

研究領域「数理・情報のフロンティア」事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

様々な科学分野や産業界で生み出されている膨大なデータを活用し新たな科学的・社会的・経済的価値を創出していく上で、数学・数理科学と情報科学とが連携・融合した新たな概念やアプローチの創出が不可欠となっています。メカニズムを抽出する数理モデル型アプローチとデータ駆動型アプローチとがそれぞれの強みを相補的に生かした革新的な情報活用手法の創出を通じて、実社会における情報活用の加速・高度化が期待されています。

本研究領域では、情報科学および数理科学、そしてその二つの分野を融合・応用した研究開発によって未来を切り拓く若手研究者を支援するとともに、新しい価値の創造につながる研究開発を推進します。具体的には、従来の情報科学の研究課題のみならず、情報科学と数理科学の双方の知見を活かしたデータ活用手法、例えばデータ同化、トポロジカルデータ解析、圧縮センシング、差分プライバシー等を含む、情報科学および数理科学に関わる幅広い専門分野、および情報科学、数理科学の他分野への応用において、新しい発想に基づいた挑戦的な研究構想を求めます。

研究推進においては、人材育成の観点を重視し異分野の若手研究者同士が交流し相互に触発する場を設けることで、未来に貢献する先端研究を推進する研究人材の育成や、将来の連携につながる研究者の人的ネットワーク構築をはかります。

なお、本研究領域は文部科学省の人工知能/ビッグデータ/IoT/サイバーセキュリティ統合プロジェクト（AIP プロジェクト）を構成する「AIP ネットワークラボ」の一環として運営していきます。

2. 事後評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

「戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化開発を除く。)の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

2-2. 評価対象研究者及び研究課題

2021年度採択研究課題

- (1) 柴 康太（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）
積層型AIチップの低電力高効率アーキテクチャ
- (2) 濱西 夏生（東京大学大学院情報学環 特別研究員）
動画による動作観察と対面した人間を観察する体験とのギャップを埋める
ローコストな時空間インタラクション技術の研究

2020年度採択研究課題

- (1) 相川 勇輔（三菱電機（株）情報技術総合研究所 研究員）
楕円曲線を用いた耐量子計算機暗号の安全性解析と高効率化
- (2) 朝倉 卓人（東京大学大学院情報理工学系研究科 大学院生）
数式と自然言語の統合的解析による学術文献理解の研究

- (3) 伊澤 侑祐 (東京工業大学情報理工学院 大学院生)
汎用性と高性能を両立するハイブリッド型実行時コンパイラ
- (4) 石川 勲 (愛媛大学データサイエンスセンター 准教授)
データ解析を見据えたKoopman作用素の包括的な理論研究
- (5) 石田 隆 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 講師)
ベイズ誤差推定及び正則化手法の研究
- (6) 大川 武彦 (東京大学大学院学際情報学府 大学院生)
模倣AIエージェントによる人物行動理解
- (7) 大西 祐輝 (東京工業大学工学院 大学院生)
リーマン計量の合成による包摂アーキテクチャの構成
- (8) 門本 淳一郎 (東京大学大学院情報理工学系研究科 助教)
微小チップ群を埋め込んだ形状自在情報デバイスの研究
- (9) 木村 慧 (九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授)
演算不変性を用いた整数計画問題のアルゴリズム開発
- (10) 久野 恵理香 (大阪大学大学院理学研究科 助教)
写像類群の擬等長分類と機械学習への展開
- (11) 黒木 祐子 (東京大学大学院情報理工学系研究科 助教)
限られた情報に基づく統計的機械学習と数理最適化アルゴリズムの開発
- (12) 計良 宥志 (千葉大学大学院工学研究院 助教)
データドリブン計算代数幾何
- (13) 末廣 大貴 (九州大学大学院システム情報科学研究院 助教)
学習問題の統合的帰着
- (14) 高木 健 (東京大学大学院工学系研究科 大学院生)
カクテルパーティ効果に着目したオンライン話者とオフライン話者の
選択的聴取の支援
- (15) 高瀬 翔 (東京工業大学情報理工学院 助教)
ランダムベクトルを用いた軽量な埋め込み表現の構築
- (16) 辻 寛 (大阪大学大学院理学研究科 大学院生)
量子論基礎にかかる高次元バナッハ空間の幾何学的研究

- (17) 中島 祐人 (九州大学大学院システム情報科学研究所 助教)
辞書式順序に基づいた文字列データ処理法の構築
- (18) 野間 裕太 (東京大学大学院工学系研究科 大学院生)
大スケールかつ展開可能な折り紙構造のファブリケーション手法
- (19) 韓 燦教 (東京大学大学院情報学環 助教)
埋め込み型無線センサを用いた立体形状計測
- (20) 坂東 宜昭 (産業技術総合研究所情報人間工学領域 主任研究員)
統計的時空間モデルに基づく雑踏音環境マッピング
- (21) 前田 洋太 (ソニーグループ(株) R&Dセンター 研究員)
Kudla予想の解決及び志村多様体の研究と暗号への応用
- (22) 村松 久圭 (広島大学大学院先進理工系科学研究科 助教)
周期/非周期分離制御の開拓
- (23) 矢倉 大夢 (筑波大学理工情報生命学術院 大学院生)
創作支援のための知覚的スタイル模倣フレームワーク
- (24) 横井 祥 (東北大学大学院情報科学研究科 助教)
言葉が埋め込まれた空間の形と言葉の意味の接続
- (25) 吉村 直也 (大阪大学大学院情報科学研究科 大学院生)
時系列信号の画像表現を用いた複雑行動認識
- (26) 和賀 正樹 (京都大学大学院情報学研究科 助教)
近似的数理モデルによるCPSの動的安全機構

2019年度採択研究課題

- (1) 宇田 智紀 (東北大学材料科学高等研究所 助教)
レーブグラフの順序定式化の数理とデータ解析
- (2) 宮内 翔子 (九州大学システム情報科学研究所 助教)
高精度3次元物体認識を実現するDenoising & Meshing DNNの構築

2019年度採択研究課題（加速フェーズ）

- (1) 磯沼 大（東京大学大学院工学系研究科 特任助教）
談話構造に基づく教師なし生成型要約
- (2) 唐木田 亮（産業技術総合研究所人工知能研究センター 主任研究員）
大自由度ニューラルネットワークの学習に潜む幾何学的構造の解析と信頼性評価への展開
- (3) 谷 林（理化学研究所革新知能統合研究センター 研究員）
Interpret-able Deep Learning Framework that Generates Pixel-wise Labels from Human Interaction（解釈可能なインタラクティブ深層学習）
- (4) 笹谷 拓也（東京大学大学院工学系研究科 特任助教）
マルチモード準静空洞共振器を用いた生体内における電力と情報の無線ネットワーク
- (5) 鈴木 杏奈（東北大学流体科学研究所 准教授）
地下資源開発に資する「流れ」と「構造」の逆解析
- (6) 鈴木 彼方（富士通（株）富士通研究所人工知能研究所 研究員）
モデルベースト制御による理論保証を伴う深層学習ロボットの研究
- (7) 早瀬 友裕（富士通（株）富士通研究所人工知能研究所 研究員）
自由確率論による深層学習の研究
- (8) 平木 剛史（筑波大学図書館情報メディア系 助教）
情報投影と投影対象最適化による視触覚重畳提示
- (9) 藤本 悠介（北九州市立大学国際環境工学部 准教授）
周波数領域の事前知識を用いた動的システム推定
- (10) 室屋 晃子（京都大学数理解析研究所 助教）
階層的グラフの書き換え系での文脈等価性証明支援

2-3. 事後評価の実施時期

2022年3月 各研究者からの研究報告書に基づき研究総括による事後評価を実施した。

2-4. 評価者

研究総括

河原林 健一 国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系 教授

領域アドバイザー

穴井 宏和 富士通(株)富士通研究所人工知能研究所 所長
伊藤 哲史 京都大学大学院理学研究科 准教授
稲見 昌彦 東京大学先端科学技術研究センター 教授
内田 誠一 九州大学 大学院システム情報科学研究院 教授
太田 慎一 大阪大学大学院理学研究科 教授
大武 美保子 理化学研究所革新知能統合研究センター チームリーダー
川原 圭博 東京大学大学院工学系研究科 教授
佐藤 いまり 国立情報学研究所コンテンツ科学研究系 教授
鈴木 大慈 東京大学大学院情報理工学系研究科 准教授
高木 剛 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
武田 朗子 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
千葉 滋 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
蓮尾 一郎 国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系 教授
宮尾 祐介 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
森前 智行 京都大学基礎物理学研究所 准教授

外部評価者

該当なし

3. 総括総評

本領域では、若手研究者が個を確立し、自由な発想で主体性を発揮し挑戦的な研究開発を推進する支援をするとともに、将来の連携の土台となる人的交流の機会を提供してきた。

こうした環境の中で、2019年度より研究を開始した1期生研究者のうち、2022年度加速フェーズ研究を実施した10名、及び延長対象者2名、2020年度より研究を開始した2期生研究者のうち26名、及び2021年度より研究を開始した3期生研究者のうち早期終了者2名が、学術・産業・社会・文化的に新たな価値を生む、数理・情報学に関わる成果を出し研究期間を終了、今回事後評価対象課題に至った。

早期終了者2名を含む40名とも、それぞれ数学・数理科学、情報学、制御工学、AI理論・応用分野の周辺で世界的にビジブルな研究業績を残してきている。特に機械学習理論の基礎分野、およびAI・情報学応用分野における研究業績は、国内では同世代でトップクラスであり、かつ、当領域の主眼でもあった数理・情報、さらには物理・生物と複数分野に跨がる研究業績も出てきており、ACT-X卒業後もさらに国際的に活躍すると確信している。実際、ACT-X卒業生が、日本学術振興会育志賞（2名）、科学技術への顕著な貢献 2022（ナイスステップな研究者）（1名）、MIT Technology Review Innovators Under 35 Japan（2名）などの有名な賞を受賞してきた。また今後、さきがけへの採択者（現在6名）、あるいは創発的研究支援事業採択者（現在2名）が増えてくることを期待している。

現在、1期生から3期生の研究者による共同研究、およびACT-i研究者を巻き込んだ新たな分野の共同研究がいくつも実施中である（既に成果として発表された論文もある）。さらに1期生から3期生が企画した研究集会在複数回行われるなど、コロナ禍でも活発に研究交流が行われてきた。これはオンラインやハイブリッド形式とはいえ、領域会議が3期に渡る研究者の自主的な共同研究を推進してきた結果と考える。さらに、ライフイベントを極力優先するような領域運営も浸透し、1期生、2期生の中で研究の「中断」・「育児休業」を取得する研究者も増えてきた。これらの研究交流、そしてライフイベントを優先する運営は、若手研究者をサポートするという意味で今後の指針になるものであり、ACT-Xの価値を示せたのではないかと考えている。

今後も40名それぞれが研究活動や人的交流を継続して、多様な研究テーマで世界をリードする活躍をしていくことを期待したい。また来年度以降、領域会議が本格的に対面方式に戻ることが予想され、さらなる研究交流、および人的交流は進むことを期待している。

尚、今回事後評価対象の1期生、2期生研究者28名中7名は、加速フェーズへ移行し1年間の加速研究に取り組む事で、これまでの成果を更に加速拡大する事を期待する。また、研究者の来年度以降さきがけ応募を促し、研究者としてのさらなる成長と発展を期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 積層型 AI チップの低電力高効率アーキテクチャ
2. 個人研究者名
柴 康太（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

深層機械学習でプルーニングを活用した学習・推論を行う際には疎行列演算が重要な位置を占める。本研究ではこの疎行列演算を、三次元積層 SRAM を利用して高速かつ低消費電力で実行する AI 推論処理チップの構成法を研究開発した。早期終了で研究期間が短縮されたが、研究終了までの期間は計画通りの進捗であり、優れた成果をあげたといえる。例えば、短期間であるにもかかわらず、英文論文誌に 2 編の論文を発表したほか、さらに 2 編の論文を投稿中である。本研究の具体的な成果は 3 つで、一つ目としてプルーニング処理によって得られる疎行列を規則性のある疎行列に並べ替えて圧縮する手法を新たに開発した。本研究では並べ替え後の疎行列の形式を CRSM 形式と名付け、それを三次元積層 SRAM を活用して高速に処理するチップを設計・試作し、評価を行った。また三次元積層 SRAM 内で直接、疎行列の計算を行い、低消費電力を実現するチップも設計した。これは当初の計画には含まれない、研究を進める中で発展的に得られた成果であるが、今後大きく発展する可能性を秘めており、より研究を進めていくことが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 動画による動作観察と対面した人間を観察する体験とのギャップを埋める
ローコストな時空間インタラクション技術の研究
2. 個人研究者名
濱西 夏生（東京大学大学院情報学環 特別研究員）
3. 事後評価結果

本研究では、リアルタイムに対面者の動作情報を記録し、実空間に重畳表示する情報環境を RGB カメラのみを用いて構築するためのソフトウェア技術とインタラクション環境の構築を行った。また、対面者の動作情報とのインタラクション手法や動画中の動作を実空間に重畳表示する手法を提案・設計し、プロトタイプシステムを開発し、研究室レベルで実現可能性を検証している。しかし、期間中には、提案手法の実現可能性や本課題の目標である動画からの動作習得可能性を検証するユーザスタディ等が不十分であり、研究成果を国際学会で発表するなどの計画は達成できなかった。また、知財化や社会実装に関するアウトリーチ活動も行われていない。とはいえ短縮された研究期間の中では十分な実績であり、今後の研究の展開に期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 楕円曲線を用いた耐量子計算機暗号の安全性解析と高効率化
2. 個人研究者名
相川 勇輔（三菱電機（株）情報技術総合研究所 研究員）
3. 事後評価結果

耐量子計算機暗号の候補として有力な同種写像暗号について、理論および実装の両方面からの研究を行った。同種写像暗号は楕円曲線に関する大量の演算を必要とする方式のため効率性に課題があった。本研究では同種写像暗号で用いられる KLPT アルゴリズムと構成的 Deering 対応アルゴリズムの改良に取り組み、従来より高速な実装を得た。また、楕円曲線の種々の演算を統一的に扱うために一般化モンゴメリー座標を導入し、楕円曲線の演算の計算効率性を扱う理論的フレームワークを整備した。さらに、他の ACT-X 研究者とともに超特別アーベル多様体の同種写像グラフのスペクトラルギャップの理論解析を行った。耐量子計算機暗号に関連した話題についての招待講演を複数回行っており、研究成果を社会に還元する活動にも積極的に取り組んだ。ACT-X の他の研究者との交流も積極的に行った。このように、同種写像暗号について理論・実装の両面において精力的に研究を進めており、今後もさらなる進展が期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 数式と自然言語の統合的解析による学術文献理解の研究
2. 個人研究者名
朝倉 卓人（東京大学大学院情報理工学系研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究では、数式グラウンディング、すなわち数学論文中に記述された数式記号（例えば、 x や y ）がどのような数学概念に対応しているかを同定するという、極めて挑戦的な課題に取り組んだ。その課題の第一歩として、15 編の論文について、その中の記号（総数 1.2 万）とその数学概念を対応付けたデータセットを構築した。その結果、本来曖昧性のない明確な記述が必要とされる論文において、多くの記号が 2 つ以上の解釈が可能（例えば論文の途中で意味が変わる）という、驚くべき結果を定量的に得ている。現時点では、こうした課題の困難性の把握、データセット構築環境(Mio Gatto)、およびデータセット記述フォーマットを、海外の研究者とのディスカッションも行いながら実現した段階である。今後はこれら知見を活かし、自動対応付け（アノテーション）や、意味の切り替わり（スコープ）の自動判定を実施予定とのことである。同技術は、知の集積としての論文に記述された内容を二次利用するためには不可避であり、その嚆矢として、本研究の今後の発展が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 汎用性と高性能を両立するハイブリッド型実行時コンパイラ
2. 個人研究者名
伊澤 侑祐（東京工業大学情報理工学院 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究は実行時コンパイラの構成法に新しい手法を提案し、高性能なプログラミング言語処理系を比較的少ない労力で開発する道を拓いた。実行時コンパイラはPythonやJavaScriptなどの現代的なプログラミング言語を高速実行するために欠かせない基本部品である。本研究で開発した手法をメタ実行時コンパイラフレームワークと呼ばれるシステムに適用すると、少ない労力で様々なコンパイル手法に対応するように拡張できる。本研究ではこの手法をRPythonというPython用の有力なフレームワークに実際に適用して、その効果を実証した。当該分野の研究は実際に動く実用システムに実装して提案手法の効果を実証するまでに時間を要するが、本研究はACT-Xの短い期間に実装・実証を行い、数編の論文を発表するところまで研究を進めている。いわゆる一流国際会議論文を発表するところまでには至っていない点は残念だが、今後さらに実装・実証を進めて、提案手法をより実用的かつ高度なものに発展させ、論文発表することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： データ解析を見据えた Koopman 作用素の包括的な理論研究

2. 個人研究者名

石川 勲 (愛媛大学データサイエンスセンター 准教授)

3. 事後評価結果

本研究では、Koopman 作用素の性質と力学系の関係性の解明に取り組み、今まで少数の具体的なカーネルの例でしか知られていなかった「Koopman 作用素の有界性と力学系の線形性の同値性」という結果が、かなり広いクラスに解析的なカーネルで成り立つことを証明した。また、一般化スペクトルの計算手法の確立にも取り組み、有限文字のシフト写像について成果が得られた。数学的に非常に難しく抽象度の高い課題であるため、課題として挙げられていたことがすべて解決されたわけではないが、適切な着地点を発見し、数学的な理論結果としても非自明で意義のある様々な成果が得られている。これらの成果により、3 編の雑誌論文発表に至っている。今後の展開として発展性・独自性のある研究課題が挙げられており、これからの研究の発展が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ベイズ誤差推定及び正則化手法の研究
2. 個人研究者名
石田 隆（東京大学大学院新領域創成科学研究科 講師）
3. 事後評価結果

本研究では、主に教師有り機械学習問題におけるベイズ誤差推定手法の開発および関連した正則化手法の導出を実施した。教師有り学習タスクにおいて達成可能な最適判別誤差をデータから推定できれば、あらかじめ各種機械学習手法に対して定量的な目標設定が可能になる。また、何度もデータセットを用いることによるテストデータへの過学習の検知といった信頼性の評価も可能である。そこで本研究では、ラベルの信頼度といったソフトラベルが得られる状況でベイズ誤差を推定する手法を提案した。提案手法を用いて CIFAR10 などの公開データのベイズ誤差を導出し、最近のモデルはベイズ誤差にすでに近接していることを解明した。この結果は ICLR2023 の Notable-top-5%論文に選出された。さらに、ベイズ誤差を推定する際に得られるソフトラベルを利用した新しい正則化法も提案している。本研究は、機械学習モデルに対する定量的な信頼性指標を与え、社会的意義も深い。今後はベイズ誤差だけでなく様々な性能指標に関する限界性能の推定法といった拡張が期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 模倣 AI エージェントによる人物行動理解
2. 個人研究者名
大川 武彦（東京大学大学院学際情報学府 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究では、種類の異なる作業映像を対象とした手操作認識を目標として、新しい映像データに既学習モデルを適用する際の課題を解決し、高い性能の学習器を構成する手法を開発した。具体的には、ユーザの手の見えと背景の環境の相違を解消し信頼できる形式に変えて学習を行う手法、手姿勢推定と手領域抽出を同時に実現し、実験室環境で取得したラベル付きデータにより学習された既存モデルを異なる撮影条件に適用する手法を開発した。その成果を論文誌 IEEE Access や画像処理の主要会議 ECCV で発表し、国内シンポジウム学生奨励賞や所属機関から Research Collaboration Initiative Award を受賞するなど、高い研究成果を挙げた。国内外の研究機関との研究交流を積極的に行い、訪問研究者として海外で実施した研究成果を国際会議で発表するなど、研究者としての著しい成長もあった。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： リーマン計量の合成による包摂アーキテクチャの構成
2. 個人研究者名
大西 祐輝（東京工業大学工学院 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究では、ロボットの制御を目的とした幾何学的な制御理論の構築、制御アルゴリズムの改良から実機（研究用双腕ロボット）の開発までを行い、それぞれで成果を得た。実機の開発が半導体不足などの影響を受けて当初の予定から大幅に遅延したことから、理論的な研究が中心となった。幾何学的な制御理論に関しては、リーマン幾何学に基づく一般化逆行列の解析について既存の研究の理論的な不整合性を正す定式化を得た。この他の研究でも、制御システムの可到達領域を高次元にも容易に拡張可能な幾何学的な量を用いて表現することや、非線形制御系について力学系の Conley 指標を用いた解析によって安定になる範囲を求めるなど、従来の研究よりも数理的なアプローチを採用して精緻な理論を構築している。今後も、研究期間の終わりに完成した実機を用いた実用的な研究を進めると共に、ACT-X で広がった人脈も活用した数理的な研究の追求を期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 微小チップ群を埋め込んだ形状自在情報デバイスの研究
2. 個人研究者名
門本 淳一郎（東京大学大学院情報理工学系研究科 助教）
3. 事後評価結果

オンチップのエナジーハーベスティングないしは無線給電で得られる少ない電力で動作する mm スケールのマイクロコントローラとアクチュエーターからなる微小チップを開発し、それらを、群れを成すマイクロロボットとして多数埋め込んだ形状自在な情報デバイスあるいはロボットを開発しようという非常に野心的かつ挑戦的な研究であった。その野心的な目標設定や挑戦性から、短い ACT-X 期間中の成果は個々の要素技術のレベルに留まっているが、将来の展開に向けた基礎固めができたともいえる。また成果を IEEE Pervasive を始め、いくつかの国際会議論文にまとめることができている。本研究では、現在内外で注目されている RISC-V ISA に基づくプロセッサ・コアを実際開発し、また 10mW 以下で動作する誘電結合による低消費電力無線通信回路を開発し、提案する要素技術を、実システムを使って定量的に評価している。今後は本研究で得られた新しい要素技術をさらに発展させ、実際に動くマイクロロボットの研究開発につなげていくことが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 演算不変性を用いた整数計画問題のアルゴリズム開発

2. 個人研究者名

木村 慧 (九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授)

3. 事後評価結果

本研究では、演算不変性に着目することにより、整数計画問題における性質の良い部分クラスを見出すことができ、様々なアルゴリズムの開発へと至った。具体的には、半整数性をもつ問題である単位係数二変数線形不等式からなる整数計画問題が近傍永続性を持つことを示し、この性質を利用して発見的解法的高速化および近似アルゴリズムの提案を行った。また、表現可能性と演算不変性との関係の解析も研究課題として挙げられていたものの、類似研究があまりなく数学的な取り扱いの困難さのために、単位係数二変数線形不等式により表現可能である解集合と演算不変性との関係の解析に留められている。抽象的で成果の出にくい課題ではあるものの、単位係数二変数線形不等式に焦点を当てて研究を行い、2編の論文発表に至っている。今後の課題として挙げられている研究課題「既知の性質の良い部分クラス以外の新たな部分クラスおよび関連する演算不変性を見出すこと」はこの研究課題の延長として、興味深い研究の方向性と期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 写像類群の擬等長分類と機械学習への展開
2. 個人研究者名
久野 恵理香（大阪大学大学院理学研究科 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、向きづけ可能な曲面に関する既存の結果を比較対象として、研究の進んでいない向きづけ不可能曲面に関する幾何学的群論的な性質を調べた。その際、向きづけ可能曲面の議論をそのまま適用することができない場合でも、適切な修正を施すことで結果を得ている。具体的には、グラフがある向きづけ可能曲面の曲線グラフのフル部分グラフであれば、グラフに付随する直角アールティン群が曲面の写像類群の部分群になるという Koberda の定理を向きづけ不可能曲面に拡張したが、通常の曲線グラフに対しては対応する性質は一般には成り立たず、双側な曲線に限定した曲線グラフを採用するというアイデアによって結果を得ている。一連の結果は向きづけ不可能曲面の理解を深めるものとして一定の評価ができる。一方、機械学習への応用を視野に入れた研究については、ACT-X 内外の研究者と多様体学習の勉強会を開くなどして取り組んでおり、研究期間内に具体的な成果を得ることはできなかったが、今後が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 限られた情報に基づく統計的機械学習と数理最適化アルゴリズムの開発
2. 個人研究者名
黒木 祐子（東京大学大学院情報理工学系研究科 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、限られた観測情報に基づく組合せ最適腕識別問題に対して、統計的かつ計算量的に効率の良いアルゴリズム開発を行った。従来の確率的多腕バンディット問題の研究コミュニティでは、計算量を無視したアルゴリズムに対しての標本複雑度の下界のみが解析されていた。数理最適化理論に関する深い知見を活用して、統計的観点から良い性質を持ったアルゴリズム設計のみならず、計算量的にも効率の良いアルゴリズムの設計を行った。これらの研究成果は、AAAI や NeurIPS などのトップ国際会議に採択されるなど、学術的に評価をされている。また、AAAI や NeurIPS の研究成果は中国清華大学の研究者らとの共同研究に基づく成果であり、活発に国際交流を行っている。今後の研究として、NP 困難な組合せ最適化問題が含まれるような組合せ最適腕識別問題において、出力がある近似保証を達成するまでに必要な標本複雑度を最小化するアルゴリズムの枠組みを提案することを検討しており、独自の視点に基づいた研究成果が得られることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： データドリブン計算代数幾何
2. 個人研究者名
計良 宥志（千葉大学大学院工学研究院 助教）
3. 事後評価結果

本研究は、データからの学習という情報科学応用での中核の問題に対し、確率・統計的手法と線形代数に支えられる現代のアプローチに、代数幾何・計算代数のアプローチを融合することで、高度なデータドリブン情報科学への発展を目指した野心的なものである。そのため、まず記号・代数計算に基づいて発展してきた代数幾何・計算代数の計算アプローチをデータドリブンな計算代数として刷新した新たな学問領域を立ち上げる研究が実施された。与えられたデータが属する代数多様体を抽出する（多項式系として構築する）ための消失イデアルの基底計算問題に取り組み、実用を意識した効率的・効果的なアルゴリズムの提案とその理論的基盤の構築を実施した。その成果は記号代数計算のトップカンファレンスで採択された。得られた近似的な多項式系を数値的な処理で計算する課題については今後の課題である。今後は、計算代数の世界における記号・代数計算アルゴリズムの新たな潮流を創出するとともに、従来確率・統計を軸としたデータ処理・学習に代数という新たなアプローチを導入したデータドリブン科学の潮流を創出することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 学習問題の統合的帰着
2. 個人研究者名
末廣 大貴（九州大学大学院システム情報科学研究所 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、機械学習問題における、経験誤差最小化問題の一般化帰着スキームを開発した。特に、経験誤差を最小化する帰着スキームを開発し、これにより、汎化性能の導出および学習アルゴリズムが即時に適用できるようになった。それらの成果は人工知能理論トップ会議である UAI2022 にも採択されるなど、分野内で注目を集める成果となった。さらに、ACT-X を通じて、他の ACT-X 研究者を含む様々な研究者との交流を積極的に行い、医療情報学分野や文字情報学の研究者らとも共同研究を行い、細胞検出問題や、署名照合問題における上位特化学習問題に関する定式化に着手し、新たなアルゴリズムを開発するなども行った。今後は計算量理論のアイデア等を参考に、様々な問題を統一的に帰着することを目指すということであり、本プロジェクト完了後もさらなる面白い発展が期待できる。この将来計画については先行研究との関連や位置づけについても予め十分調査して実施することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： カクテルパーティ効果に着目したオンライン話者とオフライン話者の選択的聴取の支援
2. 個人研究者名
高木 健（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究では、カクテルパーティ効果に着目し、その効果を享受しやすい音声処理を提案し、ハイブリッド会議において、オンライン話者とオフライン話者の音声の選択的聴取をし易くするシステムの提案と実装を行った。人間がカクテルパーティ効果を発揮し易くするための3条件である、①話者の音声の到来方向がずれている、②話者の音声周波数軸上で被らない、③話者の間で音声の明瞭度が揃っている、を達成するための音声処理手法を考案し、音声処理をユーザが実際に使用できる装置の試作し、直観的に話者同士の音量調整を行えるインタフェースを提案した。さらに、他のACT-X研究者と、理論の実応用の検証に貢献する共同研究に取り組み、共著論文を発表する成果を挙げた。今後、提案手法、試作装置を発展させることにより、実際のハイブリッド会議で使用できるシステムを実現することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ランダムベクトルを用いた軽量の埋め込み表現の構築
2. 個人研究者名
高瀬 翔（東京工業大学情報理工学院 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、大規模化の一途を辿っている自然言語処理ニューラルモデルに対し、パラメータ数や学習時間を大幅に削減する手法を探求した。パラメータ数が語彙数に比例する単語埋め込み層については、単語埋め込みをランダムベクトルの組み合わせとして表すことで、精度を落とすことなくパラメータ数を1/10~1/2に削減する手法を提案した。さらに、パラメータ数と計算時間を両立する中間層パラメータ共有手法、パラメータ効率のよいTransformerの多層化を可能にする手法、推論時の入力をサンプリングすることにより単一モデルでアンサンブルの効果を得る手法を提案した。また、学習時にノイズを入れることで推論時の精度を向上させる手法として単語をランダムに置き換える単純な手法が良い効率であることを示した。以上の成果は、トップカンファレンスNeurIPS, NAACL-HLT, ACL Findings に採択されており、言語処理学会年次大会優秀賞を受賞している。現在の自然言語処理ではニューラルモデルの大規模化が大きな問題となっており、本研究が様々な自然言語処理モデルへ応用されることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 量子論基礎にかかる高次元バナッハ空間の幾何学的研究
2. 個人研究者名
辻 寛（大阪大学大学院理学研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

凸幾何学における幾何的問題について、最適輸送理論や相対エントロピーによる理論的研究を行った。重み付き Riemann 多様体において、曲率の下限に関する仮定の下で、dilation 不等式とエントロピーに関する関数不等式を構成した。この成果は従来の結果を凸集合とは限らない場合に一般化したものであり、今後も様々な発展・応用が期待できる。また、Euclid 空間における凸体と偏極体の体積の積の下限である volume product について、Blaschke-Santaló 不等式と逆 Santaló 不等式に関する研究を行った。ある程度曲がっている凸体について volume product の下界を与えた。系として、十分に曲がった凸体に対し、volume product が最小値をとる凸体の形状に関する Mahler 予想を特別な場合に解決した。本研究の証明は熱に関する関数不等式を用いるものであり、曲率の幾何学や最適輸送理論に関する知見が活かされている。また、ACT-X を通じて他分野の研究者とも積極的に交流を行っており、今後は情報理論や量子論への展開も期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 辞書式順序に基づいた文字列データ処理法の構築
2. 個人研究者名
中島 祐人（九州大学大学院システム情報科学研究院 助教）
3. 事後評価結果

本研究は、辞書式順序に基づいた文字列構造を対象とした。文字列処理におけるこれまでの辞書式順序の利用は、暗に固定された順序の上で文字列を整列することに過ぎなかった。しかし、辞書式順序に基づいて定義される文字列構造は、その順序が異なれば一般に構造も異なる。この特徴に注目し、本研究では、固定された辞書式順序にとらわれない文字列データ処理法を構築することを目指した。文字列の辞書式順序による文字列アルゴリズムやデータ構造の最適化問題に対して、辞書式順序による最適化問題の理解と厳密解法の開発、厳密解法の開発を支える文字列構造の数理的性質の解明の二つのテーマに取り組んだ。例えば、サイズ比のタイトな上下界や非自明な下界をはじめて明らかにすることに成功している。他の ACT-X 研究者とも共同研究を行い、成果を出すことができた。今後は、当該分野の中だけでなく、関連する外の分野における本研究の意義や位置づけなどについても考えることにより、研究の幅をさらに広げていくことが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 大スケールかつ展開可能な折り紙構造のファブリケーション手法
2. 個人研究者名
野間 裕太（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究はデジタルファブリケーションに関するものであり、剛体折り紙構造に着目している。当初は大スケールな展開可能構造の製造を目的として、自由形状を容易に組み立て可能な展開図に変換する手法の構築を目指していた。それぞれの剛体の要素を適切に紐で結合し、紐を牽引することで目的とする三次元形状を得ることが可能となる。このような手法の実現のため、当初は形状表面に配置した接ベクトル場に沿って形状表面に切り込みを配置する方法を模索し、次に接ベクトル場を利用した幾何形状処理手法において頻繁に用いられる Field-aligned parametrization に着目して研究を行った。本研究では、指定した箇所が特異点となるかどうかを事前に拘束条件として指定したうえで縞模様を計算できる手法を提案し、複数のシナリオでその応用例を示している。本プロジェクトに関する成果を含む論文は当該分野のトップカンファレンスの一つ、ACM SIGGRAPH Asia 2022 に Full Paper として採択されるなど、国際的にも高く評価されている。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 埋め込み型無線センサを用いた立体形状計測
2. 個人研究者名
韓 燦教（東京大学大学院情報学環 助教）
3. 事後評価結果

本研究は三次元柔軟物体の形状計測に関するものである。当初は粘土のような物体の内部に多数のセンサを埋め込み、その位置を計測することで物体の三次元形状を推定することを目指していた。様々なアプローチで実験を行ったものの、残念ながら当初目的とした計測は現時点では困難であることが判明した。そこで、センサそのものを、3Dプリンタを用いつつ三次元形状として構成し、その変形を計測するという方向に方針転換した。センサにはラティス構造を用い、柔軟性を担保した。さらに、センサのセルの構造を変えることで押した際の変形の仕方を変えることを可能とした。当初の予定とは異なる成果ではあるが、柔軟センサに関する研究は価値が高く、今後の応用分野への展開が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 統計的時空間モデルに基づく雑踏音環境マッピング
2. 個人研究者名
坂東 宜昭（産業技術総合研究所情報人間工学領域 主任研究員）
3. 事後評価結果

本研究では、雑踏空間でも周辺環境を頑健に認識できるロボット、特に、最小限の事前情報で、雑踏音環境を精緻かつリアルタイムに認識する雑踏ロボット聴覚の実現を目指し、ベイズ時空間モデルに基づく音環境マッピング、深層生成音源モデルによる精緻化、オンライン推論と能動センシングに取り組んだ。その結果、従来の音源定位に基づくカスケード型の枠組みに比べより高い精度で音源位置を推定できることを確認し、これまで難しいとされてきたディナーパーティでの遠隔音声認識の性能が向上し、リアルタイムシステム的设计指針を得ることができるなどの成果が得られた。一連の研究成果は、信号処理分野の主要国際会議である INTERSPEECH や主要国際誌である IEEE Signal Processing Letters などに採択され、人工知能学会、情報処理学会で受賞するなど、学術的に高い評価を受けた。今後は、提案手法を発展させ、同時最適化手法の開発や、より難しい実データへの適用・拡張を進めることにより、雑踏音環境を分析するロボット聴覚が、日常生活のあらゆる環境で動作するようになることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： Kudla 予想の解決及び志村多様体の研究と暗号への応用
2. 個人研究者名
前田 洋太（ソニーグループ（株） R&D センター 研究員）
3. 事後評価結果

本研究では、志村多様体に関する Kudla 予想において、ノンコンパクトで余次元が 2 以上の部分多様体を考察することが目標であった。最初に、特殊な場合としてコンパクトなユニタリ型志村多様体に対しての予想を解決した。また、ボール商の上の不正則カスプに関して小平次元への影響を考察する研究を実施し、志村多様体の双有理幾何学的性質を鏡映的保型形式の観点から明らかにした。これらの研究成果は、数学分野のジャーナル論文誌（Proceedings in Mathematics & Statistics, Acta Arithmetica, Mathematische Nachrichten など）で発表しており、国際的に高く評価されている。更に、志村多様体の数論的な性質を耐量子計算機暗号に応用することも考察し、同種写像暗号 CSIDH の高次化に関する研究を実施した。暗号分野の研究集会で講演を行うなど一定の成果を得ており、今後の更なる発展が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 周期／非周期分離制御の開拓
2. 個人研究者名
村松 久圭（広島大学大学院先進理工系科学研究科 助教）
3. 事後評価結果

本研究では制御工学分野において周期／非周期ダイナミクスの分離という新たなパラダイムを樹立した。具体的には、周期／非周期の分離フィルタを構成し、その性質を理論的に解析したのち、制御器設計へと応用した。さらに実課題応用をすすめ、当初計画したインタラクティブロボット開発においては周期／非周期分離制御の実装には未だ至らないものの、工作機械モニタリングという新たな応用を同定し、他研究グループとの協働により実用上インパクトのある成果を得た。上記の諸成果は、制御理論分野のトップジャーナルである *Automatica* の論文を含む7編の論文として発表されており、学術的アウトプットは高く評価できる。さらに、理論的成果の実応用に取り組む積極姿勢が当初計画になかった新たな応用に結実しており、理論研究と工学応用の健全なシナジーが現出していると言える。周期／非周期分離についてはすでに次の理論的課題も同定されており、現在進行中のロボット開発も含め、理論及び応用両面における今後のさらなる研究展開が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 創作支援のための知覚的スタイル模倣フレームワーク

2. 個人研究者名

矢倉 大夢（筑波大学理工情報生命学術院 大学院生）

3. 事後評価結果

本研究では画像、音声、3D空間といった多様な対象に対し、「模倣」に着目するという独自の発想に基づく創作支援技術の開発に取り組んだ。特に、「模倣がどのくらい適切にできているのか」という複数要素が絡む難しい問題に対し、人の捉え方を反映した知覚的尺度を得る手法の開発を行うなど、課題に対する大きな技術貢献が見られた。さらに、すでに普及しているソフトウェアでの写真スタイルの模倣、メイクアップスタイルの模倣に関して実装・実験を行い、歌声の加工という異なる対象へのアプローチ拡張にも意欲的に取り組んだ。以上のように模倣をキーワードに多くの課題に挑戦し、その成果を主要な学会や論文誌で発表し、トップ会議の Best Paper Honorable Mention award 等多数の賞を受けるなど、顕著な成果をあげた。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 言葉が埋め込まれた空間の形と言葉の意味の接続
2. 個人研究者名
横井 祥（東北大学大学院情報科学研究科 助教）
3. 事後評価結果

本研究は、自然言語の意味が埋め込み空間においてどのように表現されるのか、という問いに対し、単語の意味と埋め込み空間の幾何的特性の関係、および単語埋め込み空間における文の意味の計算の2点において、複数の顕著な成果を挙げている。前者については、単語の意味の強さと単語ベクトルのノルムとの対応関係、単語頻度を考慮した等方化の有効性、Transformer による文脈表現の計算の仕組みを明らかにした。後者については、単語埋め込みの和によって論理積を表す既存手法に加えて論理和や否定を表す手法、単語集合に対する集合演算を埋め込み空間上で定義する手法を提案した。これらの成果については、トップカンファレンス EMNLP, ACL-IJCNLP SRW で採択され、言語処理学会年次大会優秀賞などを受賞している。さらに、自然言語処理における最適輸送の応用について第一人者としてチュートリアル講演など多数の実績を挙げている。本研究は埋め込み空間の理解について大きな貢献をしているが、未解明の問題も多く残されている。続く研究で、自然言語の意味と埋め込み空間との関係がさらに明らかになることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 時系列信号の画像表現を用いた複雑行動認識
2. 個人研究者名
吉村 直也（大阪大学大学院情報科学研究科 大学院生）
3. 事後評価結果

本研究は、ユーザが装着したウェアラブルデバイスから得られる加速度などのセンサデータを解析して、工場などでの作業者のモニタリングを行うための行動認識を行うことを目的としている。作業者の装着した複数のセンサからは時々刻々と動作に対応した信号が一次元の時系列信号として生成されるが、この信号を2次元のテキスト画像に変換する「時系列信号の画像表現」として処理するというアイデアを検証した。研究では、作業工程を構成する動作とそれらの動作の組み合わせを効率的に抽出するモデルを開発したほか、作業者の複雑な行動の認識を可能にする認識モデルの開発に取り組んだ。また、物流センターにおける梱包作業に着目した大規模マルチモーダルデータセット「OpenPack dataset」を構築し関連研究者が広く利用できるようにした。提案手法が実際の産業でも活用されることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 近似的数理モデルによる CPS の動的安全機構
2. 個人研究者名
和賀 正樹（京都大学大学院情報学研究科 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、自動運転システム等で重要になる、ソフトウェアの信頼性を保証するための形式検証に取り組んだ。特に、オートマトン学習による近似数理モデルの動的な生成と、モデル検査等の形式的な解析手法の組み合わせという観点から研究に取り組んだ。まず、時間を暗黙的かつ離散的に扱う従来のオートマトンを連続時間概念に拡張した時間オートマトンの収束保証付きの能動的な学習アルゴリズムに取り組んだ。また、学習された近似オートマトンの再利用による検査の効率化、そして強化学習の探索を安全にする手法である実行時防護のアイデアの導入などを行った。当技術の適用範囲は広いと見られ、今後同分野のリーダーとして業界を牽引する存在となることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： レーブグラフの順序定式化の数理とデータ解析
2. 個人研究者名
宇田 智紀（東北大学材料科学高等研究所 助教）
3. 事後評価結果

本研究では、データの順序構造を表現するレーブグラフを離散データから復元するレーブ順序法について、その数理的な性質の研究や数値実験を行なった。特に数理的な性質について、入力に近いときに出力が近いことを保証する安定性定理を確立した。レーブ順序法の安定性は理論的にも応用上も重要な性質であり、本研究の当初から主要な目標の一つであった。技術的な困難により当初の想定より難航していたが、圏論的な操作などを経由することで達成された。その他、レーブグラフ間の類似性を測る尺度である interleaving 距離と Gromov-Wasserstein 距離の比較研究及び数値実験や、レーブ順序法の計算の高速化にも取り組んだ。これらについては具体的な成果は得られていないが、研究の過程で得たレーブグラフとレーブ順序法の知見を生かした研究が計画されている。また、研究交流を目的としたワークショップ等の開催にも積極的に関わっており、ACT-X 研究者間の交流に貢献した。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高精度 3 次元物体認識を実現する Denoising & Mesher DNN の構築
2. 個人研究者名
宮内 翔子（九州大学システム情報科学研究院 助教）
3. 事後評価結果

本研究では 3 次元物体認識精度の向上法を目的として、3D センサを用いて取得したノイズ及び欠損を含む物体の点群から、物体間の意味的対応（同一クラス内の共通のパーツ間が対応可能）により共通のメッシュ構造で記述された「意味的構造モデル」の生成を目的とする。研究期間内に本目的を実現する 1. 構造化モデル生成、2. クラス識別器、3. 意味的構造化モデル生成の 3 つの構成要素に意欲的に取り組み、1 と 2 の項目については学会発表を行い、コンピュータグラフィックスの主要なジャーナルに投稿するなど、成果の発信に取り組んだ。3 についても初期検討を始めることができた。構造化モデルに対するクラス識別器の効果を 3 次元歯列咬合評価支援システムという実応用を通して検証した点を高く評価する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 談話構造に基づく教師なし生成型要約
2. 個人研究者名
磯沼 大（東京大学大学院工学系研究科 特任助教）
3. 事後評価結果

本研究は、長い文章を主要な意味を保ったまま短い文章に変換する要約生成技術に関する研究であり、教師データを必要としない教師なし要約手法の確立を目指している。教師データを用意する必要がないため、本手法は多様なドメインや言語の要約生成に応用できる可能性を秘めている。コアとなるアイデアとして、文章のトピック構造を木構造で表す潜在表現に着目し、木構造のノードからトピック潜在表現を適切に選択し、各トピックについて文生成を行うことで、要約文の生成を行う。

ACT-X においては、木構造トピックモデルを大規模文章から学習する手法や、木構造トピックモデルから要約生成を行う手法を提案した。これらの研究は、自然言語処理分野のトップカンファレンス ACL およびトップジャーナル TACL に採択され、また国内学会・研究会で3件の受賞対象となっており、高く評価されている。今後は、本手法の応用範囲をさらに拡大する研究や、要約とトピックの関係に関する理論的な貢献が期待できる。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズでは、これらの成果の応用として新たにサーベイ論文自動生成の研究に取り組んだ。サーベイ論文生成は実用性が高いがこれまで要約研究の対象とはなっていなかった。まず、時系列上でトピックの分岐・統合をモデル化する時系列構造化トピックモデルを提案し、既存モデルでは捉えられないトピックの変化が得られることを示した。さらに、サーベイ論文生成の大規模教師データを作成し、これを用いてサーベイ論文生成モデルの学習・評価を行った。これらの成果は、これまでの研究成果を新たな応用分野へ展開しようとする意欲的なものである。サーベイ論文生成手法や自動要約の理論的定式化の研究は発展途上であるが、今後の成果が期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 大自由度ニューラルネットワークの学習に潜む幾何学的構造の解析と信頼性評価への展開
2. 個人研究者名
唐木田 亮（産業技術総合研究所人工知能研究センター 主任研究員）
3. 事後評価結果

本研究では、統計力学的技法による深層学習の数理解析を様々な角度から実施した。特に、Neural Tangent Kernel (NTK) の固有値評価による解析および勾配法の学習ダイナミクスの解明に関する研究にて顕著な結果を出し、さらに少数データ学習の解析として Data augmentation に関する共同研究も実施している。

これらの研究を通じて Fisher 情報行列の固有値を用いた解析は重要な位置を占めており、バッチ正規化の効果の解析、確率的最適化の適切な学習率の解析、k-FAC 近似を用いた自然勾配法の解析などに現れている。得られた解析結果は実用的に用いられている技法へ有用な理論的示唆を与え、業界へ大きく貢献している。また、これらの研究成果は機械学習のトップ会議である NeurIPS のオーラル発表および AISTATS などにも論文が採択され、学術的なインパクトも大きい。

本研究の主軸である統計力学を用いた理論解析をさらに推し進めることで、可解モデルの拡充および新しい学習アルゴリズムの発見へと至ることが期待される。そのためにも、近隣領域の関連技術も食欲に取り入れつつ新しいパラダイムの創生に向かっていただきたい。

(加速フェーズ)

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズにおいては継続学習に表れる多段階学習手法の理論解析および勾配正則化アルゴリズムの開発を行い、応用上有用なアルゴリズムの提案も行っている。多段階学習の理論は ICLR2022 に採録されている。本研究の主軸である統計力学を用いた理論解析をさらに推し進めることで、可解モデルの拡充および新しい学習アルゴリズムの発見へと至ることが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： Interpret-able Deep Learning Framework that Generates Pixel-wise Labels from Human Interaction (解釈可能なインタラクティブ深層学習)
2. 個人研究者名
谷 林 (理化学研究所革新知能統合研究センター 研究員)
3. 事後評価結果

本研究では、画像認識を軸足として、研究者の並外れたバイタリティを存分に生かして、様々な課題を扱ってきた。

当初計画より人間の視線情報を医用画像認識の課題に活かすということの一つのキーアイデアとしていたが、これについては BMVC2021 での会議論文において無事に結実させている。他にも糖尿病網膜症診断 (IEEE Journal) や画像の輝度変換 (ICCV2021)、その他、画像認識関連課題について CVPR2021 や ECCV2020 などのトップカンファレンス、同分野のトップジャーナルなど、ACT-X 期間で 16 件の論文発表に至っているのは、共著論文が多いとはいえ、圧巻の仕事量と言える。成果報告書執筆時点でも CVPR2022 に 6 件、AAAI2022 に 4 件他と、そのペースは加速している。

COVID-19 のために医師とのコミュニケーションが進まず、一部において進捗の遅れがあったと報告されているが、それ以外については十二分の進捗があったと結論できる。彼の高いサーベイ能力とオープンマインドな性格が、ACT-X メンバへの頻繁なアドバイスにも表れていた点も、高く評価したい点である。

(加速フェーズ)

上記の評価を受けて研究実施期間を 1 年間延長し、加速フェーズを実施した。

本研究では、機械学習に基づく画像情報処理を軸足とし、人間の視線の利活用、説明可能性の向上、そしてそれら技術に基づく医療画像解析の実現、という 3 つの主方向について、膨大な研究課題を遂行した。それらはわずか 3.5 年間に 30 編ものトップジャーナル・トップカンファレンスの論文として結実している。例えば、視線を利用することで、自然な形で人間の意図を学習に取り入れることができ、さらに判断根拠の説明力向上にも繋げているシステムに関する論文が、ECCV2022 に採択されている。医療画像解析についても、言語情報と画像情報を組み合わせて X 線画像に対する診断情報を言葉で返すことが可能なシステムを構築するなど、多数の試みを行っている。こうした研究遂行のために、国を越えたコラボレーションも行っており、Oxford, Princeton, Yale 等の大学に加え、前述の診断システムにおいては、米国 National Institutes of Health との協力体制も築いている。今後も、こうした積極性を活かしつつ画像情報学の多方面の進展に寄与することが期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： マルチモード準静空洞共振器を用いた生体内における電力と情報の無線ネットワーク
2. 個人研究者名
 笹谷 拓也（東京大学大学院工学系研究科 特任助教）
3. 事後評価結果

本研究は新たな空間型無線給電手法に関するものである。部屋スケールの送電器と小型の受電器とを組み合わせ、効率よく活用するための設計論を明らかにするとともに、中継器や準静空洞共振器の磁界分布システムなど、本システムを利活用するための周辺技術についても検討を行っている。理論構築やシミュレーションでの解析だけでなく、試験的に実装し検証を行っている点も特筆に値する。

これらの成果は Nature Electronics 誌や IEEE Pervasive Computing 誌などに掲載され、国際的にも高く評価されている。これは変形可能なデバイスに給電可能な新たなセンシングやワイヤレスコンピューティングのための基盤技術として期待できる。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

三次元空間における小型機器への無線給電・無線通信の実現に向けて、(A) 小型機器への広範囲な給電に向けた階層的な共振器の実証、(B) 周波数応答を用いた受電器の状態推定手法、(C) 形状変化するコンピュータの無線ネットワークに向けた給電技術、(D) 準静空洞共振器の近似回路モデルの解析、(E) 空間内に装置を要さないマルチモード送電構造の実装・評価、の五つの研究項目に取り組んでいる。小型機器を繋ぐ電力と情報の無線ネットワークの構築に向けた重要な基盤技術について、理論面および実装面ともにバランスのよい研究開発がなされている。また、加速フェーズにおいては、生命科学分野との領域横断的なプロジェクトを立ち上げるなど、他領域への展開も期待できる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 地下資源開発に資する「流れ」と「構造」の逆解析
2. 個人研究者名
鈴木 杏奈（東北大学流体科学研究所 准教授）
3. 事後評価結果

本研究では、地下資源開発において持続的な利活用を実現するために必要となる複雑なき裂の構造と流れ（流動・熱移動・物質移動等）との関係について、地表で得られるデータに基づいて定量化・定式化を行った。

き裂構造を位相幾何学の解析手法であるパーシステントホモロジーを活用し人では把握できない複雑な岩石構造の特性を抽出可能とし、流動特性の核となるパラメータである浸透率との関係も抽出した。また、岩石き裂の表面積の推定法について、3Dプリンタを活用した流動・熱移動実験や実データによりその妥当性を示した。さらに、地熱貯留層モデルの入力パラメータを一意に推定するために、実測定可能なデータで浸透率分布を推定する機械学習手法を提案した。これら一連の成果は、当該領域でのトップ会議の採択で学術的な評価を得ているだけでなく、プレスリリース、新聞掲載など学社会的なインパクトを与えている。

今後、現在までの研究成果を発展させることで、実利用可能な地下資源開発技術の実現が期待される。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズでは、物質移動の応答曲線との関係について、数値シミュレーションを活用して、数値物質移動の応答曲線からパーシステントホモロジーによって定量化された複雑なき裂構造を推定できるかどうか検証し、応答曲線から地下構造の特性（特に流路の開口幅）を推定できる可能性を示した。また、地熱貯留層モデルの入力パラメータの推定において、実測定可能なデータで浸透率分布を推定する新たなデータ駆動型浸透率分布推定手法として、条件付き敵対的生成ネットワーク (CGAN) や畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた推定手法を提案し、実フィールドに近いデータを用いて手法の妥当性を検証した。

研究成果のプレスリリースなどアウトリーチを継続して実施するだけでなく、多様なステークホルダーに向けて地下資源利用を促進する普及活動を並行して進めている。今後、技術の成熟と併せ、社会実装も期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： モデルベースト制御による理論保証を伴う深層学習ロボットの研究
2. 個人研究者名
鈴木 彼方（富士通（株）富士通研究所人工知能研究所 研究員）
3. 事後評価結果

本研究では、学習ベースト制御器とモデルベースト制御器をロボットタスク中に切り替えることにより、未定義動作を補正する方法を提案し、物理的な外乱を伴うロボットタスクでの安定的なエラーリカバリーに成功した。ロボティクスにおいて最も困難なタスクの一つである柔軟物操作タスクとして、双腕二指ロボットによる空中紐結びタスクに提案手法を適用することによりその有効性を検証した。

これらの研究成果は、ロボティクス分野のトップ会議である ICRA や IROS などに採択され、SICE International Young Authors Award を受賞するなど、学術的に高い評価を受けた。既存のロボット制御技術では、多様なセンサ情報に基づいたインタラクティブな制御器の切替え機構や、学習ベースト制御器の任意の姿勢へのエラーリカバリー作業などの課題が残されている。

今後、現在までの研究成果に立脚し、これらの課題に取り組むと共に、提案手法を拡張し、ロボティクス分野のみならず、学習ベースト制御器を用いる自動運転などの幅広い産業応用分野へと展開可能とすることが期待される。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズでは、ACT-X 研究期間中に開発した技術をベースに、注意機構と内部状態制約の導入による拡張に取り組んだ。実環境での使用が想定されるロボティクスにおいて、重要な評価観点である、ロバスト性を向上させることに成功した。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 自由確率論による深層学習の研究
2. 個人研究者名
早瀬 友裕（富士通（株）富士通研究所人工知能研究所 研究員）
3. 事後評価結果

自由確率論を用いた深層学習の理論的研究を行った。

深層学習は実用面では大きな成功を収めているものの、理論的性質は未知の部分が多い。現状ではニューラルネットワークの学習には膨大な計算機資源が必要であり、理論的に効率の良い学習方法を研究することは急務である。

本研究では、自由確率論を応用するために理論的に重要なヤコビアン（Jacobian）の漸近的自由独立性を証明した。また、MLPのFisher情報行列の固有値解析を行うといった理論的な成果も得た。さらに、ネットワークのオンライン学習率への応用も行った。理論面・応用面の双方において成果があったことは高く評価できる。

ACT-I や ACT-X の研究者とも積極的に共同研究を行っている点も評価できる。加速フェーズ移行後もシンプルかつ実用レベルの性能を持つモデルの理論解析を目指している。今後もさらなる研究の進展が期待できる。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施する予定であったが、事情により、約2か月間で研究中止に至った。

自由確率論を用いた深層学習の理論的研究に取り組んできており、ヤコビアン（Jacobian）の漸近的自由独立性を証明した結果は理論的に重要なだけでなく、今後は様々な応用も期待される。MLPのFisher情報行列の固有値解析を行った結果は、DNNの学習可能性を理解する上で基礎となる応用上も重要な結果である。実用レベルの深層学習モデルの理論解析という夢に向かって、今後もぜひ研究を進めていって欲しい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 情報投影と投影対象最適化による視触覚重畳提示

2. 個人研究者名

平木 剛史（筑波大学図書館情報メディア系 助教）

3. 事後評価結果

本研究は実世界の物体表面にバーチャルなテクスチャを視覚・触覚と複数のモダリティを同時にかつ精密に提示することを目的としている。具体的にはプロジェクタによる空間分割可視光通信を用い、輝度や色を人間に近くできないレベルで変調させることで、ユーザが装着した触覚振動子を位置に応じて駆動することを可能としている。

研究者はヒューマン・コンピュータ・インタラクション系の研究者であるが、本 ACT-X で数理系研究者と積極的に議論を行った。その結果、様々な形状の物体に対し複数プロジェクタの最適な配置を効率よく求める手法を共同で確立することができ、これは特筆すべき成果であると判断できる。

今後とも、本手法の理論面での解析を行うとともに、様々な分野に社会実装を行うことを目指しており、その展開に期待したい。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズ研究では、視触覚提示システムを小型で設置自由度が高く、装置を装着せずに使用できるようにすることを目指している。数理最適化手法を活用し、高速性・効率性の向上を試みた。主な成果は、空中像への色度変調による視触覚重畳提示、色度変調を用いた情報埋め込みの高速化、触覚ディスプレイ開発のための数理最適化である。対外発表で国際会議ポスター発表1件、国内会議発表3件の実績を得ており、十分な成果が出ていると判断する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 周波数領域の事前知識を用いた動的システム推定
2. 個人研究者名
藤本 悠介（北九州市立大学国際環境工学部 准教授）
3. 事後評価結果

本研究は、高い自由度を持つ複雑な動的システムのパラメータを、質の低い入出力データを用いたとしても、高精度かつ解釈可能性が高い形で推定する手法の確立に取り組んだものである。

より具体的には、例えば機械システムのように、高周波減衰特性、低周波減衰特性などが既知であるような条件下において、正則化最小二乗法を導入することで、より精度の高い推定を達成することを提案している。さらに、入力信号が周期的である場合には、この時間領域での事前知識を利用することで高速な計算を可能となる手法も提案した。これらの提案手法は査読付き論文 5 件、査読付き国際会議 7 件としてまとめられた。

現在では、提案手法の適用先として、モーターなどの機械システムだけでなく、ホールやヒトの頭部の音響特性への応用にも取り組んでおり、今後さまざまな分野での応用が期待でき、理論と実践をつなぐ研究者として活躍が期待できる。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を 1 年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズでは、本期間のフーリエ変換に着目したアプローチを拡張して z 変換に着目し、新たな正則化機構を備えた最小二乗推定を行う方法を提案した。制御理論の学術的文脈における本研究成果の位置づけは、カーネル正則化法という約 10 年前の制御理論コミュニティにおけるブレイクスルーを、安定システムから不安定システムへと拡張するものであり、航空機等多数の応用例を新たに包含するものになっている。本成果は制御理論分野のトップ国際会議 CDC 2022 で発表されており、他の多数の論文等の成果も含め、学術的アウトプットは高く評価できる。本研究のこれまでの成果は確固とした数理的基盤に基づく理論的なものが中心であるが、その結果高い応用ポテンシャルを持った手法の提案に至ったことも特筆に値する。これら成果の実応用の追求と、そこで表れる新たな課題に触発される形でのさらなる理論的展開が、今後大きく期待される。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 階層的グラフの書き換え系での文脈等価性証明支援
2. 個人研究者名
室屋 晃子（京都大学数理解析研究所 助教）
3. 事後評価結果

プログラムは単純な計算の組み合わせでできあがっているが、組み合わせの変更で元の計算の振る舞いが変わってしまうことがある。

コンパイラの最適化やプログラムの自動生成などソフトウェア分野で重要ないくつかの技術は、プログラム中の計算の組み合わせを変えることによって望ましい性質を引き出す技術である。これらの技術では、計算の組み合わせの変更により計算の振る舞いが変わっていないことを保証しながら処理を進める必要がある。

本研究はこの問題に文脈等価性という理論的な切り口から取り組み、計算の振る舞いが変わらないことを証明する新しい手法を構築することを目指した。当初は階層的グラフ書き換え系を元に研究をすすめ、その成果を論文投稿している。また状態遷移系（オートマトン）を元にした研究もおこない、同様にその成果を論文投稿している。

いずれの研究でも、計算の組み合わせを変える前後のプログラムをそれぞれの系で表現し、一方の系での計算の進捗を他方の系での計算の進捗で常に模倣できることを証明する手法を考察している。残念ながら研究期間中に論文を出版するには至っていないが、加速フェーズに向け期待できる成果をあげている。

本研究の分野では研究者間の交流・議論により研究が進む面があるが、それがパンデミックにより期間中大きく阻害されたのは本研究にとって残念であった。

（加速フェーズ）

上記の評価を受けて研究実施期間を1年間延長し、加速フェーズを実施した。

加速フェーズでの研究は、大きく、階層的グラフ書き換えをオートマトンと見なして証明を行う手法と、階層的グラフ書き換えを項書き換えとして見なして証明を行う手法の二つからなる。

前者の研究では、オートマトンとして見なすことで、従来から可能であった決定的なプログラムだけでなく、非決定的なプログラムについても証明を行える手法が得られた。証明を行えるのは非決定的な入出力を伴うプログラムであり、確率的な分岐を伴うプログラムにはまだ対応できないが、ここまでの成果を論文にまとめ投稿している。

後者の研究は、プログラムをまずグラフで表現し、それを項書き換え系と見なすことで、項書き換え系の様々な手法を活用して証明を行う、という目論見の研究であった。しかしながら、グラフを項書き換え系と見なすときの同値性の確保が困難であることが判明し、いったんは頓挫したが、グラフを介さずプログラムを直接的に項書き換え系と見なすというアイデアで研究を復活させている。その後、プログラムを項書き換え系と見なすと、従来から研究されている非決定的な自由な項書き換えではなく、制約付きの項書き換えとなることを発見した。この発見により、制約付きの項書き換え系という新たな研究分野を生み出せる可能性がでてきた。今後も研究を続け、実際にその研究分野を切り開き、大きな成果を得られることが期待される。