

令和2年度 領域報告書

研究領域名：ACT-I「情報と未来」

研究総括名：後藤 真孝

○本年度の研究状況

本年度は領域発足後5年目の年度として、2期生加速フェーズ研究者11名、3期生加速フェーズ研究者12名の合計23名の研究者による研究活動を実施した。

6月の第8回領域会議および11月の第9回領域会議（何れもオンライン開催）では2期生加速フェーズ研究者・3期生加速フェーズ研究者によりそれぞれ研究発表を行った。この2回の領域会議では本研究領域卒業生研究者の参加により、更に研究議論を深めた。加えて、7月～10月および2月～3月には担当アドバイザーによるサイトビジット（研究者が担当アドバイザーの元などへ訪問する逆サイトビジットや担当アドバイザーグループでのミニ領域会議的な研究ディスカッションを含む）を行い、研究計画や進捗状況について対面で深い議論をする機会を設けた。

2019年度に研究終了となった1期生加速フェーズ研究者および3期生研究者については2020年5月に、また、2020年度に研究終了の2期生加速フェーズ研究者については2021年3月に、日本科学未来館を発信スタジオとするオンラインでの先端研究フォーラム（公開）を開催し、各研究者からの研究成果アピールを行った。

○領域会議、報告会などの開催記録

No	会の名称	開催日	開催場所	内容
1	ACT-I 1期生加速フェーズ・3期生 先端研究フォーラム（公開）	5/15(金) 5/16(土)	オンライン開催 日本科学未来館 7階 を発信スタジオ利用	1期生加速フェーズ研究者12名は一人10分間、3期生研究者29名は一人5分間のショートプレゼンテーションと、オンラインポスター発表の形式で、合計41人による研究成果の発表会を実施した。
2	第8回領域会議 （非公開）	6/13(土) 6/14(日)	オンライン開催	3期生加速フェーズ研究者12名による研究ビジョン説明、2期生加速フェーズ研究者11名による研究中間報告を行った。また、15名の卒業生の参加（内4名より発表あり）により研究議論を更に深めた。
3	第9回領域会議 （非公開）	11/14(土) 11/15(日)	オンライン開催	2期生加速フェーズ研究者11名・3期生加速フェーズ研究者12名の合計23名による研究中間報告を行った。また、5名の卒業生の参加（内1名より発表あり）により研究議論を更に深めた。
4	ACT-I 2期生加速フェーズ 先端研究フォーラム（公開）	3/13(土)	オンライン開催 日本科学未来館 7階 を発信スタジオ利用	2期生加速フェーズ研究者11名による一人10分間のショートプレゼンテーションと、オンラインポスター発表の形式で、研究成果の発表会を実施した。

○プレスリリース：

2021年2月19日、原 祐子研究者（東京工業大学 准教授）：1期生加速フェーズ研究者（2020年度研究終了）
発表名：エッジ端末に適した小型省電力プロセッサを実証
～従来比3.8倍のエネルギー効率でヘルスケアIoTに道～

○研究者の動向（所属機関、研究実施場所、研究実施形態の変更など）

2期生加速フェーズ：塩川 浩昭…筑波大学 助教⇒准教授：4/1付昇格
2期生加速フェーズ：山下 聖悟…東京大学 ⇒株式会社エクサウィザーズ：4/1付異動
2期生加速フェーズ：吉田 博則…東京大学 大学院生(博士課程)⇒特任研究員：4/1付採用
3期生加速フェーズ：伊藤 伸志…東京大学 ⇒日本電気株式会社：4/1付異動
3期生加速フェーズ：中村 優吾…奈良先端科学技術大学院大学 大学院生(博士課程)⇒特任助教：4/1付採用
3期生加速フェーズ：鳴海 紘也…東京大学 大学院生(博士課程)⇒助教：4/1付採用

以上

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

2020 年度は以下の研究 2 つの項目を推進した。

- a. Approximate Memory において同一のエラー率を設定しなければならない領域のサイズが 512 バイトから数 KB と大きいことによる問題の定量化および解決手法の検討。
- b. Approximate Memory を適切に制御し、アプリケーションの計算誤差をユーザの許容できる範囲に抑えた上で最大限の高速化を得る手法の検討。
- c. Approximate Memory 制御手法を評価するための枠組みの検討

2. 研究経過および進捗状況、成果

研究項目 a では、2019 年度までで問題の発見および広く使われるベンチマークのソースコード調査による問題の適用可能性を明らかにしていた。2020 年度はこの問題 Granularity Gap Problem と名付け、2019 年度に調査したアプリケーションがどの程度性能的な影響を受けるか、影響が Approximate Memory の恩恵と比較してどの程度大きいかを調べ問題の重大性をより明らかにした。調査の結果いくつかのアプリケーションでは最大数 % の性能劣化が見られ、これは Approximate Memory の恩恵と類似の値であることが分かった。またこの問題を解決するための手法について検討を行った。これらの成果は以下に挙げる論文として発表を行った。

穠山空道, 塩谷亮太: “複雑なデータ構造を持つアプリケーションを対象とした

Approximate Memory 適応の検討”, *Hot Spring Annual Meeting (HotSPA 2020)*, pp. 1 - 11

(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 (CPSY) 研究会優秀若手発表賞)

Soramichi Akiyama, Ryota Shioya: “The Granularity Gap Problem: A Hurdle for Applying Approximate Memory to Complex Data Layout”, *12th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE)*, pp. 125 - 132

研究項目 b では、これまでの経験から実際のアプリケーションにエラーを混入して統計的な知識を得るよりもより数学的なアプローチが重要と判断した。プログラムを数学的な関数と捉え出力の入力に関する微分値を計算し、これを Approximate Memory 制御に使うことを検討した。具体的に 2020 年度はこの方針について関連研究の調査および具体的にプログラムを微分する手法と本研究の文脈に適用する場合の問題点を検討した。

研究項目 c では、Approximate Memory 制御手法を評価するためのベンチマークに必要な要件を検討し、複数のベンチマークと計算誤差の大きさを実用的な観点から評価するメトリクスをベンチマークごとに定めた。

3. 今後の予定

今後は研究項目 b を進める。関連研究の調査で Approximate Memory にプログラムの微分値を用いる既存研究は存在しないこと、本研究にプログラムの微分を適用する際の問題点は実行時に与えられた入力に対する微分値を高速に求められない点であることが分かった。この問題を解決し Approximate Memory の制御手法を確立することを本年度の目標とする。

4. 外部との研究交流

研究項目 c では実装を株式会社フィクスターズに委託した。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

オンライン最適化問題・バンディット最適化問題における実用上の適用可能性を拡張し、さらに導入時の障壁を削減する理論研究として、(1) 情報フィードバックに時間遅れが存在する状況を考察したほか、(2) 様々な環境の特性に応じて自動的にアルゴリズム自身をチューニングし性能を改善するアプローチを検討した。加えて、(3) アルゴリズムが達成可能な性能限界や、複数の動作主体が最適化アルゴリズムを用いて意思決定を繰り返す状況におけるダイナミクスの理論解析を進めた。

2. 研究経過および進捗状況、成果

項目(1)について、フィードバック遅れのある非確率的線形バンディット問題に対する初の最適なアルゴリズムを開発、その最適性を証明し、成果をまとめた論文が国際会議 NeurIPS に spotlight 発表枠で採択 [1]。項目(2)について、非確率的線形バンディット問題に対する入力データ依存の性能保証をもつアルゴリズムを開発、性能の改善を証明し、成果をまとめた論文が国際会議 NeurIPS に spotlight 発表枠で採択 [2]。加えて、多腕バンディット問題に対するパラメータフリーかつ複数の既存アルゴリズムの性能保証を併せもつアルゴリズムを開発し、成果をまとめた論文が国際会議 COLT に採択 [4]。項目(3)について、ある種のオンライン最適化問題に対する達成可能な性能限界についての未解決問題を解決、結果をまとめた論文が国際会議 NeurIPS に spotlight 発表枠で採択 [3]。

[1] Shinji Ito, Daisuke Hatano, Hanna Sumita, Kei Takemura, Takuro Fukunaga, Naonori Kakimura, Ken-ichi Kawarabayashi, Delay and Cooperation in Nonstochastic Linear Bandits, NeurIPS2020, spotlight.

[2] Shinji Ito, Shuichi Hirahara, Tasuku Soma, Yuichi Yoshida, Tight First- and Second-Order Regret Bounds for Adversarial Linear Bandits, NeurIPS2020, spotlight.

[3] Shinji Ito, A Tight Lower Bound and Efficient Reduction for Swap Regret, NeurIPS2020, spotlight.

[4] Shinji Ito, Parameter-Free Multi-Armed Bandit Algorithms with Hybrid Data-Dependent Regret Bounds, COLT 2021 to appear.

3. 今後の予定

項目(2)で検討し、得られた成果 [3, 4] をより一般的かつ実用上有用な問題設定(文脈付きバンディット問題・非線形の問題など)に拡張する。加えて、外部の環境が時刻変化する状況においても有用なアルゴリズムの開発を進める。これらの活動の進捗に応じて、項目(1)と(2)の検討で得られた結果の統合や実験的評価、理論研究の結果を反映したソフトウェアの開発と公開に向けた活動を進める。

4. 外部との研究交流

研究成果 [1] と [2] は組織外(NII、理研 AIP、中央大、慶應大、東京大など)の研究者との共同研究に基づく。そのほか、本 PJ で得られた成果を、組合せ最適化理論やブラックボックス最適化などの異なる研究に活用することを目指し、NII、理研 AIP、東京大などの外部研究者との新規の共同研究を開始。

2020 年度

研究者番号: 50243

個人研究者氏名: ダニロ ヴァルガス

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

- 最適化によらない、構造学習ができる新たな機械学習のパラダイムを開発した。具体的には、SyncMap という脳の動きの模倣によるアルゴリズムを開発ならびに性能評価を行い、その結果として最適化によらない構造学習手法を確立するに至った。
- 加えて、Perceptual DNNs というアーキテクチャを開発し、合計 2 件の手法を作成するに至った。

2. 研究経過および進捗状況、成果

- SyncMap については、AAAI21 で論文採択と発表を実施した (論文採択率は 19%)。
- AAAI21 以外で複数の国際論文採択: GECCO2020…3 件、IJCAI のワークショップ…2 件
- Springer…” Autonomous Vehicles: Business, Technology and Law” にて、ロバスト性を含む自動運転に関する法律とビジネスに関する書物を発行。
- 招待公演 1 件: 第 7 回 AI Optics 研究会で発表。
題目: 「1 ピクセルで誤魔化される人工知能が人間を超えた？」

3. 今後の予定

- SyncMap の処理方法拡張による Overlap や Hierarchy を有する構造でも学習できる手法の開発検討。
- ロバスト性を有する対象検出手法の確立。
- ロバスト性を優先する、より動物に近い問題設定検討。
- 潜在変数の構造評価手法の検討。

4. 外部との研究交流

- 東京大学の客員研究員として、川原先生の RIISE のプロジェクトに参加。
- 大手企業と 2 年間の共同研究のプロジェクトを 2021 年度に開始予定。
- 九州大学側で MIRAI 2.0 という Sweden と日本のプロジェクトに参加。
- 九州大学医学部の研究者との共同研究を開始。

以上

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

「組合せ最適化と線形代数の交点における理論と応用の探求」という研究課題名のもと、二部グラフのマッチングの最大サイズと行列の階数の関係を起点とし、二分野にまたがる理論とその工学への応用可能性の探求を行うのが研究課題全体の目的である。特に本半期に取り組んだ研究項目は以下である。

- ・パフィアンとよばれる特殊な二部グラフに対しては、適切に行列を構成し、その行列式を計算することで完全マッチングの個数を数え上げることができる。他にも全域木など、効率的に数え上げ可能な離散構造のいくつかは「パフィアンペア」として共通して一般化される。ACT-I 本期間ではパフィアンペアに対する研究を行った。加速フェーズの本半期ではパフィアンペアのさらなる一般化を狙った。

- ・各要素に非可換な不定元をもつ行列の階数計算は非可換 Edmonds 問題として知られ、近年多項式時間で決定的に解くことができるという結果が報告された。ACT-I 本期間では、行列展開に基づく表現と組合せ最適化の理論を用いることで、この問題の「重みつき版」を解く多項式時間アルゴリズムを提案した。行列展開アルゴリズムが本質的に要求する性質の精査を行うことで、アルゴリズムの本質的理解と適用対象の拡張を図った。

2. 研究経過および進捗状況、成果

- ・パフィアンとよばれる性質は二部に限らない一般のグラフに対しても定義され、完全マッチングの数え上げが効率的に可能なクラスを与える。本半期の研究において、パフィアンな一般グラフとパフィアンペアを共通して一般化する「パフィアンパリティ」という離散構造を提案し、効率的に数え上げ可能な様々な離散構造がこの枠組みに含まれることを示した。また、重みつきの問題設定において最小重みの対象を数え上げる効率的なアルゴリズムも設計した。この結果は 2021 年 5 月に開催された組合せ最適化の国際会議 IPCO 2021 に採択された。

- ・行列展開アルゴリズムの適用対象を「分割的付値斜体」とよばれる代数構造上の行列まで拡張した。特に、本アルゴリズムは歪多項式行列に対して効率的に動作するというを示し、同時に歪多項式行列がある意味で拡張の限界であるということを示した。歪多項式行列は線形微分・差分方程式系から自然に現れ、提案アルゴリズムはこれらの方程式系の解析に適用できる。さらに、組合せ緩和法とよばれる別のアルゴリズムも分割的付値斜体上の行列に対して拡張可能であるということを示した。この結果は 2021 年 7 月に開催される代数計算の国際会議 ISSAC2021 に採択された。

3. 今後の予定

マッチングと行列の関係について、基本的だが理解が進んでいない側面もまだまだ多く、研究を進めていく。また、理論の工学応用について、線形システムを記述する微分・差分方程式系の設計・解析・求解という側面で調査・研究を開始したいと考えている。

4. 外部との研究交流

加速フェーズの研究計画立案時には活発な国内外の研究者訪問を計画していたが、現在、新型コロナウイルス感染症の影響により、出張が非常に制限された情勢にある。しかし、今年度の後半にはワクチン接種が広まり、ある程度の出張を行うことができるようになるという可能性もある。この希望的観測が現実となった場合には、感染防止に注意を払いながら、研究者訪問や国際会議参加を行いたい。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

本研究課題では、材料の計測データから材料特性を推定する操作をデータのモダリティ変換として捉え、機械学習の問題として解くことで、多種多様なデータを高速に解析する手法を開発する。さらに、機械学習による予測と物理モデルを組み合わせることにより、物理的な妥当性を担保しつつも高速なデータ解析技術を開発する。以上2点の目的を実現するため、本半期の研究項目は次の通りである。

- A) 結晶構造を扱うための深層学習技術の開発
- B) 物理モデルに基づくデータ解析技術の自動化と、網羅的実験

2. 研究経過および進捗状況、成果

A について

本研究課題では、深層学習技術を用いた結晶構造データ（3次元の原子配列）の取り扱いが核心的技術となる。本半期においては、結晶構造を直接入力して学習できる深層学習技術を開発し、これを用いて、結晶構造および材料の粉末 X 線回折（XRD）パターン（1次元配列）から、材料に内在する重要な特徴を学習により認識できることを実証した。本件については論文を投稿中および特許準備中である。

B について

粉末 XRD パターンから結晶構造の情報を得るためには、物理モデルのあてはめに基づくデータ解析手法（リートベルト法）が用いられる。ACT-I 本フェーズでは、リートベルト法の設定をハイパーパラメータ最適化の問題として扱うことでデータ解析を自動化する手法を開発した。本半期では、様々な材料の粉末 XRD パターンについて、設定を変えながらリートベルト法の網羅的計算を行い、探索パラメータ空間に関する情報を集めた。今後このデータを分析し、ACT-I 本フェーズの成果と組み合わせ、より効率的にハイパーパラメータ探索を行えるよう手法を拡張する。

3. 今後の予定

目標の実現に向けた基本的な技術要素が開発できたことから、今後はこれらの技術要素（深層学習・物理モデル）を組み合わせ、粉末 XRD パターンから高速かつ高精度に結晶構造を予測する手法の実現に取り組む。また、開発した手法について、理想的なデータだけでなく、様々なノイズも含んだ測定データにおける検証を進めていく。

4. 外部との研究交流

深層学習技術の開発に関して、株式会社オムロンサイニクエックスとの共同研究として、同社に在籍する牛久氏（ACT-I 2 期生）、千葉氏（ACT-I 1 期生）らと協力して取り組んでいる。また数理最適化に関して、産業技術総合研究所 人工知能研究センター 大西氏らと議論しながら研究を進めている。材料探索への深層学習の応用に関して、大阪大学 佐々木 助教（ACT-I 3 期生）らと共同でサーベイ論文を出版したほか、議論を行っている。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

近年、人々を強制することなく、望ましい選択肢や行動に導く仕組みとして、ナッジが注目を集めている。しかし、世の中に導入されているナッジの多くは、特定の状況下での静的な情報提示やワンパターンな介入にとどまっており、効果が一時的であり持続しにくいという問題を抱えている。本研究では、既存のナッジ理論と ACT-I 標準フェーズで研究開発を進めてきた多様な IoT デバイスを用いたコンテキスト認識技術を融合することによって、この問題の解決に取り組む。具体的には、対象者の細かな行動コンテキストを認識し、その認識結果に応じて、適切なタイミング、適切な情報量、適切な手段で情報提示することで、継続的な効果を発揮する IoT データ駆動型の次世代ナッジシステムの創出を目的としている。この目的の達成に向けて、本半期は、以下の研究項目に取り組んだ。

研究項目 1: 斬新かつユニークな IoT ナッジ機構の設計開発

身の回りのモノや環境オブジェクトを IoT 化し、これまでにない斬新かつユニークなナッジシステムの設計開発を進める。

2. 研究経過および進捗状況、成果

まず、IoT データ駆動型の次世代ナッジシステムの仮説的な概念モデルとして、①日常的なオブジェクトを模した IoT センサによる行動のセンシング、②アナロジーに基づいて行動コンテキスト X を異なるコンテキスト Y に変換するコンテキスト・リフレーミング、③日常的なオブジェクトを模した IoT アクチュエータによる行動のナッジングの 3 ステップで構成される行動データ駆動型ナッジモデル (図 1) の検討を進めた。

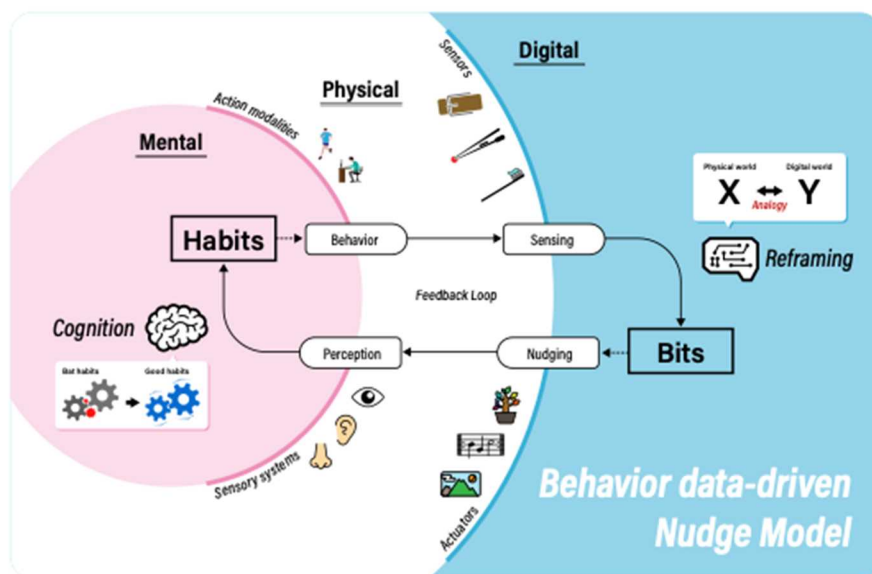


図 1. 行動データ駆動ナッジモデル

次に、コロナ禍で求められる行動変容シナリオ (免疫力を高める食行動や衛生行動の促進、運動増進など) を対象に、行動データ駆動ナッジモデルを具現化するユニークな応用システムのアイデア出しとプロトタイピングを行った (図 2)。また、上記の中で新規性や有用性が見込まれた案である「eat2pic」に関して、発明の権利化 (特許出願完了) を進めるとともに、システムの設計開発と評価実験を行い、学会発表を行なった (eat2pic 以外にも、一部、行動データ駆動ナッジ関連の研究成果を学会発表済)。これらの成果は、1 件の論文賞 (上位 2 件: IPSJ インタラ

クシオン 2021) と 1 件の Best Demo Award (上位 1 件: IEEE PerCom2021) の受賞を果たした。また、アウトリーチ活動の一環として、国内外の展示会 (CES2020, イノベーションストリーム KANSAI2020, Maker Faire Kyoto 2021 など) で研究成果の発表を行なった。メディア掲載実績としては、本半期中で、1 件のテレビ出演 (NHK 奈良) と、2 件の WEB メディアの記事 (電波新聞, IT media news) という成果が得られた。以上より、研究項目 1 に関する成果は、国内外で高い評価を得ることが出来ており、概ね順調に進んでいる。

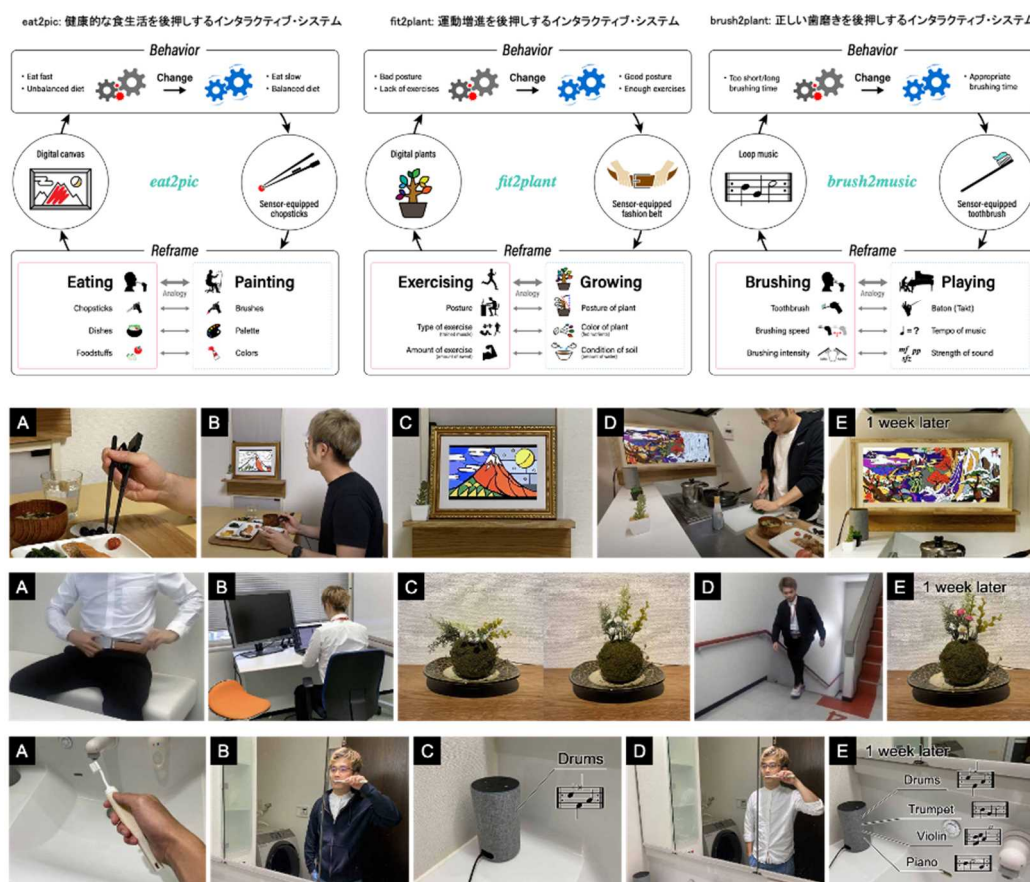


図 2. 行動データ駆動ナッジモデルを具現化するユニークな応用システムの例

3. 今後の予定

今後は、IoT を介在させた行動データ駆動型ナッジ (IoT ナッジ) の代表例である「eat2pic」に関して、国際特許出願の準備を進めるとともに、現在進行中である長期的な実証実験の評価結果を統合し、国際ジャーナル化を進める予定である。また、人々の健康増進を後押しするという観点では、健常者だけでなく何らかの疾患を有する患者も利用可能なシステムを構築することが求められるため、病院やデイケアセンター等と協力しつつ、高齢者や患者を対象とした検証についても並行して進めていく予定である。一方、現在までに検討してきた応用システムは、ミクロな視点から、個人の生活を対象としたシナリオにとどまっている。そのため、次年度は、マクロな視点から実社会で複数人のユーザを対象とした IoT ナッジの研究開発及び実証実験を展開する予定である。また、IoT 環境におけるナッジの応用に関しては十分な検討が進んでいないため、IoT システムの設計者が、目的に応じて適切な心理効果に基づいた IoT ナッジシステムを容易に設計することができるように、IoT ナッジシステムの設計プロセスの体系化に取り組む。具体的には、これまでの研究期間で、調査・検討してきた IoT ナッジシステムの事例を再利用可能な形式でパターン化すると共に、次世代 IoT 環境に適用可能なナッジを設計開発するための新しい方法論としてまとめ、その内容を国際ジャーナルに投稿する。

4. 外部との研究交流

- ・研究協力: 奈良先端科学技術大学院大学 松田裕貴先生
- ・研究協力: 奈良県立医科大学 城戸顕先生, 眞野智生先生
- ・研究協力: 畿央大学 野原潤子先生

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

- 項目 1) ムービングネットワーク
- 項目 2) Device-to-Device (D2D)
- 項目 3) DDoS 防御
- 項目 4) エッジコンピューティング
- 項目 5) 光カメラ通信

2. 研究経過および進捗状況、成果

項目 1) ムービングネットワーク

需要変動に応じて適応的に再構成する通信ネットワークとして、車載スモールセルによるマルチホップモバイルフロントホールの検討を行った。特に、FPGA-SAT ソルバを用いた超高速ルーティング手法を提案し、VTC2020spring にて発表を行った。

項目 2) Device-to-Device (D2D)

モバイルユーザ分布に応じて、ユーザデバイス間で動的に D2D 接続を促すための手法を検討した。特に、デバイスの相対速度を考慮して安定した接続を可能とする手法を提案し、IEEE IoT Journal にて発表した。また、共有経済による D2D 促進メカニズムを提案し、IEEE Communications Magazine に採択された。さらに、ゲーミフィケーションによりユーザ参加を促す手法についても、VTC2020fall にて発表を行った。

項目 3) DDoS 防御

IoT デバイスを利用した DDoS 攻撃に対して、レイヤ 2 スイッチなどのノードにおいて周期的キューイングにより攻撃検知・緩和を可能とする手法を提案し、CCNC 2021 で発表した。

項目 4) エッジコンピューティング

GPU エッジに多数のカメラを収容した際に、効率的なりアルタイム物体検出を行うための手法を提案し、ICC 2020 および CCNC 2021 で発表した。

項目 5) 光カメラ通信

LED 等の光源からの信号をカメラで撮影して復調する光カメラ通信について、基本的なコンセプトを提案し、VTC2021spring に採択された。

3. 今後の予定

各項目について、2020 年度に行った予備実験の結果に基づき、実証実験を進めていく。同時に、新たなコンセプトについても引き続き考案・提案していく。

4. 外部との研究交流

各研究項目について、ACT-I 研究者の原祐子さん、桂井麻里衣さん、西尾理志さんらと共同で検討を行い、共著論文を発表した。また、原祐さんと共同で科研費 挑戦的萌芽研究に採択された。他にも、ACT-I 研究者らと共同で研究費獲得を目指した検討・申請を行っている。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

加速フェーズでは、「デジタルファブリケーションによる生体模倣インタフェース」とりわけ生物の形態変化(メタモルフォーゼ)に着目したファブリケーションの研究を行っている。特に本半期では、そのうちの1つのテーマである、3D 構造物をしわに折りたたんで印刷する技術「Pop-up Print」に取り組んだ。これは、カブトムシなどの昆虫が、成虫になる前のサナギの段階で既にツノの構造物を折りたたんで持っているという事実に着目したものである。この生物の折りたたみ構造に着想を得て、背の高い3D 造形物を3D プリントするとき、予め構造物を折りたたんだ状態にしてから印刷し、印刷後に展開する手法を開発した。これにより、印刷時間の短縮・サポート材の削減・印刷後の物体の収納スペースの低減などの効果を得ることができた。

2. 研究経過および進捗状況、成果

Pop-up Print はインタフェースシステムのトップカンファレンスである UIST2020 に採択され、2020 年 10 月に無事発表を終えた。また、鳴海は第 2 著者であるが、指導学生で第 1 著者の野間裕太は東京大学工学部電気系にて優秀卒業論文賞を受賞し、その後 ACT-X にも採択された。

3. 今後の予定

今後はここまでの知見を踏まえた上で別のプロジェクトに取り組んでいく。具体的には Pop-up Print で折りたたみに着目したことから、より専門的な計算機折り紙に着目した 2 つのプロジェクトを進める。

① Crane

Crane は、Rhinoceros と Grasshopper 上に実装された、折り紙のデザイン・シミュレーション・ファブリケーションに関わる機能を統合したインタフェースである。既存の折り紙に関するソフトウェアは、特定の折り条件(例:鏡映反転など)に特化したものや 3D 構造を特定の折りパターンにより 2D で実現するものなどが多かったが、本研究では実際のプロダクトデザインに必要な 3 要素を統一的に扱える工夫をした。実装のコアは、ユーザのデザインに対する要求(プロダクトの機能、折り紙としての特性、ファブリケーションツールに応じた厚みとヒンジの対処)などを、まとめて Constraint Components と呼ばれるノードとして実装していることである。本成果は日本時間 2021/04/08 締切の UIST2021 に投稿予定である。

② Inkjet 4D Print

Inkjet 4D Print は、平面上に印刷したパターンを時間的に変形させることによって 3D 形状を実現する 4D プリントと呼ばれる技術を、インクジェット印刷の手法により実現しようとするものである。これまでの 4D プリントは、主に FDM などの非効率的な造形を利用したものが多かったが、この研究では布に対するインクジェット印刷で高速高精度かつ産業的な 4D プリントを目指す。予備実験にて、フルカラーで高精度の変形は実現しているため、今後グラフィックス系やインタフェース系の学会などへの投稿を目指す。

4. 外部との研究交流

これまでも多少の交流の機会があったが、Crane のプロジェクトによりメタマテリアルを扱う企業である Nature Architects や計算機折り紙の第一人者である舘知宏准教授と一緒に仕事できた。その他、ACM UIST や ACM C&C の Program Committee として働く機会をいただけるなど、コロナ禍においても様々な交流があった。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

確率的生成モデルとニューラルネットワークに関する研究に従事し、主に以下の3項目について研究を進めた。

- ・ニューラルネットワークを用いた確率モデル推論
- ・確率論に基づくニューラルネットワークの構造解析
- ・ニューラルネットワークへの確率モデル埋め込みに関する研究

2. 研究経過および進捗状況、成果

- ・ニューラルネットワークを用いた確率モデル推論

混合正規分布の識別モデル化とスパース学習法について提案するとともに、提案モデルをニューラルネット最終層に埋め込み dropout により近似して学習する方法について研究を進めた。本研究成果は機械学習分野のトップ会議である International Conference on Learning Representations (ICLR 2021)へ採択された。

- ・確率論に基づくニューラルネットワークの構造解析

単位行列を用いた深層パーセプトロンの初期化（単位初期化）に関する理論解析を行い、単位初期化したネットワークが勾配消失せずに学習できる条件を導出した。また、その理論をニューラルネットワークの解釈性向上へ応用した。本研究成果は、信号処理分野のトップ会議である International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2021)へ採択された。

- ・ニューラルネットワークへの確率モデル埋め込みに関する研究

識別モデルと生成モデルを融合したハイブリッドモデルに関して研究を進めた。ハイブリッドモデルは識別モデルと生成モデルを一般化して定式化することにより、両モデルの特性を相補的に学習する手法である。正規分布に基づくハイブリッドモデルを構築し、それをニューラルネットワークと end-to-end で学習する方法を提案した。本研究成果は、第23回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2020) においてインタラクティブ発表賞を受賞した。

3. 今後の予定

ニューラルネットワークを用いた確率モデル推論について、推論手法を一般的なニューラルネットワーク構造へ応用するとともに、確信度推定や医用データを用いた active learning へ応用する。また、単位初期化に関する理論を拡張するとともに、生成モデルへの応用を広げる。さらに、ハイブリッドモデルを利用したデータ生成、外れ値検出、欠損値補間、confidence calibration への応用研究を進める。

4. 外部との研究交流

富士通研究所の早瀬 友裕氏と単位初期化について共同研究を進め、共著で論文を発表した。主に理論部分について早瀬氏の助言に基づき進め、実験及び論文執筆を早志が担当した。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

- (a) Graph Convolutional Network (GCN)による多指ロボットハンドの物体認識
- (b) Graph Convolutional Network (GCN)による多指ロボットハンドの動作生成
- (c) ロボットアームと2指グリップを用いた変形・滑り認識と物体ピックアップ

2. 研究経過および進捗状況、成果

本研究提案全体概要として、各物体で柔らかさ・重さ・滑りやすさが特徴的なものを用意し、それに合わせて操りの動作を調整する手法を提案した。

具体的には、(a)物体特性を認識する学習モデルと操り動作を生成する学習モデルを用意することで、ロボットハンドが物体に触れた瞬間、物体特性を認識させ、その結果を動作生成モデルに反映させるというものだった。しかし、学習データを使った物体特性認識では非常に高い認識精度であったにも関わらず、実際に操り動作を行う際に行った認識は上手く行われなかった。これは、人間の動作によって得られたデータと実際の GCN による操り動作のデータでは触覚情報に大きな差が出てしまっていたことが原因と考えられる。そこで、当時は物体特性認識モデルを使わずにラベル値を前もって与えることで動作を変化させることにした。

これによって、(b)各物体に対して適応的な操り動作の生成に成功した。特に、各試行で異なる人間の指の動きの違いを学習し、動作生成することに成功した。しかし、制御モデルが自動的に物体を認識して動作を調整したとは言えない状況にある。

また、多指ロボットハンドをロボットアームに取り付けて操りを実現するため、(c)ロボットアームによる触覚センサを用いた物体ピックアップを行った。

3. 今後の予定

今後の予定として、(a)のロボットハンドの動作生成中に実際に認識を成功させることから検討を始める。具体的には学習データに GCN が生成したものも含めることで、実際に認識したい状態に近いデータを学習に使う。最終的には物性認識と動作生成を一つのモデルで行えるような end-to-end のモデルを構築することを目指す。

また、(b)により生成される動作についても検討する必要がある。現状生成出来ている動作では、未学習物体への対応などが難しく、物体を落としてしまったり、動作生成しきれないなどといった課題がある。昨年度はグラフ系のニューラルネットの導入で様々なパラメータを検討してきたが、今回はさらに動作生成を上手く行うため、LSTM などといったリカレント系のモデルを使ったり、Auto-encoder 系のモデルを使うことで触覚情報から上手く特徴量抽出することを狙うことで、未学習の物体など適応的に操るようを目指す。

最終的には(c)に基づいたシステムにより、ロボットアームに多指ハンドを搭載することで物体へのリーチングを行ってから、実際に物体を把持するというデモンストレーションの達成を目指す。特にリーチングにおいて簡単な画像認識手法を実装し、多指ハンド実用の可能性を示す。

4. 外部との研究交流

- ・触覚センサ使用事例に関する東北大学 山口明彦助教との研究議論
- ・(a)に関して、早稲田大学 千葉直也氏との研究議論
- ・(c)に関して、東京ロボティクス株式会社との共同研究、技術提供を受ける。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

常微分方程式の初期値問題の数値計算の誤差を不確実性として定量的に評価するための理論・手法について研究を行った。これまで開発してきた手法は、数値計算の不確実性は時間発展とともに増大するという経験的考察に基づいているが、この仮定は必ずしも **realistic** でないという批判に対処すべく研究を行った。また、欧米においてここ数年散発的に発表されている手法との比較を行った。

2. 研究経過および進捗状況、成果

- 2-1. カオスな方程式などを対象に、単調増大性の仮定でも実際の誤差のふるまいにある程度即した定量化ができ、また、パラメータ推定に取り込むことで、数値計算の誤差を無視した推定と比べて推定精度が向上することを実験的に示した。また、パラメータ推定の観点での不確実性定量化手法も開発した。
- 2-2. もちろん、単調増大性の仮定が適切ではない、あるいはより良い仮定が存在しそうな状況もある。例えば、周期解を持つ方程式や勾配系などが該当する。そのような場合を念頭に、単調増大性に破れを許す定式化を考案し、その性能評価を開始した。
- 2-3. 2.1 と関連するが、提案手法は欧米においてここ数年散発的に発表されている手法と比較して最大数十万倍高速であるが、対象の問題によってはほぼ同程度の性能の不確実性定量化ができていることを実験で確認した。

3. 今後の予定

まずは上述の 2.1 の研究をまとめることに注力する。この研究では統計学における **nearly isotonic regression** に発想を得ているが、それを直ちに適用できるわけではなく、例えば、パラメータ推定に組み込んだときに最適化問題の解法などを精密に議論していく。この研究がまとめれば、偏微分方程式などへと研究の対象を広げていく。

4. 外部との研究交流

オンラインで海外の研究者と意見交換は行っているが、予定していた海外の研究者の訪問や招聘は **Covid-19** の影響で実現しなかった。

研究進捗状況

1. 本半期の研究項目

①高階埋め込み多様体モデルによる画像復元

基礎理論は ACT-I 期間に完成しており, 初期実験や論文投稿などもできていたが, 採録に至らなかった. 本期間では, 理論の再構築および追実験, 論文のブラッシュアップ等を行った.

②高階埋め込み低ランクモデルの高速アルゴリズムの開発

高階埋め込み変換とフーリエ変換関係に着目し, アルゴリズムを高速化するための方法について理論構築およびアルゴリズム開発, 初期実験等を行った.

③グラフ遅延埋め込み

グラフデータに対して, 遅延埋め込みモデルを適用するための基礎理論の構築および基礎アルゴリズム, 基礎実験等を行った.

2. 研究経過および進捗状況、成果

①高階埋め込み多様体モデルについては, これまで ICCV2019, ICLR2020 などへ投稿し採録には至らなかった. すでに研究成果のボリュームが国際会議論文に収まらないところまでできていたので最終的に IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems へ投稿し採録に至った.

②高階埋め込み低ランクモデルの高速アルゴリズムの開発については, 筑波大学の今倉先生と共同の形で研究を開始した. 巡回行列がフーリエ変換基底で対角化可能なことを利用して, メモリ効率が高くかつ高速なテンソル分解のアルゴリズムを開発した. 最初の研究成果を 12 月開催の PRMU 研究会にて発表した.

③グラフ遅延埋め込みについては, 筑波大学の塩川先生と共同の形で研究を開始した. データのグラフ表現, グラフ理論, グラフ処理などが自身の専門と近くない領域であったため, 調査や勉強を入念に行い, グラフ遅延埋め込みの初期理論の構築を行った. 画像のノイズ除去を題材に簡単なアルゴリズムの開発を行った. 成果は未発表である.

3. 今後の予定

①については今後副次的な成果が出ることもあると考えられるが, ひとまずは中心的課題から外す予定である.

②については, さらなる理論整備, アルゴリズム開発, 実験を進めて, 国際会議やジャーナルでの発表を目指す.

③については, 初期理論, アルゴリズム, 実験結果について塩川先生 (筑波大) と議論しながら, 研究を進め, 成果につなげていく.

4. 外部との研究交流

・新型コロナ対策上, 訪問などは控えているがメール, オンライン会議などで以下の研究者と協力しながら研究を進めている.

- Andrzej Cichocki (Skoltech, ロシア)
- Qibin Zhao (RIKEN AIP, 日本)
- Cesar F. Caiafa (CONICET, アルゼンチン)
- 今倉暁 (筑波大学, 日本)
- 塩川浩二 (筑波大学, 日本)

・ Zhao, Caiafa 博士らとは IJCAI にてテンソルのワークショップをオーガナイズした.