公開

（事後評価・研究総括用）

ACT-I「情報と未来」研究領域 領域活動・評価報告書
－2019 年度終了研究課題－

研究総括 後藤 真孝

1．研究領域の概要

情報学とそれに基づく技術開発の目覚ましい進展は、これまでに学術・産業・社会・文化的に新たな価値を生み続けてきましたが、今後も未来社会を創造する中心的技術として、その重要性がより一層高まっています。既に情報学・情報技術は、あらゆる学術分野の進展や、産業・経済の持続発展、物理空間・情報空間が融合した社会基盤の高度化、健康で文化的な生活の質の向上等において、本質的な役割を果たしています。そのため、情報学における独創的な研究開発を推進して、人類が現在および未来において直面する問題を解決しつつ新たな価値を創造することは、人類の未来を切り拓き、人類が持続発展していく上で不可欠です。

本研究領域では、情報学における研究開発によって未来を切り拓く気概を持つ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、人工知能、ビッグデータ、IoT、サイバーセキュリティ等を含む、情報学に関わる幅広い専門分野において、新しい発想に基づいた挑戦的な研究構想を求めます。今後の学術・産業・社会・文化を変えていくような多種多様な研究開発を、独創的な発想によっていかに推進するかが重要だと考えています。

研究推進においては、未来開拓型の研究開発、価値創造型の研究開発を募り、本研究領域で若手研究者同士がお互いに切磋琢磨し相互触発する場を設けることで、未来社会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ヒューマンネットワーク構築を促していきます。それによって、ひときわ輝き存在感のある研究者がより一層増え、ひいてはより良い未来社会が切り拓かれることを期待します。

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）の一環として運営していきます。

2．事後評価対象の研究課題・研究者名

件数： 1 期生加速フェーズ・・・12 件　3 期生・・・29 件*　　合計 41 件

（＊ 更に 1 件採択するも、委託研究契約締結・研究開始に至らず。）

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3．3 期生研究者の事前評価の選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

1）選考は、「情報と未来」領域に設けた選考委員 12 名の協力を得て、研究総括が行う。

2）選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。

3）選考に当たっては、ACT-I の選考基準（URL：https://www.jst.go.jp/pr/info/info1276/sankou2.html）を重視した。

4．3 期生研究者の事前評価の選考の経緯

一応募課題につき領域アドバイザー12 名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補課題を選定した。

選　考	書類選考	面接選考	採択数
対象数	89 件	56 件	30 件*

（＊ うち 1 件は、委託研究契約締結・研究開始に至らず、研究を実施したのは 29 件。）

5．研究実施期間 （本事後評価対象期間）

1 期生加速フェーズ研究者：　2018 年 4 月～2020 年 3 月

（注記： ACT-I 標準期間 2016 年 12 月～2018 年 3 月も研究に従事しているが、本評価対象期間には含めない）

3 期生研究者：　2018 年 10 月～2020 年 3 月

6．領域の活動状況

（1）領域会議（非公開）： 1 期生加速フェーズ研究者・・・7 回参加（ACT-I 標準期間を含む）、
3 期生研究者・・・3 回参加

第 1 回領域会議	2016 年 12 月 17 日～18 日開催	・・・1 期生研究者
第 2 回領域会議	2017 年 6 月 10 日～11 日開催	・・・1 期生研究者
第 3 回領域会議	2017 年 11 月 17 日～19 日開催	・・・1 期生研究者
第 4 回領域会議	2018 年 6 月 8 日～10 日開催	・・・1 期生加速フェーズ研究者
第 5 回領域会議	2018 年 11 月 16 日～18 日開催	・・・1 期生加速フェーズ研究者、3 期生研究者
第 6 回領域会議	2019 年 6 月 21 日～23 日開催	・・・1 期生加速フェーズ研究者、3 期生研究者
第 7 回領域会議	2019 年 11 月 15 日～17 日開催	・・・1 期生加速フェーズ研究者、3 期生研究者

(2) 担当アドバイザーによるサイトビジット（非公開）

本領域の運営にあたっては担当アドバイザー制を採用した。これは各領域アドバイザーが、2、3 名の研究者の担当となり、研究計画や進捗状況について確認、助言を行い、各研究者が個を確立するために細やかなサポートを行うことを支援する制度である。

担当アドバイザーによるサイトビジット（研究実施場所等の訪問）を1期生加速フェーズ研究者は 5 回ずつ（ACT-I 標準期間を含む）、3期生は 2 回ずつ実施した。サイトビジットでは各研究者と担当アドバイザーが個別に研究推進について議論を行った。

(3) 成果発表会（公開）

2020 年 5 月 15 日、16 日　オンライン開催

詳細：https://www.jst.go.jp/kisoken/act-i/presentation2020/index.html

7．事後評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、領域会議、サイトビジット、成果発表会等での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

（事後評価の流れ）

2020 年 3 月	研究報告書提出
2020 年 5 月 15 日、16 日	成果発表会
2020 年 4 月～6 月	研究総括および領域アドバイザーによる評価
2020 年 7 月	被評価者への評価フィードバック

8．事後評価項目

(1) 研究課題等の研究目的の達成状況

但し、未達成の場合であっても、独創性や挑戦性が認められ、将来的に高水準の発展が見込まれる場合は積極的に評価する。

(2) 研究実施体制及び研究費執行状況

(3) 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

ACT-I では、「学術・産業・社会・文化を変えていくような多種多様な研究開発の推進」を支援しているため、学術・産業・社会・文化のいずれかへの波及効果（今後の見込みを含む）を評価する。

9．評価結果

本領域では、若手研究者が個を確立し、自由な発想で主導権を握りながら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、2016 年度より研究を開始した 1 期生加速フェーズ研究者 12 名、および 2018 年度より研究を開始した 3 期生研究者 29 名の合計 41 名は学術・産業・社会・文化的に新たな価値を生み出し、未来を切り拓く気概を持って、今解決すべき問題、あるいは、未来に起こりうる問題の解決に向けて切磋琢磨し、情報学に関わる様々な成果が出てきた。今後も 41 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。

1 期生加速フェーズ研究者(12 名)

(1) 荒瀬 由紀 研究者　　　担当アドバイザー:河原林アドバイザー
「パラフレーズ現象の解明のための言語資源構築とパラフレーズアラインメント技術の確立」
本研究では、パラフレーズ文ペアにおけるフレーズアラインメントのアノテーションにより、合計 1,916 文対についてアノテーションを完了し、フレーズアラインメントのアノテーションデータとしては世界最大のデータを構築した。さらにそれを活用して 高精度なテキストベクトル化技術の開発し、柔軟なフレーズアラインメント技術の開発も行った。これらの研究成果は、EMNLP などのトップカンファレンスに採用されるなど、学術的に大きなインパクトを与えた。本研究をさらなる推進することにより、パラフレーズの自動生成に応用される可能性がある。既存のパラフレーズ生成技術には、意味の同一性を保持できず過剰な言い換えを行う、あるいは意味の同一性を保持しようとするため、ほとんど言い換えを行わないなど、課題が多く残されている。今後、現在までの研究成果であるフレーズアラインメント技術を応用して、品質の高いパラフレーズ生成技術の開発が期待される。

(2) 飯塚 里志 研究者　　　担当アドバイザー:五十嵐アドバイザー
「多層ニューラルネットワークモデルを用いた大規模学習による歴史的映像コンテンツの自動修復手法の開発」
本研究では、劣化した映像資料を自動的に修復する深層学習による手法を開発した。新規性としては、修復と色付けを同時に行うフレームワークを提案している点、色付けについて色付け見本画像から適切なものを自動的に選択して利用している点などが挙げられる。学術的な成果としては、当該分野のトップカンファレンスである ACM SIGGRAPH ASIA 2019 に採択されており、顕著な成果であるといえる。また、伊勢湾台風の白黒映像のカラーリマスターを行い、その結果がテレビ番組で放映されたり、第 61 回科学技術映像祭において文部科学大臣賞を受賞したりするなどの実績があり、高く評価できる。今後については、学術的な成果だけでなく、広く一般に利用可能な形で提供できるように、実用化に向けた研究開発が期待される。

(3) 井上 中順 研究者　　　担当アドバイザー:中小路アドバイザー
「マルチメディアデータから新しい概念を発見する高階モデル学習」
本研究は、少量のアノテーションされたマルチメディアデータから、新たな認識対象や新たな概念の学習を比較的高精度で行う技術の構築を目指すものである。本研究期間の成果は大きく二つある。第一の成果は、数枚の画像から高精度にモデル学習を行う Few-Shot Adaptation 法の提案であり、Zero-shot(教師なし学習)と Many-shot(大量データを用いた教師あり学習)の最適化問題を目的関数の加重和を介して統合し、サンプル数に応じた学習手法を適用するという独創的なものであり、これは ACM Multimedia 2018 にフルペーパーとして採択された。第二の成果は、ベンチマーキングデータセットとして、1000 カテゴリを有する Verb-Image セットをクラウドソーシングにより構築したもので、この公開および伝播を目的として ICCV 2019 のワークショップを提案、採択され、参加人数 300 人という大規模な国際ワークショップの実施へとつなげた。当該研究コミュニティづくりへの端緒を作り上げており、今後が期待される。

(4) 今倉 暁 研究者　　　担当アドバイザー:河原林アドバイザー
「非線形非負行列分解を用いたディープニューラルネットワーク計算手法の開発」
本研究は、超大規模並列計算機の高度利用を前提とし、並列計算機との親和性の高い非線形非負行列分解(非線形 NMF)を利用した新しい DNN 計算法を開発した。また、固有値計算や行列分解などに対する高性能な行列分解技術を基盤とした各種のデータ解析手法の開発も行った。これらの研究成果は、IJCAI、AAAI などのトップカンファレンスに採用されるなど、学術的に大きなインパクトを与えた。本研究をさらなる推進し、高性能化とともに、高速・高並列なデータ解析基盤を整備することができれば、現状では実現し得ない超大規模データの高速な解析を可能とし、ビックデータから新しい価値の創出に繋がることが期待される。

(5) 久保 勇貴 研究者　　　担当アドバイザー:五十嵐アドバイザー
「パーソナルインタラクションスペースの実現に向けた操作体系の構築」
本研究では、高度に情報化された環境において、ユーザからの効率的な情報入力を可能とするセンシング技術の開発を行った。具体的には、アクティブ音響センシングを利用して、手の形状の認識や、把持オブ

ジェクトの識別、さらに内部構造の差異を利用した 3 次元プリントオブジェクトの識別などを実現している。成果については、HCI 分野の国際会議 MobileHCI 2019 および CHI Late-Breaking work に採択され発表を行っており、顕著な成果であるといえる。手の認識については、他の手法（電気信号によるもの）などに対するメリットを明確にする発展や、内部構造によるオブジェクト識別手法については、パターンの最適化などの発展の余地がまだあり、今後のさらなる展開が期待される。

(6) 黒木 菜保子 研究者　　担当アドバイザー：湊アドバイザー

「CO_2フリー社会実現のための物理化学と情報科学の融合」

本研究は、地球温暖化の原因の1つである CO_2 を効率良く回収するために、CO_2 を選択的に吸収するイオン液体の開発を目指すものである。イオン液体は理論上 10 の 18 乗もの種類存在するため、全てを試すことは事実上不可能である。この研究では、イオン液体のある種の特徴量と CO_2 吸収能力に一定の相関があることから、機械学習の技法を用いて有力候補の絞り込みを行うことを目標としている。ACT-I 期間中はイオン液体の CO_2 吸収量のみを評価していたが、加速フェーズにおいては吸収量だけでなく吸収速度や分離回収の容易さも評価尺度に加え、より実用に近づくための物質探索を行った。加速フェーズの研究成果として、従来よりも CO_2 吸収量・吸収速度・分離回収性に優れると予想されるイオン液体を探索・提案することに成功しており、実験科学者との共同研究につなげている。化学分野の著名国際会議での招待講演の依頼を受けるなど、その成果は国際的にも認められている。職位に関しても、中央大学において助教のポジションを獲得しており、自立した研究者としての地歩を固めつつある。今後の活躍が期待される。

(7) 小林 亮太 研究者　　担当アドバイザー：原アドバイザー

「時系列データの自動解析技術の実現」

本研究は、複数のイベントから得られたイベント時系列を対象としてイベント間の因果関係を抽出する技術の開発と、開発した技術に基づいて高精度神経細胞モデルを推定する技術の確立を目指すものである。特に、脳科学分野で 50 年以上の研究でも有効な結果が得られていなかった「ニューロン間のシナプス結合の推定問題」に果敢に取り組み、重要な成果を達成したことは特筆に値する。考案技術は、一般化線形モデルと相関イベント時系列解析を融合させた独創性の高いアプローチに基づいており、学術的な貢献が大きい。特に、考案技術によって脳内の異なる機能領域における情報処理や情報の流れの違いが明らかになるため、脳科学分野の発展に大きく貢献することが期待される。また、考案技術は、Web や SNS、人々のコミュニケーションから得られたビッグデータの分析にも応用可能であり、工学的な価値が高い。本研究の成果は、情報通信分野で最高峰の論文誌である Nature Communications に採択されるなど、国際的に高く評価されている。さらに、さきがけ研究者として本研究を発展させた研究に取り組んでおり、今後の益々の活躍が期待される。

(8) 曽我部 舞奈 研究者　　担当アドバイザー：内田アドバイザー

「生体ライブイメージングにおける最適なデータ取得のための技術革新」

本研究は、スパース性を利用した高精度バイオイメージ取得を目指し、顕微鏡ハードウェアを含めた撮影システムを実現したものである。本研究者は生物系（正確には獣医学部）出身であり、情報系そして工学系はもともと専門ではない。この学際的テーマの実施には、相当の苦労があったことは容易に想像できる。特に、撮像位置を制御するステージを実装し、それにより多点撮影システムを現実のものとできたのは圧巻であった。そのシステムで撮影された実際の美しい動画を領域会議で見た時の感動は忘れられない。論文の執筆についても、その学際的な研究成果が査読者に理解してもらいにくく、苦労していたようだが、あきらめずに J. Biophotonics への論文採択に至ったのも素晴らしい。ACT-I の最初の申請書に見られた「分野をつなぎたい」という熱い気持ちを持ち続けたことが、そうした成果に結実した。今後もそのマインドを忘れることなく、バイオ分野と情報分野をつなぐ活躍が期待される。

(9) 千葉 直也 研究者　　担当アドバイザー：内田アドバイザー

「プロジェクタ・カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法」

本研究は、カメラプロジェクタシステムを利用し光点投影を基本アイディアとした三次元形状推定を行うシステムの実現を目指したものである。三次元形状推定だけでなく対象の材質推定を実現できた点や、実時間動作に向けて多角的な工夫（計算技術や機械学習理論の活用）を行っていた点を評価する。修士学生時代に ACT-I に採択され、その後博士課程の途中で ACT-I フェーズに移行することなった。その期間、与

えられたチャンスを最大限活かし続けたことも驚異的であり、喜ばしいことであった。既に SSII での招待講演をするなど、学術界にもその名は知られつつある。ACT-I「修了」後も、スピードを落とすことなく、むしろさらに加速して、自らの「技術的武器」に磨きをかけつつ、その抜群の行動力を活かして，様々な方向に研究を展開していくことが期待される。

(10)中島　一崇　研究者　　　　担当アドバイザー：川原アドバイザー

「型による成形のためのコネクタ形状を考慮したボリューム分割」

本研究は、製品の外装の造形手法においてコンピュータを使って設計を支援する手法について取り組んだ。具体的には大きく分けて二つの研究課題からなる。一つ目は、射出成形を用いて造形する際に必要になる型を設計する手法である。造形物を分割して印刷する際、分割された各パーツの間に適切なコネクタ形状を生成することで、最終的な造形物を容易なものとすることが可能になった。この際、コンピュータグラフィクスにおけるセマンティクスセグメンテーションアルゴリズムを活用することにより、コネクタの動作方向を考慮しながらも、見た目よく分割できる方法を提案することができた。二つ目は、粉末焼成型の 3D プリンタにおいて、内部の粉体を容易に排出するための穴を自動決定するという問題を提起し、計算が複雑である粉の空洞内での動きを近似的に求めることを可能にした。研究成果は ACM SIGGRAPH での発表としてまとめられた。学術的な有用さに加えて実用性でも優れた提案になっており、今後の活躍が期待される。

(11)原　祐子　研究者　　　　担当アドバイザー：千葉アドバイザー

「大量ストリームデータのリアルタイム処理に向けた柔軟なアーキテクチャ探索と設計環境構築」

本研究では、IoT エッジコンピューティングの時代においてセンサからのデータをエッジサーバへ送るシステムの最前線を司る超低消費電力のプロセッサコアを開発した。4種類の命令だけをもつプロセッサコアを開発し、実アプリケーションを試作することで、従来にはないレベルの超低消費電力プロセッサという新しいカテゴリを切り拓き、その実現可能と有用性を実証した。従来の低消費電力プロセッサより性能が劣ってもエネルギー効率を追求して超低消費電力を実現すると、新しい応用が開けるという主張は興味深い。また開発したプロセッサコアを並列に接続し、性能要件に柔軟に対応できるように開発した点も評価できる。短い研究期間であるが国際論文誌論文や国際会議論文、特許も申請しており学術的にも優れた成果をあげている。今後もハードウェアとソフトウェアの両面から研究開発した技術を深め、より実用的な技術としていくことが期待される。

(12)松井　勇佑　研究者　　　　担当アドバイザー：原アドバイザー

「圧縮線形代数：データ圧縮による省メモリ高速大規模行列演算」

本研究は、「圧縮線形代数」という新しい学問領域を提案しており、学術的に顕著な貢献が認められる。圧縮線形代数では、ベクトル・行列を圧縮して省メモリで表現し、圧縮した状態のままで距離計算などの数学的操作を高速かつ省メモリに実行できる。本研究の加速フェーズでは、これまでの研究成果を発展させ、圧縮表現として利用するコードワードに対して重み付き距離を考慮した意味づけを行うなど、挑戦的な取り組みが行われている。ここで構築された理論基盤は、さまざまな距離関数に基づく数学的操作や探索操作を劇的に高速化する可能性があり、工学的な価値が高い。本研究の成果は国内外で高く評価され、コンピュータビジョン分野で最高峰の国際会議 CVPR におけるチュートリアル講演などのアウトリーチ活動にもつながっている。さらに、さきがけ研究者としても最近傍探索に関する挑戦的な研究に取り組んでおり、今後も益々活躍し、情報学分野の中心人物となって分野全体をけん引していくことが期待される。

3期生研究者(29 名)

(1) 穐山　空道　研究者　　　　担当アドバイザー:井上アドバイザー
「次世代メモリデバイスによるアプリケーションの自動高速化」
本研究は、アクセスレイテンシを高速化する代わりにデータに小さな確率でエラー(ビット化け)が入るメモリである Approximate memory を用いてアプリケーションを高速化する手法の開発を目指すものである。Approximate memory によるエラーがアプリケーションの最終結果に与える影響を軽量に見積もる手法を提案するとともに、エラー混入を許容するデータと許容しないデータが混在している場合に発生する課題の初期的な解決手法を提案した。さらに、実機の Approximate memory 上で実際にアプリケーションコードを動作させるシステムを提案した。これらの成果は英文論文誌や国内外のワークショップで公表され、十分な学術的成果を残した。今後は、ACT-I 加速フェーズにおいて本研究をさらに発展させる研究に挑戦し、さらにインパクトの大きな成果を出すことが期待される。

(2) 石田　繁巳　研究者　　　　担当アドバイザー:原アドバイザー
「無線通信を用いた車両・自転車・歩行者検出技術」
本研究は、高度道路交通情報システム(ITS)における道路上の車両検出の高度化のために、車両、自転車、歩行者を区別して低コストで検出可能なシステムの構築を目指している。構築したシステムでは、(1)非見通し環境での Wi-Fi センシング、(2) 非見通し環境での屋外人間検出、(3) 見通し、非見通し混在環境での車両・自転車検出、という 3 つのステップを実行することで、屋外での高度な WiFi センシング技術を確立している。さらに実証実験を通じて、高い精度で車両の識別が可能であることを示した。多数の車両が存在する現実的な環境への拡張は残された課題ではあるが、そのための第一歩として重要な成果を達成した。今後も本研究に関連する挑戦的な課題に取り組み、学術的および工学的に重要な成果を達成することが期待される。

(3) 石畠　正和　研究者　　　　担当アドバイザー:河原林アドバイザー
「決定グラフを用いた組合せ最適化問題に対する統一的解法の研究」
本研究は、決定グラフと呼ばれる制約をコンパクトに表現するグラフ構造を用いることで、いくつかの組合せ最適化問題に対する効率的な解法を提案した。なかでも、線形関数を定義する重みは未知であるが、その最大値がわかったとき、背後にあると考えられる全ての線形関数(重み)を出力する問題の解法に関する研究成果は、IJCAI などのトップカンファレンスに採用されるなど、学術的に大きなインパクトを与えた。さらに国内の機械学習の代表的なワークショップである IBIS と、オペレーションズリサーチの中心的なワークショップである RAMP で招待講演を行うなど、国内でも評価されてきている。提案手法は、他の組合せ最適化問題に対しても貢献の余地があると考えられ、今後さらなるインパクトのある研究成果を出すことが期待される。

(4) 板倉　健太　研究者　　　　担当アドバイザー:内田アドバイザー
「機械学習や 3 次元点群処理技術が切り拓く植物計測の技術革新」
本研究は、樹木の3次元形状を3次元センサや全方位カメラを用いて取得することで、環境内の植生解析の高度化を目指した研究である。農学系修士学生として ACT-I に採択されたことをきっかけに、情報系の会議等にも積極的に参加するなど、まさに学際的な研究者として努力を重ねた態度は、高く評価したい。このように、研究推進力だけでなく、抜群の行動力を持っており、特にシンガポールとのコラボレーションを自身の力で可能にしたことは圧巻だった。その縁が今後さらに展開予定なことは、そのコラボレーションが成功していることの証左である。今後は、これまで培った3次元センシングのノウハウや客観定量化能力を活かしつつ、そこに農学研究者としての様々な視点を重ねていくことで、唯一無二の研究領域を展開していくことが期待される。

(5) 伊藤　伸志　研究者　　　　担当アドバイザー:湊アドバイザー
「部分的フィードバックに基づくオンライン凸最適化」
本研究は、オンライン最適化問題において、途中までの意思決定による目的関数の評価を、空間全体でなく部分的にしか観測(フィードバック)できないという現実的な問題を設定し、それでも効果的に最適化を行うアルゴリズムの研究に取り組んだ。取り組んだ問題設定とその理論的解析結果は、当該分野の研究コ

ミュニティにおいて大きな関心を集め、機械学習分野でのトップ国際会議として知られる NeurIPS 2019 に単著および筆頭の論文を 3 件同時に投稿し全て採択されるという特筆すべき成果を達成した。その他にも 1 件の単著論文がトップ会議 AISTATS 2020 に採択されている。以上の研究成果により、若手研究者としての評価はゆるぎないものとなっており、今後の活躍が多いに期待される。ACT-I 期間中に東大の社会人博士課程を修了し、博士の学位を取得するなど、着実にキャリアを積んでいる。今後は、ACT-I 加速フェーズにおいても、大きなインパクトを与える研究成果を出していくことが期待される。

(6) ヴァルガス ダニロ 研究者　　　担当アドバイザー:松尾アドバイザー

「頑強なハイブリッド深層学習モデルの自動探索システム」

本研究は、敵対的な攻撃に対して頑健な深層学習の構造を探索する手法を開発することを目指すものである。本研究者の以前の研究である、1つのピクセルの変更で分類のクラスを変えるという攻撃手法は注目を集めたが、これを発展させた一連の研究から構成される。まず、深層学習の脆弱性について議論した上で、頑健な構造を探索する手法を提案した。また、テキスト等のデータに対しても適用した。さまざまな研究テーマを並行して活発に進め、成果は GECCO をはじめとして複数の国際会議に採択されている。今後は、ACT-I 加速フェーズにおいても、こうした研究を発展させることでさらに大きな分野を切り拓き、世界の中でも重要な研究者としての認知を高めるべく、インパクトの大きな成果を出していくことが期待される。

(7) 植吉 晃大 研究者　　　担当アドバイザー:松尾アドバイザー

「省電力なメモリアクセスを実現する DNN モデル学習」

本研究は、深層ニューラルネットワークの計算を省電力化する手法を確立し、ハードウェアへの実装につなげることを目指すものである。ニューラルネットワークのユニットの半分以上が0を返すという点に注目し、その活性を予測する軽量なニューラルネットワークをコントローラとして用いることで省電力化につなげる。この提案手法は実際に効果があり、また、省電力化につながることも電力シミュレーションにより検証することができた。国内の研究会等で複数の受賞につながっている。研究の方向性やアイディアは良かったものの、国際的には競争の激しい領域であり、本研究と同じアイディアの論文が先に掲載されるなどの不運な面もあったが、研究期間を通じて粘り強く取り組んだ。今後は、ACT-I の研究で得られた経験を活かしながら、さらにインパクトの大きな成果を出すことが期待される。

(8) 江原 遥 研究者　　　担当アドバイザー:河原林アドバイザー

「意味空間上の広がりに基づく効率的な語彙学習支援システム」

本研究は、専門分野の要学習語やその文脈ごとの使い分けを、学習者に合わせて提示・可視化する、効率的な語彙学習支援システムを開発した。技術的には、語が持つ文脈の多様性を空間的な広がりとして表現可能な、分散表現の獲得手法を提案した。これらの研究開発が評価され、本研究者は、NLP 若手の会第 14 回シンポジウム奨励賞、そして第 44 回教育システム情報学会全国大会で大会奨励賞を受賞した。さらにこれらの研究開発成果は、ラーニングアナリティクスのトップ国際会議である LAK のポスターなどに採用されるなど、学術的に大きなインパクトを与えた。提案開発システムは様々な発展の可能性があり、今後さらなるインパクトのある研究・開発成果を出すことが期待される。

(9) 大城 泰平 研究者　　　担当アドバイザー:湊アドバイザー

「重みつき組合せ最適化と多項式行列理論のインタラクション」

本研究は、重みなし組合せ最適化問題を重みつき組合せ最適化問題に拡張し、具体的な2つの問題を通して、重みなし問題と重みあり問題の間に存在する理論のギャップを埋め、「重みつき組合せ最適化問題」と「多項式行列の問題」の数学的な対応関係を明らかにすることを目指した。1 年半の研究期間に、「重みつき行列木定理」と「多項式行列の行列式の次数計算」の2つのテーマに取り組み、前者のテーマでは、パフィアンペアと呼ばれる離散構造に広く適用可能な効率的な重みつき数え上げアルゴリズムを構築することに成功し、国内研究会での学生発表論文賞を受賞している。後者のテーマでは、非可換 Edmonds 問題と呼ばれる問題を重みつきに拡張した問題に対する効率的解法を初めて考案し、理論計算機科学のトップ国際会議 ICALP 2020 に採択されている。博士課程学生として顕著な研究成果を出しており、ACT-I 加速フェーズにおいても、大きなインパクトを与える活躍が期待される。

(10)大屋　優　研究者　　　　担当アドバイザー：井上アドバイザー
「デジタル回路設計における耐ハードウェアトロイ設計仕様の研究開発」
　本研究は、第三者に委託された IC の設計・製造段階で、秘密裏に挿入される悪意のある回路（ハードウェアトロイ）への対策技術の開発を目指すものである。既存のハードウェアセキュリティ対策技術（taint propagation）についてハードウェアトロイに対する有効性調査を行い、ハードウェアトロイのうち対策できるものとできないものを明らかにした。その上で、既存技術でカバーできないハードウェアトロイについて 3 つの検証手法（Port Identification, Address Identification, Data Identification）を提案した。これらの成果は CEATEC 2019 等で展示され、まだ認知度が低いハードウェアトロイ問題についての啓発を行った。短い研究期間の中で学会等での論文発表には至らなかったが、今度さらに重要性が増す研究課題であるため、学術成果も含めた研究の発展が期待される。

(11)梶原　智之　研究者　　　　担当アドバイザー：中小路アドバイザー
「語彙制限に基づくパーソナライズされたテキスト生成」
　本研究は、深層学習を用いて、文章の一貫した平易さや丁寧さといった、スタイル間の自動変換を目指したものである。研究期間中に、言い換えたい表現とそのスタイルを確実に編集する手法、より細かいレベルでのスタイル（難易度）間の言い換えを制御する手法、および、小規模な訓練データで効率良くスタイル変換の性能を向上する手法を構築することができ、当初の研究の目的を達成した。成果の一部は、AAAI や自然言語分野における著名な国際会議 ACL にも採択され、style-sensitive paraphrasing という分野において、国際的にも高い評価を得た。ACT-I 実施期間中に交流を得た他の研究者との共同研究提案が科研費に採択されるなど、今後の展開が期待される。

(12)桂井　麻里衣　研究者　　　担当アドバイザー：原アドバイザー
「学術データの自動集約による研究者プロファイリング」
　本研究は、複数の学術データベースから個人の情報を正確に収集するための技術を開発し、学術データベース分析に関する実務や研究開発に貢献することを目指している。特に、研究者プロファイル間の類似性を発見する手法を構築し、異分野コミュニケーションの機会を誘発するような新たな検索フレームワークを提供している。このフレームワークは、研究者が関連する研究者を探すことを支援し、新たな共同研究を促進するものである。本研究は、学術的に挑戦的な課題であることに加えて、「科学の科学（Science of Science）」を実現するうえで重要な基盤技術を構築するという観点から社会的な意義が大きい。さらに、ACT-X 研究者としても採択されて「科学の科学」のための重要技術の開発を進めており、当該分野をけん引する研究者として今後の活躍が期待される。

(13)佐々木　勇和　研究者　　　担当アドバイザー：湊アドバイザー
「大規模グラフのための二部決定図に関する研究」
　本研究は、二分決定図（BDD）を用いた解の圧縮索引化技術を用いて、大規模なグラフ列挙問題を効率的に解くことを目的としている。計算機のメモリが不足して BDD の構築が困難な例題に対して、厳密な解の列挙をあきらめ、近似的な解集合の列挙を行うことで、メモリ使用量や計算時間を削減することを目指した。ACT-I の研究期間において、既存の BDD 構築アルゴリズムの一部を改変し、メモリオーバフローが起こる前に一部の BDD ノードを消去することでメモリ使用量を抑える手法を開発した。BDD ノード消去による解の精度低下をできるだけ防ぐための、BDD ノードの重要性（価値）を表すスコアを考案し、それを用いたアルゴリズムを実装した。この手法をネットワーク信頼性解析の問題に適用し、実グラフを用いた実験により既存のサンプリングによる手法と比較して最大で 50 倍の高速化を可能とした。この成果はデータベース工学に関する査読付き国際会議に採択され、論文誌でも論文発表されており、当該分野において一定の評価を得ている。1 年半という期間ではネットワーク信頼性以外の様々な問題に適用して汎用的な技法として提供可能にするというところまではできなかったが、今後も引き続きデータベース分野における BDD 技術の活用を進めて、活躍の場を広げていくことが期待される。

(14)鈴木　雄太　研究者　　　　担当アドバイザー：土井アドバイザー
「物質の結晶構造を高速に予測するデータ解析技術の開発」
　本研究は、X 線解析パターン（XRD）から結晶構造推定を高速かつ自動で行うものである。決定木ベースの機械学習アルゴリズムである Extremely Randomized Tree により結晶構造推定を可能とした。さらにこの

機械学習モデルが獲得した結晶系の分類規則の一部が、熟練者の直感的な結晶系推測に合致することも示した。つまり本研究は結晶構造推定を高速化しただけでなく、いわゆる経験知を発見できるようになった点が大きな意味を持つ。今後、UC サンディエゴなど海外の研究機関も含め、Web 会議で進められる共同研究にて、XDR 以外での知識発見も展開できるとよい。機械学習に通じた材料科学者という視点を最大限に活かして、ACT-I 加速フェーズにおいても、材料分野における知識発見という方向性をさらに深めることが期待される。

(15)竹内　孝　研究者　　　　　担当アドバイザー：内田アドバイザー

「時空間超解像のための時空間畳み込み技術の研究」

本研究は、時空間的にイレギュラーな構造を持つデータを対象とした高解像度手法の開発を目指すものである。1 年半の短期間中に論文発表に至らなかったのは残念であったが、ACT-I の場を積極的に利用していたのは高く評価する。実際、ACT-I 千葉直也研究者とのディスカッションにより、時空間高解像化の問題が、3 次元点群処理の問題に置き換えられるという着想を得て、3 次元点群用の深層学習の活用を早速開始した点や、同じく ACT-I 宮本崇研究者との連携により、新しく企業とのコラボレーションを開始した点は素晴らしい。扱っている問題が広範囲に適用できることを活かし、こうした様々なコラボレーションを今後も充実していくことが期待される。

(16)谷本　輝夫　研究者　　　　担当アドバイザー：千葉アドバイザー

「柔軟性と電力効率に優れた次世代専用プロセッサ設計手法の開発」

本研究は、IoT 機器の多品種少量生産の時代に向け、汎用処理回路と専用処理回路をハイブリッドにすることで低消費電力かつ高性能を実現するプロセッサを自動設計する手法の開発を目指すものである。本研究により、目的とするプログラムを静的に解析することでクリティカルパスを自動検出し、専用処理回路を用意することで高速化が期待できる部分を精度良く自動抽出できることを示した。さらに抽出された部分の専用処理回路を設計するための領域特化言語(DSL)も開発し、開発の容易化が可能であることを示した。これらの研究成果は、自動運転等で重要なアプリケーションである SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)用のプロセッサ開発を例として、その有効性が実証的に確かめられた。研究期間が短いため、これらの研究成果は国際会議論文として採択・発表される段階には至っていないが、早期に論文として発表することが期待される。

(17)包　含　研究者　　　　　担当アドバイザー：河原林アドバイザー

「弱い教師データに基づく低分散なリスク推定方法の開発」

本研究は、教師付き分類で用いられている評価指標を一般化した線形分数形と呼ばれる評価指標のクラスを考え、このクラスに含まれる評価指標を近似する surrogate utility を呼ばれる目的関数を構成した。この提案目的関数は教師付き分類において、既存法よりも良い実験的性能を達成しただけでなく、画像セグメンテーションのような応用先でも良い性能を達成した。これらの研究成果は、AISTATS、AAAI などのトップカンファレンスに採用されるなど、学術的に大きなインパクトを与えた。提案目的関数は、さらなる発展の余地があると考えられ、今後も大きなインパクトのある研究成果を出すことが期待される。

(18)照屋　唯紀　研究者　　　　担当アドバイザー：井上アドバイザー

「大規模並列計算に適した高速な格子基底簡約アルゴリズムの開発」

本研究は、耐量子計算機暗号として有力な候補である格子暗号の安全性を評価するため、高次元の格子問題を高速に求解するための格子基底簡約アルゴリズムの開発を目指すものである。最短ベクトル問題（SVP）困難性推定技術として、ランダムネス仮定と呼ばれる確率モデルを採用し、Gram-Charlier A 型級数展開を利用してアルゴリズムが出力する格子点の長さの確率的推定法を構築した。また、格子基底簡約法についても前述の推定法は適用可能であり、さらに高速なアルゴリズムの開発について理論的なツールを構築した。これらの成果を国際ワークショップで発表し、学術的成果を残した。アメリカ国立標準技術研究所では現在、耐量子計算機暗号の標準化プロジェクトが進行しており、その中でも最有力視されている格子暗号の安全性評価は今後重要性を増していく研究課題であるため、研究のさらなる発展が期待される。

(19)中村　優吾　研究者　　　　担当アドバイザー：川原アドバイザー
「人と環境に自己適応する柔軟性を備えたコンテキスト認識メカニズムの創出」
本研究は、人と環境に自己適応する柔軟性を備えたコンテキスト認識メカニズムの創出に向けて、(1) 多様なセンサ環境と行動コンテキストを包括したデータセットの構築、(2) IoT センサ環境の違い/変化にロバストな自己適応メカニズムの設計開発、(3) 実環境で動作する行動コンテキスト認識システムの構築について取り組んだ。研究期間中には様々なエクササイズ行動をカバーしたデータセットを構築した上で、センサの装着位置や向きの違いにロバストな行動認識機構を開発した。さらにアプリケーションとして、オフィスやトレーニングなど、実環境でのフィールドワークを通じてシステムの有効性を確認した。得られた研究成果をもとに国内外の研究者に加えて医師やスポーツインストラクターとの連携も模索しながら、今後は ACT-I 加速フェーズにおいて、さらなる活躍が期待される。

(20)中山　悠　研究者　　　　担当アドバイザー：原アドバイザー
「適応的に再構成する通信ネットワーク」
本研究は、5G の本格的な運用や 6G に向けた研究開発が本格化する状況下で複雑化するネットワーク環境を考慮し、「適応的に再構成するネットワーク」の実現を目指している。この目的のために、移動基地局の制御手法やクラウドソーシングベースのアプローチなど様々な研究開発を展開しており、有効な技術を考案している。本研究の成果は、通信分野で著名な論文誌や国際会議に多数採択されており、国際的に高く評価されている。本研究で取り組む課題は、今後のネットワーク環境における重要な課題を解決する基盤技術を構築するものであり、学術的な貢献に加えて、社会的な意義が大きい。ACT-I 加速フェーズにおいても、この研究をさらに発展させて、学術・産業・社会的に一層インパクトのある研究を推進していくことが期待される。

(21)名波　拓哉　研究者　　　　担当アドバイザー：川原アドバイザー
「昆虫の嗅覚神経系を模倣したシリコン神経ネットワーク」
本研究は、昆虫の神経回路構造を模した情報処理系を電子回路として実現するシリコン神経ネットワークに関する研究に取り組んだものである。昆虫脳の中でも、嗅覚神経系を再現する神経ネットワークモデルを電子回路として構成する方法について検討してきた。これまでの研究領域から一歩踏み出し、神経科学の最新の知見を取り入れ、神経科学者との連携を行うことで、神経ネットワークモデルの構築をすることができた。匂いセンサと組み合わせることで、匂い情報の活用に向けた情報処理基盤の創出へとつなげられる可能性を秘めている。本研究をさらに発展させ、高い電力効率を持つ情報処理システムの創出を切り拓いていくことが期待される。

(22)鳴海　紘也　研究者　　　　担当アドバイザー：五十嵐アドバイザー
「印刷できる生体模倣型ソフトロボットシステムの構築」
本研究では、デジタルファブリケーションの手法を用いることによって、動く・感じる・傷が治るなど生体の機能を持つ柔らかいロボットや形状変化インタフェースを実現することを目標として研究を行った。具体的には、界面を接続するだけで強度が回復する自己修復ポリマー内部に導電材料を分散させることにより複合素材とし、機械的な修復に加えて電気的な修復機能も同時に実装した。この複合素材をシート状に加工し、所望の形状の平面に切り、その後複数のシート同士を積み上げることによって立体のデバイスを構築した。これらの技術によって、動き・感じ・傷が治るインタフェースデバイス (Self-healing UI) を作製した。これらの研究成果はユーザ・インタフェースのトップ会議である UIST 等で発表されており、また一連の研究をまとめた博士論文が東京大学の総長賞に選ばれており、顕著な実績であるといえる。ACT-I 加速フェーズにおいても、大きなインパクトを与える活躍が期待される。

(23)早志　英朗　研究者　　　　担当アドバイザー：尾形アドバイザー
「生体信号の確率的生成モデルと推論ニューラルネット」
本研究は、特に生体信号を対象として、その確率的な生成モデルを構築し、さらにそのモデルの知見を反映させた神経回路モデルを構築することを目指すものである。深層学習に代表される神経回路モデルを部分的に確率モデルで表現する試みはこれまでにも多くあるが、実質的な性能向上につながることは難しかった。それに対して本研究者の試みは、脳波や筋電など既に知見の集められている生体メカニズムを利用する独創的なアイディアに基づいている。本領域においては、特に医師との共同を積極的に進め、胎児

の生体信号モデルに取り組むなど、提案した計画を超えた成果を上げている。ACT-I 加速フェーズにおいても、このアプローチの適用範囲を広げ、分野全体をけん引していくことが期待される。

(24)船橋　賢　研究者　　　　　担当アドバイザー：内田アドバイザー

「分布型触覚センサと CNN の多指ハンドでのタスク実現」

本研究は、多数の触覚センサを搭載したロボットハンドを実装し、そのセンシングデータを元に把持状態や把持対象を認識・制御・理解することを目指すものである。本研究の成果は、深層学習の効果と見られてしまう可能性があるが、より本質的には、世界トップレベルのロボットハンドの実装力に基づいている。指先等の小領域に多数のセンサを搭載し、それらすべてを結線した上で、故障なくセンシング結果を収集するためには、高度な技術と根気が必要である。現在タスクをより一歩進め、操り制御を試みており、これについても成果が生まれる可能性を秘めている。今後、ACT-I 加速フェーズにおいても、唯一無二のロボットハンドを武器に、既存の把持研究の枠を越えた研究を推進していく活躍が期待される。

(25)古川　淳一朗　研究者　　　担当アドバイザー：尾形アドバイザー

「人の動作技量を再現する外骨格ロボット制御」

本研究では、人間が装着する外骨格ロボットを対象として、人の運動情報からその「動作目的」を逆強化学習により推定し、その目的に応じた適切な運動負荷軽減、運動精度向上を行うことを目的としている。これまでにも、筋電などの情報を用いた動作パターン切替えにより運動負荷を低減させる研究は存在したものの、提案モデルは機械学習の手法を積極的に導入することで、運動の「微妙な補助」を実現したところに独創性がある。本手法は、人間の意図を読んだ運動調整（生成）という性質から、外骨格ロボットの運動補助というターゲットにとどまらず、人間のコーチングやアバターロボットなど多様な応用に繋がる可能性を持っている。今後、さらにインパクトのある成果を出すことが期待される。

(26)松木　萌　研究者　　　　　担当アドバイザー：川原アドバイザー

「行動認識における Zero-shot 学習法の提案」

本研究は、日常での行動認識手法の実現においてネックになっていた、膨大な数の教師データを取得する必要性を緩和することを目的として、Zero-shot 学習法を活用した未知行動の推定手法の確立に取り組んだ。未知行動推定の検討において新たに意味ベクトルを使用する手法を提案した他、介護記録データを参照する事例において、時系列上に並ぶ属性推定を考慮した新たな学習法の検討を行なった。研究成果は論文誌や国際会議で発表した他、国内口頭発表では優秀論文賞と、優秀プレゼンテーション賞も受賞した。本成果が端緒となり、今後介護の現場など多様な業務が行われているような作業環境においても、センサを用いて業務内容を分析し、業務改善をするような事例が生まれることが期待される。

(27)宮武　勇登　研究者　　　　担当アドバイザー：千葉アドバイザー

「連続型数理モデル構築のための確率的アルゴリズムの整備」

本研究は、微分方程式の確率的数値解法において数値解の誤差を高速かつ定量的に評価する手法を開発し、様々な自然現象から数理モデルを構築し、さらに現象の予測をおこなうという計算科学的アプローチの分野に新たな方向性をもたらそうという野心的な研究であった。本研究は数値解の誤差を確率変数とみなし、その分散をデータと数値解を用いて推定することで、微分方程式のパラメータ推定を高速かつ精度良くおこなう手法を開発した。本研究の成果は、気象学や地震学などの発展に寄与するだけでなく、深層学習の発展にも寄与する可能性を秘めている。同様の問題意識をもつ研究者と連携・交流し、研究集会やミニワークショップを積極的に開催することで、研究成果の普及やその意義についての議論をおこなってきた点も評価できる。今後は ACT-I 加速フェーズにおいて、さらなる活躍が期待される。

(28)宮西　大樹　研究者　　　　担当アドバイザー：中小路アドバイザー

「仮想世界のデータを用いたドメイン適応による実世界質問応答の高度化」

本研究は、日常生活における質問応答システムの性能向上に向けて、現実世界では大量に取得することが困難な学習データをライフシミュレータゲーム上で仮想的に生成することで、ニューラル質問応答モデルの性能向上を狙う Sim2RealQA (Simulation to Real QA)の構築を目指したものである。ACT-I の研究期間中に、ライフシミュレーションを用いて 54770 個のストーリー文と 22000 個の質問応答データセットを作成し、既存のニューラル質問応答モデルおよびドメインの違いに頑健なニューラル質問応答モデルのいずれ

においても、特に現実世界での学習データが数百個しかない場合には、この生成した仮想世界学習データにより精度が向上することを示した。学習データを仮想世界で生成し、現実世界の学習データの欠損を補完するという本研究は、実用的な状況で価値を発揮する基礎的研究である。論文発表を含む今後の発展が期待される。

(29)横田　達也　研究者　　　担当アドバイザー：土井アドバイザー

「高階埋め込みテンソルモデリングの研究」

　本研究は、従来のようにテンソルの原空間で数理モデルを適用するのではなく、高階かつ高次元な埋め込み空間で数理モデルを適用して解析する高階埋め込みテンソルモデリングに関する研究である。高階埋め込み低ランクモデリングの提案とアルゴリズム開発により、その応用例として画像補完を実現し、高階埋め込み多様体モデリングの提案とアルゴリズム開発により、その応用例としてボケ画像の復元などを実現するという大きな成果を上げた。今後は加速フェーズにおいて、これまでの研究を発展していくとともに、医療画像への展開など、ACT-I の他の研究者との連携も含めて、研究の深化と応用展開が期待される。

10.　評価者

研究総括　後藤　真孝　　産業技術総合研究所　人間情報インタラクション研究部門　首席研究員

領域アドバイザー　（五十音順）

五十嵐　健夫	東京大学　大学院情報理工学系研究科　教授
井上　大介	情報通信研究機構　サイバーセキュリティ研究所　室長
内田　誠一	九州大学　大学院システム情報科学研究院　教授
尾形　哲也	早稲田大学　理工学術院　教授
川原　圭博	東京大学　大学院工学系研究科　教授
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　副所長/教授
千葉　滋	東京大学　大学院情報理工学系研究科　教授
土井　美和子	情報通信研究機構　監事
中小路　久美代	公立はこだて未来大学　情報アーキテクチャ学科　教授
原　隆浩	大阪大学　大学院情報科学研究科　教授
松尾　豊	東京大学　大学院工学系研究科　教授
湊　真一	京都大学　大学院情報学研究科　教授

（参考）

件数はいずれも、2020 年 3 月末現在。

1 期生加速フェーズ研究者（12 名）

（1）外部発表件数

	国　内	国　際	計
論　文	4	27	31
口　頭	57	26	83
その他	20	16	36
合　計	81	69	150

（2）特許出願件数

国　内	国　際	計
2	3	5

（3）受賞等

＜2018 年度＞

・久保　勇貴　　第 34 回テレコムシステム技術学生賞　佳作
ベゼル間の距離の短さを利用した超小型端末向けタッチジェスチャ

・黒木 菜保子　第 11 回 GSC Student Travel Grant Award
電子的特徴を基としたマテリアルズ・インフォマティクスによる CO_2 吸収液の迅速設計

・黒木 菜保子　Student Poster Presentation Award
Designing ionic liquids for efficient CO_2 capture: A materials informatics study, 8th International Symposium on Molecular Thermodynamics and Molecular Simulation (MTMS'18), PP30, Narashino, Japan (Sep. 2018)

・黒木 菜保子　化学工学会 第 50 回秋季大会, CC217, 学生優秀講演賞最優秀賞
CO_2 吸収特性に優れたイオン液体探索のための電子状態インフォマティクス,

・黒木 菜保子　GREEN Chemistry Poster Prize
Exploring ionic liquids for efficient CO_2 capture and storage by electronic structure calculation and machine learning, 7th Asia-Oceania Conference on Green and Sustainable Chemistry (AOC7-GSC 2018), P-0043, Singapore (Nov. 2018)

・千葉 直也　The 5th Case Western Reserve University – Tohoku University Joint Workshop Best Poster Presentation Award
LTM (Light Transport Matrix) estimation method under saturated condition by using Saturation ADMM

・千葉 直也　2018 IEEE Robotics and Automation Society Japan Joint Chapter Young Award (ICRA 2018)
Ultra-Fast Multi-Scale Shape Estimation of Light Transport Matrix for Complex Light Reflection Objects

・千葉 直也　PRUM 月間ベストプレゼンテーション賞
SMW 公式を用いた ADMM-L1 最小化問題の高速解法

・千葉 直也　第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI 2018 優秀講演賞
LTM 指定三次元計測法による金属物体のばら積みピッキング

＜2019 年度＞

・荒瀬 由紀　NLP 若手の会 (YANS) 第 14 回シンポジウム リクルートテクノロジーズ賞
文脈化された単語ベクトルからの単語領域表現

・荒瀬 由紀　NLP 若手の会 (YANS) 第 14 回シンポジウム サイバー賞
文脈ベクトルと細分化した単語ベクトルを用いた語彙的換言

・黒木 菜保子　お茶の水女子大学賞 第 5 回 黒田チカ賞
フラグメント化手法に基づく物理化学シミュレーション法による混合溶媒の物性予測と応用に関する研究

・千葉 直也、今倉 暁 (共著)
ROBIO 2019 Best Paper Finalist
Bin-picking of Randomly Piled Shiny Industrial Objects Using Light Transport Matrix Estimation

・千葉 直也、今倉 暁 (共著)
ROBIO 2019 Best Paper Finalist
Fast ADMM L1 minimization by applying SMW formula and multi-row simultaneous estimation for Light Transport Matrix acquisition.

・飯塚 里志　VC 賞(最優秀研究発表賞) Visual Computing 2019

(4)招待講演

国際 5件

国内 21件

3期生研究者(29 名)

(1)外部発表件数

	国　内	国　際	計
論　文	10	70	80
口　頭	66	39	105
その他	15	18	33
合　計	91	127	218

(2)特許出願件数

国　内	国　際	計
3	0	3

(3)受賞等

＜2018 年度＞

・植吉　晃大　IEEE SSCS – Predoctoral Achievement Award

・植吉　晃大　第 9 回(2018 年度)日本学術振興会　育志賞
深層学習を加速する汎用計算アーキテクチャに関する研究

・梶原　智之　言語処理学会　2018 年度　最優秀論文賞
平易なコーパスを用いないテキスト平易化

・佐々木　勇和　優秀インタラクティブ賞・優秀論文賞
第 11 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム

・包　含　Best Poster Award (Japan-Israel Machine Learning Meeting)
Classification from Pairwise Similarity and Unlabeled Data

＜2019 年度＞

・穐山　空道　電子情報通信学会 コンピュータシステム研究専門委員会　研究会優秀若手発表賞
Approximate Memory のデータ分離に起因する性能低下を抑制するプリフェッチ手法

・石田　繁巳　情報処理学会　高度交通システムとスマートコミュニティ研究会優秀論文賞
離散ウェーブレット変換を用いた省リソース車両検出システムの設計と評価

・伊藤　伸志　東京大学大学院情報理工学系研究科　研究科長賞
Online Optimization with Limited Information

・植吉　晃大　電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会 – 優秀講演賞
無効ニューロン予測による DNN 計算効率化手法

・江原　遥　第 44 回教育システム情報学会　全国大会　大会奨励賞
テキストカバー率の確率的拡張に基づく語彙テストのみからの個人化読解判定

・江原　遥　NLP 若手の会 (YANS) 第 14 回シンポジウム　奨励賞
文脈を考慮した視覚的な語彙学習支援

・大城　泰平　日本オペレーションズ・リサーチ学会研究部会「最適化とその応用」:未来を担う若手研究者の集い 2019　優秀発表賞
Improved Structural Methods for Nonlinear Differential-Algebraic Equations via Combinatorial Relaxation

・大城　泰平　LA/EATCS-Japan 学生発表論文賞　パフィアンペアに対する一般化行列木定理

・梶原　智之　NLP 若手の会 第 14 回シンポジウム　スポンサー賞
文脈ベクトルと細分化した単語ベクトルを用いた語彙的換言

・梶原　智之　NLP 若手の会 第 14 回シンポジウム　スポンサー賞
文脈化された単語ベクトルからの単語領域表現

・梶原　智之　情報処理学会 第 241 回自然言語処理研究会 若手奨励賞
スタイル変換のための折り返し翻訳に基づく事前訓練

・梶原　智之　言語処理学会 第 26 回年次大会 若手奨励賞
事前学習された多言語の文符号化器を用いた機械翻訳の品質推定

・梶原 智之　　言語処理学会 第 26 回年次大会 若手奨励賞
文脈を考慮した単語ベクトル集合からの単語領域表現

・桂井 麻里衣　2019 年度 信号処理研究会賞
語の共起関係に基づく研究トレンドの可視化

・佐々木 勇和　FIT 論文賞 第 17 回情報科学技術フォーラム（FIT 2018）

・竹内 孝　　DICOMO 2019 最優秀論文賞
グラフを用いた NMF の地域分散高速化

・包 含　　第 22 回情報論的学習理論ワークショップ（IBIS 2019）
学生優秀プレゼンテーション賞
Calibrated Surrogate Maximization of Linear-fractional Utility in Binary Classification

・中村 優吾　マルチメディア，分散，協調とモバイル(DICOMO 2019)シンポジウム
最優秀プレゼンテーション賞
ウェアラブルセンサ装着位置/向きの違いにロバストな行動認識システムの実現に向けたデータ変換手法の検討

・中村 優吾　第 27 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 奨励賞
IMU を用いた剣道の素振り稽古における打突動作区間の検出手法

・中山 悠　　2019 年度 船井研究奨励賞

・鳴海 紘也　UbiComp Gaetano Outstanding Student Award Finalist
Animating Daily Objects and Environment

・鳴海 紘也　第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2019), No.88, pp.55-60, Sept. 2019 最優秀論文賞
Self-healing UI: 機械的かつ電気的に自己修復するセンシングインタフェース

・早志 英朗　PRMU 研究奨励賞
混合正規分布に基づくニューラルネットワークのスパースベイズ学習

・早志 英朗　SI 2019 優秀講演賞
Deep Learning を用いた Jellyfish Sign 自動識別システムの開発

・松木 萌　　マルチメディア，分散，協調とモバイル(DICOMO 2019)シンポジウム
最優秀プレゼンテーション賞・優秀論文賞
センサ行動認識における Zero-shot 学習法のためのベクトル 表現の性質の分析

（4）招待講演

国際 10件

国内 18件

別紙

ACT-I「情報と未来」領域　事後評価実施　研究課題名および研究者氏名

1 期生加速フェーズ研究者（12 名）

研究者氏名 （参加形態）	研　究　課　題　名 （研究実施場所）	所属・役職（2020 年 3 月末現在） （加速フェーズ開始時所属）	加速フェーズ 研究費(百万円)
荒瀬　由紀 （委託先機関に所属）	パラフレーズ現象の解明のための言語資源構築とパラフレーズアラインメント技術の確立 （大阪大学）	大阪大学 大学院情報科学研究科　准教授 （大阪大学）	20
飯塚　里志 （委託先機関に所属）	多層ニューラルネットワークモデルを用いた大規模学習による歴史的映像コンテンツの自動修復手法の開発 （筑波大学）	筑波大学 システム情報系情報工学域　助教 （早稲田大学）	21
井上　中順 （委託先機関に所属）	マルチメディアデータから新しい概念を発見する高階モデル学習 （東京工業大学）	東京工業大学　情報理工学院　助教 （東京工業大学）	20
今倉　暁 （委託先機関に所属）	非線形非負行列分解を用いたディープニューラルネットワーク計算手法の開発 （筑波大学）	筑波大学　システム情報系　准教授 （筑波大学）	20
久保　勇貴 （委託先機関に所属）	パーソナルインタラクションスペースの実現に向けた操作体系の構築 （日本電信電話株式会社）	日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所 社員 （日本電信電話株式会社）	20
黒木　菜保子 （学生）⇒（専任）	CO_2 フリー社会実現のための物理化学と情報科学の融合 （中央大学）	中央大学　理工学研究所 専任研究員 （お茶の水女子大学）	20
小林　亮太 （委託先機関に所属）	時系列データの自動解析技術の実現 （国立情報学研究所）	情報・システム研究機構 国立情報学研究所　助教 （国立情報学研究所）	9
曽我部　舞奈 （学生）⇒（専任）	生体ライブイメージングにおける最適なデータ取得のための技術革新 （京都大学）	京都大学 ウイルス・再生医科学研究所 特定研究員 （京都大学）	20
千葉　直也 （学生）	プロジェクタ・カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法 （東北大学）	東北大学 大学院情報科学研究科 大学院生（博士課程） （東北大学）	19
中島　一崇 （学生）	型による成形のためのコネクタ形状を考慮したボリューム分割 （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 大学院生（博士課程） （東京大学）	15
原　祐子 （委託先機関に所属）	大量ストリームデータのリアルタイム処理に向けた柔軟なアーキテクチャ探索と設計環境構築 （東京工業大学）	東京工業大学　工学院情報通信系 准教授 （東京工業大学）	22
松井　勇佑 （委託先機関に所属）	圧縮線形代数：データ圧縮による省メモリ高速大規模行列演算 （東京大学）	東京大学　生産技術研究所　助教 （国立情報学研究所）	20

3期生研究者（29 名）

研究者氏名 （参加形態）	研 究 課 題 名 （研究実施場所）	所属・役職（2020 年 3 月末現在） （応募時所属）	研究費 （百万円）
穐山 空道 （委託先機関に所属）	次世代メモリデバイスによるアプリケーションの自動高速化 （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 助教 （東京大学）	3
石田 繁巳 （委託先機関に所属）	無線通信を用いた車両・自転車・歩行者検出技術 （九州大学）	九州大学 大学院システム情報科学研究院 助教 （九州大学）	3
石畠 正和 （委託先機関に所属）	決定グラフを用いた組合せ最適化問題に対する統一的解法の研究 （日本電信電話株式会社）	日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所 研究主任 （日本電信電話株式会社）	3
板倉 健太 （学生）	機械学習や 3 次元点群処理技術が切り拓く植物計測の技術革新 （東京大学）	東京大学 大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻 大学院生（修士課程） （東京大学）	5
伊藤 伸志 （学生）	部分的フィードバックに基づくオンライン凸最適化 （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 大学院生（博士課程） （東京大学）	3
ヴァルガス ダニロ （委託先機関に所属）	頑強なハイブリッド深層学習モデルの自動探索システム （九州大学）	九州大学 大学院システム情報科学研究院 助教 （九州大学）	4
植吉 晃大 （学生）	省電力なメモリアクセスを実現する DNN モデル学習 （北海道大学）	北海道大学 大学院情報科学研究院 大学院生（博士課程） （北海道大学）	5
江原 遥 （委託先機関に所属）	意味空間上の広がりに基づく効率的な語彙学習支援システム （静岡理工科大学）	静岡理工科大学 情報学部コンピュータシステム学科 講師 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 協力研究員 （産業技術総合研究所）	5
大城 泰平 （学生）	重みつき組合せ最適化と多項式行列理論のインタラクション （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 大学院生（博士課程） （東京大学）	3
大屋 優 （学生）	デジタル回路設計における耐ハードウェアトロイ設計仕様の研究開発 （早稲田大学）	早稲田大学 大学院基幹理工学研究科 大学院生（博士課程） （早稲田大学）	3
梶原 智之 （委託先機関に所属）	語彙制限に基づくパーソナライズされたテキスト生成 （大阪大学）	大阪大学 データビリティフロンティア機構 特任助教 （大阪大学）	4
桂井 麻里衣 （委託先機関に所属）	学術データの自動集約による研究者プロファイリング （同志社大学）	同志社大学 理工学部 助教 （同志社大学）	5

佐々木　勇和 （委託先機関に所属）	大規模グラフのための二部決定図に関する研究 （大阪大学）	大阪大学　大学院情報科学研究科 助教 （大阪大学）	3
鈴木　雄太 （学生）	物質の結晶構造を高速に予測するデータ解析技術の開発 （総合研究大学院大学）	総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 物質構造科学専攻 大学院生（博士課程） （東京理科大学）	3
竹内　孝 （委託先機関に所属）	時空間超解像のための時空間畳み込み技術の研究 （京都大学）	京都大学　大学院情報学研究科 助教 （日本電信電話株式会社）	3
谷本　輝夫 （委託先機関に所属）	柔軟性と電力効率に優れた次世代専用プロセッサ設計手法の開発 （九州大学）	九州大学 情報基盤研究開発センター　助教 （九州大学）	3
包　含 （学生）	弱い教師データに基づく低分散なリスク推定方法の開発 （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 大学院生（博士課程） （東京大学）	3
照屋　唯紀 （委託先機関に所属）	大規模並列計算に適した高速な格子基底簡約アルゴリズムの開発 （産業技術総合研究所）	産業技術総合研究所 サイバーフィジカルセキュリティ 研究センター　研究員 （産業技術総合研究所）	5
中村　優吾 （学生）	人と環境に自己適応する柔軟性を備えたコンテキスト認識メカニズムの創出 （奈良先端科学技術大学院大学）	奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 大学院生（博士課程） （奈良先端科学技術大学院大学）	4
中山　悠 （委託先機関に所属）	適応的に再構成する通信ネットワーク （東京農工大学）	東京農工大学 工学研究院　先端情報科学部門 准教授 （青山学院大学）	3
名波　拓哉 （学生）⇒（委託先機関に所属）	昆虫の嗅覚神経系を模倣したシリコン神経ネットワーク （東京大学）	東京大学　生産技術研究所 特任研究員 （東京大学）	3
鳴海　紘也 （学生）	印刷できる生体模倣型ソフトロボットシステムの構築 （東京大学）	東京大学 大学院情報理工学系研究科 大学院生（博士課程） （東京大学）	3
早志　英朗 （委託先機関に所属）	生体信号の確率的生成モデルと推論ニューラルネット （九州大学）	九州大学 大学院システム情報科学研究院 助教 （九州大学）	3
船橋　賢 （学生）	分布型触覚センサと CNN の多指ハンドでのタスク実現 （早稲田大学）	早稲田大学 大学院創造理工学研究科 大学院生（博士課程） （早稲田大学）	5
古川　淳一朗 （委託先機関に所属）	人の動作技量を再現する外骨格ロボット制御 （株式会社国際電気通信基礎技術研究所）	株式会社国際電気通信基礎技術研究所　脳情報研究所ブレインロボットインタフェース研究室 専任研究員 （株式会社国際電気通信基礎技術研究所）	5

松木　萌 （学生）	行動認識における Zero-shot 学習法の提案 （九州工業大学）	九州工業大学 大学院工学府　工学専攻 大学院生（博士課程） （九州工業大学）	5
宮武　勇登 （委託先機関に所属）	連続型数理モデル構築のための確率的アルゴリズムの整備 （大阪大学）	大阪大学 サイバーメディアセンター 准教授 （大阪大学）	3
宮西　大樹 （委託先機関に所属）	仮想世界のデータを用いたドメイン適応による実世界質問応答の高度化 （株式会社国際電気通信基礎技術研究所）	株式会社国際電気通信基礎技術研究所　脳情報通信総合研究所 専任研究員 （株式会社国際電気通信基礎技術研究所）	3
横田　達也 （委託先機関に所属）	高階埋め込みテンソルモデリングの研究 （名古屋工業大学）	名古屋工業大学 大学院工学研究科　助教 （名古屋工業大学）	5

以上

研　究　報　告　書

「パラフレーズ現象の解明のための言語資源構築とパラフレーズアラインメント技術の確立」

研究期間： 2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号： 50201
研 究 者： 荒瀬 由紀

1. 研究のねらい

本研究では、文法的なフレーズを単位とするパラフレーズを対象とし、パラフレーズ研究において必須となる言語資源の構築と、それを応用した高精度なテキストのベクトル化技術およびフレーズアラインメント技術の開発に取り組む。

言語は表現の自由度が高く、同じ事象であっても多様な語彙・構文構造をもって記述できる。このような多様性は人工知能による言語理解における高い障壁である。言語理解が求められるアプリケーションとして、自動質問応答や Google Home のようなパーソナルアシスタントがある。これらアプリケーションでは、ユーザの問いかけを理解し処理するため、知識ベースを用いることが多い。本質的には知識ベースにある知識を使って回答可能であっても、言語的な表現の違いにより知識ベースとのマッチングが上手くいかず、誤った回答を行う、回答そのものが不可能となるといった問題が起こる。このような同一の事象を異なる言語表現で表す現象をパラフレーズと呼ぶ。パラフレーズの理解および知的な処理は、言語理解を要するアプリケーションにおける基盤であり、最重要課題の一つである。

これまでパラフレーズ認識は盛んに研究されてきたが、パラフレーズか否かという二値の分類性能向上が主要課題であった。これは、パラフレーズ認識に失敗するものにおいてどのような言語現象が要因となっているのか分析を可能とするデータセットが存在しなかったことが要因である。またテキストのベクトル表現は言語理解の基盤となる技術であるが、実アプリケーションに応用可能なレベルの言語理解を実現するには、さらなる技術革新が望まれている。

そこで本研究では (1) パラフレーズ文ペアにおけるフレーズアラインメントのアノテーションにより、パラフレーズ抽出研究に必須となる言語資源を構築し、それを活用して (2) 高精度なテキストベクトル化技術の開発、および (3) 柔軟なフレーズアラインメント技術の開発、に取り組む。

2. 研究成果

（1）概要

文法的なフレーズを単位とするパラフレーズを対象とし、パラフレーズ研究において必須となる言語資源の構築と、それを応用した高精度なテキストベクトル化技術、フレーズアラインメント技術の開発に取り組む。これらは人間の話す言語を人工知能が理解する上での基盤となるものであり、自動質問応答やパーソナルアシスタントなど、幅広い応用を持つ。本研究では (1) パラフレーズ文ペアにおけるフレーズアラインメントのアノテーションにより、パラフレーズ

認識研究に必須となる言語資源を構築し、それを活用して (2) 高精度なテキストベクトル化技術および (3) 柔軟なフレーズアラインメント技術を開発する。

まず (1) では、英語母語話者である言語学者に依頼し、パラフレーズ文対に構文構造のアノテーションを実施する。これにより、文法なフレーズの抽出が可能となる。そして得られたフレーズ対について、英語母語話者およびバイリンガル話者 3 名によりフレーズアラインメントのアノテーションを行う。合計 1,916 文対についてアノテーションを完了しており、フレーズアラインメントのアノテーションデータとしては世界最大のデータを構築した。

(2) では、深層学習を用いた高精度なテキストベクトル化技術を開発した。パラフレーズ認識を含め様々な文対モデリングタスクに応用し、性能を体系的に評価したところ、既存手法を大きく上回る性能を達成している。本成果は自然言語処理分野の最重要国際会議の一つである Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2019) にて採択されている（主要研究成果 5ー(1)-2）。

(3) では、シンプルかつ柔軟なフレーズアラインメント技術を開発した。これまで我々が開発してきたフレーズアラインメント技術は高精度なアラインメントを行える一方、Head-driven phrase structure grammar (HPSG) による構文解析を必要としており、適用範囲が限定的であった。そこでテキストのベクトル化手法を用い、HPSG 構文木に縛られない柔軟なフレーズアラインメント技術を開発した。

（2）詳細

研究テーマ (1) パラフレーズ文ペアにおけるフレーズアラインメントのアノテーション

パラフレーズ 1,916 ペアについて、まず文法的なフレーズ抽出を可能とするため、英語を母語とする言語学者により構文構造のアノテーションを行った。その後、構文情報を用いて得られるフレーズ 15.2 万件について、英語母語話者およびバイリンガル話者 3 名により 2 つのフレーズ対が同一の意味を表現するかどうかラベル付けを行った。その結果、約 25.2 万件のアラインメントを獲得し、内ユニークなアラインメントは約 10.5 万件であった。アノテータ 3 名の内、2 名を正解、1 名を評価対象とした場合の、アラインメントの再現率は 93.3%、適合率は 90.2%、F 値は 91.7% であった。意味の同一性判定は本質的に曖昧性が存在するが、今回得られたアノテーション結果は充分高い一致率をもつといえる。構築したアノテーションデータの統計量を表 1 に示す。本データセットは文法的フレーズアラインメントをラベル付けしたものとして世界最大であり、付随する構文構造を用いてパラフレーズ認識手法の詳細なエラー分析が可能である。構築したデータセットは Linguistic Data Consortium より公開予定である。

表 1 フレーズアラインメントデータセットの統計量

パラフレーズ文対数	1,916
語彙サイズ	9,540
フレーズ総数 (単語を除く)	152,480 (75,283)
アラインメント数 (ユニークなアラインメント数)	251,972 (105,154)
2 名以上のアノテータで一致したアラインメント数	80,572

研究テーマ (2) 高精度なテキストベクトル化技術の開発

テキストのベクトル表現は言語理解の基盤となる技術であり、現在活発に研究が行われている分野である。既存研究では深層学習によりあらゆるタスクに適用可能な汎用的なベクトルの生成を目指しており、性能を高めるためにモデルの大規模化を行ってきた。しかし数十億のパラメータを持つような大規模なモデルは、時間的･空間的計算量の要件からアプリケーションへの応用が難しいというジレンマを抱えている。

本研究では言語理解の基盤となる、パラフレーズ認識や含意関係認識等の文対モデリングにフォーカスし、それらに特化したテキストのベクトル化を小規模なモデルで実現する手法を開発した。文対モデリングにおいて構文的な情報やフレーズの意味的関係は重要な役割を果たすと考えられる。しかし既存のテキストベクトル化手法では文における構文構造やフレーズ間の意味的関係は一切考慮されていなかった。そこで、汎用的な文ベクトル生成を行うBERT (Devlin et al. 2019) にフレーズアラインメントの訓練を加える。具体的には図 1 に示す通り、提案手法では BERT が生成する単語ベクトルをプーリングしたものをフレーズベクトルとして、フレーズアラインメントが可能かどうか分類する学習を行う。これにより、フレーズに関わる構文的知識を BERT に付加し、かつ意味的類似性をベクトルに反映することを可能とする。推論時はBERTレイヤのみを用いてテキストのベクトル化を行う。つまり、提案手法ではBERTのパラメータを増やすことなくテキストのベクトル化性能を向上する。

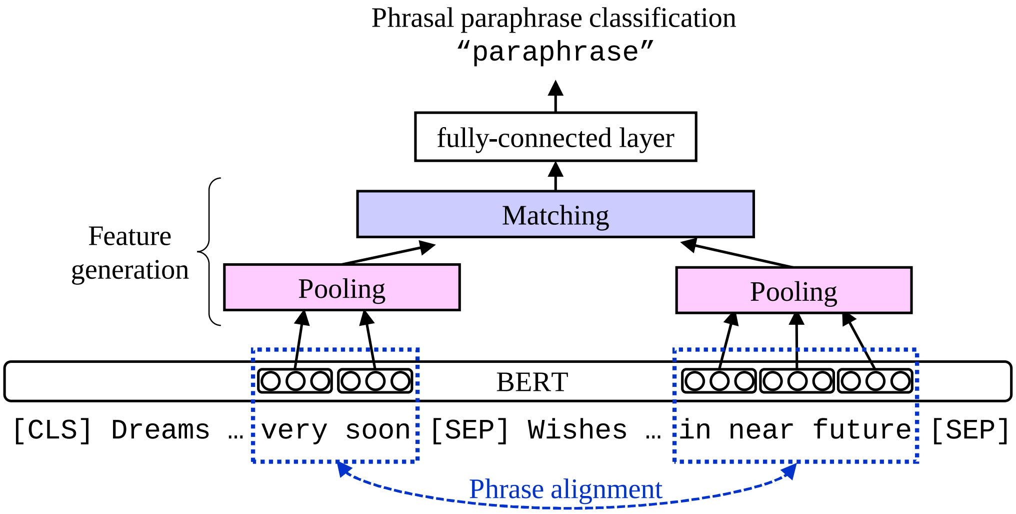


図 1 フレーズアラインメントを応用したテキストベクトル化

表 2 にパラフレーズ認識、意味的類似度推定、含意関係認識タスクにおける提案手法および BERT の性能を示す。各手法はタスク固有のラベル付き訓練データによって Fine-tuning を行い、テストセットで性能を評価する。BERT は標準モデルである base モデル、その 3.1 倍のパラメータを持つ large モデルを用い、それぞれを訓練した提案手法 (Ours-base および Ours-large) と比較する。表 2 が示す通り、提案手法ではそれぞれ対応する BERT を上回る性能を達成している。さらに意味的類似度推定タスクの STS-B、含意関係認識タスクの RTE、パラフレーズ認識タスクの MRPC では、Ours-base が 3.1 倍のパラメータを持つ BERT-large と同等もしくはより高い性能を示している。以上

より提案手法がモデルサイズを維持しながらも、様々な文対モデリングタスクの性能を向上するベクトル化を行うことが示された。

表 2 文対モデリングタスクにおける性能 (最高性能を太字で、対応する BERT より高い性能のものをアンダーラインで示す)

	パラフレーズ認識		類似度推定	含意関係認識			
Model	MRPC	QQP	STS-B	MNLI-m	MNLI-mm	QNLI	RTE
BERT-base	88.3	71.2	84.7	84.3	83.0	89.1	59.8
Ours-base	<u>88.6</u>	<u>71.5</u>	**87.7**	<u>84.7</u>	<u>83.6</u>	<u>91.1</u>	<u>67.0</u>
BERT-large	88.6	72.1	86.0	86.2	85.5	**92.7**	65.5
Ours-large	**89.9**	**72.5**	<u>87.1</u>	**86.5**	**85.6**	92.2	**68.2**

また 図 2 に、STS-B タスクの訓練データサイズを変動させた際の開発セットにおける性能を示す。グラフより、提案手法は訓練データが少ない際に特に大きな性能向上を示すことが分かる。他のタスクにおいても同様の傾向が確認され、提案手法は構築コストが高いタスク固有の訓練（ラベル付き）データを削減できることが明らかとなった。

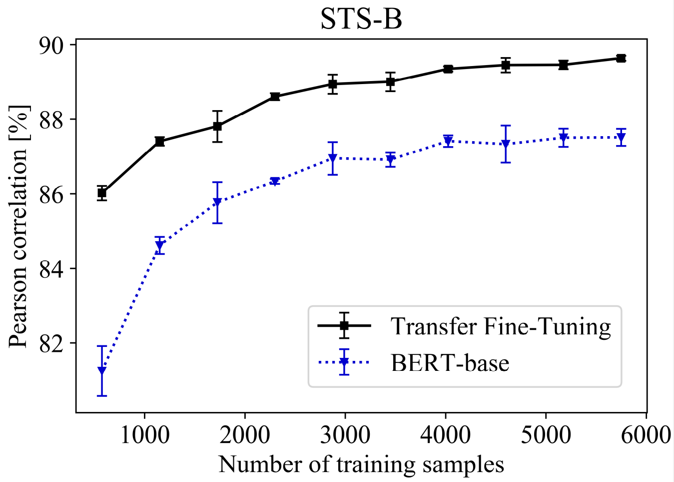


図 2 訓練データサイズの影響 (黒線が提案手法)

研究テーマ (3) 柔軟なフレーズアラインメント技術の開発

我々がこれまで開発してきたフレーズアラインメント手法 (Arase and Tsujii 2017) は、高精度なアラインメントが可能な一方、HPSG 構文解析器に強く依存していた。構文解析器の精度はドメインの影響を受けやすく、専門性の高い文や口語体の文の解析精度は大きく低下することが知られている。そこで本研究では構文木の構造（文法）に縛られず、あらゆるフレーズのアラインメントを可能とする手法を開発した。テキストベクトル化モデルによりフレーズをベクトル化し、ラティスを枝刈りしながらフレーズアラインメントを行うことでフレーズの構造に対し柔軟なアライメントを高速に行う（主要研究成果 5―(1)-1, 5―(3)-1）。

参考文献

Y. Arase and J. Tsujii. 2017. Monolingual Phrase Alignment on Parse Forests, in Proc. of EMNLP, pp. 5396–5407.

Jacob Devlin et al. 2019. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. in Proc. of NAACL-HLT, pp. 4171–4186.

3.　今後の展開

パラフレーズ認識は人工知能による言語理解における基盤技術である。今後は開発したテキストベクトル化技術、フレーズアラインメント技術を対話システムに応用する予定である。同一の意味を表現する入力を知的に考慮することで、ユーザとシステムの対話が破綻しないよう対話システムの頑健性を高める。

またパラフレーズ研究の重要テーマとして、パラフレーズの自動生成がある。パラフレーズ生成は、意味を保持しつつテキストの難易度を柔軟に変更するテキスト平易化、文体を変更するスタイル変換など、特に言語教育に貢献する技術である。既存のパラフレーズ生成技術には、意味の同一性を保持できず過剰な言い換えを行う、あるいは意味の同一性を保持しようとするあまりほとんど言い換えを行わないなど、課題が多く残されている。今後、これまで取り組んできたフレーズアラインメント技術を応用して品質の高いパラフレーズ生成技術の開発に取り組む予定である。

4.　自己評価

研究目的の達成状況

本研究では文法的なフレーズを単位とするパラフレーズを対象とし、パラフレーズ研究において必須となる言語資源の構築と、それを応用した高精度なテキストのベクトル化技術およびフレーズアラインメント技術の開発に取り組んだ。成果として世界最大となるフレーズアラインメントデータセットを構築し、またそれを活用したテキストのベクトル化技術、柔軟なフレーズアラインメント技術の開発を行った。技術面では既存のstate-of-the-artを上回る性能を達成し、その成果は EMNLP 等重要国際会議に採択されている。またフレーズアラインメントの改善手法についても論文投稿を準備中である。以上より、研究目的は充分達成され、また当初予定を超えて研究を進めることができたと考えている。

研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

研究費を活用してフレーズアラインメントアノテーションを行い、学術的にも貴重なデータセットを構築できた。データセットについては学術利用のため、近日中に公開予定である。

研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

パラフレーズ認識は言語理解における基盤技術であり、自動質問応答や対話システム等、人工知能と人間の言葉によるインタラクションを実現する上で必須となる技術である。それらに貢献する本研究は学術的にも社会的にも重要な成果である。今後、本研究で開発した技術を実際に対話システムや自動質問応答システムに適用し、これらアプリケーションの性能向上に貢献したい。

研究課題の独創性・挑戦性

文法的なフレーズを単位とするパラフレーズに関する研究はほとんど前例がなく、また本研究は言語資源構築から新たな技術の開発まで体系的に行う挑戦性の高いプロジェクトであった。アドバイザや他のACT-I生からの助言、活発な議論がなければ本プロジェクトを完遂することはできなかった。心より感謝申し上げたい。

5．　主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

1. M. Yoshinaka, T. Kajiwara, and Y. Arase. SAPPHIRE: Simple Aligner for Phrasal Paraphrase with Hierarchical Representation. in Proc. of International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2020), (May 2020 to appear).
2. Y. Arase and J. Tsujii: Transfer Fine-Tuning: A BERT Case Study, in Proc. of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP2019), pp. 5396–5407 (Nov. 2019).
3. Y. Arase and J. Tsujii: SPADE: Evaluation Dataset for Monolingual Phrase Alignment, in Proc. of Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2018), (May 2018).

（2）特許出願

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

1. 吉仲真人, 梶原智之, 荒瀬由紀: 単語分散表現に基づく単一言語内フレーズアライメント手法. 言語処理学会第 26 回年次大会, pp.581-584, (2020 年 3 月).
2. 荒瀬由紀. 人と AI を言葉でつなぐ～自然言語処理による言語理解～,「AI と人がつくる未来社会」シンポジウム（日本学術会議第三部, 近畿地区会議, 国立大学法人大阪大学) (2019 年 8 月). (招待講演)
3. SPADE. LDC Catalogue No.: LDC2018T09 (https://catalog.ldc.upenn.edu/LDC2018T09).

公開

（事後評価・研究者用）

研 究 報 告 書

「深層学習による高品質デジタル リマスター技術の創出」

研究期間： 2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号： 50202
研 究 者： 飯塚 里志

1． 研究のねらい

本研究では，戦前の記録映像や白黒映画など古い動画像コンテンツを対象とし，経年劣化の修復や色彩の復元，さらには極端な低画質画像の高画質化や色調補正まで含めた，包括的なデジタルリマスター技術の創出に取り組む．多くの歴史的な映像は色情報のないグレイスケールデータであり，フィルムの経年劣化によって画質も極端に劣化している．このような映像データのデジタルリマスターには，フィルムノイズやブロックノイズの除去や明度およびコントラストの補正，超解像，色彩復元など複雑な画像処理が必要であり，現在は専門技術をもつ熟練者が膨大な時間をかけて行っている．本研究では，この複雑なリマスター処理を計算機上で再現できる新たなニューラルネットワークモデルを構築し，そのモデルを効果的に学習できるフレームワークの確立を目指す．このためには，経年劣化をシミュレーションして教師データを構築するフレームワークの構築，および複雑な修復・補正処理および色彩復元を同時に行うことのできる大規模ネットワークモデルを構築する必要がある．この技術が確立できれば，実世界の様々な映像コンテンツを誰でも容易に高品質化できるようになり，これまで「過去の出来事」として認識されていた古い劣化映像をより身近なものとして蘇らせ，人々の新たな歴史認識や価値観の創造につながることが期待できる．さらに本技術は，教師データを用意することが難しく複雑な変換を必要とする動画像合成・編集技術に応用することが可能であり，画像中の物体を別の画像に自然に合成する技術や，手書きイラストからの自然画像を自動生成する技術など，新たなコンテンツ制作の支援技術の創出につながることが期待できる．特に本研究は実世界の画像データを扱うことを目標としているため，より実用的なアプリケーションに向けた基盤技術として実社会のコンテンツ産業に貢献できると考えている．

2． 研究成果

（1）概要
古い映像の包括的な高品質デジタルリマスターを実現するため，動画の劣化修復を行えるニューラルネットワークモデルの構築，参照画像を利用した高精度の動画着色ネットワークモデルの構築，および劣化シミュレーションによる教師データセットの構築を実現した．また，それらのネットワークをまとめて単一のリマスターネットワークとして end-to-end で学習できるフレームワークを確立した．提案手法では，時空間畳み込み演算および temporal source-reference attention 機構から成るリマスターネットワークを構築することで，入力動画の様々な劣化を自動検出・修復し，さらに参照画像を用いてユーザの意図するカラー化を可能にしている．時空間畳み込み演算を用いることで，複数のフレーム間情報を計算できるため，高精度の修復およびフレーム間で一貫性を保持した着色が可能となる（図 1）．さらに，本

研究で新たに提案する temporal source-reference attention は，時系列特徴マップの行列計算によって入力動画と参照画像の類似度を計算し，任意の枚数の参照画像の色彩情報を大域的かつ同時に入力動画に反映させることができる．これにより，これまでの主流である再帰計算によるアプローチの様々な制約を解消し，少数の参照画像で長時間の動画を効果的に着色することができる．様々な検証実験を通じて，提案手法はこれまでのアプローチに対して顕著な精度向上を実現することを確認した．

この研究成果はコンピュータグラフィクス分野の最難関国際会議の一つである SIGGRAPH ASIA 2019 などに採択された[1,2,3]．また社会応用としても，実際に本技術を用いて 1959 年の伊勢湾台風の白黒映像のカラーリマスターを行った．このカラー化された映像は複数のテレビ番組で放送され[6,7]，多くの視聴者に過去の映像をより鮮明に伝える役割を果たし，大きな反響を呼んだ．この映像を特集した番組「伊勢湾台風 60 年　色と記憶」は第 61 回科学技術映像祭において文部科学大臣賞を受賞した．さらに，本技術は最先端の AI 技術として 2019 年 11 月より日本科学未来館の常設展示に採用されている．

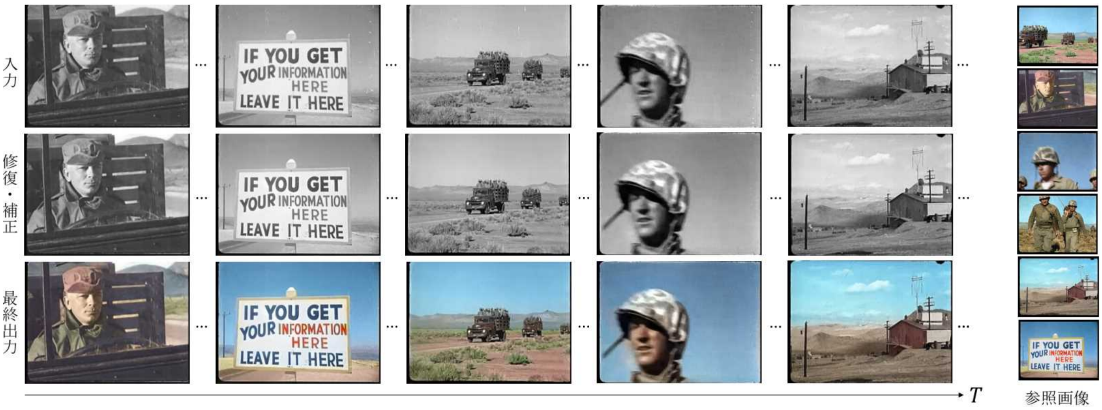


図 1：提案手法によるリマスター結果．6 枚の参照画像のみを用いて 700 フレームのリマスターを行っている．右に示されている画像が使用された参照画像である．左の 1 段目が入力動画であり，2 段目が劣化修復や画質補正の結果，3 段目がカラー化された結果である．提案手法は自動で劣化の修復から超解像，コントラスト補正などを行い，さらにユーザが用意した参照画像に合わせて色彩を復元することができる．

（2）詳細

研究課題 A「時系列情報を考慮した動画の複合的劣化修復手法の確立」

古い映像の多様かつ複合的な劣化を自動修復するため，時系列情報を考慮して修復処理を行うことのできる畳み込みニューラルネットワークモデルを考案した（図 2 左）．この修復･補正ネットワークは，グレイスケールの入力フレームの様々なノイズや汚れを取り除き，さらにコントラスト補正や超解像まで行う．このモデルはすべての層が時空間畳み込み層で構成されるエンコーダ･デコーダ型のネットワークであり，入力と出力の間にスキップ接続をもつ．修復処理においては入力と出力でほとんど変化しない領域もあるため，入力と出力の間にスキップ接続を持たせることで，ネットワークは入力画像の変化箇所のみを学習するようになり，効果的な学習が可能となる．また，ノイズはフレーム間で変化することが多いため，時空間畳み

込みによって複数のフレーム情報を計算に取り入れることで，どこがノイズかを判断しやすくなり，精度を向上させることができる．このネットワークは既存手法と比較実験を行い，最も高精度であることを確認した．以上より，研究目的の一つである，古い映像の多様な劣化を自動かつ高精度で取り除くことのできるネットワークモデルの構築を達成した．

研究課題 B「ユーザが制御可能な動画の高精度カラー化手法の確立」

グレイスケール動画の高精度カラー化のため，本研究では参照カラー画像を利用した source-reference ネットワークを考案した．このネットワークは，修復･補正ネットワークの出力および任意の枚数の参照カラー画像を入力とし，参照画像の色彩を反映したカラー化を行う（図 2）．これにより，ユーザは少数の参照画像によって大まかな色彩を指定するだけで，動画全体のカラー化を行うことが可能となる．このネットワークでは，空間畳み込み演算や時空間畳み込み演算，2 種類の attention 機構を組み込むことで，時系列方向まで含めた大域的な情報を考慮して色度マップを計算できる．特に，本研究で考案した temporal source-reference attention は，ネットワーク内部の特徴マップ上で入力フレームと類似した箇所を全参照画像から計算することで，そのカラー情報を高精度で出力に反映することができる．従来の動画着色手法は再帰計算によってフレームを順次着色していくアプローチを取っているが，これは一度着色に失敗するとその後のフレームの着色結果が急速に悪化する上，シーンが切り替わるとうまくいかない．これに対し，提案手法は任意の枚数の参照画像全体から必要な情報を抽出し，入力動画全体に効果的に反映させることができる．これにより，長時間の動画着色を少数の参照画像で効率的に行うことができる．様々な種類の動画を用いて検証実験を行い，提案手法は既存手法を大きく上回る精度を達成することを確認した．

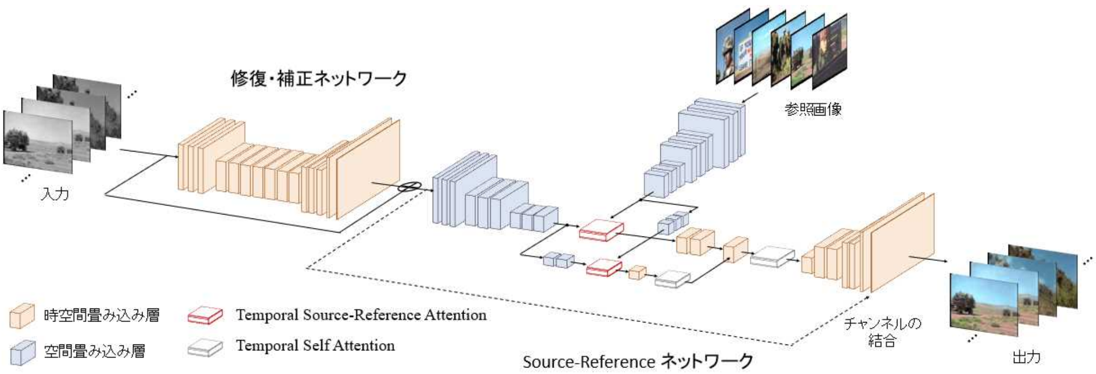


図 2：提案モデル全体の概要図．提案モデルは修復･補正ネットワークと source-reference ネットワークから構成される．グレイスケール動画のフレーム群が入力されると，まず時空間畳み込み層で構成された修復･補正ネットワークによってフレームの修復処理が行われる．その後，修復されたフレームおよび任意の枚数の参照画像が source-reference ネットワークに入力され，色度マップが出力される．最後に，修復･補正ネットワークによって修復されたフレームを輝度チャンネルとして色度マップと結合することで，リマスターされたカラー動画が出力される．

研究課題 C「学習データセットの構築」

上記のネットワークモデルを学習させるため，本研究では高品質の動画を劣化シミュレーションによって昔の映像のように劣化させることで，劣化動画とその高品質版のペアを生成するアルゴリズムを構築した．まず，公開されている大規模動画データセットから，本タスクに適した動画約 1500 本（1000 万フレーム）を手動で収集した．ここで，本タスクに適した動画とは，動きのあるシーンや高画質で自然な色のシーンを撮影した動画であり，逆に適していない動画は白黒動画やテレビゲーム動画など不自然な色彩の動画，および固定カメラでほとんど動きのない動画などである．

この動画に対し，example ベースとアルゴリズムベースを組み合わせた劣化シミュレーションおよびデータ拡張により，多様な教師データを生成した．Example ベースでは，フラクタルノイズや砂状ノイズ，スクラッチ，ダストノイズなど，実際の映像に現れる様々なノイズデータをあらかじめ用意し，これにスケーリングや回転などのデータ拡張を施しながらランダムに組み合わせ，多種多様な劣化を生成する．アルゴリズムベースでは，圧縮ノイズやガウシアンノイズ，低解像度化，コントラストや明度の低下などによって画質を劣化させる．これらを組み合わせて多様な劣化を自動生成し，様々な動画で効果的な劣化修復を学習できるようにした．敵対的学習を用いた教師なし学習なども検討したが，実際，提案手法のように人工的に教師ありデータを生成した方が顕著に精度が向上するため，今回のタスクではこのようなアプローチを採用した．

【研究目的の達成状況】

時空間畳み込み演算や新たな attention 機構を組み込んだニューラルネットワークモデルの構築や，劣化シミュレーションによる教師データの生成により，本研究の目標であった，包括的なデジタルリマスター技術の創出を実現した．この研究成果は CG 分野の最難関国際会議にも採択されたことから，学術的に重要な意義があったと考えられる．さらに，もう一つの目標であった社会応用についても，テレビ局と連携し本研究成果を用いて実際の白黒映像をカラーリマスターし，テレビ放送を通じて視聴者から大きな反響を得ることができた．このことから，実用的かつ社会的にもインパクトのある技術を開発できたと思われる．以上のことから，まだ技術的に改善の余地はあるものの，学術的･実用的両面でインパクトのある技術を開発でき，当初の研究目標を達成できたと考えている．

3.　今後の展開

本研究は、これまでは「過去の出来事」として認識されていた白黒映像を身近なものとして蘇らせ、人々の新たな歴史認識や価値観の創造につなげることが一つの目標である。実際に，本研究の成果によって過去の記録映像のカラーリマスターに成功し，視聴者から「昔の出来事が非常に身近に感じられた」，「衝撃を受けた」など大きな反響があった．今後は，参照画像として使用できる適切な画像をウェブやデータベースから自動抽出できるようなアルゴリズムを確立し，ユーザの負担なしに高品質デジタルリマスターを行えるようにしたい．これが実現できれば，より誰でも簡単に過去の映像を高品質化できるようになり，大量の映像のアーカイブをもつ出版業界やテレビ業界に新たなコンテンツ活用の可能性を示せると考えている．さらに学術的にも，参照ベースの様々な動画像処理タスクに対して，幅広い応用が期待できる．

4.　自己評価

・研究目的の達成状況

上記の通り，目標としていた過去の映像の多様な劣化修復・補正から色彩の復元まで含めた，包括的なデジタルリマスター技術の創出を実現できたため，研究目標は達成できたと考えている．今後はさらに手法を改良し，動きの激しいシーンでも良好にカラー化できるようにしたり，参照カラー画像をデータベースなどから自動で取得できるようにしたりするなど，より実用的な手法の確立を目指したい．

・研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

基本的には計画通りに進めることができたと思われる．研究費もそのほとんどをGPUサーバの購入に充てることで，複雑で大規模な提案ネットワークモデルを効率的に学習することができ，その結果研究期間内に一定の目標を達成できたと考えている．

・研究成果技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

研究成果は最難関国際会議の一つであるSIGGPRAH Asiaに採択されたことから，学術的にインパクトがあったと思われる．さらに，実際に研究成果を用いて過去の悲惨な災害の記録映像をカラーリマスターし，テレビ番組を通じて現代に伝えることで，多くの人々の関心を得ることができた．この映像は第 61 回科学技術映像祭において文部科学大臣賞を受賞したことも含め，産業的・社会的にも大きなインパクトがあったと考えている．さらに，この研究成果は日本科学未来館の常設展示として採用されているため，今後さらに一般に波及していくことが期待される．

・研究課題の独創性・挑戦性

極端に劣化したグレイスケールの動画データを対象とし、その劣化箇所の修復から色彩情報の復元まで行う手法はこれまでに存在しない。動画像のノイズ除去や画質改善の技術はこれまでにも提案されているが、これらは単純なガウシアンノイズやぼけの除去を対象としていることがほとんどであり，多様なパターンで劣化した実際の古い動画ではうまくいかない。また動画の着色では、従来の再帰型アプローチでは長期の着色が困難な上，劣化した映像では着色精度が極端に低下してしまう．これに対し本研究では，修復から色彩復元まで単一のフレームワークで行える深層学習ベースの手法を確立することで，これまで困難であった高精度のデジタルリマスターを実現することが，独創的かつ挑戦的な点である。

5．主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

1. Satoshi Iizuka and Edgar Simo-Serra. "DeepRemaster: Temporal Source-Reference Attention Networks for Comprehensive Video Enhancement", ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH Asia 2019), 38, 9, 1-13, 2019.
2. Kazuma Sasaki, Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, and Hiroshi Ishikawa. "Learning to Restore Deteriorated Line Drawing", The Visual Computer (Proc. of Computer Graphics International 2018), 34, 6-8, 1077-1085, 2018.

（2）特許出願

研究期間累積件数：0 件

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

3. 飯塚里志, シモセラエドガー. "DeepRemaster: Temporal Source-Reference Attention を用いた動画のデジタルリマスター", Visual Computing 2019, 2019-6.（査読付き国内会議, VC 賞（最優秀研究発表賞）を受賞）
4. 飯塚里志, "ディープラーニングによる対話的な画像処理", パターン認識・メディア理解研究会（PRMU）, 2018/10/19.（招待講演）
5. 飯塚里志, "深層学習と画像編集", 可視化情報シンポジウム 2018, 2018/9/15.（招待講演）
6. 「伊勢湾台風 60 年, 色が呼びさます記憶」, CBC テレビ, 2019/9/26.（テレビ報道, そのほか TBS テレビ「NEWS23」「チャント！」「ゴゴスマ！」などで放送）
7. 「伊勢湾台風の被災映像、AI で初のカラー化」, 中日新聞第一面, 2019/9/26.

公開

（事後評価・研究者用）

研　究　報　告　書

「マルチメディアデータから新しい概念を発見する高階モデル学習」

研究期間：　2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号：　５０２０３
研　究　者：　井上　中順

1.　研究のねらい

本研究の狙いは，マルチメディアデータから新しい概念を発見・創出する手法の確立である．コンピュータによる画像の認識・理解に関する従来の研究では，学習データ作成のために，大規模なデータに人手でアノテーション（タグ付け）を行うことが前提とされていた．しかし，近い将来，さらなるデータの大規模多様化が進むと，このようなアノテーションのコストが膨大化する．そのため，新しい認識対象となる物体や人物動作について，これまでよりも少量のアノテーションで，より高精度な学習を実現する手法が切望されている．

本加速フェーズ研究の基となった，1年4ヶ月の ACT-I 研究期間では，「学習用サンプルが与えられていない物体・動作・シーンを発見すること」を目標として掲げ，Zero-Shot Learning の研究を実施してきた．ここで，Zero-Shot Learning とは，学習とテストの段階で検出対象が異なることを想定したモデル学習の枠組みである．例えば，飛行機のモデルを，車・鳥など他の物体の画像と，物体間の関係を表す外部データから学習する．ここで，飛行機の画像は学習に用いず，辞書などの外部データを利用する点が，従来の教師あり学習とは異なる部分となる．

加速フェーズ研究期間では，この方式と従来の教師あり学習を統一し，数枚の画像から高精度にモデル学習を行う Few-Shot 学習の実現を目指す．さらに，Few-Shot 学習向けの評価用のデータセット（画像 URL 集）を作成し，これまでよりも多角的な評価方針を提案，それに関して国際ワークショップの開催を目標とする．

2.　研究成果

（1）概要
加速フェーズ期間における主な成果と実績は，以下の 2 点である． (A) 大規模データに対する Few-shot 適応学習手法の提案 (B) Few-Shot Verb Image データセットの作成 前者については，マルチメディア情報処理分野のトップカンファレンスである ACM Multimedia に論文(フルペーパー)が採択されている．これは Zero-Shot 学習と Many-shot 学習 (大量のデータを用いた教師あり学習)を統一的に定式化することで，少量の学習データに適応するモデルの構築を実現したものである．評価は大規模な画像・映像データで実施している． 後者のデータセットは，人物動作を表す画像の URL 集であり，Few-Shot 学習のベンチマーキングに適している．この研究に関しては，コンピュータービジョン分野のトップカンファレンスである IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)のワークショップを主催する形で発表を行った．本分野におけるワークショップは大規模なものであり，採択率が低く，国際的には顕著な実績として評価されるものである．

（2）詳細

(A) 大規模データに対する Few-shot 適応学習手法の提案

本研究項目では，少数の画像データから物体，動作，シーンといった意味的コンセプトに関するモデルの学習を行う Few-Shot Adaptation 法を提案した．これは従来の教師あり学習(Supervised Learning)および Zero-Shot 学習を統一的に扱う枠組みである．

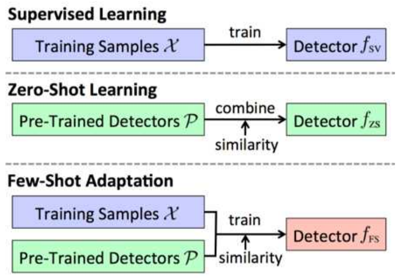


図 1. 従来法と提案法の入出力

図 1 は従来手法と本手法の仕組みを比較したものである．まず，従来の教師あり学習では学習データ X を入力とする．ここには，人手でタグ付けが行われた画像が含まれている．次に，Zero-Shot 学習では，事前学習済み識別器の集合 P を入力とし，複数の検出器を組み合わせることで，新たな対象に関する識別器を構成する．提案手法は，これら 2 つの方式を統一したものである．具体的には，教師あり学習と Zero-Shot 学習の最適化問題を，目的関数の重み付け和を取ることで統合し，サンプル数が少ない場合は Zero-Shot 学習に近い結果を，サンプル数が多くなるにつれて教師あり学習に近い結果を出力するように設計されているものである．

評価実験では，大規模映像データセットとして知られる，TRECVID Semantic Indexing データセットを用いて提案手法の効果を示した．主な実験結果は図 2 の通りである．ここでグラフの横軸は学習サンプル数，縦軸は Mean Average Precision (%)である．提案手法は Few-Shot Adaptation （赤)のもので，線形モデルに基づいたもの(Linear)とカーネル化を行ったもの(Kernelized)の 2 通りを，3 種類の従来手法と比較している．Zero-Shot 学習用の事前学習モデルは ImageNET および Places データセットのものを導入している．本実験より，従来手法よりも提案手法の方がどの場合においても高い精度を示していることが分かった．これは，サンプル数が増加するに連れて，Zero-Shot 学習から教師あり学習への滑らかな遷移が行われたためである．

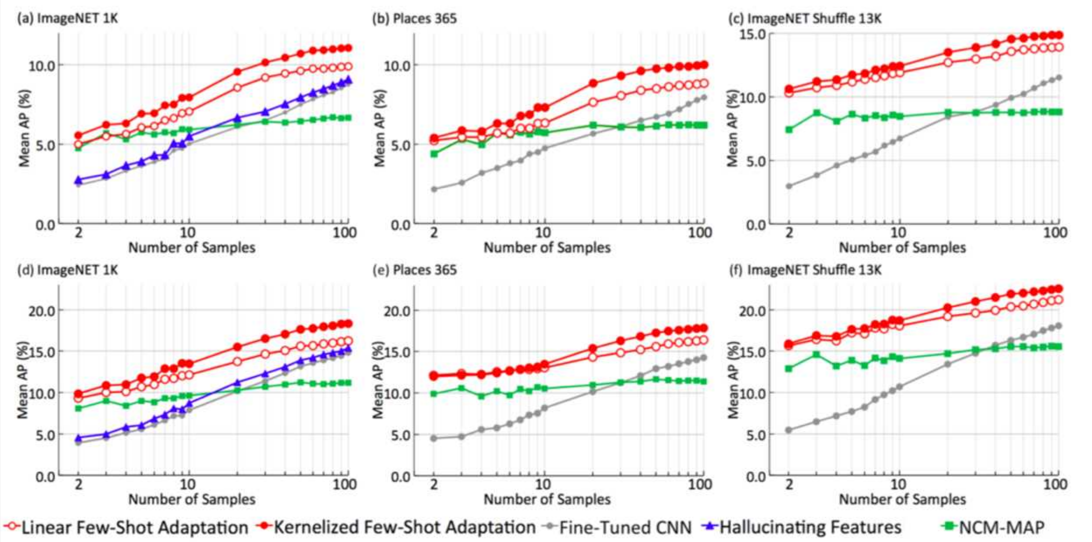


図 2. TRECVID データセットにおける Few-Shot 学習の実験結果

(B) Few-Shot Verb Image データセットの作成

Zero-Shot 学習および Few-Shot 学習の研究をさらに発展させるには，カテゴリ数の多いデータセットが必要であることが，これまでの評価実験で明らかとなったため，ベンチマーキングデータセットの作成に着手した．本データセットは，人物動作の決定的瞬間を捉えら画像に関する URL 集であり，1,000 カテゴリを有するものを作成し，国際会議 ICCV でワークショップを主催して公表した．

本データセットから得られる画像の例を図3に示す．動作を表すカテゴリは，WordNet の動詞概念(verb synset)単位であり，物体画像を有する ImageNet データセットの拡張として利用することができるものとなっている．当初は映像データへのタグ付けを検討していたが，動作が明確である瞬間を捉えることを重視して画像 URL 集を作成することとした．また，それによりクラウドソーシングによるアノテーションコストを削減することもできた．

本データに関する画像認識精度は，ResNet50 を用いた場合で表1の通りである．ImageNet データセットで事前学習を行うことで精度が向上するものの，依然として高精度な認識が難しい問題を設定できている．

本データセットは，今後，大規模なプロジェクトとして，100 倍程度のカテゴリ数を実現できると，大規模 Few-Shot 学習が実現し，意味的コンセプト間のモデル化に大きな発展を齎すことが期待できる．しかし，大規模化にはリンク切れ等の問題が生じてしまい，その解決には Instagram などの画像共有サービスを有する機関の協力が必要である．

表 1. 認識精度

Pre-Training	Train Accuracy		Val Accuracy	
	Top-1	Top-5	Top-1	Top-5
Scratch	73.1	92.2	11.6	24.2
ImageNet	75.0	90.6	14.9	30.4

また，本項目に関する国際ワークショップ提案は，2019 年度のコンピュータビジョンに関する国際会議 ICCV に採択され，2019 年 10 月にワークショップ開催が実現した．ワークショップでは，データセット公表とともに，IEEE/CVF の査読付きフルペーパーを 14 本，アブストラクトを 12 本採択し，当日の参加者は 300 名と盛況であった．現在のところ，国内機関からのトップカンファレンスにおけるワークショップ提案採択は稀であり，今後はさらに活動の枠を広げる必要がある．

図 3. 動作画像のサンプル

3.　今後の展開

本研究の成果は，少数サンプル環境下での学習を実現するものであり，大規模データ収集が困難な分野への波及効果が期待できる．特に，最近では医療分野など，収集可能なデータの量が限られている応用が注目を浴びており，巨大IT企業に限らず，深層学習技術の導入が望まれているため，研究成果をそれぞれの応用分野に適用することで，幅広く社会貢献ができる可能性がある．

4.　自己評価

・研究目的の達成状況

当初の第一目標であった，データセット作成に関するトップカンファレンス国際ワークショップの開催が実現した．また，Few-Shot 学習法もマルチメディア分野の国際会議フルペーパーで採択されたため，概ね目標は達成できている．

・研究の進め方

東京工業大学の有するスーパーコンピュータ TSUBAME3.0 を活用して研究実施を行った．大規模な評価実験が出来た点は評価できる．データセットおよび実験の規模は Google など他の研究機関が公表しているものに比べると小規模であるが，最大限に研究費を活用できている．

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

Few-Shot 学習に関する成果はデータ収集が困難な分野への波及効果が期待できる．また，その原理は情報分野の発展に貢献するものである．

・研究課題の独創性・挑戦性

研究提案時，Few-Shot 学習という課題自体は独創性の高いものであった．データセットおよび実験の大規模化は高い挑戦性を有していたが，個人型研究では実施スピードが限られており，他機関と比較すると実施体制を見直す必要がある課題であった．

5.　主な研究成果リスト

(1) 論文（原著論文）発表：0件

(2) 特許出願

研究期間累積件数：0 件

(2) その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

1. Nakamasa Inoue and Koichi Shinoda, Few-Shot Adaptation for Multimedia Semantic Indexing, ACM Multimedia, 2018.
2. Nakamasa Inoue, Chihiro Shiraishi, Aleksandr Drozd, Koichi Shinoda, Shi-wook Lee, Alex Chichung Kot, Activity Detection in Extended Video using Action Tubelets (VANT at TRECVID 2018), NIST TRECVID workshop, 2018.
3. Nakamasa Inoue, Multi-Discipline Approach for Learning Concepts Workshop, Organizer's talk, IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2019.

公開

（事後評価・研究者用）

研　究　報　告　書

「非線形非負行列分解を用いたディープニューラルネットワーク計算手法の開発」

研究期間：　2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号：　５０２０４
研　究　者：　今倉　暁

1．　研究のねらい

近年、「ディープニューラルネットワーク（DNN）計算」に基づくディープラーニングは画像や音声データ、自然言語認識などの分野において高い性能を発揮しており、自動運転技術などへの応用が世界各国で進められている。

一方で、近年のコンピュータ技術の目覚ましい発展に伴って、超高速計算機の高度利用に基づく"計算科学"は各種の最先端分野においてその中心的な役割を果たしている。ただし、これらの複雑な科学技術計算を実施するためには、単に超大規模並列計算機を開発するだけでは不十分であり、その計算資源を効率的に使いこなすアルゴリズムの開発が重要であるとされ、大規模連立一次方程式や大規模固有値計算などの超並列アルゴリズムの開発が進められている。このような超大規模並列計算機の高度利用を前提としたアルゴリズム開発はディープニューラルネットワーク計算においても必要不可欠である。

DNN は入力データの重み付き平均、バイアス項および非線形活性化関数からなる神経細胞間の情報伝達に関する数学モデルを基盤とし、多階層ネットワーク化したものである。DNN 計算とは、入力データからネットワークを介して得られた出力データと正解データの「ズレ」を最小化するようネットワークの重みおよびバイアスを最適化する非線形最適化問題として定式化される。その最適化問題の数値解法としては、確率的勾配降下法に基づくバックプロパゲーション（BP）法が標準的なアルゴリズムとして利用されている。しかしながら、大規模並列化を前提として作られたアルゴリズムではなく、必ずしも超大規模並列計算機との親和性が高いとは言えない。

本研究課題では、超大規模並列計算機の高度利用を前提とし、並列計算機との親和性の高い非線形非負行列分解（非線形 NMF）を利用した新しい DNN 計算法の開発を目的とする。加速フェーズにおいては、ACT-I プロジェクト研究期間（2016 年 12 月～2018 年 3 月）で開発を進めた基盤アルゴリズムである NMF 型 DNN 計算法の高度化を行う。また、固有値計算や行列分解などに対する高性能な行列分解技術を基盤とした各種のデータ解析手法の開発についても併せて取り組む。

本研究課題の推進により、現状では実現し得ない超大規模データの高速な解析を可能とし、現在放置されているビックデータから新しい価値の創出に繋がることが期待される。

2.　研究成果

(1) 概要

本研究課題では、研究代表者がこれまでの研究で培った超並列アルゴリズム開発でのノウハウを活かし、現在の標準的手法であるバックプロパゲーション (BP) 法とは異なるアプローチに基づくディープニューラルネットワーク (DNN) 計算法として、超大規模並列計算機の高度利用を前提とし、並列計算機との親和性の高い行列分解型のアルゴリズムの開発を行った。具体的には、現在主流となっている活性化関数 (ReLU) の非負値性に着目し、非線形非負行列分解 (非線形 NMF) を利用した新しい DNN 計算手法を開発した。

加速フェーズにおいては、基盤アルゴリズムの高度化として、複数ネットワークを併用する高並列 DNN 計算法の開発および BP 法と NMF 型 DNN 計算法を併用した高速化について研究を進めた。

また、固有値計算や行列分解などに対する高性能な行列分解技術を基盤とした各種のデータ解析手法の開発を行った。特に、行列トレースの最適化問題に基づく次元削減法に着目し、より多数の固有ベクトル情報を利用する、高性能な次元削減法の開発を行った。

(2) 詳細

本研究課題における、研究テーマは「非線形 NMF に基づく DNN 計算法の高性能化」および「行列計算を基盤とした別のデータ解析法の開発」である。各テーマに対する研究成果の詳細を以下に示す。

研究テーマ A「非線形 NMF に基づく DNN 計算法の高性能化」

- 基盤アルゴリズム開発

現在の標準的手法である BP 法と異なるアプローチに基づく DNN 計算法として、非線形 NMF に基づく DNN 計算法の開発を行った。提案手法は逐次的な最適化に基づき、各最適化ステップは本研究課題で新たに導入した制約･正則化項付き非線形 NMF である。また、提案手法の初期値設定として、NMF に基づくオートエンコーダーの開発も併せて行った。

手書き数字認識 (MNIST) や関数近似に対して、提案手法は古典的な BP 法と同程度の認識性能を発揮することを示した。また、バイアス･正則化項により過学習の抑制が可能であることが示された。

- アルゴリズムの高度化

NMF 型 DNN 計算法の高度化として、図 1 に示すような複数のネットワークを組み合わせた構造を考え、各ネットワークを並列に学習する手法を考案した。このようなネットワークを用いることで、並列性能および中間層のユニット数が増えることによる高い認識性能を発揮することが期待される。このような並列ネットワークを BP 法および NMF 型 DNN 計算法を用いて学習したところ、図 2 に示すように、特に NMF 型 DNN 計算法に顕著に性能改善が見られた。

また、並列ネットワーク数を p とすると、各中間層のユニット数が p 倍された大きなネットワークの部分構造になっているため、大きなネットワークを学習する際の前処理としても利用することができる。

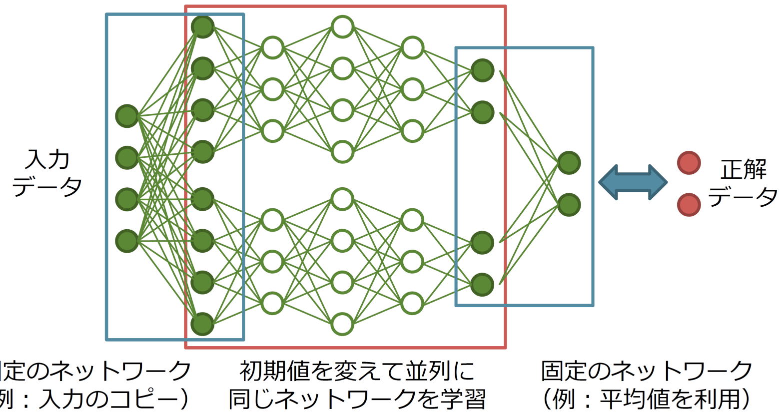


図1. 複数ネットワークによる並列化.

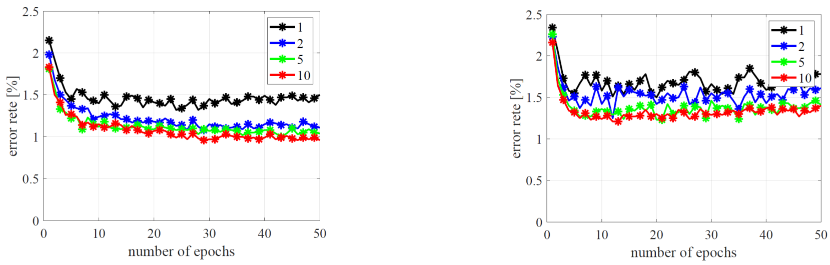


図2. MNIST による複数ネットワークの数値実験. (左) BP 法、(右) NMF 型 DNN 計算法

上記の知見を元にアルゴリズムの高度化を行い、現在論文執筆を進めている。

研究テーマ B「行列計算を基盤とした別のデータ解析法の開発」

➢ 行列トレースの最適化に基づく次元削減法の高性能化

本研究課題では、高次元データに対する次元削減法として、局所性保存射影 (LPP) や主成分分析 (PCA) など行列のトレースの最適化に基づく手法に着目し、解析性能を改善する新しい次元削減法として、複素モーメント型次元削減法 (CMSE) を提案した。従来のトレースの最適化に基づく次元削減法は削減する次元分の少数の固有ベクトルのみを利用する。これに対して、CMSE 法ではより多くの固有ベクトルを利用するよう、複数の固有ベクトルを含む複素モーメント型部分空間を利用することで性能改善を図る。また、提案法は行列のトレースと教師データを利用した 2 乗誤差を組み合わせた目的関数を設定する (図3)。

分類問題に対する数値実験から、CMSE 法は従来の次元削減法と比較して分類性能を向上させる結果が得られた (図4)。また、並列実験の結果から高いストロングスケーラビリティを示す結果が得られた。

次元削減法は各種のデータ解析において重要な役割を果たし、本研究で提案された手法は、既存の次元削減法と比較して同等以上の性能を発揮する。また高い並列性を示すことから、大規模データ解析に対する有効な手法となりうる。

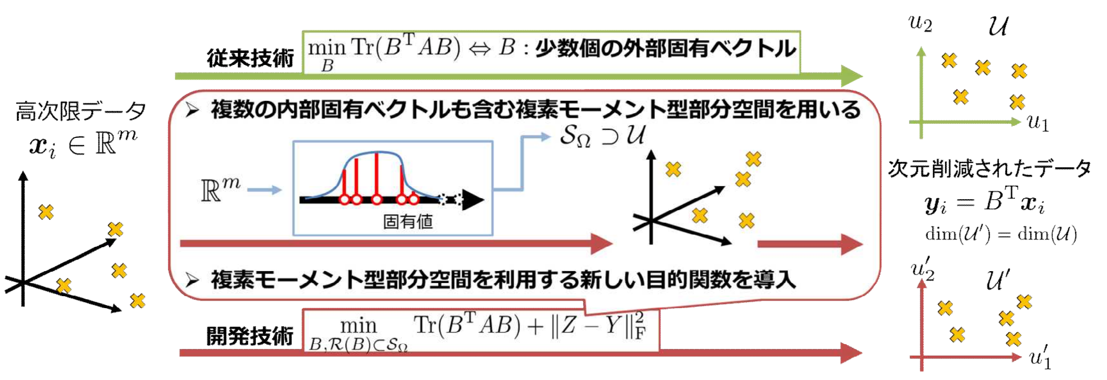


図3. 行列トレースの最適化に基づく従来の次元削減法と CMSE 法の概略

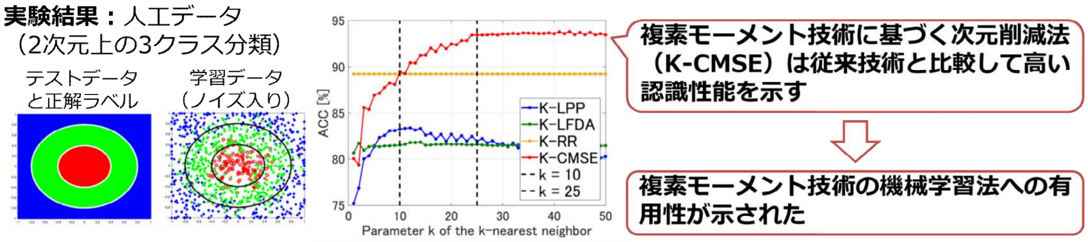


図4. 行列トレースの最適化に基づく従来の次元削減法と CMSE 法の実験結果

本成果は人工知能、機械学習分野のトップカンファレンスの一つである AAAI-19 (採択率: 16.2%、投稿件数:7700 件) に採択された [論文 (原著論文) 発表 1]。

➢ その他関連研究

その他の関連研究として、行列計算を基盤として、特徴量選択技術や異常検知法など各種のデータ解析手法の研究を進めており、その研究成果について複数の論文が掲載された[論文 (原著論文) 発表 2]-[論文 (原著論文) 発表 5]。

3. 今後の展開

本研究課題では、超大規模並列計算機の高度利用を前提とし、並列計算機との親和性の高い非線形非負行列分解 (非線形 NMF) を利用した新しい DNN 計算法の開発および行列分解に基づく他のデータ解析手法の開発を目的とした。今後は、高性能行列計算を基盤としたディープラーニングや機械学習法の開発を進めるとともに、各種の応用分野からのニーズに対応した応用研究を進めていきたいと考えている。

DNN 計算のみにかぎらず様々なデータ解析において、高速・高並列な行列計算法に基づくアルゴリズムの再設計を行い、効率的な解法群を構築する。また、ソフトウェア化し高速・高並列なデータ解析基盤とすることを目指す。

高速・高並列なデータ解析基盤を整備することができれば、様々な応用分野において現状では実現し得ない超大規模データの高速な解析を可能とし、現在放置されているビックデータから新しい価値の創出に繋がることが期待される。

4.　自己評価

本研究課題の研究目的は超大規模並列計算機の高度利用を前提とし、バックプロパゲーション法とは異なる新しい計算法の開発・高性能化を行うことである。

研究開発期間において、非線形NMFに基づくDNN計算法の高性能化および行列計算を基盤とした各種の機械学習法の開発を進めた。これらの結果は複数の学術論文および査読付き国際会議に採択されている。また、本研究成果の応用先として医療、生命、農業関連の研究者や企業との共同研究に発展している。以上のことから、当初の研究目的は十分に達成されたと考えられる。

本研究課題の遂行にあたり、研究補助者 3 名を雇用し研究補助としてデータ収集および解析依頼し、週 1 回のミーティングを継続して行うことで、研究代表者の統括のもと研究課題を実施した。研究費は主に、計算機購入費、国際会議への旅費、書籍購入費の他、論文の英文校正費として計画通りに執行した。

従来法である BP 法は、DNN 計算法として 30 年の実績を持つ標準的なアルゴリズムであり、画像認識を始めとして多くの成果を挙げている。一方、BP 法以外の DNN 計算法についてはあまり研究が進められておらず、本研究課題の BP 法と全く異なるアプローチに基づく手法の開発は萌芽的かつ挑戦性の高い研究であると言える。

また、本手法の高性能化とともに、高速・高並列なデータ解析基盤を整備することができれば、BP 法があまり有効ではなく DNN 計算が用いられてこなかった様々な応用分野においても DNN 計算の可能性を広げることができる。これにより、現状では実現し得ない超大規模データの高速な解析を可能とし、現在放置されているビックデータから新しい価値の創出に繋がることが期待される。

5. 主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

1. Akira Imakura, Momo Matsuda, Xiucai Ye, Tetsuya Sakurai, Complex Moment-Based Supervised Eigenmap for Dimensionality Reduction, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 33, pp. 3910-3918. 2019.
2. Xiucai Ye, Hongmin Li, Akira Imakura, Tetsuya Sakurai, Distributed Collaborative Feature Selection Based on Intermediate Representation, Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19), pp. 4142--4149, 2019.
3. Akira Imakura, Tetsuya Sakurai, Data Collaboration Analysis Framework Using Centralization of Individual Intermediate Representations for Distributed Data Sets, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, Vol. 6, Issue 2, 04020018, 2020.
4. Momo Matsuda, Keiichi Morikuni, Akira Imakura, Xiucai Ye, Tetsuya Sakurai, Multiclass spectral feature scaling method for dimensionality reduction, Intelligent Data Analysis, (accepted)
5. Hiroyuki Yoda, Akira Imakura, Momo Matsuda, Xiucai Ye, Tetsuya Sakurai, Novelty Detection in Multimodal Datasets Based on Least Square Probabilistic Analysis, International Journal of Machine Learning and Computing (IJMLC), (accepted).

（2）特許出願

研究期間累積件数：0 件

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

1. 筑波大学 若手教員奨励賞（2018 年 11 月）
2. Akira Imakura, Momo Matsuda, Xiucai Ye, Tetsuya Sakurai, A complex moment-based dimensionality reduction for data analysis, 2019 Mini-Workshop on Computational Science (MWCS2019), Dalian University of Technology, China, August 18-19, 2019.
3. Akira Imakura, Momo Matsuda, Xiucai Ye, Tetsuya Sakurai, A novel dimensionality reduction method using a complex moment-based subspace, International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2019), the Universitat de Valencia, Spain, July 15-19, 2019.
4. Akira Imakura, Tetsuya Sakurai, Nonlinear semi-NMF based method for deep neural network computations and its improvements, International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2019), the Universitat de Valencia, Spain, July 15-19, 2019.
5. Akira Imakura, Nonlinear semi-NMF based method for deep neural network computations, International Symposium on "Digital Science Now", University of Tsukuba, Japan, June 7, 2019.

公開

（事後評価・研究者用）

研 究 報 告 書

「パーソナルインタラクションスペースの実現に向けた操作体系の構築」

研究期間： 2018 年 10 月～2020 年 3 月
研究者番号： ５０２０５
研 究 者： 久保 勇貴

1． 研究のねらい

情報端末を通じたユーザへの情報表示はある場面においてユーザの行動を決定するための指針を示す等，ユーザの行動を支援する．情報端末にはパブリックディスプレイ以外に，スマートフォンのようなモバイル端末も用いられているが，今後，これらの端末はスマートグラスおよびスマートコンタクトのようなウェアラブル端末へと形態を変化していくことが想定される．この形態変化により，ユーザの視界への情報の重畳表示が可能となる．すなわち，現実世界に情報を重畳してユーザへ表示できるようになるために，空間自体が情報表示領域となる．

これまで，場所に応じた情報表示には駅の案内板およびサイネージ等，各地に設置されたパブリックディスプレイ等が活用されてきたが，想定する未来においては，空間自体が情報表示領域となるために，ユーザが所有するウェアラブル端末を通じ，場所に応じた情報表示をユーザが所有するウェアラブル端末を用いて代替可能となり，各地への情報端末の設置を不要とできる．これに伴い，各地に存在した情報端末がユーザの所有する単一のウェアラブル端末に統合され，新たなコンピューティング環境が実現されることが想定される．また，ウェアラブル端末は，端末ごとに異なる情報を表示できるパーソナルな情報端末であるため，ユーザごとに異なる各ユーザに適した情報を表示できる．このような，各ユーザに適した内容に変更されたあらゆる情報およびそれら情報とユーザがインタラクションするパーソナルな情報表示空間を，本研究ではパーソナルインタラクションスペースと呼ぶ．

パーソナルインタラクションスペースにおいて表示された情報を扱うためには，情報を操作する入力手法が必要である．これまでの情報端末は，各地に存在する端末がそれぞれ情報を表示する出力装置および表示された情報を扱う入力装置から構成されている．一方，パーソナルインタラクションスペースでは，ユーザが備えた単一のウェアラブル端末が備えた同一の出力装置及び入力装置を用いる．したがって，パーソナルインタラクションスペースにおいては，ユーザはウェアラブル端末が備えた同一な入力装置を常に用いることが想定される．よって，本研究では，パーソナルインタラクションスペースの実現に必要となる，表示情報を扱うための操作体系の構築を目標に，入力手法及びこれを実現するためのセンシング技術に関する研究を行う．

2． 研究成果

（1）概要
本研究では，パーソナルインタラクションスペースの実現に必要となる，表示情報を扱うための操作体系の構築を目標に研究を行う．パーソナルインタラクションスペースにおける，ユーザと表示情報とのインタラクションは主に 2 つの場面が存在する．1 つ目に，情報のみを扱

う場面，2 つ目に，ユーザの行動に合わせて情報の振る舞いが変容する場面である．本研究課題では，これら 2 つの場面を想定した表示情報に対する操作手法をそれぞれ検討し，操作体系の確立を目指す．

表示情報のみ扱う場面に対しては，手指の詳細な形状を認識し，認識した手指の状態をもとに表示情報を操作する，マイクロジェスチャを活用した操作手法を検討する（テーマ A）．手の状態を利用した操作（ハンドジェスチャ）を検討するにあたり課題となる点が，腕を大きく動かす必要のあるジェスチャを用いる場合，ユーザの肉体的負担が大きい点である．よって，本研究ではジェスチャの中でも，手指の細かな状態を用いるマイクロジェスチャを活用する．マイクロジェスチャは操作に伴う手指の稼働動作がわずかであるために，屋外において人の注目を集めにくいことに加え，ジェスチャを行うことに伴う疲労を軽減できることが期待される．

ユーザの行動に合わせて情報の振る舞いが変容する場面に対しては，ユーザの行動に伴い使用するオブジェクトを識別可能とする手法を検討する．そのために，日常において使用される道具にセンサを装着しないことを特徴とする，手指の状態から間接的に把持しているオブジェクトを識別可能とする手法を検討する（テーマ B）．また，対象とするオブジェクトが 3D プリンタによって生成されるようになる未来を想定し，オブジェクト生成過程においてオブジェクト内部に構成される内部構造の差異を活用した，オブジェクト識別手法の検討も行う（テーマ C）．

（2）詳細

研究テーマ A「アクティブ音響センシングを用いたマイクロジェスチャ認識手法」

情報機器の操作手段としての手の状態を利用した操作（ハンドジェスチャ）の中でも細かな動作のものはマイクロジェスチャと呼ばれ，ジェスチャに伴う手指の動作がわずかであるために，屋外において人の注目を集めにくい，ジェスチャを行うことに伴う疲労が少ない，という特徴を有する．これまでにも，親指をわずかに動かす，それぞれの指同士を合わせるジェスチャの認識を行うために，グローブ型もしくは指輪型のセンサを用いた手法が提案されている．しかし，これらの形態の場合，ユーザの作業中において手指の動作を妨げる場合がある．これらの研究に対して，本研究では手の甲にセンサを貼り付ける形態をとることにより，手指の詳細な状態を認識でき，かつ手指に動作を妨げない形態の新たな手法を提案する．加えて，本研究では多様なマイクロジェスチャが認識可能かについても検討を行う．

AudioTouch [4] は能動的音響計測に基づくマイクロジェスチャ認識手法である．AudioTouch は，一組のスピーカとマイクとして機能する 2 つのピエゾ素子をユーザの手の甲に貼付け，手の甲の振動応答を取得する．この取得した振動応答より特徴量を生成し，これを入力とした機械学習によりマイクロハンドジェスチャを認識する．なお本手法が認識に用いるセンサは手の甲に貼付けられたピエゾ素子のみであるため，指輪型及びグローブ型センサを用いる手法と比べ，指にセンサを装着しないために手指の動作を阻害しない．本研究では図 1 に示す，3 つのジェスチャセットがそれぞれどの程度の認識精度として認識可能か評価実験を行い，提案手法の性能を評価した．そのほかにも，3 つの評価実験を行い，本手法のさらなる可能性を検討し外部発表において報告した．この成果に関して，ACM MobileHCI2019 に採択され，口頭発表を行った [4]．

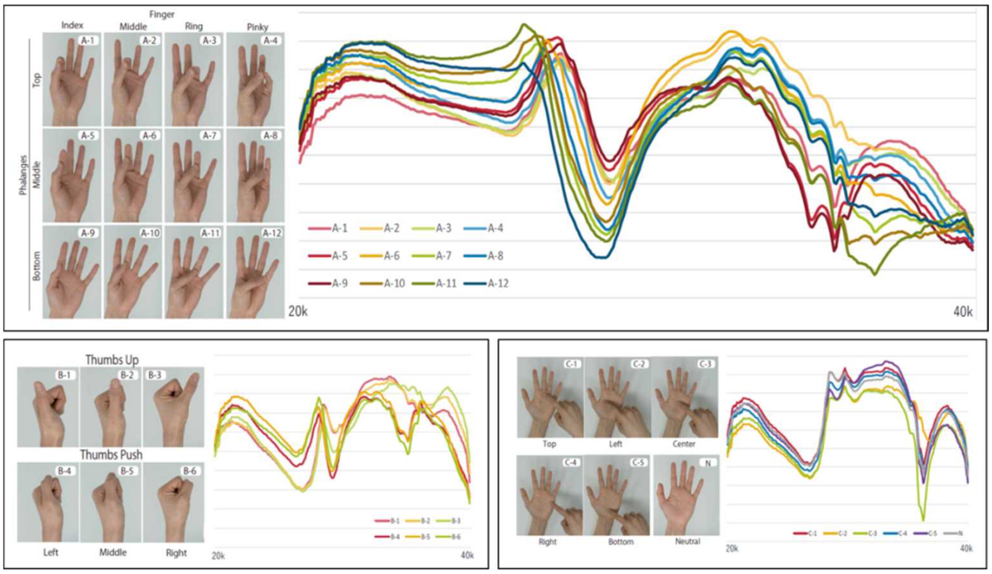


図 1:認識対象としたジェスチャセットとその音響周波数特性例

研究テーマ B「詳細な把持姿勢推定手法を用いた把持オブジェクト推定」

ユーザ周辺の状況をセンシングする手段の 1 つとして，ユーザが手にするあらゆる対象に対してセンサを取り付けるアプローチが存在する．しかし，このアプローチにおいては，あらゆる対象に対してセンサを取り付ける必要が生じる．一方，ユーザの手形状認識技術の進展により，認識可能なユーザの状態の解像度が向上した．本研究では，この点に着目し，高度なウェアラブルセンシング技術を用いた環境へのセンサの設置を不要とする，ユーザの周辺状況をセンシングする技術を検討する．

本研究において，ユーザの把持姿勢推定に基づく把持オブジェクト推定技術を提案する（図 2，特許 2）．本手法では，ユーザが把持するオブジェクトに応じて異なる把持姿勢を取ることを前提とし，AudioTouch を用いて識別したユーザの把持姿勢に基づき，把持オブジェクトを間接的に認識する．提案手法の実現可能性検討のために，13 個のオブジェクトを対象とした実験を実施し，結果，約 80%の認識精度において各オブジェクトを認識可能であることを確認し，提案手法の実現可能性を示した．

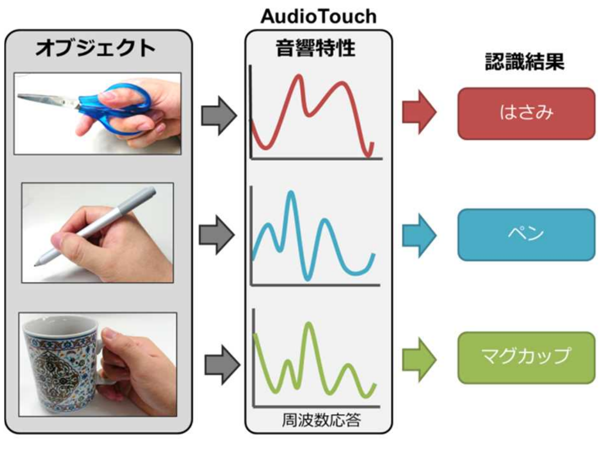


図 3:詳細な把持姿勢推定手法を用いた把持オブジェクト推定

研究テーマ C「内部構造パターンの差異を利用した 3D プリントオブジェクト識別手法」

印刷オブジェクト内部の構造パターンの差異を利用した 3D プリントオブジェクト識別手法を提案した [1, 3, 5, 特許 1] (図 4). 内部構造が異なると, 各オブジェクトが持つ振動特性が異なる. この特性の違いを識別し, 各オブジェクトの識別可能とする. この手法では, アクティブ音響センシングを用いて各オブジェクトの音響周波数応答を取得し, 機械学習を用いて各オブジェクトを識別する. 内部構造については, スライサーと呼ばれる 3D モデルデータを 3D プリンタに出力可能なデータ形式に変換するソフトウェア上において内部パターン等の印刷条件を設定さえ行えば, 図 5 に示すような内部構造を割り当てることが可能である. これにより, 内部構造のパターンを埋め込むために, 新たに 3D モデリングを行うことが不要となり, タグを埋め込む手間を削減可能とできる.

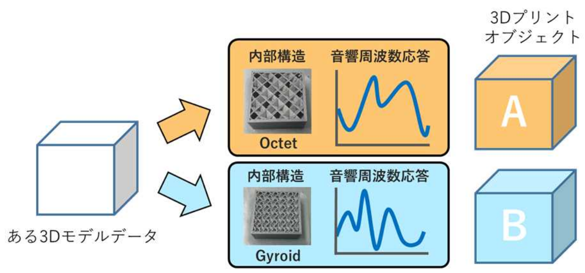


図 4：内部構造を利用した 3D プリントオブジェクト識別手法

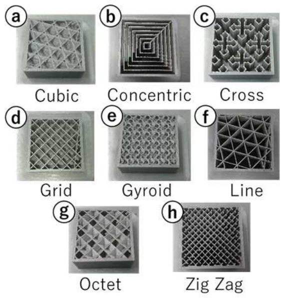


図 5：内部構造の例

3. 今後の展開

本研究において述べたパーソナルインタラクションスペースを実現するためには, 本研究において実施した研究テーマ以外の技術に関しても検討を行う必要がある. 本研究においては想定する世界の端末における入力機器に着目した研究を主として実施したが, 今後の展開として, 想定する世界を実現に必要な他の技術要素に関しても研究を進めることが考えられる.

また, 本研究の提案手法の社会実装を目指すためには, ユースケース及びアプリケーションを明確とし, 各ユースケースに用いることに必要な技術的要件を満たすための技術も検討する必要がある. ユースケース及びアプリケーション, 社会実装に必要となる追加の技術事項も検討することが, 今後の展開として考えられる.

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初想定していた複数の要素技術からなる挑戦的な研究目標を達成するまでに至ることはできなかったが, 目標を実現するために必要となる要素技術については, 複数の外部発表及び特許出願を行う成果を挙げたため, 一定以上の目標をおおよそ達成することができたと考える.

・研究の進め方

共同研究者との打ち合わせ, 領域会議やサイトビジットでの研究議論を行い, 研究を滞りなく進めることができた. また, 研究予算執行に関しては, 適切かつ有効に執行することができた.

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

本研究の成果は, 複数の外部発表を上げることができたため, 一定の学術的な波及があったと考える. 加えて, 3 件の特許出願を行ったため, 一定の産業的貢献も見込めると考える. また, マイクロジェスチャ認識手法については, グローブでもなく指輪型でもない, 手指の動きを妨げない形態の認識手法を用いて, 手だけでなく指の状態まで認識を可能としたために, 一定の波及効果があると考える.

・研究課題の独創性・挑戦性

手指の動作を妨げない手形状認識技術, 手形状から間接的に把持物体を推定する技術, 内部構造を利用した 3D 印刷物識別技術を新たに提案し, 本研究において独創性を有する研究を複数提案し検証した点は評価できる. また, 手指の動作を妨げない手形状認識技術に関しては, 装着型センサを用いた際の手指の認識解像度の向上を目指した挑戦的な研究であったと考える. また, 手形状から間接的に把持物体を推定する技術においても, あらゆる場所にセンサがあることを想定しない環境において, どのようにしてこれまで以上にユーザの詳細な状態を取得可能とするか検討した挑戦的な研究であると考える.

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

該当なし

(2) 特許出願

研究期間累積件数:3件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. **Yuki Kubo**, Kana Eguchi, Ryosuke Aoki, Shigekuni Kondo, Shozo Azuma, Takuya Indo. FabAuth: Printed Objects Identification Using Resonant Properties of Their Inner Structures. In Proceedings of Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA'19), 6 pages, May 2019, ACM.
2. **久保 勇貴**, パーソナルインタラクションスペースの実現に向けた操作体系の構築. 第 18 回情報科学技術フォーラム(FIT2019) イベント企画「若手研究者が描く未来予想図」(招待講演), 2019 年 9 月 3 日.
3. **久保 勇貴**, 江口 佳那, 青木 良輔, 近藤 重邦, 東 正造, 犬童 拓也. 内部構造パターンの差異を利用した 3D プリントオブジェクト識別手法. 第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集(WISS2019), 2019 年 9 月, pp. 43-48, 日本ソフトウェア科学会.
4. **Yuki Kubo**, Yuto Koguchi, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi, Otmar Hilliges. AudioTouch: Minimally Invasive Sensing of Micro-Gestures via Active Bio-Acoustic Sensing. In Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '19), Article No. 36, 13 pages, Oct. 2019. ACM.
5. **Yuki Kubo**, Kana Eguchi, Ryosuke Aoki. 3D-Printed Object Identification Method using Inner Structure Patterns Configured by Slicer Software. In Proceedings of Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA'20), 7 pages, Apr. 2020, ACM. (to appear)

研　究　報　告　書

「CO_2フリー社会実現のための物理化学と情報科学の融合」

研究期間：　2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号：　50206
研　究　者：　黒木　菜保子

1．　研究のねらい

地球温暖化の進行が深刻化している。生活水準を維持・向上しつつ地球温暖化を解決するには、CO_2 を効率良く回収しなければならない。近年、イオン液体が CO_2 を選択的に吸収する能力を持つことが報告され、多くの環境化学者・物理化学者が、CO_2 を吸収する「より大きな空隙を持つイオン液体」の開発に挑戦してきた。しかし、イオン液体は数多存在する陽イオンと陰イオンの組み合わせから構成され、大量生産されないため高価である。そのため、従来、全てのイオン液体について CO_2 吸収能力を調査することは不可能であった。

イオン液体中により多くの CO_2 を吸収させるには、イオン液体中のイオンパッキング効率を下げ、CO_2 を吸収可能な空隙を持たせることが重要である。空隙体積を増やすには、直感的には幾何構造が大きく異なる陽イオン・陰イオンの組を用いることが有効だと考えられる。しかしながら、空隙体積は構成イオンの幾何構造のみならず電子状態、すなわち分子間相互作用にも影響を受けるため、単純には求めることができない。これは、空隙体積の大きいイオン液体の探索が、「幾何構造と分子間相互作用が非線形に絡み合った高次空間において、CO_2 吸収量を予測する物理化学と情報科学の融合問題」に帰着することを意味する。

本研究の目的は、CO_2 フリー社会の実現を目指して、CO_2 を効率良く吸収するイオン液体を、物理化学と情報科学の融合により高精度かつ迅速に提案することである。本研究では、物理化学・情報科学の学際的アプローチにより、イオン液体の CO_2 吸収能力最大化に挑んだ。

2．　研究成果

（1）概要

有機化合物の陽イオン・陰イオンの組み合わせから構成されるイオン液体は、CO_2 を吸収する空隙体積をもつことが知られている。しかし、どのようなイオンの組み合わせにおいて CO_2 吸収能（吸収量・吸収速度）が最大値をとるのかは物理化学的に自明ではない。

ACT-I研究期間では、より多くの CO_2 を吸収可能な陽イオン・陰イオンの組み合わせを、マテリアルズインフォマティクスの手法により迅速に求めることを目標とし、

（1）イオン液体の構成要素である単分子イオンの幾何構造・電子状態のデータベース作成

（2）単分子イオンの組み合わせと CO_2 吸収特性の相関に関する機械学習・モデル検証

（3）混合液体の熱力学物性予測のための分子動力学計算

を実施した。その結果、ホスホニウム陽イオンを含むイオン液体において、より多くの CO_2 を吸収可能になることが分かった。だが、CO_2 吸収量の評価のみで、新たな CO_2 吸収材の設計指針とするべきではない。すなわち、CO_2 吸収速度さらには排気ガスに含まれる他

のガスとの分離回収性も考慮する必要がある。

上記背景を鑑み、加速フェーズ期間では、イオン液体の探索空間の拡張及び CO_2 吸収速度･分離回収性の評価、予測結果の検証実験を実施した。

（2）詳細

本研究では、イオン液体を陽イオン･陰イオンの混合物であると捉え、その単分子イオンの特徴量の組み合わせから CO_2 吸収性に優れたイオン液体を見いだすことを目的として研究に取り組んだ。これまでに得られた成果は以下の六点にまとめられる。

（1）イオン液体の構成要素である単分子イオンの幾何構造･電子状態のデータベース拡張

量子化学計算では、化学実験では不可能な陽イオン･陰イオンの個別扱いが可能である。本研究では、BP/TZVPD レベルの密度汎関数法を用いた高精度量子化学計算により、単分子イオンのデータベース作成を行っており、これまでに、陽イオン 3,767 種類･陰イオン 109 種類を計算した。本研究期間では、新たに陽イオン 2,848 種類･陰イオン 916 種類についてその幾何構造･電子状態を計算し、全体で、陽イオン 6,615 種類･陰イオン 1,025 種類をデータベースに登録した。

（2）CO_2 吸収速度最大化のためのベイズ最適化

各イオンの幾何構造･電子状態を特徴量とし、イオン液体の CO_2 吸収量を予測するための機械学習（ガウス過程回帰）を行なった（学会 1-3）。機械学習の結果 CO_2 吸収量が多いと予測されたイオン液体のうち、より CO_2 吸収速度が速いイオン液体を迅速に探索することが求められる。CO_2 吸収速度は、CO_2 がイオンを掻き分けて空隙に到達するまでのエネルギー障壁（遷移状態）によって決まる。これは、分子動力学の問題であり、網羅的シミュレーションは計算コストの観点から現実的ではない。

本研究では、実験計画法の一つであるベイズ最適化を用いて、分子動力学計算の実施数を抑えつつ、CO_2 吸収速度の最大化に挑んだ。研究の結果、ホスホニウム系イオン液体に加え、従来あまり注目されてこなかった骨格構造を持つイオン液体の有望性が明らかになりつつある。

（3）排気ガスからの CO_2 分離回収性に優れたイオン液体の予測

イオン液体を CO_2 吸収材として化学プロセスに応用するには、排気ガスに含まれる他のガスからの高い分離回収性が求められる。そこで、燃焼排ガスの主要組成であるガス 14 種類 (HCN, SO_2, H_2O, NH_3, H_2S, NO_2, NO, CO, N_2O, C_2H_6, C_2H_4, CH_4, N_2, H_2) について、イオン液体に対する吸収性を、機械学習した。

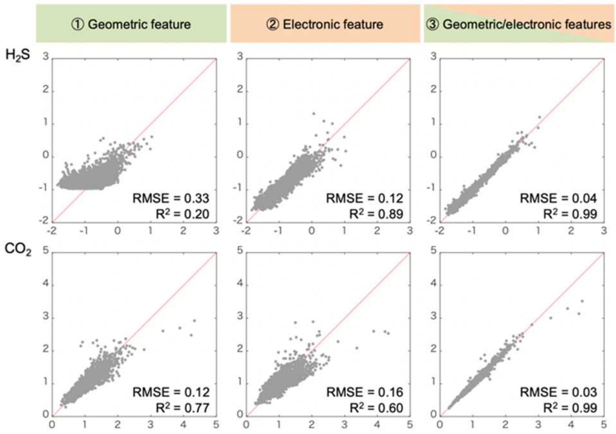


図 1. H_2S, CO_2 の吸収量について機械学習したモデル
横軸：統計熱力学計算の値、縦軸：機械学習の予測値

図 1 に、陽イオン･陰イオンの ①幾何的物性のみ、②電子的物性のみ、③物性全てをそれぞれ特徴量として H_2S および CO_2 の吸収量を回帰した結果を示す。①と②の比較より、H_2S の場合は電子的物性が、CO_2 の場合は幾何的物性が、より重要だと分かる。これは、H_2S が双極子モーメントを持ち、イオンと比較的強い静電相互作用を形成する一方、CO_2 は無極性分子であるためと解釈できる。また、①、②より③の方が高い予測精度を得たことから、H_2S のサイズおよび CO_2 の四極子相互作用の考慮も、高精度なガス吸収能評価に必須であることが分かった (学会 4)。予測した各ガスのヘンリー定数から選択性を算出したところ、CO_2 を N_2 や CH_4 と分離回収可能なイオン液体が存在することが示唆された (論文 2)。

(4) さらなる CO_2 吸収性向上を狙った混合イオン液体へのデータベース応用

ここまでで、純粋なイオン液体に対するガス吸収量･吸収速度および分離回収性の議論が可能になった。さらなる CO_2 吸収量の向上には、陽イオン･陰イオンの二成分に加え、その強い静電パッキング構造を壊す第三成分の積極的な導入が必要であることが分かりつつある。

そこで、陰イオンの嵩高さ及びその特異な電子分布がイオン液体のパッキング効率を弱めることに着目した。これまでに作成したデータベースを応用し、共通する陽イオンを有する二種類のイオン液体を 1:1 の割合で混合した混合イオン液体について統計熱力学計算を実施した。図 2 に示すように、含フッ素陰イオンを含むイオン液体と有機陰イオンを含むイオン液体を混合することにより、CO_2 吸収性を向上させることが可能であることが分かった (論文 3、学会 5)。

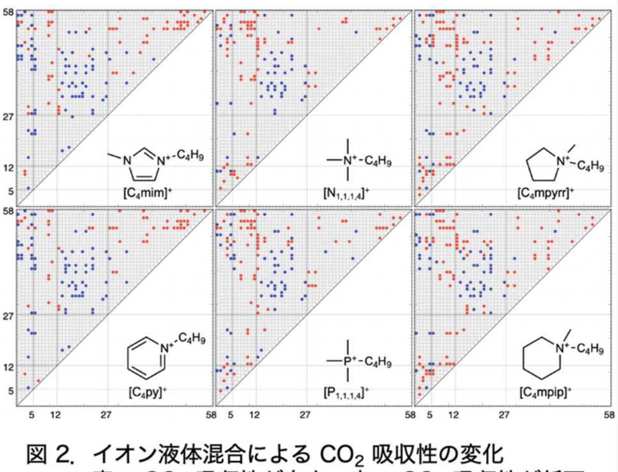


図 2. イオン液体混合による CO_2 吸収性の変化
青： CO_2 吸収性が向上、赤： CO_2 吸収性が低下
横軸縦軸：混合した陰イオンのデータベース番号

（5）機械学習結果の検証実験

本研究で実施した機械学習の結果を、地球環境産業技術研究機構 山田 秀尚 准教授、Firoz A. Chowdhury 博士、日本大学 児玉 大輔 准教授に提供し、イオン液体の合成および高圧物性・CO_2 溶解度の測定を依頼した。2種類のホスホニウム系イオン液体について CO_2 溶解度を測定した結果、これまで CO_2 溶解性に優れると報告されてきたイオン液体より CO_2 吸収性に優れるものが、本研究で実施した機械学習により得られたことが明らかになった。（学会発表 6,7）

（6）高温高圧下での拡散係数予測が可能な分子シミュレーション法の検討

イオン液体により回収された CO_2 は、高温高圧条件下では超臨界流体となり、有機分子を抽出可能な機能性溶媒として活用できる。超臨界流体を分離抽出溶媒として利用するには、温度・圧力に応じて変化する輸送特性を分子レベルで解明せねばならない。

そこで、フラグメント化の手法に基づく分子シミュレーション法 EFP-MD による超臨界流体の物性予測可能性を調査した。比較的穏やかな条件で臨界点に達する無機ガスに着目し、EFP-MD シミュレーションにより算出した自己拡散係数は、対応する実験結果を半定量的に再現できた。本成果は J. Phys. Chem. B 誌の中表紙に選出された。（論文 1）

3. 今後の展開

これまでに、量子化学計算により陽イオン・陰イオンの幾何構造・電子状態のデータベースを作成し、単分子の組み合わせからイオン液体のガス吸収量・吸収速度および分離回収性に関する議論を展開することができた。本研究で理論予測した結果を基とした、実験研究者との共同研究が複数開始されている。

イオン液体は、ACT-I 研究で着目した「CO_2 吸収性」以外にも、「電気伝導性」、「セルロース溶解性」など様々な特徴を有するデザイナー液体である。これまでに作り上げた研究基盤を基に、イオン液体の持つ特異な物性を目的に応じて最適化する技術の開発を目指す。本研究完遂時には機能性液体開発にマテリアルズインフォマティクスを利用した研究例であるとして、学術ひいては産業に対しインパクトを与えたい。

4. 自己評価

本研究の目的は、CO_2 フリー社会の実現を目指して、CO_2 を効率良く吸収するイオン液体を、物理化学と情報科学の融合により高精度かつ迅速に提案することであった。これまでの研究で、物理化学者として情報科学の手法を応用し、CO_2 吸収量・吸収速度・分離回収性に優れたイオン液体を提案できた。検証実験まで進むことができたが、CO_2 吸収材としての実用化には、価格や合成の難しさが課題に挙がった。

領域会議やサイトビジットを通じ、同時採択の研究者とディスカッションさせていただき、常に刺激をもらいながら研究を進めることができたと考える。研究費執行状況も適切であったと判断する。

本研究で開発した手法は、従来の実験のみを基としたイオン液体設計とは一線を画する手法である。本研究成果について、2020 年 3 月に開催される予定であった The 8th French-

Japanese Workshop on Computational Methods in Chemistry (COVID-19 により開催中止) の講演依頼を頂いた他、7th Asia-Oceania Conference on Green and Sustainable Chemistry (AOC7-GSC 2018) では GREEN Chemistry Poster Prize を受賞した。また、関連研究として推進した超臨界流体の輸送特性について記述可能な力場について検討した論文 (*J. Phys. Chem. B* **123**, 194-200 (2019).) は、中表紙に選出された。これらの成果は、本研究が物理化学を基盤とし、イオン液体 (溶液化学) ひいては環境工学の分野に波及効果を及ぼしつつあることを示すものだと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文 (原著論文) 発表

1. Kuroki N., Mori H.*,
   Applicability of Effective Fragment Potential version 2 - Molecular Dynamics (EFP2-MD) Simulations for Predicting Dynamic Liquid Properties Including Supercritical Fluid Phase,
   J. Phys. Chem. B **123**, 194-200 (2019).
   【Inside Cover Art 採択】
2. Masuda C., Kuroki N.*,
   Statistical thermodynamics database construction to search for novel ionic liquids with gas selectivity,
   J. Comput. Chem. Jpn. **18**, 217-220 (2019).
3. Kuroki N.*, Maruyama S., Mori H.*,
   Theoretical Strategy for Improving CO_2 Absorption of Mixed Ionic Liquids Focusing on the Anion Effect: A Comprehensive COSMO-RS Study
   Ind. Eng. Chem. Res. **59**, 8848-8854 (2020).
   【Inside Cover Art 採択】

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

1. Kuroki N., Mori H.,
   Designing ionic liquids for efficient CO_2 capture: A materials informatics study,
   8th International Symposium on Molecular Thermodynamics and Molecular Simulation (MTMS'18), PP30, Narashino, Japan (Sep. 2018)
   【Student Poster Presentation Award 受賞】
2. Kuroki N., Mori H.,
   Exploring ionic liquids for efficient CO_2 capture and storage by electronic structure

calculation and machine learning,
7th Asia-Oceania Conference on Green and Sustainable Chemistry (AOC7-GSC 2018), P-0043, Singapore (Nov. 2018)
【GREEN Chemistry Poster Prize 受賞】

3. 黒木 菜保子, 森 寛敏
CO_2吸収特性に優れたイオン液体探索のための電子状態インフォマティクス,
化学工学会 第50回秋季大会, CC217, 鹿児島, 2018年9月
【学生優秀講演賞最優秀賞受賞】
4. 増田 千夏, 黒木 菜保子, 森 寛敏
統計熱力学計算によるガス選択的吸収能を持つイオン液体の探索,
日本コンピュータ化学会 2019 秋季年会, 2P24, 広島, 2019年10月
5. 丸山 峻太, 黒木 菜保子, 森 寛敏
統計熱力学計算に基づく三成分混合イオン液体の CO_2吸収能検討,
第10回 イオン液体討論会, 1P22, 大阪, 2019年11月
6. 黒木 菜保子, 森 寛敏
イオン液体の電子状態データベース構築とガス吸収能評価への応用,
化学工学会 第85回年会, J307, 大阪, 2020 年 3 月
7. 児玉 大輔, 荻野 涼, 高橋 広大, 黒木 菜保子, 森 寛敏, Chowdhury Firoz, 山田 秀尚
ホスホニウム系イオン液体のガス溶解度に及ぼすアニオンの影響,
化学工学会 第85回年会, J308, 大阪, 2020 年 3 月

公開

(事後評価・研究者用)

研 究 報 告 書

「時系列データの自動解析技術の実現」

研究期間: ２０１８年4月～２０２０年3月
研究者番号: ５０２０７
研 究 者: 小林 亮太

1. 研究のねらい

これまで時系列データの解析には時系列モデルが使われてきた。しかし、このアプローチでは、対象や データが変わるたびに時系列モデルを構築する必要がある。時系列モデルの構築には多くの時間と コストが必要となるため、時系列データの活用は十分に進んでいない。

本研究では、時系列データの中でも「イベント時系列」(点過程データ)、すなわち、あるイベントが起きた時刻についてのデータに着目する。イベント時系列は、Twitter・YouTube などのオンライン上の行動履歴 (Web 情報学)、金融市場における注文履歴 (ファイナンス)、神経スパイク (脳科学)、地震 (地震学) など分野横断的にあらわれるデータ形式である。

ACT-I 研究期間 (2016 年 12 月～2018 年 3 月) では、1 つのイベント時系列を対象とし SNS やインターネットから得られるイベント時系列の予測技術を開発した。一方、本加速フェーズでは、複数のイベントから得られたイベント時系列 (多次元データ) へ対象を拡大させる。加速フェーズのねらいは、

① イベント間の因果関係を抽出する技術を開発する、

② 脳や社会から得られる実データに適用して開発技術の有効性を検証する、

の 2 点である。一連の研究で開発される技術は、これまであまり着目されてこなかったイベント時系列 のデータ活用を促進させ、科学・産業界に変革をもたらすことが期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究課題では、複数のイベント (複数の神経細胞のスパイク信号、複数のオンライン動画の閲覧履歴など) に関するイベント時系列データに着目し、以下の 2 つの研究テーマを進めた。

研究テーマ A「因果関係を推定する技術の開発」
研究テーマ B「高精度神経細胞モデルを推定する技術の開発」

以下、個々のテーマの概要について説明する。 研究テーマ A では、複数のイベント (複数の 神経細胞のスパイク信号、複数のオンライン動画の閲覧履歴など) に関するイベント時系列から イベント間の因果関係を推定する技術を開発した (図 1)。

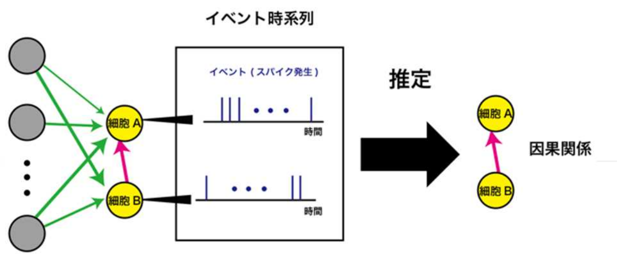


図 1: イベント間の因果関係をデータ(イベント時系列) から推定す

さらに、脳の大規模シミュレーションデータやラット海馬の実験データに適用し、開発技術が従来手法に比べてはるかに高い推定精度を有することを確認した。データ解析のプログラム (Python) は研究者が自由に使えるよう公開しており、Web アプリ (JavaScript) も提供している (主な研究成果リスト 5. (3): http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~shino/GLMCC/)。研究テーマ B では、イベント時系列 (神経スパイクデータ) から神経細胞の高精度シミュレーションモデルを得るための方法論を開発した。

(2) 詳細

上で紹介した 2 つの研究テーマの詳細を説明する。

研究テーマ A 「因果関係を推定する技術の開発」

脳の回路構造、すなわちニューロン (神経細胞) 間の電気的なつながり (シナプス結合) を知ることは、脳における情報処理・記憶・学習メカニズムの理解にとって極めて重要である。しかし、生きた動物のシナプス結合を直接計測することが非常に困難であるため、大規模な分析はされてこなかった。一方、近年の計測技術の進展によって数多くのニューロンが発生するスパイク信号を長時間にわたって記録できるようになり、それらの信号を分析すれば多数のニューロン間の電気的つながり を推定できることが期待されている。ニューロン A からニューロン B に正 (興奮性) の神経結合が あれば、ニューロン A が活動した後には B が活動する頻度が上がり、負 (抑制性) の神経結合があれば活動頻度が下がるので、活動頻度の変化を逆にたどることで神経結合を推定できるはずである。このような考え方は 50 年以上前から提案されていたが、神経信号にはニューロン間の結合による直接の影響だけでなく、観測されていない多数のニューロンを介した間接的な影響や外部信号の影響も加わっていて現象が複雑であり、信頼性のある推定をすることができなかった。

本研究では、多数のニューロンから計測されたスパイク時系列からニューロン間の神経結合を 高精度に推定するデータ解析技術を開発した (図 2: 主な研究成果リスト 5. (1) Kobayashi et al., Nature Communications 2019)。

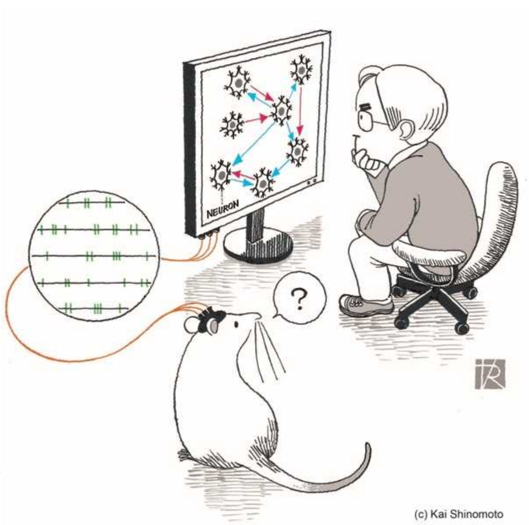
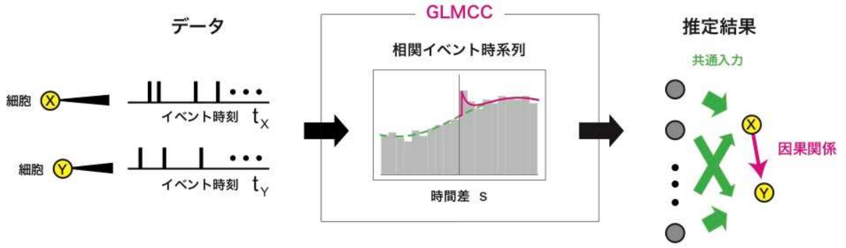


図 2: 研究テーマ A で開発した技術本研究では、神経スパイク信号から脳の回路図 (神経回路構造) を 推定する技術 GLMCC を開発した。神経スパイク信号は、神経細胞が スパイクを生成した時刻のデータ (緑) である。神経回路構造は、ニューロンがどのようにつながっているか (矢印) を示す。

具体的にはスパイク信号から相関イベント時系列（CC: Cross Correlation）を計算し、その後、一般化線形モデル（GLM: Generalized Linear Model）を適用して外部からの入力の 影響を消すことによりニューロン間の神経結合を抽出した（図 3A)。GLMCC（Generalized Linear Model for Cross Correlation）と名付けられたこの解析法は、シナプス結合の強さを シナプス膜電位の単位で推定できる。また、推定する膜電位に応じて必要な計測時間の 見積もりを与える公式も導出した。

A. 提案手法 GLMCC



B. シナプス結合の推定精度 (MCC: Matthews Correlation Coefficient)

推定手法		平均	興奮性	抑制性
既存手法	(Aertsen & Gerstein 1985)	0.41	0.24	0.59
最新手法	(Amarasingham et al., 2012)	0.46	0.33	0.58
提案手法: GLMCC		**0.70**	**0.61**	**0.78**

図 3: 因果関係を推定する技術 GLMCC の説明。

A. GLMCC の模式図。GLMCC では、まず 2 つのニューロンのスパイク時系列の相関イベント系列を計算する。次に、一般化線形モデル（GLM）を相関イベント系列に適用し、外部からの入力（緑）を取り除きながら、ニューロン間の因果関係(シナプス結合: マゼンタ）を抽出する。

B. 推定精度の比較。MCC は -1 から 1 までの値をとり、大きいほど性能が高いことを示

次に、シナプス結合の推定精度を評価するため、1,000 個のモデルニューロンからなる神経回路の シミュレーションを行った。シミュレーションデータを用いて検証した結果、提案手法は従来手法に 比べてはるかに高い推定精度（精度: 97%, MCC: 0.7）を有することを確認した（図 3B)。

最後にラットから計測された実験データに適用し、海馬のニューロン間の神経結合を推定した。神経細胞には、興奮性の結合だけを出力する興奮性細胞と抑制性の結合だけを出力する抑制性細胞がある。スパイク波形や神経活動の様子などから専門家が判定した興奮性･抑制性細胞と推定された興奮性･抑制性細胞は一致していることを確認した。また、ニューロン間の結合確率はこれまでの知見と整合している（結合確率は約 3%）ことを確認した。データ解析のプログラム（Python）は研究者が自由に使えるよう公開しており、Web アプリ

(JavaScript) も提供している (図 4)。本研究は、栗田 修平 (理研 AIP)、北野 勝則 (立命館大)、水関 健司 (大阪市立大)、Anno Kurth、Markus Diesmann (ユーリッヒ研究所、ドイツ)、Barry J. Richmond (NIH、 米国)、篠本 滋 (京都大) との国際共同研究であり、Web アプリは内藤 雅博、春名 純一 (京都大: ACT-I 予算で雇用した学生)、篠本 滋と共同で開発した。

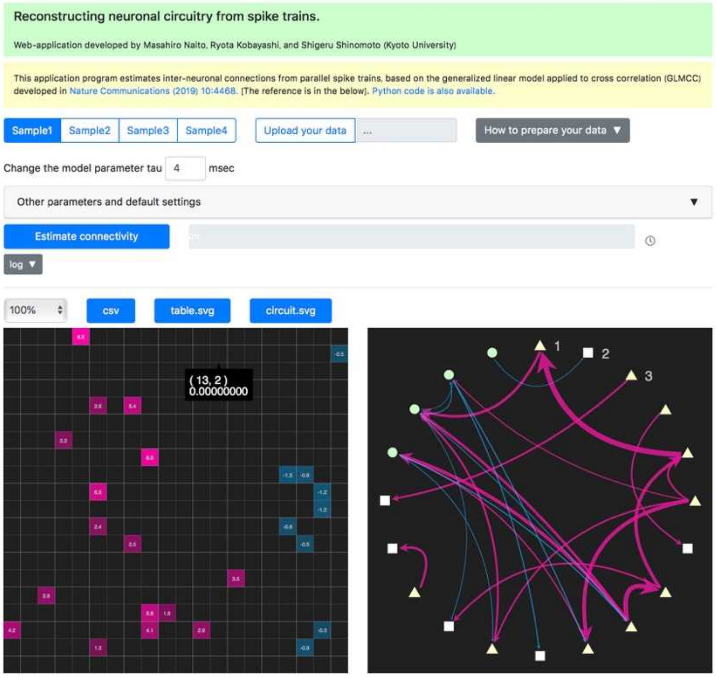


図 1：内藤 雅博、篠本 滋と共同で開発したシナプス結合を推定する Web アプリ
(http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~shino/GLMCC/)

研究テーマ B「高精度神経細胞モデルを推定する技術の開発」

このテーマでは、イベント時系列 (神経スパイクデータ) から神経細胞の高精度シミュレーション モデルを得るための方法論を開発した。まず、進化的戦略の探索アルゴリズムの 1 つである CMA-ES を用いることにより、神経細胞モデルのパラメータ探索効率を向上させた (主な研究成果リスト 5. (1) Han et al., ICASSP 2019)。本研究は、Han Xu、篠崎 隆宏 (東京工業大) との共同研究である。また、昆虫の嗅覚神経細胞に焦点を当て、神経スパイクデータを高精度に再現するシミュレーションモデルを得るための方法を開発した (主な研究成果リスト 5. (1) Levakova et al., Journal of the Royal Society Interface, 2019)。本研究は、Marie Levakova (コペンハーゲン大、デンマーク)、Lubomir Kostal (チェコ科学アカデミー、チェコ)、Christelle Monsempès、Philippe Lucas (INRA、フランス) との国際共同研究である。

3．　今後の展開

本研究で開発した GLMCC により、神経イベント時系列から脳の神経回路構造を高精度に推定　できるようになった。また得られた公式によって、研究者は、実験を行う前に推定に必要となる計測時間を見積もることができる。今後は、最新の計測技術によって、視覚野、運動野など様々な脳領野から多くの神経ビッグデータが得られるため、この解析法によって脳内の異なる機能領域における情報処理や　情報の流れの違いが明らかになり、脳科学の研究が大きく進展するだろう。

また、本研究で開発した技術は、脳科学だけでなく、Web データ (Twitter, Youtube のログデータ) や人々のコミュニケーション (メール、SMS、携帯電話の通話など) から得られたビッグデータの分析にも応用できる (Aoki et al., Phys Rev E, 2016)。 今後は、これらのデータに応用するための方法論の開発を　進めていき、炎上やデマ拡散などの社会問題が起こるメカニズムの理解を目指して研究を進めたい。

4．　自己評価

① 研究目的の達成状況

本研究の目的は、イベント間の因果関係を抽出する技術を開発し、実データに適用して開発技術の有効性を検証することであった。本研究では、イベント時系列から因果関係を推定するデータ解析技術である GLMCC を開発した。そして、この成果を論文発表 (Kobayashi et al., Nature Communications 2019) した。 このことから、研究目的は達成できたと考えている。また、時系列分析の専門知識がなくても気軽に使えるようにするために Web アプリ (http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~shino/GLMCC/) や Python コード (https://github.com/NII-Kobayashi) を開発して公開した。これらの反響も大きい ことから、研究当初のねらいであった「イベント時系列のデータ活用の促進」 についても達成できた。

② 研究の進め方

研究体制としては、研究者 (小林) が中心となって進めた。後述するように、本課題は非常に挑戦性が高かったので、篠本滋をはじめ、国内、米国、ドイツの共同研究者と密に議論を行いながら進めた。 また、Web アプリや Github の開発を進めるため、3 名の学生を雇用した。 研究費は、共同研究者との打ち合わせ旅費、学生の雇用、研究成果発表 (論文のオープンアクセス費、国際会議での発表) などに執行した。

③ 研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

主な研究成果を Nature Communications 誌で発表することができ (Kobayashi et al., 2019)、学術 (脳神経科学) に大きなインパクトを与えることができた。また、開発したイベント時系列の解析技術は Web・社会データ (Kobayashi & Lambiotte 2016) への展開も可能であるため、データサイエンスの基盤技術としても重要である。今後は、Web マーケティングや金融データ解析などへの波及効果も期待される。

④ 本研究の独創性・挑戦性

本課題の独創性は、これまであまり着目されてこなかったイベント時系列に着目し、イベント時系列から因果関係を絞り込む技術を開発した点にある。この例として、ニューロン間のシナプス結合の推定問題に取り組んだ。この問題は、脳科学で重要であり、50 年以上も前から研究がされてきた (Perkel et al., 1967) ものの、これまで信頼性のある推定ができなかった極めて挑戦性が高い課題であった。本研究　では一般化線形モデル (GLM) と相関イベント時系列解析 (Cross-Correlation) を融合させて GLMCC を新たに提案し、この問題を解決できることを示した。提案技術 GLMCC そのものも独創性が高いと考えている。

5.　主な研究成果リスト

(1) 論文（原著論文）発表

1. Kobayashi R, Kurita S, Kurth A, Kitano K, Mizuseki K, Diesmann M, Richmond BJ, & Shinomoto S. “Reconstructing Neuronal Circuitry from Parallel Spike Trains”, Nature Communications, 2019, vol. 10: 4468.
2. Levakova M, Kostal L, Monsempès C, Lucas P, Kobayashi R. “Adaptive integrate-and-fire model reproduces the dynamics of olfactory receptor neuron responses in moth” Journal of the Royal Society Interface, 2019, vol. 16: 20190246.
3. Han X, Shinozaki T, and Kobayashi R. “Effective and Stable Neuron Model Optimization Based on Aggregated CMA-ES”, 2019, ICASSP 2019:1264-1268.

(2) 特許出願

研究期間累積件数：0 件

(3) その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

主要な学会発表

1. [招待講演] 小林 亮太, 「イベント時系列モデリング: SNS データ分析や脳科学への応用」,　　ネットワーク科学セミナー2018, 2018.
2. Kobayashi R, Kurita S, Kitano K, Mizuseki K, Richmond BJ, & Shinomoto S, “Estimation of synaptic connections from parallel spike trains”, Neural Coding 2018, 2018.
3. Kobayashi R, Kurita S, Kitano K, Mizuseki K, Richmond BJ, & Shinomoto S, “Estimating Synaptic Connectivity from Parallel Spike Trains”, The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2018 (口頭発表に選ばれた: 10/71 = 14.1%).
4. [招待講演] 小林 亮太, 「イベント時系列解析とその応用」, 第 18 回情報科学技術フォーラム, 2019.
5. [招待講演] 小林 亮太, “Estimating synaptic connections from parallel spike trains”, 神経ダイナミクスミニワークショップ, 2019.

著作物

6. 小林 亮太, 岡本 洋, 山川 宏, 特集「物理学と AI」にあたって, 人工知能 33(4), 2018年
7. 小林 亮太, 木村 睦, 三宅 陽一郎, 市瀬 龍太郎, 特集「マテリアルズインフォマティクス」にあたって, 人工知能 34(3), 2019年
8. Kobayashi R, Kurita S, Kurth A, Kitano K, Mizuseki K, Diesmann M, Richmond BJ, & Shinomoto S. “Synthetic spike data generated by a network of 1,000 Hodgkin-Huxley type neurons”, figshare 2019.
9. Web アプリ: Masahiro Naito, Ryota Kobayashi, and Shigeru Shinomoto, “Reconstructing neuronal circuitry from spike trains.”, http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~shino/GLMCC/
10. 小林 亮太, “Universal AI”, AI 事典 第 3 版 (編集: 中島秀之, 浅田稔, 橋田浩一, 松原仁, 山川宏, 栗原聡, 松尾豊). (2019年12月).

プレスリリース

11. 神経信号からニューロンのつながりを推定-神経活動データから脳の回路図を描く-(2019年10月).

公開

(事後評価・研究者用)

研 究 報 告 書

「生体ライブイメージングにおける最適なデータ取得のための技術革新」

研究期間: 2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号: 50208
研 究 者: 曽我部 舞奈

1. 研究のねらい

顕微鏡を用いた生体組織解析は、生命科学や医学研究にとってなくてはならない存在である。その中でも二光子励起顕微鏡は組織透過性に優れ、固定して透明化する等の操作なしで、生きている状態のマウス内の組織や細胞を観察できる優れたツールであり、そして、二光子励起顕微鏡に求められていることは、生命現象を組織という構造がある中で、動きで捉えて可視化することで、その観察を正常組織の動態や、病態の解明につなげてきた。しかしながら、現段階では多くのリミテーションが存在するため、どのような状況、組織でも適応できる頑健性は持ち合わせていない。こういった制約を生んでいるライブイメージングの問題点としては、例えば計測機器自体のノイズ、光退色やレーザーによるダメージによるシグナルの喪失、データサイズの膨大化とそれに伴う解析処理の煩雑化等が存在している。

それだけではなく、生きた個体内の組織構造を捉える目的での生体内ライブイメージング特有の問題も存在する。ひとつ目の問題点は、呼吸や心拍による視野のブレや、素早い細胞動態撮像時のモーションブラーの影響による取得データの不鮮明化、2つ目は、細胞のダイナミックな動きに対して、従来撮像で得られる視野が狭すぎることである。そこで本研究では、これらの問題に対して、ハードウェアおよびソフトウェア的なアプローチの両者を融合させ、実際の生体イメージング環境で技術開発、検証を行い、より実用性の高いイメージングを実現することを目指した。 これらの技術により、高速で動く物体やダイナミックな細胞動態を捉えることが可能になり、これまで組織の特性によって制限されてきた生体内ライブイメージングの応用可能性が広がり、正常組織の動態や、病態の解明につながることが期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

個体を用いたライブイメージング特有の問題として、呼吸や心拍のような制御できない動きが存在しており、この結果、生体内の組織動態情報を鮮明に得ることは難しかった。そこで、本研究では、顕微鏡を使うユーザー側では制御できない撮像対象の動きの影響を少なくした高速イメージングの実現し、撮像ターゲットの幅を広げることを目標とした。これにより、血流のような動きの速い、なおかつ制御できない動きの影響を受けやすい組織においても、従来に比べ細胞ひとつひとつの形態が明瞭なイメージングが可能となった。

続いて、また、二光子励起顕微鏡の利点である、深さ方向の情報取得能の高さが挙げられるが、撮像対象の動きが広範にわたる再生時の組織動態イメージング等では、深さだけでなく、視野に捉えた細胞の情報を平面方向に追跡し取得し続け、広範囲に情報を取得する

必要がある。しかし、広視野を観察するためには、時間がかかり、さらにデータ量も膨大化する。そのままでは、再び時間分解能が犠牲になる撮像しかできない。イメージングの際は、細胞の存在しない領域を撮像するメリットはないため、細胞のいる領域だけを選択して撮像すれば、時間とデータ量を削減することができる。そこで、細胞や組織構造同士のつながりの情報を取得するために十分な撮像空間を設定する多点イメージングの最適化技術の開発に取り組み、筋組織における再生像の観測において、開発手法の有用性を示した。

（2）詳細

研究テーマ A「生体の動きにロバストなイメージングの実現」

生体イメージングを行い、細胞や組織動態情報を十分に得るために重要となるファクターは、時間解像度と空間解像度、そして、撮像領域の広さである。

本フェーズにおいて、画像のスパース性を用いた画像再構成手法を提案し、筋組織において一定の画質改善効果があることを示した。

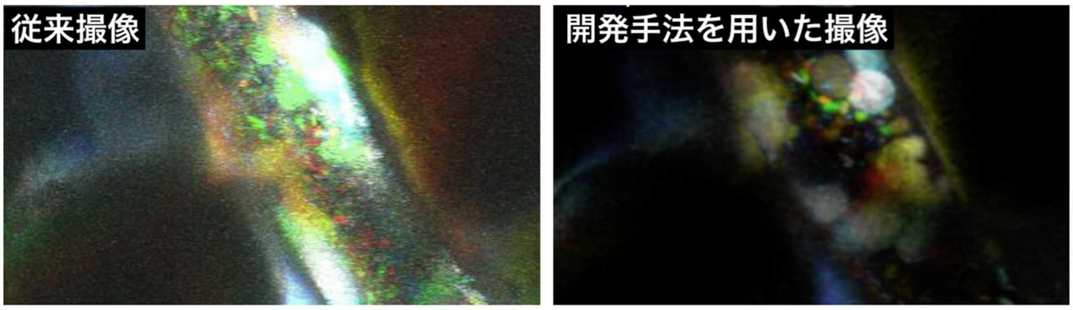


図 1 開発手法を用いて撮像したマウス血管内像: Depth coding と呼ばれる疑似カラーを用いて深度情報を表示 している(表層に近い部分が青色、深層部に行くに従い、緑→黄→赤と変化する)。 高速撮像によりモーションブラーや生体の動きによるブレを軽減した撮像が可能となった。

しかし、これまでの画像再構成手法では、正解画像があることを前提としてきたため、他組織への汎用性は低いことが問題であった。さらに血管等のイメージングを行った際、前述した生体の持つ制御できない動きによる視野のブレ、そして血管内を高速で流れる細胞を捉えるには不十分な時間解像度など、様々な問題が判明した。そこで加速フェーズにおいては、サンプルの撮像位置を制御するステージの開発、および高速撮像手法の開発を行い、画像のスパース性を用いた再構成手法と組み合わせることにより、これまで撮像が難しいとされてきた血管動態のイメージングを実現した(図 1)。

また、再構成時、パラメータ設定時に既知の形態を持つ蛍光ビーズと、非参照画像評価手法(naturalness image quality evaluator)を用いることで、これまで問題となっていた正解画像の取得が難しい組織等でのイメージング時にも本手法を適応可能となった。実際に開発した装置、プログラムを用いて様々な組織でイメージングを行なった結果、従来のイメージングと比較して良好な画質改善効果が認められ、本手法の汎用性・頑健性を示すことができた(図 2)。

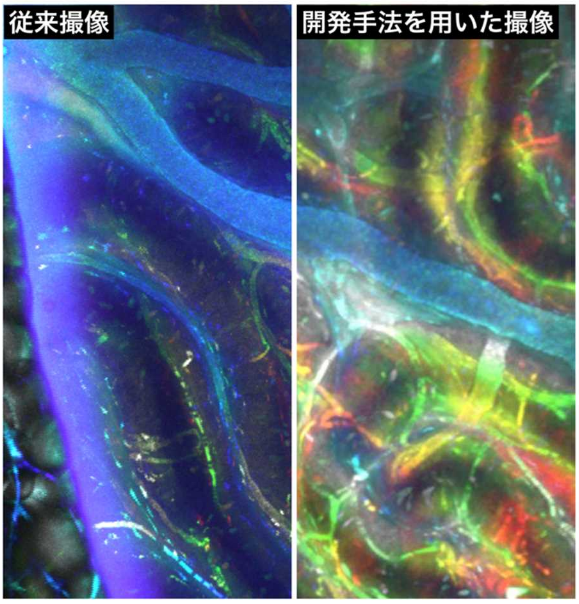


図 2 開発手法を用いて撮像したマウス血管組織全体像: 空間解像度が増加し、ノイズが軽減するため、より鮮明な画像取得が可能になった。

研究テーマ B「広範な生命動態解明のための自動多点イメージングの実現」

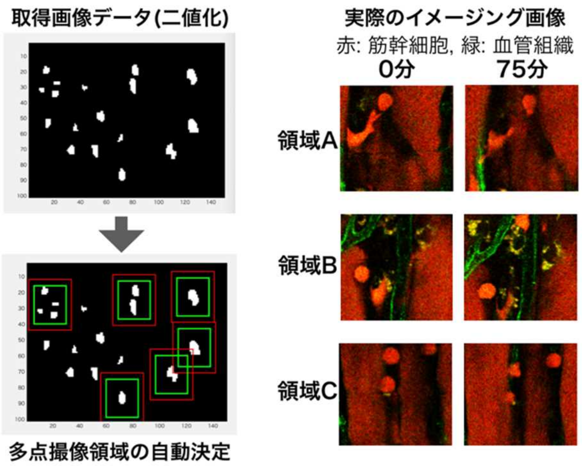


図 3 多点イメージングの実際
左図は多点決定のイメージ。右図は各多点領域におけるイメージング開始 0 分後と 75 分後の画像。

頑健生の高い画像再構成、取得手法が完成したことで、より広い空間の撮像に、撮像リソースを利用することが可能になった。しかしながら、すべての空間を詳細に撮像することは、時間解像度の低下を引き起こすため、時間解像度とのバランスをとった状態で、広範な撮像を実現することが望ましい。そこで、蛍光シグナルの存在密度を元に撮像の重要度を算出し、そのデータを元に、どこで撮影を行えば、少ない回数の撮影で広範な組織の生命現象を正確に網羅できるかを設定し、開発したサンプルの撮像位置を制御するステージにて撮像を行なった。 撮像対象としては、比較的動きの小さい、筋再生初期の筋幹細胞をターゲットとした。その結果、実際の生体イメージング下において自動での多点設定及び継続的なイメージングを実現し (図 3)、本手法を用いて、3D で動き回る細胞を対象にしたイメージング制御機構の有用性を示すことができた。

3. 今後の展開

本手法のリミテーションとしては、前提条件として生体画像中のシグナルがスパースであることを利用としているため、画像全体にシグナルが存在している組織、例えば細胞質内に EGFP を発現するマウスの子宮平滑筋等では、シグナルが均一に発現し、密度が高いため、その効果が得られにくく、通常の bicubic 等のフィルター処理を用いた画像処理を行った方が良いケースもある。この点に関しては、再構成時のパラメータ調整に用いるビーズ濃度や大きさ等を検討することで、改善が可能であり、それらを最適化する手法も今後必要になると考えられる。

また、正解画像がない条件での生体画像の評価、という部分はまだ未開の領域であり、より良いパラメータ設定のために正解画像がない条件での生体画像の評価手法の改善は、今後の生体　画像に対する画像処理アプローチに重要になると考えられ、評価プラットフォームの整備も今後開発する必要がある。

また、生物学分野における今後の展開としては、本手法を用いて、筋再生のイメージングから得た情報を生命現象解明へ役立て、本手法の適用モデルを示すとともに、他組織への拡張性という点について、角膜や、皮膚の病態イメージング等、他の生命動態を通して、それぞれのイメージングに適したパラメータ設定を自動で行うための、統合的な環境を構築する必要があると考えられる。

4. 自己評価

本研究では、生体内ライブイメージングが抱える様々な問題を解決するひとつの手法を提案した。その結果、深さ方向の情報を保持したまま、細胞ひとつひとつの観測が可能な血流動態イメージングを実現することが可能となった。さらに様々なニーズに合わせたイメージングができることを実証するため、実際の筋組織やリンパ管組織、脂肪組織や角膜、生殖器等を用いてイメージングを行うことで、本手法の頑健生を示すことができ、これにより、より多くの生体イメージングユーザーに有益な手法であることを示すことができたと考える。

今後はこれらの技術を幅広い生命科学研究者へ提供できるプラットフォームを作るとともに、本研究を応用することで生体の制御できない動きやダイナミックな変化に対応する必要性のある他の生体･医療イメージング分野へ応用し、生体計測分野の発展を目指す。

研究体制としては、研究者が単独でプログラムの実装からマウスを用いた生体イメージング等の全ての作業を担当した。研究経費は主に二光子励起顕微鏡の維持･稼働費および GPU 搭載演算 PC の購入に充当し、顕微鏡から取得した生体画像情報の処理を行なった。

研究成果については、バイオフォトニクス分野での論文発表に加えて、情報学、生物学分野の学会における招待講演、および企業関係者に向けた講演会等で発表するとともに、京都大学アカデミックデイにおいては、一般の来場者や小･中学生に対して、最先端の生体イメージング技術について発表を行った。これらの活動は、生命科学･医学研究における情報科学技術の活用促進に貢献できたものと考えている。

5．　主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

1. Sogabe M, Ohzeki M, Fujimoto K, Sehara-Fujisawa A, Nishimura S. "Restored interlaced volumetric imaging increases image quality and scanning speed during intravital imaging in living mice". Journal of Biophotonics, 2020.

（2）特許出願

研究期間累積件数：0 件

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

1. 「スパースモデリングを用いた生体・医療イメージング画像処理の実際」曽我部舞奈. 医療と介護の総合展 メディカルジャパン, 大阪 (2019)
2. 「もの言わぬ動物たちのための計測」 曽我部舞奈. システム制御情報学会講演会, 大阪 (2019)
3. "Improving under-Sampled Imaging Data Quality in Live Tissue Imaging". Sogabe M, Ohzeki M, Sehara-Fujisawa A. Focus on microscopy, London (2019).
4. 京都大学アカデミックデイ「細胞たちのホームムービー撮影係」京都 (2019)

公開

(事後評価･研究者用)

研　究　報　告　書

「プロジェクタ･カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法」

研究期間：2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号：５０２０９
研 究 者：千葉　直也

1．　研究のねらい

産業ロボットの実応用が本格的に進むにつれて，様々な物体を汎用的なシステムでハンドリングする需要が高まっている．特にばら積みピッキングなどの問題設定では，産業ロボットが正確に物体をハンドリングするためにはシーンの三次元形状を正確に認識することが必要である．これまでも様々な三次元計測法が提案されており，特に計測対象の表面テクスチャによらず計測できるため，プロジェクタ･カメラシステムを用いたアクティブステレオ法が広く普及している．一方，既存のアクティブステレオ法では複雑な光学特性を有する物体（例えば金属物体や半透明物体）については精度良く計測することが難しいという課題があった．

ACT-I 研究課題「プロジェクタ･カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法」において，輝度伝達行列（Light Transport Matrix, 以下 LTM）の高速･ロバストなスパース推定というアプローチにより，プロジェクタ･カメラシステムによる金属物体･半透明物体を含むシーンをも精度良く計測できる三次元計測法を実現した．具体的成果として，スパース推定を用いた LTM の推定による三次元計測が原理的に可能であることを示し，行分解 LTM 推定，多段解像度 LTM 推定を提案することで現実的な時間（数分程度）で実用できる解像度（256x256 のプロジェクタ･カメラ解像度程度）の三次元形状計測を可能とした．また，主に金属物体の計測時に生じる白飛びに対応したスパース推定法を提案し，金属物体についてロバストな三次元形状計測が可能となった．

加速フェーズでは，LTM の三次元形状計測以外への応用，及び計測システムとしての完成･性能向上を軸として，ACT-I 期間の研究成果をさらに発展させることを目指した．これらの達成のため，A) 反射強度･表面下散乱による材質セグメンテーション，B) ロボットとの統合によるピッキング実証，C) LTM 推定･三次元計測の高速化，D) 反射強度に応じたロバストな計測を具体的目標として設定した．

2．　研究成果

（1）概要

ACT-I 研究期間において，LTM のスパース推定による三次元計測法に関して研究を進め，LTM スパース推定の高速化（行分解 LTM 推定と多段解像度 LTM 推定）及びロバスト化（白飛び対応スパース推定）に関する成果を得た[1, 3, 5, 6]．加速フェーズではこれらを発展させ，LTM 推定の高速化手法（研究テーマ C「LTM 推定･三次元計測の高速化」）と黒つぶれに対するロバスト化（研究テーマ D「反射強度に応じたロバストな計測」）を実現した．

LTM 推定の三次元計測以外への応用として，研究テーマ A「反射強度･表面下散乱による材質セグメンテーション」にも取り組んだ．これは LTM から得られた反射特性（一画素照射応

答）によるクラスタリングを用いた材質セグメンテーションであり，オンラインの計測データのみから材質の違いを推定しセグメンテーションを行う．このために必要な光線方向・表面形状を利用した補正手法を開発し，実際に材質セグメンテーションができることを示した．

三次元計測結果の実応用として，研究テーマ B「ロボットとの統合によるピッキング実証」に取り組んだ [2, 7, 8]．これは研究提案時に応用例として想定していたアプリケーションである．既存手法では計測が困難な金属物体をばら積みしたシーンを設定し，開発した三次元計測法と既存の物体認識・位置姿勢推定手法を組み合わせてピッキングアプリケーションを実現した．

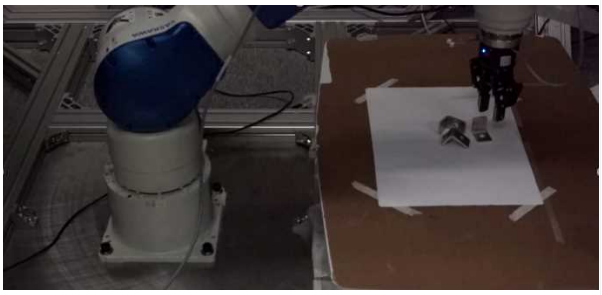
研究テーマ B で得られた知見として，LTM スパース推定による三次元計測手法は計算時間が光学系の解像度に大きく依存するため，密度の小さい三次元点群を処理する手法が実現すれば非常に相性が良いと予想できる．したがって，まずは物体認識・位置姿勢推定について点群密度の小さい場合にもうまく推定できる手法の開発を進めた．本研究期間中に急速に発展した点群深層学習と呼ばれるアプローチに着目し，学習ベースでの物体認識・位置姿勢推定手法を提案，三次元計測法と組み合わせてピッキングの高速化を実現した．

（2）詳細

研究テーマ A「反射強度・表面下散乱による材質セグメンテーション」

LTM 推定による三次元計測法では LTM が一画素照射応答を結合した行列であることに着目し，LTM の取得によって一画素照射応答を得てからエピポーラ幾何を用いたマスクを行うことで直接反射成分を分離，光の反射が生じた三次元点を復元する．しかし，一画素照射応答は直接反射成分のみならず，他の情報（反射強度や表面下散乱の広がり）を含んでいるため，これらを利用することを目標とした．このために必要な光線・表面の方向による補正手法を開発し，例として濃度の異なる牛乳と水を混ぜ合わせた液体を見分けられることを示した．

研究テーマ B「ロボットとの統合によるピッキング実証」



LTM スパース推定による三次元計測手法を実際の産業ロボットと統合し，ばら積みピッキングの実装を行った．はじめに既存手法の一つである PPF Plus（Li ら，ICPR, 2018）を物体認識・位置姿勢推定手法として統合し，実際にロボットを用いた金属物体のピッキングを行った [4, 7, 8]．このとき，物体認識・位置姿勢推定手法が要求する点群密度の制約から，プロジェクタ・カメラシステムを 256x256 の解像度として計測し，全体として 1 分程度のタクトタイムでのピッキングを達成した．LTM スパース推定の場合，解像度を下げることで計算コストを大幅に下げる

ことができるため，少ない計測点数（低い点群密度）から物体認識・位置姿勢推定できることが望ましいことがわかった．したがって，近年急速に発展した点群深層学習のアプローチによる物体認識・位置姿勢推定手法を提案，128x128 の解像度のプロジェクタ・カメラシステムを用いて，タクトタイム 30 秒程度で金属物体のピッキングを実現した．伴って，点群深層学習に関する文献調査と和文資料の作成・公開を行った [9, 10].

研究テーマ C「LTM 推定・三次元計測の高速化」

ACT-I 研究期間中に行分解 LTM 推定と多段解像度 LTM 推定の各手法を提案し，LTM のスパース推定の高速化を実現した [1, 3]．ここまでで 256x256 の解像度の LTM を 6 分程度で推定できる手法となっている．加速フェーズではここからさらに Sherman -Morrison-Woodbury 公式（SMW 公式）の利用（特に後述の白飛び対応スパース推定法，白飛び・黒つぶれ同時対応スパース推定法の設定においても利用できることを示した） [8] と複数行同時推定の導入 [8]，実装の見直しによって 23 秒程度で 256x256 の解像度の LTM 推定が実現した.

研究テーマ D「反射強度に応じたロバストな計測」

ACT-I 研究期間中に，白飛びに対応した LTM のスパース推定を実現した [4, 6]． 加速フェーズでは白飛びに加えて黒つぶれにも対応したスパース推定手法を提案し，この手法で金属物体（白飛びが顕著に生じる）と暗色半透明物体（黒つぶれが顕著に生じる）が混合した計測シーンについても精度良く三次元形状を計測できた.

3． 今後の展開

金属物体や半透明物体の三次元形状計測は未だ重要な課題であると認識されており，本研究成果を応用した製品が実現すれば産業用ロボットビジョンシステムとして一定の価値があると予想できる．また，2020 年以降，ACT-I 研究での成果を更に発展させた研究成果（Ralašić ら，IEEE Access，2020）や，深層学習と Light Transport を組み合わせた手法（Huang ら，arXiv:2003.03040, 2020）などが提案されており，加速フェーズでの成果についても今後学術的な波及効果が現れると期待される．さらに点群深層学習の調査・資料公開を通じて，国内での点群処理と深層学習を組み合わせた研究の発展に貢献できたと考えている．今後も引き続き点群深層学習に関する研究を継続し，国際的に評価される成果・似たデータを扱う他分野への波及効果を得ることを目指す.

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初の研究目標であった「LTM の三次元形状計測以外への応用」「計測システムとしての完成・性能向上」については，上記研究成果で示した通りの成果を得ることができた．また，ばら積みピッキングのために必要な物体認識・位置姿勢推定手法の研究を進め，点群深層学習を用いた手法の提案に至った．このアプローチはLTM推定による三次元計測法と特に相性の良いと考えられるため，最終的な目標の一つである「高速で汎用的なばら積みピッキングシステムの実現」に向けた重要な成果であると考えている．一方，学術的意義の低さから，高速プロジェクタ・カメラシステムと産業ロボットの統合は優先しなかったため，ACT-I 加速フェーズ研究期間中に高速なばら積みピッキングシステムを実現できなかった．

・研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

概ね研究計画通り実施した．ただし，研究計画時点よりも物体認識・位置姿勢推定に関する研究を重点的に進めた．これは研究期間中に点群深層学習を用いたアプローチがコンピュータビジョン分野で急速に発展したため，それらの成果を ACT-I 研究にも応用することを目指したためである．

研究経費についてはおおよそ計画通りに執行することができ，購入した機器も有効に活用できた．特に産業ロボットを実際に用いた実験を行うことができたのはロボットビジョンのための計測法の評価として有意義であった．

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

本研究提案は産業応用を見据えた三次元計測手法の開発を目標としており，これまでにある程度実用レベルの計算時間・解像度を達成している．将来的には実際にロボットビジョンシステムとして応用されることを期待する．また，学術的にも「3. 今後の展開」で述べたような波及効果が得られており，今後も広がることを期待している．同時に，点群深層学習に関する講演などの機会を多く頂いており，特に自動運転などの三次元点群処理の分野に貢献できたと考えている．こちらについては引き続き研究を進めたいと考えている．

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究提案は金属物体や半透明物体の三次元形状計測という挑戦的な課題の解決を目指すものであったが，ACT-I 研究期間と加速フェーズでの研究期間を通して実用的な手法を提案することができたと評価している．さらにロボットビジョンとして統合するにあたり三次元点群処理との融合を目指したため，挑戦的な課題（点群深層学習による物体認識・位置姿勢推定）を見出すことができた．

5．　主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

[1] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Homogeneous light transport matrix estimation based 3D shape measurement. International Journal of Mechatronics and Automation （IJMA), 2018, Vol. 6, No. 2/3, pp.63-70.
[2] 福地伸晃, 千葉直也, 橋本浩一. CAD モデルを用いないばら積みシーンからの物体検出. 日本ロボット学会誌, 2018, Vol. 36, No. 5, pp. 368-375, 2018.
[3] 千葉直也, 橋本浩一. LT 行列行分解推定による三次元計測. 計測自動制御学会論文集, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 294-304, 2019.
[4] 千葉直也, 橋本浩一. LTM スパース推定による三次元計測の白飛び対応とばら積みピッキングロボットへの応用. 精密工学学会誌, 2020, Vol. 86, No. 1, pp106-112, 2020.

（2）特許出願

研究期間累積件数：0 件

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

[5] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Ultra-Fast Multi-Scale Shape Estimation of Light Transport Matrix for Complex Light Reflection Objects. The 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2018), 2018.

[6] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Sparse Estimation of Light Transport Matrix under Saturated Condition. The 29th British Machine Vision Conference (BMVC2018), 2018.

[7] Naoya Chiba, Mingyu Li, Akira Imakura, Koichi Hashimoto. Bin-picking of Randomly Piled Shiny Industrial Objects Using Light Transport Matrix Estimation. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2019).

[8] Naoya Chiba, Akira Imakura, Koichi Hashimoto. Fast ADMM L1 minimization by applying SMW formula and multi-row simultaneous estimation for Light Transport Matrix acquisition. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2019).

[9] （招待講演）千葉直也. 点群深層学習の研究動向. 第 25 回 画像センシングシンポジウム (SSII2019), 企画セッション「画像センシングの最先端」講演 2, 2019.

[10] 千葉直也, 戸田幸宏. 三次元点群を取り扱うニューラルネットワークのサーベイ Ver. 2. 2019.

研 究 報 告 書

「型による成形のためのコネクタ形状を考慮したボリューム分割」

研究期間： 2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号： 50210
研 究 者： 中島 一崇

1. 研究のねらい

実際のものづくり、特に大量生産においては、型を利用した射出成形が利用されている。しかし、型の設計においてはアンダーカットと呼ばれる三次元的な特徴が存在しないことを保証する必要があるなど、種々の制約がある。このような制約により、専門的な経験のないユーザが型の設計を行うことは非常に難しいというのが実情であった。そこで、私は ACT-I 研究として、対象形状を型で複製するための、型の設計を支援するインタラクティブな手法についての研究を行っていた。本加速フェーズでは、その研究を更に発展させ、実社会に一層適応した手法を対象として研究を行った。

また、ACT-I 研究では上述の型の設計支援と並行して、石膏を始めとした粉末を利用する 3D プリンタにおける粉末マテリアルの排出口位置の最適化についても研究を行っていた。粉末を利用する 3D プリントでは、3D プリントにかかる材料費を削減する目的で、対象形状の内部をくり抜くというテクニックが一般的に用いられる。しかし、その際、内部空洞に残留してしまう粉末マテリアルを回収する必要が生じる。そのため、排出口を配置する必要があるが、その位置はユーザの勘で決められており、排出性能については何も保証がされていないというのが現状であった。ACT-I 研究として行っていた研究は、コンピュータグラフィクス技術を背景として排出性能を推定し、その保証をすることを目的としていた。本加速フェーズでは、この研究を発展させ、より一層精度の向上などを目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

研究テーマ A「型による成形のためのコネクタ形状を考慮したボリューム分割」

本研究は ACT-I 研究として従事していた研究のさらなる発展である。ACT-I 研究では対象形状を薄い殻形状として、内部をくり抜いた形で複製するための型の設計を支援する技術について研究を行ってきた。しかし、このようにプラモデルのように複製をするということは現実での適用範囲が制限されてしまう。そこで、ACT-I 加速フェーズでは、内部をくり抜くのではなく、中身が詰まった状態での分割を考えることとした。このような分割は実社会でも幅広く利用されており、より幅広い影響を与えることにできる研究になると期待できる。

また、ACT-I 研究では分割された各パーツの間にコネクタ形状などはなく、それぞれを糊付けすることで組み立てを行っていたが、ACT-I 加速フェーズの本研究では、分割された各パーツの間に適切なコネクタ形状を生成することで、最終的な造形物の組み立てを容易なものとすることを目指した。この際、新たに生成したコネクタ形状が型による複製可能性を阻害しないことを担保する必要が生じる。

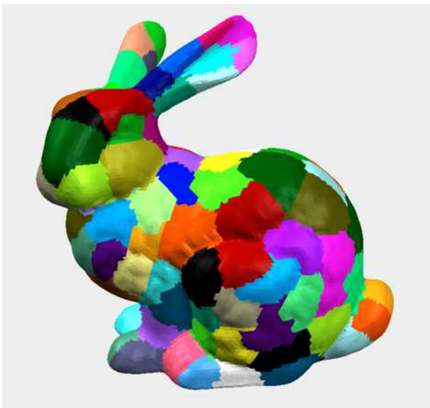
研究テーマ B「SLS/粉末を利用するプリンタにおける排出口位置の最適化」

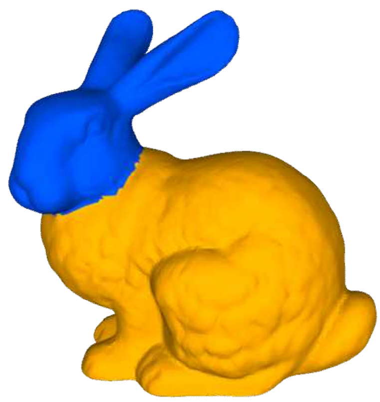
こちらの研究も、ACT-I 研究として従事していた研究のさらなる発展である。ACT-I 研究の段階では、コンピュータグラフィクス分野、特にレンダリングの分野で利用されるラジオシティ法のアイディアを活用し、本来複雑で非常に長い計算時間が必要となる粉体の振る舞いを近似することで高速化するというアプローチを取っていた。このアプローチでも一定の精度は得られたものの、特定のケースでは排出性能の近似精度が大幅に低下するという問題も見つかった。そこで ACT-I 加速フェーズの本研究では、粉体が本来持つ、体積に着目をして、粉が降り積もるような振る舞いを考慮することで計算精度を高めることを行った。

（2）詳細

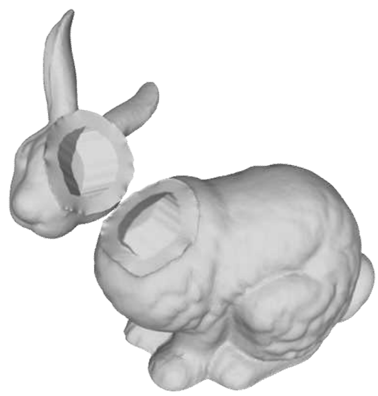
研究テーマ A「型による成形のためのコネクタ形状を考慮したボリューム分割」

加速フェーズの研究で取り組んだ問題のうち、解くべき問題は大きく 2 つに分ける事ができた。具体的には、(1)対象形状を”意味のある”パーツに分割する, (2)分割された各パーツの間に、型による造形可能性を阻害しないコネクタ形状を生成する の 2 つである。以下、それぞれについて詳細に説明をする。また、型による造形可能性の判定については、ACT-I 研究として行ったものの大部分を再利用できたため、加速フェーズでもそのプログラム資産を再利用した。(1)のパーツ分割部分については、実社会での利用を想定すると、機能的･審美的に意味のある分割をする必要があるという要請に基づくものである。こちらについては、コンピュータグラフィクス、特に三次元形状解析の分野でセマンティックセグメンテーションと呼ばれる研究分野として確立している。そこで、本研究では既存のセマンティックセグメンテーションアルゴリズムを複数実装し、テストを行った。その結果、Approximate convex decomposition と呼ばれるアルゴリズム(の一部)を利用し、対象形状を複数のパッチに分割し、そのパッチを適宜統合していくという手順で処理をすることとした。





その後、分割されたパーツの間に、それぞれのパーツ(図中青色と黄色)の造形方向(造形時に型が動く方向･パーティングディレクション)を考慮した上でそれぞれのパーツの型による造形可能性を阻害しないコネクタ形状を生成し、配置する。コネクタ形状はプラモデルのスナップフィット(押し込むだけでカチッと嵌って固定できるタイプのコネクタ)など様々なものが考えられるが、スナップフィットのようなコネクタは非常に高い造形精度



が必要となるため、今回は一般的なフィギュアなどで採用されている、位置合わせのためのコネクタを採用することとした。このようなコネクタは、隣り合うパーツを固定するという機能はほとんど無いが、接着剤等で固定をする際に位置合わせのガイドとして働く。

研究テーマ B「SLS/粉末を利用するプリンタにおける排出口位置の最適化」
　こちらの研究については、ACT-I 研究として構想していた、ラジオシティ法のアイディアをベースとした排出性能の近似について実際に石膏粉を利用した実験から始めた。

この実験の結果、特定のケース(写真右上のドラゴン)で誤差が大きくなってしまうということが判明した。実験の際に半透明のマテリアルでシェル形状をプリントしていたため、内部の粉の振る舞いを観察することができ、その結果、提案手法内で粉末が積み重なっている振る舞いを無視してしまっていることが大きな誤差を生んでいるということがわかった。
　そこで、加速フェーズでのさらなる発展として、ACT-I 研究での提案手法を拡張する形で、粉体の体積を考慮することとした。具体的には、ラジオシティ法のアイディアを直接利用しているACT-I 研究では、対象形状の内部空砲のサーフェスだけを利用して計算していた一方、加速フェーズの研究では、内部空洞の空間そのものと、その空間の大きさを考慮して計算することとしている。
　研究リソースの多くを型の研究に割り振ってしまっていたことと、実際の石膏粉を利用した実験が当初の想定よりも遥かに大変なものであったため、こちらの研究については体積を考慮したアルゴリズムを設計し、そのプログラムを組み始めた段階である。

3.　今後の展開

加速フェーズにおける 2 年間の研究の結果、研究提案時点の未来ビジョンの実現に大きく近づいたと実感している。この 2 年間の間に、個人的に、多くのプロの 3D 造形アーティストの方と知り合う機会に恵まれ、研究の紹介などを行ったが、型での複製、特に、この加速フェーズで行っていた中身の詰まった状態での分割及び、コネクタ形状の生成などは実社会でのニーズも非常に強く、この研究の産業的、社会的インパクトの大きさを再認識することができた。残念ながら現段階では外部発表まで達成することはできていないが、できる限り早く、研究内容を論文としてまとめ、広く発表することを考えている。

4.　自己評価

研究目的の達成状況としては、提案当初のコアとなる問題については解決方法を見つけることができたと確信しており、満足している。しかし、論文としてまとめ、発表するために必要なその他(相対的に)小さな問題については完璧に解決できているとは言い難く、論文発表に結びつかなかった点は至らなかった点だと思う。

また、研究の進め方についても、私自身の博士論文執筆と期間が重複してしまったこともあり、100%満足の行くものではなかった。また、当初の予算計画では研究が順調に進んだ際に必要となる額を申請していたため、最終的に執行した額との間に差が生じてしまった。研究計画をよりこまめに見直し、適宜、方針変更するというような柔軟性が必要だったと思う。その点は今後の自身の課題と考えている。

研究成果と、その内容については、上述の「今後の展開」で詳述したとおり、実際に専門的にファブリケーションをしている造形アーティストの方々との意見交換などから、この研究が産業的、社会的に非常に大きなインパクトを有していると確信している。この潜在的なインパクトを現実のものとするためにも、可能な限り早急にこの研究を仕上げ、広く公開することが必要だと考えている。

5．　主な研究成果リスト

（1）論文（原著論文）発表

1. Kazutaka Nakashima, Thomas Auzinger, Emmanuel Iarussi, Ran Zhang, Takeo Igarashi, and Bernd Bickel. 2018. CoreCavity: interactive shell decomposition for fabrication with two-piece rigid molds. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 135 (July 2018), 13 pages. DOI:https://doi.org/10.1145/3197517.3201341

（2）特許出願

研究期間累積件数：1 件

1.

発　明　者：BICKEL, Bernd; AUZINGER, Thomas; NAKASHIMA, Kazutaka; IGARASHI, Takeo

発明の名称　：METHOD FOR COMPUTATIONALLY DESIGNING A RE-USABLE TWO-PIECED MOLD

出　願　人：INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY AUSTRIA

出　願　日：2019/06/21

出 願 番 号：PCT/AT2019/060205

備　考　　　：https://patentscope2.wipo.int/search/ja/detail.jsf?docId=WO2019241818

（3）その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）：無し

研　究　報　告　書

「大量ストリームデータのリアルタイム処理に向けた柔軟なアーキテクチャ探索と設計環境構築」

研究期間：　2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号：　５０２１１
研　究　者：　原　祐子

1．　研究のねらい

近年、Internet of Things (IoT)デバイスが急速に普及し、多くのデバイスがネットワークに接続されることで、膨大なデータがクラウド上のコンピュータで処理されている。このようなクラウドコンピューティングでは、IoT デバイスやデータ量が増えるにつれネットワーク帯域を切迫し、IoT エッジデバイスへの応答遅延が重大な問題を引き起こす。特に、ヘルスケアやファクトリーオートメーション（FA）における異常検出などにおいては、リアルタイム性は重要な要求である。この解決する方法として、エッジサーバやエッジデバイス上におけるコンピューティング技術、すなわちエッジコンピューティングに適したアーキテクチャ設計技術の確立が喫緊の課題である。

エッジコンピューティング向けアーキテクチャ設計には、リアルタイム性のほかにも、生産・管理コスト軽減のため小規模（小回路面積）かつ省エネルギー（バッテリ長寿命）であること、サービス（アプリケーション、アルゴリズム）の多様化・頻繁な仕様変更を見越した柔軟性（高い再利用性）を持つこと、などの要求が挙げられる。さらに、アーキテクチャ開発だけでなく、実用化、更なる研究促進、新たな技術・課題創出のために、考案したアーキテクチャとそのハードウェア・ソフトウェアの自動設計環境も含めた研究開発が必要不可欠である。

以上の要求を鑑みて、今後の IoT エッジコンピューティングの普及と IoT のセンシングデータの多くはストリームデータであることを踏まえ、本研究は「大量ストリームデータを効率的・柔軟に処理する省エネルギーなアーキテクチャとその設計環境」の構築に取り組む。本研究では、主に軽量演算から成るアプリケーションドメインを対象とした、新たな IoT エッジコンピューティング向けドメインスペシフィックアーキテクチャを提案する。大規模・複雑化し続けている組込みプロセッサの傾向とは逆転の発想に基づき、計算資源を極限まで削減した超小型プロセッサコアを用いたマルチコアプロセッサを実現し、ターゲットアプリケーションに応じて「設計柔軟性・リアルタイム性・省エネルギー」という 3 点の設計要求を全て満足させる。これにより、今後の IoT 社会の課題や在り方を見据えた本課題の一連の研究成果により、アーキテクチャだけでなく、サービス（アプリケーション）やセンサ技術等の周辺技術の研究開発も活性化し、今後の日本の情報社会の発展・成長に繋げることを狙う。

2．　研究成果

（1）概要
複数の演算器やプロセッサコアを利用してリアルタイム処理（高スループット処理）を実現する計算機システムとして、ベクトルプロセッサや高性能マルチコア（メニーコア）プロセッサなど

が数多く研究されてきた。しかし、各演算器やプロセッサコアの機能が過剰であるため、バッテリ容量によるエネルギー制約が厳しく、かつ、常時稼働することを要求されるヘルスケアやファクトリーオートメーションの異常検出を行う IoT デバイスには、既存のプロセッサは使用できない。

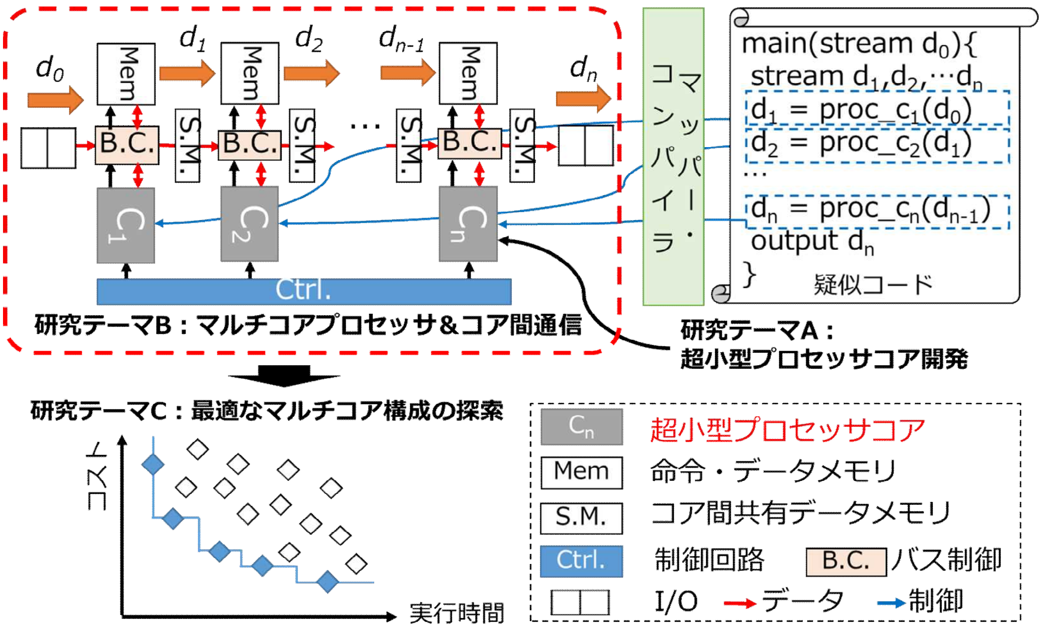
本研究は、IoT エッジデバイスのセンサから得られたストリームデータに対して、データセンタに転送する前に前処理、あるいは、リアルタイム処理によるサービスを提供するエッジコンピューティングのための新たなプロセッサを提案した。具体的には、従来のプロセッサより小型ながら、高性能かつ省エネルギーで対象アプリケーションを処理可能なプロセッサコア、および、それを応用したマルチコアプロセッサを開発した。プロセッサコアでは、大規模化し続ける従来の設計方針とは逆行したアプローチを取り、軽量アルゴリズムを対象ドメインとして、敢えて機能は必要最低限に抑えた超小型プロセッサの設計を行うことで、回路資源や電力消費の無駄を削減した。マルチコアプロセッサでは、この超小型プロセッサを複数コア用いることで、データをパイプライン式に処理し、エネルギー消費量の無駄を抑えつつ、高スループット処理を可能にした。さらに、アプリケーションや設計制約に応じてコア数やコア間通信トポロジを変更可能な構造にすることで、柔軟性・再利用性も得られる仕組みを確立し、その最適なマルチコアプロセッサ構成（コア数および通信トポロジ）を探索する手法を提案した。本課題では、ストリームデータを対象に行う軽量アルゴリズム数種類と実アプリケーション（ヘルスケアモニタリングにおける異常検出）を想定したケーススタディによって、既存プロセッサ（MIPS, ARM Cortex-M0, RISC-V）と本研究成果の比較を行った。超小型プロセッサコアは、回路面積・電力をともに既存プロセッサ Cortex-M0 の半分以下、RISC-V の 1/3 以下に抑えつつ、より高性能であり、実アプリケーションで要求される時間内に処理を完了できる（リアルタイム処理ができる）ことを示した。同様に、マルチコアプロセッサは複数のマルチコア構成で、既存プロセッサ MIPS よりエネルギー消費量を削減できることを示した。

（2）詳細

新たなプロセッサを実用化へ繋げるためには、ハードウェア（アーキテクチャ）開発のみだけでなく、その効率的な利活用も重要な課題である。したがって、本研究では、図1に示す通り、小型プロセッサコア設計（研究テーマ A）、様々なマルチコアプロセッサの開発（研究テーマ B）、および、マルチコアプロセッサの最適な構成（コア数およびコア間通信トポロジ）の設計探索（研究テーマ C）という3つの課題に細分化して同時並行で進めた。

- **研究テーマ A「超小型プロセッサ SubRISC+の開発」（論文 1、論文 2、特許出願 1 件）**

本研究では、超小型プロセッサの１つである SNG (Subtract and branch on NeGative with 4 operands)に着目し、必要最小限の機能拡張を施した小型プロセッサを提案した。SNG は、1 種類の命令のみを扱えるプロセッサ(One-Instruction Set Computer; OISC)の1つであり、プロセッサの初期に提唱されたものの1つである。チューリング完全であり、1 種類の命令を組み合わせて、いかなる演算も実現できる。プロセッサ構造が極めてシンプル、すなわち回路面積が非常に小さいというメリットがある一方、その非効率さ（命令数やメモリアクセス多）により実アプリケーションへの適用は困難である。本研究テーマでは、この SNG をベースに、超小型というメリットを活かしつつ、より演算効率が高い（すなわち高性能な）小型プロセッサ SubRISC+



【図1：提案手法全体の概要】

TSMC 65nm LP	Cortex M0 (w/o Mult)	zero-riscy※2 Fast Mult	zero-riscy※2 Slow Mult	micro-riscy※3	提案
面積 [K um²]	20,934	34,319	32,226	24,094	10,356
ゲート数 [K GE※1]	14,538	23,833 (x1.64)	22,379 (x1.54)	16,732 (x1.15)	7,192 (x0.49)

※1 GE=Gate Equivalent（全面積um²を2入力NAND面積um²で除した値）
※2 レジスタファイル32エントリ，16ビット乗除算有り
※3 レジスタファイル16エントリ，乗除算無し

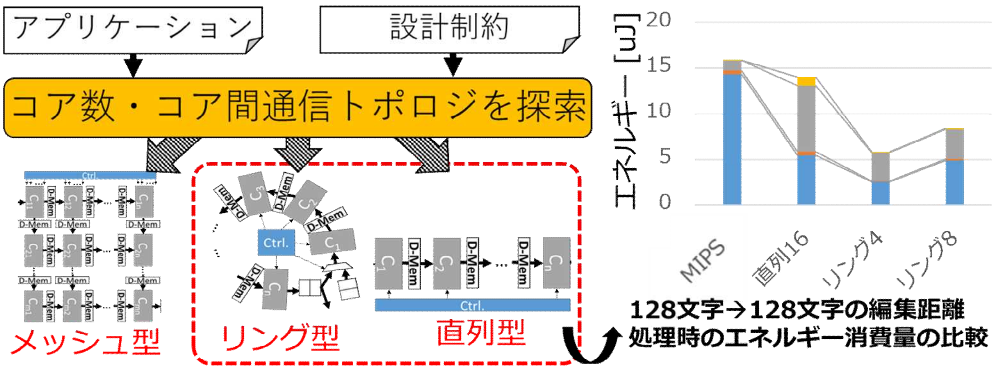
【表 1：SubRISC+（提案）の回路実装評価】

実行時間 [ms]	M0	提案	正規化
Sort	1.9	1.2	(x0.63)
Motion	0.19	0.14	(x0.74)
IntDCT	0.11	0.09	(x0.82)
Histo	0.12	0.06	(x0.50)
Edge	0.36	0.34	(x0.94)
WordCnt	2.37	3.27	(x1.38)

エネルギー [uJ]	M0	提案	正規化
Sort	8.6	5.4	(x0.63)
Motion	0.81	0.59	(x0.73)
IntDCT	0.5	0.38	(x0.76)
Histo	0.57	0.28	(x0.49)
Edge	1.62	1.25	(x0.77)
WordCnt	10.46	13.54	(x1.29)

【表 2：軽量アルゴリズムにおける実行時間とエネルギー消費量の評価】

を開発した。具体的には、本研究が対象とする軽量アルゴリズム（ヘルスケアやファクトリーオートメーションにおける異常検出等）において頻出する演算の種類を解析し、少ないハードウェア資源で、かつ、多様な演算を効率良く実現できる 4 種の命令のみを命令セットとして選定した。既存の小型プロセッサ（ARM Cortex-M0, RISC-V）よりさらに小規模な回路実装を実現した（表 1）。さらに Cortex-M0 に比べ、提案プロセッサは高速かつ省エネルギーに 6 種のアプリケーションを処理できることを示した（表 2）。また、ヘルスケアモニタリングのケーススタディとして、100Hz サンプリング周波数の脳波から、てんかんの発作検出を行うアプリケーションに



【図 2：様々なマルチコア構成（研究テーマ B）と最適な構成の自動探索（研究テーマ C）】

ついて評価した結果、サンプリング周期より高速に発作検出可能なことを確認し、十分なリアルタイム性を実現できることを示した。

本研究成果は、国際論文誌および査読付き国際会議にて発表済みであり、特許出願を行った[論文 1、論文 2、特許出願 1]。また、ヘルスケアモニタリングのケーススタディについて、国際会議の University Booth で成果発表をした。また、本研究成果は ASIC チップ試作を行った（3 月末に試作チップ納品のため、4 月以降に評価予定）。

● **研究テーマ B「超小型プロセッサコアを用いたマルチプロセッサ」（その他の成果 1 件）**

小型プロセッサを複数コア用いて、ストリームデータをパイプライン式に処理することでさらに高性能・リアルタイム処理を実現するマルチコアプロセッサを開発した。アプリケーションや設計制約に応じて、コア数やコア間通信トポロジを柔軟に変更可能な仕組みを構築した。ACT-I 期間中 （2016 年 12 月～2018 年 3 月）に既に直列型のマルチコアを実現し、ソーティングや文字列の編集距離（リーベンシュタイン距離）を算出するアプリケーションを用いて、既存プロセッサに対して性能およびエネルギー消費量の優位性を示した。ACT-I 加速フェーズでは、さらにリング型やメッシュ型のマルチコアプロセッサを実現した（図 2 左）。

本研究テーマは、研究テーマ A と並行して進めたため、研究テーマ A がベースとした SNG を用いてマルチコアの検討・実装を進め、コア間通信の改良点を探った。

図 2 右は、編集距離（128 文字）について、従来プロセッサの MIPS （シングルコア）、ACT-I 研究で開発した直列型マルチコア（16 コア）、および、ACT-I 加速研究で開発したリング型マルチコア（4 コア・8 コア）のエネルギー消費量を比較した結果である（結果の一部を抜粋）。研究テーマ A と研究テーマ B を統合前の段階で、既に既存プロセッサよりエネルギー効率を大幅に改善できた。研究テーマ A の成果と統合することで、更に性能・エネルギー効率を改善できると考えられる。

本研究成果は、国際会議にて発表済みである[その他の成果（国際会議招待講演）]。

● **研究テーマ C「最適なマルチコアプロセッサ構築のための設計空間探索」**

図 2 に示した通り、研究テーマ B で開発した様々な構成のマルチコアプロセッサのうち、エネルギーを最小化する構成の探索は、IoT デバイスの開発において非常に重要な課題である。最適なエネルギー効率を実現するマルチコア構成は、アプリケーションに異なる。また、設計制約（回路面積等）により、採用不可能な構成を早期に候補から排除することも重要であ

る。本研究テーマでは、アプリケーションやコア間通信データ量に応じてマルチコア構成(コア数およびコア間通信トポロジ)をモデリングし、設計制約に応じて最適な構成を探索する手法を提案した。モデリングには、Timed Petri Nets という、時間情報を扱えるペトリネットを活用し、各コアの処理時間、コア間通信に要する時間、コア間の同期を抽象的な数学モデルとして表現した。

本研究テーマは、ACT-I 加速研究終了時までに完了できなかったが、コア間通信データ量は抽象的かつ概ね正確なモデルを構築できている。現在は、アプリケーション全体のエネルギー消費量(計算処理にかかるエネルギー消費量とコア間通信にかかるエネルギー消費量)のモデリングに取り組んでおり、2020 年度中にエネルギー効率を最適化するマルチコア構成を自動探索可能なフレームワークが完成する見込みである。

3. 今後の展開

本研究は、IoT エッジデバイス上で行うエッジコンピューティングに向けた、小型・省電力プロセッサアーキテクチャの開発を中心に、ハードウェアアーキテクチャとソフトウェアアプリケーションの両面から幅広く研究に取り組んだ。さらに、開発技術の応用として、特にヘルスケアやファクトリーオートメーション等のアプリケーションドメインを対象に、新たなエッジコンピューティングを開拓する技術に注力してきた。これらのアプリケーションでの評価において、本研究成果はIoTデバイスの物理セキュリティの向上と高い親和性を持ち、IoTセキュリティの強化に発展・展開できる感触を得られた。今後は、ACT-I加速研究成果を更に拡張・応用し、物理セキュリティを強化した、小型・省電力 IoT デバイスの開発に取り組む予定である。ネットワークに繋がるIoT機器のセキュリティレベルを底上げすることで、IoT全体のセキュリティを強化でき、産業・社会への波及効果は大きいと考えられる。

上記の応用・展開には、組込システムの設計レイヤの縦の連携や、セキュリティの数理モデル等の横の連携が欠かせない。縦・横の異分野連携を通して、新たな学術分野を開拓するとともに、積極的に各分野の研究者の交流を図り、学生の教育にも力を入れていく。

4. 自己評価

- 研究目的の達成状況

本研究は、益々普及していくIoTデバイスのセンサから収集され、増加し続けるストリームデータを IoT エッジデバイス上で処理ことを想定した、計算機（プロセッサ）およびその開発環境を構築することを目的として、ACT-I 研究から継続して取り組んできた。本研究課題は、アーキテクチャ設計とソフトウェア開発環境の両課題から成るため、3 つの研究テーマにブレイクダウンして同時並行に進めることで、テーマ間で問題を共有しに相互フィードバックすることで、研究促進を図ることができた。広く使用されている商用プロセッサ（ARM Cortex-M0 や RISC-V micro-risky）より、小型・高速・省エネルギーなプロセッサコア設計、および、その応用（マルチコア化）を示すことができた。特に、インパクトファクターの高い国際論文誌（IF=1.5）であるIEEE Embedded Systems Lettersに論文が採択されたことは、組込みシステムの研究コミュニティから国際的に高い評価を得られたことを実証している。また、本研究成果を論文執筆だけにとどめることなく、チップ試作や特許出願にも挑戦できた点は、一研究者として大きく成長できた点であると考えている。対象とすべきドメインやアプリケーションの特徴を整理し、狙いをクリアにできた点も意義が高い。

一方で、ACT-I加速フェーズの2年間をもってしても、3つの研究テーマすべてを完結させ、統合することができなかった。特に研究テーマCについては、未だ成果は得られていないが、手応えを感じ始めている段階であるため、ACT-I研究終了後も継続して取り組んでいく。

ACT-I加速フェーズ中に得られた成果と知見を元に、今後はAIP加速課題としてIoTのセキュリティを強化する方向で、本研究成果をさらに拡張・展開していく。

- 研究の進め方

現在のみならず今後確実に増加すると考えられるアプリケーションの傾向を調査するとともに、エッジコンピューティングの社会的ニーズを明らかにした。それにより、対象とすべきアプリケーションドメインを絞り、サポートすべき機能（命令セット）を明らかにした。提案マルチコアプロセッサを開発するにあたり、(1)コア設計、(2)マルチコア設計（特にコア間通信のメカニズム）、(3)設計空間探索フレームワークの 3 点に課題をブレイクダウンし、同時並行で進めた。適宜、各技術・実装で必要な点を情報共有・フィードバックすることで、設計の早い段階から実装の完成度を高めることができた。

回路設計用のソフトウェア（特にシミュレーション）を使用するためにハイパフォーマンスな計算機環境（サーバ等）を充実させる必要があり、本研究費を有効に執行できたと考えている。さらに、開発したプロセッサの特許出願、および、ASIC チップ試作にチャレンジすることができた。これらの成果を起点に、今後も学術研究だけでなく社会実装の可能性を検討していく。

- 研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

本研究成果は、IoT センサ等に搭載し、そのデバイス上で行うエッジコンピューティングに利用することを想定している。現在のエッジコンピューティングは、比較的高性能なエッジサーバにおける計算処理を行うことを想定している。バッテリ制約が厳しく、かつ、長時間・常時動作することを要求されるセンサノードのような IoT デバイスへ、既存プロセッサを適用することは困難である。

本研究成果は、今後社会実装されるべきエッジコンピューティングの在り方を考え直す、

一つの切欠になると考えらえる。すなわち、データはどの程度エッジ端末上で処理するのか・保存するべきなのか、どのような処理・データをクラウド側・エッジ側で扱うのか等について、これまでは検討する余地がなかったが、IoT エッジデバイスで効率良く処理する技術があることを示すことで、再考されるものと期待される。現在のニーズだけでなく、将来のニーズを見据えた技術開発を行っている点で、本研究課題の社会的影響・波及効果は高いと考える。

学術研究において、プロセッサの命令セットや小型化に取り組む研究はこれまで多数あるが、その多くは「どんなアプリケーションに対しても」高性能であることを目指してきた。一方、近年 IRDS も提唱しているように、今後はアプリケーションドメインに特化した「ドメインスペシフィックアーキテクチャ (DSA) 」が重要なアプローチとなる。DSA では、どのようなドメインを切り出し、対象にすべきかが、重要な視点となる。本研究は、その先駆けとして、多くの研究がドメインとしてケアしてこなかったが今後確実に増えるアプリケーションの特徴と粒度をドメインとしてフォーカスし、さらにそのドメインに特化した効率性を追求したアプローチを実施した。この研究アプローチと成果は、今後の学術研究の取り組みに大きく寄与すると考える。

- 研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題の技術は、IoT エッジデバイスのセンサから得られたデータに対して、複雑なアプリケーション (算術演算等) の前処理として、軽量処理な (異常検出等) を省電力・省エネルギーに行うためのものである。一般的な前処理としては、算術演算を多く含むフィルタ等があり、これまでにも数多く・多様なDSP設計が行われてきた。しかし、本研究では、今後はIoTセンサノードのような小型IoTデバイスにおけるエッジコンピューティングの需要の高まり、および、エッジコンピューティングにおいて DSP とは異なる性質を持つ前処理 (データの比較・探索、差分検出等から成る前処理) が重要となることを見据え、独創的な着眼点によって、これまでの対象とは異なる前処理にフォーカスしている。

一般的には柔軟性 (再利用性) と効率的 (無駄がない) 設計は相反する性質を持ち、両立困難である。本研究では、アーキテクチャ設計において、アーキテクチャのどの部分をアプリケーションに応じてコンフィギュレーション (柔軟にカスタマイズ) 可能にするか、および、柔軟性より効率を優先してハードワイヤ設計 (カスタマイズ不可) にするかについて、定性的かつ定量的に検討し、上記の相反する課題を両立しようしている点で、挑戦的である。

上述の独創性および挑戦性の点から、本研究課題は、今後のアーキテクチャ設計における1つのアプローチを開拓するものであると考えられる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Kaoru Saso and Yuko Hara-Azumi, "Revisiting Simple and Energy-Efficient Embedded Processor Designs Towards the Edge Computing," IEEE Embedded Systems Letters, 2019, 巻号・頁 未定 (Early Access 版公開済み)
2. Kaoru Saso and Yuko Hara-Azumi, "Simple Instruction-Set Computer for Area and Energy-Sensitive IoT Edge Devices," International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), pp.93-96, Milan, Italy, Jul. 10th, 2018.

(2) 特許出願

研究期間累積件数:1 件

1.

発　明　者: 原 祐子、佐宗 馨、楊 明宇

発明の名称　:少命令セット組込みプロセッサ

出　願　人: 東京工業大学

出 願 番 号: 特願 2019-172638

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 国際会議招待講演

  Yuko Hara-Azumi, "Highly-Scalable and Flexible Multicore Processors with Limited ISAs," 18th International Forum on MPSoC for Software-defined Hardware (MPSoC), Aug. 2nd, 2018.

- 国際会議デモンストレーション

  Mingyu Yang and Yuko Hara-Azumi, "Implementation and Evaluation of an Embedded Processor for Lightweight IoT eHealth," University Booth of Design, Automation & Test in Europe (DATE), Grenoble, France, Mar. 11-12th 2020.

公開

(事後評価･研究者用)

研 究 報 告 書

「圧縮線形代数:データ圧縮による省メモリ高速大規模行列演算」

研究期間: 2018 年 4 月～2020 年 3 月
研究者番号: 5 0 2 1 2
研 究 者: 松井勇佑

1. 研究のねらい

本研究では「圧縮線形代数」という, 高速かつ省メモリで演算を行える新しい学問領域を提案する. 圧縮線形代数では, ベクトル･行列を圧縮し, 省メモリでそれらを表現する. そして, 圧縮した状態のままで距離計算といった数学的操作を高速に実現する. その実現のために, 距離表を事前計算しておきテーブルルックアップで高速に計算を行う方式を提案する.

提案する圧縮線形代数により, 人工知能問題を解く上で重要な大規模データ処理･大規模機械学習処理を従来よりずっと小規模な計算機環境で実現する.

2. 研究成果

(1) 概要

近年の人工知能分野では, 極めて大量のデータを扱う (例:ImageNet 機械学習における 1000 万枚以上の画像処理, また都市レベル三次元復元における 10 億個以上の点群処理). こういった大量データを真面目に処理する場合, (1) データが多すぎてメモリに載らない, (2) ゆえに高速にデータを処理できない, という問題がある. 特に, 最も基礎的な処理である「探索 (似たベクトルを探す)」ですら, 大量のデータに対しては相当時間がかかる. これを解決するため, (1) データを圧縮してメモリに載せ, (2) 圧縮したまま探索を行う, 直積量子化, およびその改良手法が, 近年急速に発展してきている. 直積量子化を用いると, 10 億個の 128 次元ベクトルに対する探索処理を, 32GB 程度の現実的なメモリ消費量で処理できる. これによって, 大規模データに対する高速省メモリ探索処理が実現されている.

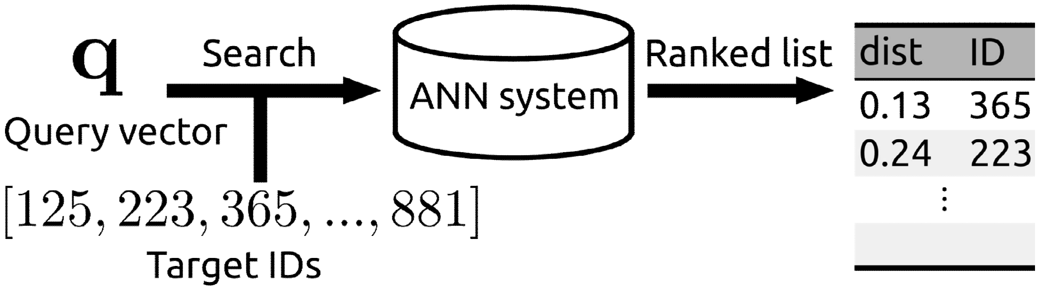
一方で, 直積量子化ベースの手法は本質的には線形な探索処理を行うことしかできない. より一般的な数学的処理を扱うことが本研究の目的である. そのために, 私は「部分に対する探索処理」, および「コードに対する意味の埋め込み」を実現した. これにより, 通常の探索の枠を超えて, 直積量子化コードに対する新たな数学的操作が実現され, 大規模データ処理に対する新たな方法論が切り開かれた. 加えて, コンピュータビジョン分野における最大の国内会議である MIRU にて, 探索処理に関するチュートリアルを行った. また同様のチュートリアルをコンピュータビジョン分野世界最大の会議である CVPR において発表することが決定している. このように, 探索分野に関する多くのアウトリーチ活動を行い, 知見を広く社会に還元した.

(2) 詳細

研究テーマ1 「部分に対する探索」

これまでの一般的な探索処理は,「全てのデータに対する探索」は高速であるが,「部分に

対する探索」は苦手だという直感に反する情勢にあった．私は現在広く用いられている転置インデクス型の探索処理に対し，そのような部分での探索を可能とした．これにより，例えば画像検索の文脈において，画像検索と単語検索を組み合わせるような複雑な検索が統一的に記述可能になる．この内容はマルチメディアのトップの国際会議である ACM Multimedia に採録され，オーラル発表された．その詳細を下図に記す．



ここでは簡単のため，画像検索を対象として説明する．画像検索の文脈では，画像は一本のベクトルとして表現される．事前に行われる前処理（インデクシング）として，データベース側の 1 番目から N 番目のベクトル（画像）は全て最近傍探索システムに登録される．オンラインの探索処理として，クエリのベクトル（画像）が与えられたとき，似ているベクトルを探す．これが画像検索である．

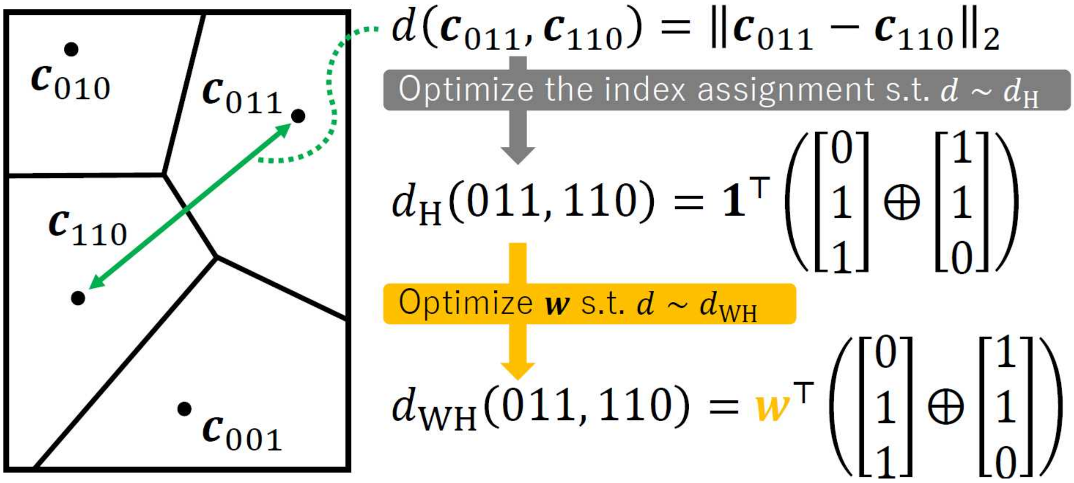
一方で、例えば「2019 年に撮影された画像の中から似ている画像を探したい」というような要望がある．の問題は，事前に撮影記録に対するフィルタリング処理などを行い画像番号を特定し，その番号集合のなかから似ているベクトルを探すという処理に相当する。すなわち、「2019 年に撮影された画像は 101 番目、245 番目、･･･4325 番目の画像である」という情報を得て，その指定されている番号の中から検索を行う．この問題は、上の図のように，検索時にクエリに加えて，ターゲットとなる画像番号の集合が与えられ，検索を行う，と立式できる．これを私は「部分に対する検索」と名付けた．

この問題は非常に大きな需要がありながら，近年の最近傍探索システムは対応していなかった．すなわち、既存の高速なシステムは全て（1～N 番目）のベクトルに対する探索には高速（そのために最適化されている）だが，部分に対する処理をサポートしていない場合がほとんどだからである．よって、この部分に対する検索問題は，従来はエンジニアリングによる力業で処理されてきた．私が提案した手法は、一つのデータ構造で二つの探索方式をサポートすることにより，「部分に対する検索」を実行可能にした．すなわち，与えられる画像番号集合の要素数が少ないときは単純な線形探索を行う．一方で，要素数が多いときは転置インデクス方式で処理を行い，後処理で絞り込む．このような二つの操作を，単一のデータ構造で実現可能とした．

研究テーマ 2 「コードに対する意味の埋め込み」

直積量子化では，データ（ベクトル）はベクトル量子化により，最近傍のコードワードにアサインされる．これはすなわち，ベクトルに整数を割り振るという処理に相当する．これにより，ベクトルの全ての要素を保持するのではなく，整数一つを保持するだけでベクトルが（近似的に）表現できる．これはメモリ効率が良いデータ表現であると言える．

一方で，量子化されたあとの世界（ベクトルが整数で表された世界）では，「足し算」といった基本的な処理しか考慮されていない．私はここで，整数を二進表現したバイナリベクトルについて，重みつきハミング距離を考えることにより，これまでにない距離尺度の埋め込みが理論的に可能であることを示した．その概念図を下に示す．



コードワードを c とあらわし，その添え字（整数）を二進数として表現するとする．このコードワード間の距離（緑色の矢印）は，コードワード間のユークリッド距離である．一方で，添え字の二進表現をバイナリベクトルだとみなし，そのハミング距離を考えることが出来る．このハミング距離が元の距離に近くなるように添え字の割り振りを変える方式を，Polysemous Codes [Douze, ECCV 16]と言う．この方式を用いることで，別の距離尺度をコード間に埋め込むことが出来る．

一方で，ハミング距離と元の距離間ではスケールやオフセットが違うため，必ずしも良い近似を達成することが出来ない．そこで私は，新たに重みベクトルを学習することで，ハミング距離を重み付きハミング距離に拡張した．これにより，L1 距離といった別の距離尺度をより効果的に埋め込めることを確認した．

提案方式は理論的かつ萌芽的な内容である．しかし，「量子化されたコードに新たな意味を与える」というこれまでにない研究分野の確立への第一歩を踏み出したと言える．この後続の研究が続いていってほしいと考えている．

アウトリーチ活動

私は ACT-I 期間中に以下のアウトリーチ活動を行った

- 産業技術研究所における招待講演
- MIRU（CV分野国内最大の会議)におけるチュートリアル講演
- 東北大学における招待講演
- CVPR（CV 分野世界最大の会議)におけるチュートリアル講演の決定（2020/6 開催予定）

これらの多くの招待講演やチュートリアル講演は，多くの人々に対し私の研究や関連する探索分野を広く人々に知ってもらうために貢献できたと考える．特に，MIRU におけるチュートリアル内容は SpeakerDeck にて公開され、9.9K 回の閲覧されている．

https://speakerdeck.com/matsui_528/jin-si-zui-jin-bang-tan-suo-falsezui-qian-xian

また，CVPR におけるチュートリアルはメルカリ社との合同のものであり，社会との接点を広げられていると思う．今後も，そういった情報発信を進めていきたい．

3．　今後の展開

探索問題は大規模データ処理の際に必要な実用的かつ理論的は裏付けをもつ分野である．今後は，実際にそういった技術をもつ会社とのコラボレーションや，コンペティションの開催といった形で，社会に技術を還元していきたい．

4．　自己評価

本研究計画期間においては，応用面として「部分探索の探索」，理論面として「コードへの埋め込み」を達成することが出来た．このどちらも，インクリメンタルな研究というよりは，「意味のある問題」に対して取り組み，解答を示せたと思う．その意味で，十分な達成があった．また，様々なアウトリーチを持つなど，社会への波及効果は大きくあったと考えている．

一方で，「コードへの埋め込み」は最終的に「新しい理論的枠組みの第一歩」を踏み出すにとどまった．これをベースとして，より多くの理論的発展を本研究期間中に行えなかった面が心残りである．本研究をベースとした後続研究をこれから進めていきたいし，また周りからそういった研究が出てくることで分野として発展していけばよいと思う．

5．　主な研究成果リスト

(1) 論文（原著論文）発表

(2) 特許出願

研究期間累積件数：0 件

(3) その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

1. Yusuke Matsui and Shin’ichi Satoh, “Revisiting Column-Wise Vector Quantization for Memory-Efficient Matrix Multiplication”, IEEE International Conference on Image Processing, 2018.
2. Yusuke Matsui, Ryota Hinami, and Shin’ichi Satoh, “Reconfigurable Inverted Index”, ACM International Conference of Multimedia, 2018
3. 松井勇佑, “billion-scale の近似最近傍探索”, 招待講演（産業技術総合研究所）, 2019
4. 松井勇佑, “近似最近傍探索の最前線”, 第 22 回画像の認識･理解シンポジウム(MIRU), チュートリアル, 2019
5. 松井勇佑, “近似最近傍探索の最前線”, 招待講演（東北大学, 2020
6. Yusuke Matsui, Takuma Yamaguchi, and Zheng Wang, “Image Retrieval in the Wild”, Computer Vision and Pattern Recognition, Tutorial, 2020 (accepted)