検証するためのテストベンチをHDLで記述し、そしてシミュレーションを実行し、という長い工程が必要であった。ここで触れた工程の先にも数多くのやらなければならない工程が存在し、それらを通してようやく実機での動作を確認できる。ただし、この実機での動作確認がすぐに完了するという事例は少なく、多くの場合は何度もさらに修正を繰り返す必要がある。

IPコアを使用することでこのような工程を短縮できる場合もあるが、それでもなお多くの工程が必要である。また、IPコアを使用する場合は、そのIPコアが提供する機能に制限があるため、自由度が低いという問題もある。IPコアのカスタマイズのために公開されているパラメーター数が少なかったり、公開されているパラメーター数が多くてもそれらのパラメーターが自分の求めるものと一致しなかったりと、IPコアを使用することで得られる利点が少ない場合もある。

本プロジェクトの成果を使用することで、これらの問題を解決できると考えている。本プロジェクトで開発したプロセッサ生成ツールを使用することで、ユーザーは自分の求めるプロセッサを自由に設計できる。IPコアの利用とは異なり、回路の部分を自由に変更できるため、自由度が高い。このツールで生成できるプロセッサの多くは自動生成されるため、ユーザーに対して要求される工程は少ない。しかも、自動生成されるプロセッサの多くは検証済みであることから、不具合の箇所を見つけるための工程も少なくて済む。

5 期待される効果

本プロジェクトでは“Logic as Software”というコンセプトを新規に発案した。このコンセプトに基づくHDLとRustプログラムの組み合わせによるFPGA開発におけるハードウェアレイヤーの隠蔽というアプローチは、新しいものである。本プロジェクトで採用したこのアプローチは、FPGA開発の効率化と簡素化に貢献するものであり、今後のFPGA開発における一手法として提案したい。

本プロジェクトで開発したプロセッサは、RISC-VをISAとして採用した。RISC-Vはこれまでに定義されていた数多くのISAが抱えていた課題が解決されると言われ、またISA設計がオープンソースかつロイヤリティフリーとなっていることから、近年注目を集めている。しかし、個人開発者がRISC-Vを採用したプロダクトを開発するには、参考となる資料や実装例が少なく、高い壁が立ちだかっている状況である。本プロジェクトの成果によって、誰もが自由に、かつ容易に、RISC-VをISAとして採用したプロセッサを利用、あるいは組み込んだプロダクトを開発できる未来が実現されることを期待する。

6 普及の見通し

本プロジェクトの成果は全てGitHub上で公開しているため、Sasanquaは誰でも自由に利用することができる。今後は成果を利活用するためのドキュメントを準備し、併せて、関連コミュニティにも積極的に情報を発信していく。多くの人に認知されることで、本プロジェクトの成果が広く利用されることを期待する。

現在、本プロセッサの成果である Sasanqua をより直感的に扱うための「ツールキット」に開発に着手している。ツールキットの開発によって、プロセッサコアやコプロセッサの組み合わせ指示、プロセッサ生成ツールの実行、生成された回路の合成および配置配線、FPGA への書き込みといった一連の作業を GUI で提供することを目指している。他にも多くの機能を検討および実装することでより扱いやすいツールキットを探求し、多くの人に使用されるプロダクトとして成長させていく。

関連 URL

Sasanqua : <https://github.com/SasanquaProject>

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、FPGAを用いた開発の難易度を低減させ、より多くの開発者が容易に扱えるようにすることを目的としている。クリエイタはRISC-VベースのOSを自作したり、FPGAを触ったりするなかで、もっとFPGAが簡単に扱えるようになれば、この面白さを多くの人に広げられるのではないかという動機で、本プロジェクトを考案した。

プロジェクトにおいては、RISC-Vの基本命令セットであるRV32Iをベースとしたプロセッサコアと、それらの命令セットを拡張するコプロセッサの開発を行った。これにより、開発者はプロセッサコアとコプロセッサを組み合わせることで、独自のプロセッサ構成を自由に設計できるようになる。さらに、本プロジェクトで開発されたコンポーネントはオープンソースとして公開されており、FPGA開発のアクセシビリティを向上させるとともに、RISC-Vコミュニティの発展に寄与することが期待され、FPGA開発の敷居を大幅に下げることにより、ハードウェア開発の新たな可能性を切り拓くものである。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトが目的としていた「FPGA開発の難易度を下げる」については、プロセッサコアやコプロセッサ、およびこれらを扱うためのツールキットを開発し、FPGA開発における革新的な手法を提案しており、達成されているものと考えられる。本プロジェクトのコンセプトである「Software as Logic」は、従来のプログラミング言語に慣れ親しんだ開発者にとって理解しやすく、FPGA開発の入門障壁を著しく低減するものである。特に、HDLとRustプログラムを組み合わせることによるハードウェアレイヤーの隠蔽は、開発者がより高いレベルでの設計と制御に集中できるようにし、FPGA開発の効率化と簡素化に大きく貢献していると言っても過言ではない。

また、本プロジェクトにおけるHDLによる回路設計の補助は、FPGA開発に必要な不可欠なスキルであるにもかかわらず、その複雑さから開発のハードルを高めている問題を解決するものである。プロセッサ生成ツールを用いることで、開発者は必要とされるVerilogプログラムの量を大幅に削減でき、プロセッサコアが動作に必要なほとんどを担っているため、記述するプログラムの難易度も低減される。このようなアプローチにより、FPGA開発における自由度を高めつつ、開発工程を短縮することが可能となる。

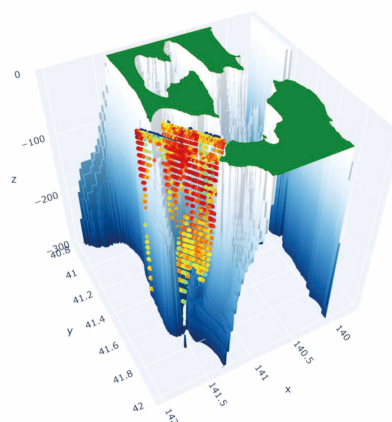
2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

魚群や動物プランクトンの空間分布を可視化するシステムの開発

— 海洋の環境から海の生物の分布をAIで予測する — 松村優作、佐藤寛通

海洋環境から海の生物 をAIで予測する

従来、海の中の魚群や動物プランクトンの空間分布を把握することはできませんでした。私たちはこれらを海流モデルとAIの技術を用いて把握できるモデルを開発しました。



津軽海峡における動物プランクトンの空間分布

魚群や動物プランクトンの空間分布を 可視化するシステムの開発

松村 優作 (北海道大学 水産科学院 海洋生物資源科学専攻)

佐藤 寛通 (北海道大学 環境科学院 生物圏科学専攻)

1 背景

本プロジェクト以前では、魚群や動物プランクトンの空間分布を把握することはできなかった。魚群や動物プランクトンの空間分布が把握できないと水産資源管理や漁獲規制が正確に行われない可能性がある。

魚群の空間分布が予測できないのは、餌となる動物プランクトンの空間分布が予測できないことが原因である。動物プランクトンの空間分布が予測できていない原因は、衛星による観測ができず、動物プランクトンが自己遊泳能力を持つためにその能動的な行動を数理モデルで再現することができなかったためである。この2つの課題が解決できず、動物プランクトンの空間分布を予測することはできなかった。

2 目的

本プロジェクトの目的は、海洋物理環境データから動物プランクトンの空間分布を予測するモデルと、動物プランクトンモデルをベースとした魚群の分布を予測するモデルを開発することである。

3 開発の内容

図1に本プロジェクトで作成した動物プランクトンの空間分布予測モデル、スケトウダラ魚群モデルの概略図を示す。本プロジェクトで開発したモデルはある時間の水温、塩分、流速のデータから動物プランクトンの空間分布を予測するモデルと、動物プランクトンの空間分布予測結果を基に、魚群（スケトウダラ）の資源量を出力するモデルから構成される。

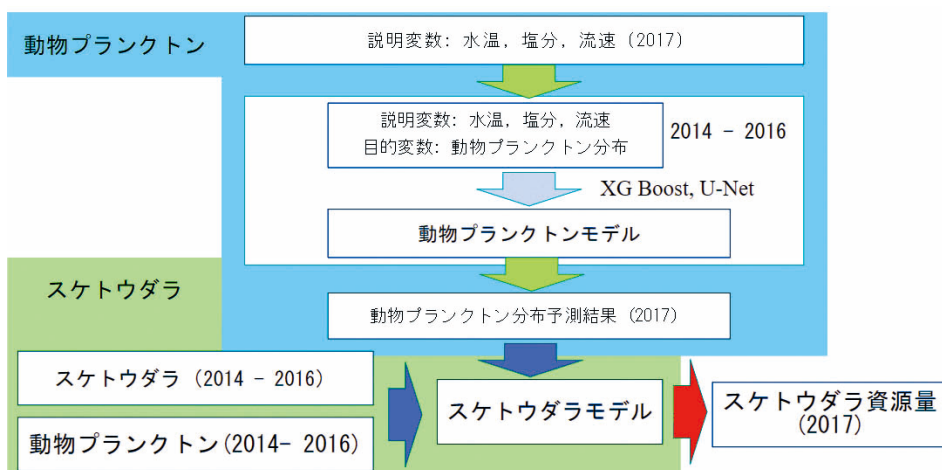


図1：動物プランクトンの空間分布モデルとスケトウダラ魚群モデルの概略図

機械学習を用いて動物プランクトンの空間分布予測モデルを開発した。まず2014から2016年の海洋物理環境データと、魚群探知機で取得した2014から2016年の動物プランクトンの空間分布データとの関係性を機械学習でモデル化し、2017年の動物プランクトンの空間分布の予測を行った。その結果の一部を図2に示す。図2の左列は動物プランクトンの空間分布の魚群探知機で取得した実測値を示し、右列は本プロジェクトで開発したモデルで予測した結果を示している。①②③はそれぞれ別の海域である。図2の①と②から、動物プランクトンの少ない海域と多い海域を判別できていることがわかる。図2の②と③から、動物プランクトンの行動生態学的特徴である昼間と夜間にかけて、表層と深層を移動する行動を再現することができた。

スケトウダラの資源量予測モデルを実現するための手段には一般線形モデルを用いた。まず魚群探知機で取得した2014から2016年の動物プランクトンの空間分布データと同じく、魚群探知機で取得した2014から2016年のスケトウダラの資源量データの関係性をモデル化した。開発したモデルを使い、2017年の動物プランクトンの空間分布の予測結果をもとにしたスケトウダラの資源量を予測した。スケトウダラの資源量を予測した結果、スケトウダラ魚群の資源量予測値は230万匹であった。これは、水産庁の予測値である300万匹とオーダーは一致した。

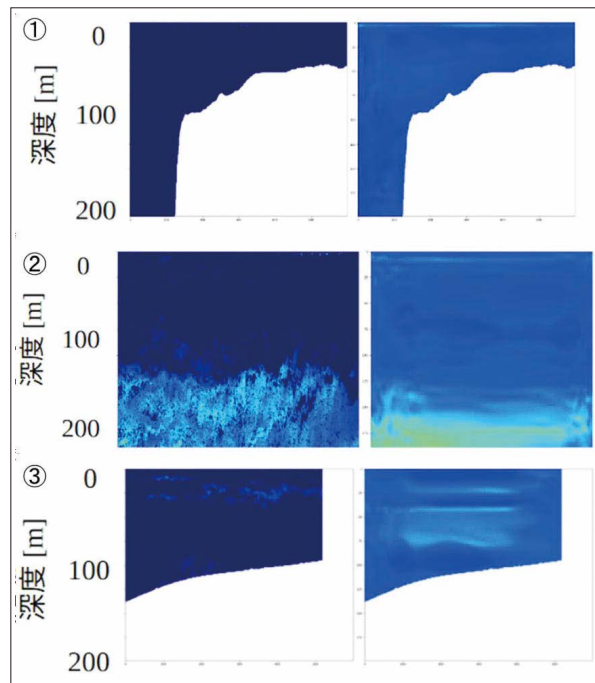


図2：2017年の動物プランクトンの空間分布の実測値とモデル値の鉛直断面図の比較

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動物プランクトンの空間分布モデルは、既存の数値モデルでは再現できなかった日周鉛直移動などの動物プランクトンの行動生態学的な側面を再現することができた。さらに、海域の変化に応じた動物プランクトンの空間分布の量的な変化も再現することができた。また、この予測に必要なパラメーターは水温、塩分、流速、時刻だけである。従来の数値モデルでは日周鉛直移動を再現することが困難であったが、本プロジェクトで開発した動物プランクトンの空間分布モデルは、数値モデルで計算した海洋環境データを基に、動物プランクトンの日周鉛直移動を再現することができる。本プロジェクトで開発したモデルは水温、塩分、流速、時刻だけを要するので、これらの海洋物理環境を正確に予測することができれば、動物プランクトンの空間分布の将来予測が可能である。

また、スケトウダラの資源量予測モデルは、餌環境を考慮することでコンピューター上での資源量予測を実現した。従来、水産庁は毎年乗船調査を実施し多額のコストをかけて調査を行っていた。本プロジェクトで開発したスケトウダラの資源量予測モデルでは、説明変数となる海流モデルの水温、塩分、流速の情報が人工衛星による観測や数値モデルによる再現で取得可能であるため、コンピューター上で予測を完結することができる。そのため、将来的には水産庁の実施する水産資源量管理のコスト削減に大きく貢献することが期待される。また、従来の水産資源量予測は、対象魚種の個体数の動向のみを考慮したもので、海洋物理環境の変動や餌環境を考慮できていなかった。近年の地球温暖化による水産資源の漁獲量の減少や漁場の北上が確認されている現状において、これは致命的な欠陥となると予想される。一方、本プロジェクトで開発したスケトウダラの資源量予測モデルはスケトウダラの餌となる動物プランクトン

の空間分布をもとに予測する。動物プランクトンの空間分布予測モデルは水温、塩分、流速といった海洋環境を説明変数にしている。従って地球温暖化による海洋物理環境の変動といった長期的なスケールの変動に対応可能なモデルだと言える。

■ 5 期待される効果

本プロジェクトで開発した動物プランクトンの空間分布モデルとスケトウダラ魚群の資源量予測モデルは、将来的には水産庁の行う水産資源管理と天然漁業に貢献すると考えられる。水産庁の行う水産資源には、管理に必要なコストの大幅な削減や、地球温暖化といった長期的な海洋環境の変動にも対応を可能にするといった効果が期待される。また、今回のプロジェクトで、動物プランクトンの空間分布を予測して、少ない海域と多い海域を判別することができた。このような機能は、魚類の餌資源を推定することに応用できると考要な手掛かりとなる餌生物の分布データを提供し、漁場探索の時間やコストの削減、例えば近年高騰している燃油の節減といった効果が期待される。

■ 6 普及（または活用）の見通し

本プロジェクト期間内に行った成果の普及に関する取り組みとして、リバネス社主催のマリンテックグランプリに参加し、本プロジェクトで開発したモデルを活用する動物プランクトンベースの水産資源量管理の発表を行った。また、同社主催の超異分野学会北海道フォーラムに参加し、同様の発表を行った。今後開発が進み、精度が向上できれば、漁師個人や水産庁などに対し広く普及させることを考えている。

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、海洋物理環境データを基に魚群や動物プランクトンの空間分布を予測するシステムの開発を目的としている。漁獲量の将来予測や漁獲規制の正確な実施を可能にすることを目指しており、従来の方法では把握が困難であった魚群や動物プランクトンの空間分布の理解を深めることを試みている。クリエイター2名が、実際に北海道大学水産学部において、スケトウダラの資源量調査を行う中で、テクノロジーによる解決ができないかと考えたものである。

海洋物理環境データと魚群および動物プランクトンの空間分布データを収集し、これらのデータを用いてモデルの開発を行い、動物プランクトンの空間分布予測モデルと魚群の空間分布予測モデルの開発を行う。これらの取り組みにより、海洋生物の空間分布予測に関する新たなアプローチを提供し、水産業や資源管理に対する貢献が期待される。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトで開発した動物プランクトンの空間分布モデルは、既存の数値モデルでは再現できなかった日周鉛直移動を再現した。この予測に必要なパラメーターは水温、塩分、流速、時刻であり、これらは気象庁のMOVE/MRI.COM-JPNにおいて2週間後まで予測することができるとされているため、本プロジェクトで開発したモデルによって理論上は動物プランクトンの空間分布の将来予測が理論上は可能である。ただし、再現性に関する検証が十分にできていないことから、予想が実際に行えたわけではない。

また、本プロジェクトで開発された動物プランクトン量からスケトウダラの空間分布を推定するモデルであるが、クリエイターの成果報告書においては資源量予測をコンピューター上の数値だけで予測できる可能性を示すことができたと考えているとされているが、その精度は低く、再現可能な形で予測できるまでには至らなかったのは残念である。

2023年度未踏IT人材発掘・育成事業

Capabilityを主軸とするマイクロカーネル

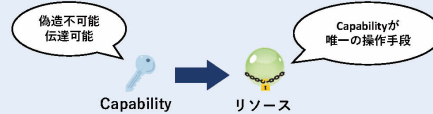
ー Caprese: Capability-based Securityを採用したマイクロカーネル ー

今村 翔太（慶應義塾大学）

Caprese Microkernel

Capability-based Securityをメモリ領域などのハードウェアリソースやプロセスなどのカーネルオブジェクトに対して適用したマイクロカーネルを開発。従来ではカーネル内で動作させなければ操作できなかったリソースをCapabilityによりユーザランドから操作可能に。

Capability: リソースへの参照と権限が一体となったオブジェクト



<https://github.com/caprese-project/caprese>

Sample OS

Capreseをカーネルとして使用したOSの実装例。メモリ管理やプロセス管理などのOS機能やUARTなどのドライバがそれぞれ独立したプロセスとして実行され、ファイルシステムやシェルなどのOSとしての基本的な機能を備えている。

<https://github.com/caprese-project/sample-os>

libc/libc++

CapreseとSample OSに使用される、OS機能に依存しないC/C++標準ライブラリを実装。

すべてのシンボルがweakであるため実装の上書きが可能であり、独自のOSに向けたC/C++標準ライブラリをOS機能に依存する実装のみで提供可能に。

<https://github.com/caprese-project/libc>

Capabilityを主軸とするマイクロカーネル

今村 翔太（慶應義塾大学 環境情報学部 環境情報学科）

1 背景

Linuxに代表される従来のOSは、特定の操作を行うために特権を必要としたり、ハードウェアを操作するようなデバイスドライバがカーネル空間で動作するようになっていたり、本来不要な権限を保持した状態で実行される環境になっている。

不要な権限を保持しているとそのプログラムにバグがあった場合の影響範囲が広がってしまうため慎重にプログラムを組む必要があるが、開発者は必ずしもカーネルやセキュリティに精通しているわけではなく、そのため脆弱なプログラムを提供してしまうことがしばしば発生する。

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

2 目的

このような状況を改善するためには、権限を細かく分割し、安全かつ容易に分散できる仕組みが必要である。本プロジェクトではこの仕組みを実現するカーネルを新たに開発する。このカーネルは権限をオブジェクトとして表現し、プロセス間で送受信することで権限の分散を実現する。

3 開発の内容

本プロジェクトでは、Capability-based Securityを用いたマイクロカーネル「Caprese」と、そのうえで動作するOSのサンプル、これらの上で動作するOS非依存で汎用的なC/C++標準ライブラリーを実装した。対象とするCPU命令セットは64bitのRISC-Vであり、仮想環境であるQEMUと実機であるVisionFive2に向けて動作する。

3.1 Capreseについて

まずはCapability-based Securityの一般的な概念について説明する。Capability-based Securityでは、図1のように、あるリソースへの参照とアクセス権を一体としたCapabilityという概念を用いてセキュリティーを実現する。Capabilityは伝達可能かつ偽造不可能な参照であり、このセキュリティーを実現したシステムではそのリソースへアクセスする唯一の手段となるという特徴を持つ。

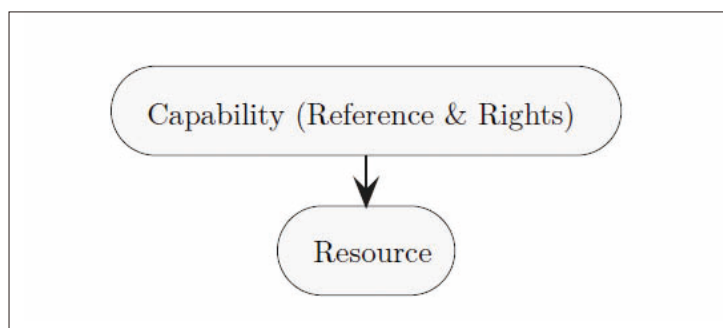


図1：Capabilityの概要図

次にCapreseにおけるCapabilityについて説明する。図2のように、CapreseがCapabilityで保護するリソースはカーネル内に存在し、ユーザーアプリケーション側から直接操作することはできない。カーネルへのシステムコールがそのリソースを操作する唯一の手段となる。

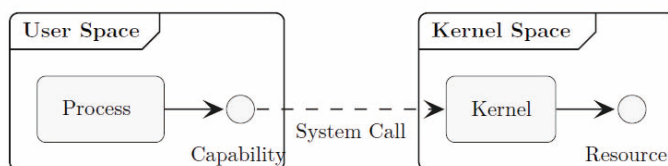


図2：CapreseにおけるCapability

また、Capabilityはプロセス間で委譲あるいは転送することができる。どちらの操作を行っても、Capabilityを持っていたプロセスはその権限を失い、委譲あるいは転送先のプロセスがその権限を得る。委譲した場合は委譲元のプロセスはその権限を取り戻して委譲先の権限を無効化することができるが、転送した場合は取り戻すことはできない。Capreseでは、このCapabilityを物理メモリーなどのハードウェアリソースやプロセスなどのカーネルオブジェクトの保護に適用した。これにより、OS機能やデバイスドライバーなどの従来は特権が必要であったプログラムをユーザーアプリケーションと同じレイヤーで動作させつつ、より容易に最小権限に近づけることができる。

Capreseが提供するCapabilityには次のようなものがある。

- **Memory Capability**

物理メモリーの範囲を表す。このCapabilityは領域の一部をほかのCapabilityに変換することが可能であり、変換したCapabilityの種類に応じてその領域に対する操作が可能になる。

- **Task Capability**

特定のプロセスに対する操作を提供する。このCapabilityを利用することでユーザーアプリケーション側でプロセスを管理する機構を実装したり、別のプロセスへCapabilityを委譲/転送したりすることができる。

- **Endpoint Capability**

プロセス間通信におけるチャンネルに対する操作を提供する。

- **Page Table Capability**

プロセスの仮想アドレス空間を構成するページテーブルに対する捜査を提供する。このCapabilityと後述する Virt Page Capabilityを利用することで、プロセスの仮想アドレス空間をユーザーアプリケーション側から構成することができる。

- **Virt Page**

Capability特定のページを表す。このCapabilityと前述のPage Table Capabilityを利用することで、プロセスの仮想アドレス空間をユーザーアプリケーション側から構成することができる。

- **Cap Space Capability**

Capabilityを管理するための領域を表す。このCapabilityはカーネルにメモリー領域を割り当てるために使用される。これにより、プロセスが持てるCapabilityの上限数を増やすことができる。

- **ID Capability**

システム全体で一意となる値を表す。このCapabilityはユーザーアプリケーションが提供するリソースに対して一意なIDを割り当てるために使用される。

■ 3.2 OSのサンプルについて

このOSは、CapreseによるCapabilityの機構が実際にOSやドライバー開発に適合することを示すために開発した。OS機能としては、次のようなものを実装した。

- ・メモリー管理プロセス
- ・アプリケーション管理プロセス
- ・ドライバー管理プロセス
- ・ファイルシステム
- ・シェル

■ 3.3 OS非依存のC/C++標準ライブラリーについて

CapreseはファイルシステムなどのOSとして必要とされる機能を持たず、上に乗るOSのインターフェイスをPOSIXなどの既存のものに制限しない。そのため、OS機能に依存する部分をスタブとして提供するようなC/C++標準ライブラリーがあれば、どのようなインターフェイスを持つOSを開発してもそのOSに向けた実装が容易になると考え、本ライブラリーの開発に至った。これによりOS開発者はOS機能の実装のみに集中できるため、OS開発の生産性向上に役立つと考えられる。

■ 4 従来の技術との相違

従来のOSでは、OS機能やデバイスドライバーが特権を持ち、本来不要な権限を保持した状態で実行されていた。Capreseは、従来では操作するために特権が必要であったリソースをCapabilityとして切り出すことで権限を細分化し、各機能に必要な最小限の権限を安全かつ容易に付与することを可能にした。

■ 5 期待される効果

Capreseは、Capability-based Securityをハードウェアリソースやカーネルオブジェクトに適用することで、上に乗るOSをより簡単に最小権限に近付けることができる。これにより、独自のOSやデバイスドライバーを開発する必要がある分野において、セキュリティを重視したシステムを容易に開発することができるようになることが期待される。

■ 6 普及の見通し

本プロジェクトは既にオープンソースとなっているが、ドキュメントを整備することで開発者を増やし、コミュニティを形成し、普及を目指していく。

関連URL

ソースコード：<https://github.com/caprese-project>

PMの評価

採択時の評価

本プロジェクトは、従来のオペレーティングシステムが持つセキュリティに関わる問題点を解決するために、Capability-based Securityを中心としたマイクロカーネル「Caprese」の開発を行った。主な目的は、従来のUNIX OSにおいて特権が破られた時に発生するセキュリティインシデントの軽減を解消し、セキュリティと効率性を向上させることである。クリエータ自身はCapability-based Securityに関する開発は初めてであるが、マイクロカーネルを作ってみたいという自身の強い内発的動機をスタートとしており、まさにやりたいことを叶えるプロジェクトと言える。「Caprese」の核心となるのは、権限を細かく分割し、安全かつ柔軟に管理できることであり、これにより従来のOSにおけるセキュリティ上のリスクを低減する。

本プロジェクトでは、それらを実装したマイクロカーネル「Caprese」に加え、Caprese上で動作するOSのサンプルと、汎用的なC/C++標準ライブラリーの実装も行われており、Capability-based Securityの効果を検証し、実用性を探求した。

プロジェクト終了時の評価

本プロジェクトにおいては、これまでのUNIX系OSにおけるセキュリティアプローチとは全く異なるCapability-based Securityを実装するために、独自のカーネルやOSコマンド群、ライブラリーなどを一から開発し、約5万行という大規模な成果を生み出した。当初より目標としていたCapability-based Securityを実装するマイクロカーネルを開発し、サンプルOSや標準ライブラリーを実装し、実機で稼働させることまで成功しており、ネットワーク機能以外の部分について、全て目標を達成している。

元々は、マイクロカーネルを作りたいという好奇心から始まったプロジェクトではあるが、それにセキュリティ向上という意味を持たせて、今後の発展にもつながるアプローチを完遂させたことは素晴らしい。

五十嵐
PM稲見
PM岡
PM落合
PM曾川
PM竹迫
PM田中
PM

ミトウのキセキ

2023年度 未踏IT人材発掘・育成事業 成果報告書集

2024年10月31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）
デジタル基盤センター イノベーション部 未踏企画グループ

〒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 © 2024 Information-technology Promotion Agency, Japan.

