

ACT-I「情報と未来」研究領域 領域活動・評価報告書

- 2018 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、ひととき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: 30 件

研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3. 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. 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	119 件	56 件	30 件

5. 研究実施期間

2017 年 10 月～2019 年 3 月

6. 領域の活動状況

(1) 領域会議: 3 回 (非公開)

第 3 回領域会議 2017 年 11 月 17 日～19 日開催

第4回領域会議 2018年6月8日～10日開催
第5回領域会議 2018年11月16日～18日開催

(2) 担当アドバイザーによるサイトビジット:

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。

担当アドバイザーのサイトビジット(研究実施場所等の訪問)を各研究者につき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)

2019年4月20日 日本科学未来館にて開催

詳細: <https://www.jst.go.jp/kisoken/act-i/presentation2019/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)

2019年2月～3月	研究報告書提出
2019年4月20日	成果発表会
2019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
2019年6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、平成29年度に採択した2期生30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、1年6ヶ月という短い研究期間であったにも関わらず、情報学に関わる様々な成果が出てきた。今後も30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) 秋山 諒 研究者 担当アドバイザー:五十嵐アドバイザー

「光投影による人の視覚特性を利用した錯覚的見かけ制御」

本研究は、紙の印刷物の上に、プロジェクタ映像を投影することによって、印刷物の色を違う色として知覚させようというものである。情報技術と人間の知覚という二つの対象を扱う意欲的な研究である。人間がどのようなときにどのような色を知覚するかというモデルを構築し、そのモデルによって計算したプロジェクタ映像の投影によって実際に目的とした色を知覚させることに成功しており、高く評価できる。今回は、単色のバックグラウンドを利用した比較的単純なモデルであったので、今後はより一般性のあるモデルとして拡張していくことが期待される。

(2) 天方 大地 研究者 担当アドバイザー:河原林アドバイザー

「空間データモデリングによるニューロンデータ検索の高速化」

ニューロサイエンス分野には、ニューロンのモデリングや神経回路の形成メカニズムの解明など多くの問

題が存在する。なかでもニューロンの分析をより高度かつ高速に行うために空間データベース技術が必須である。データベース技術に対する具体的な研究課題として、ニューロン間の結合が axon と dendrite と呼ばれる部位間でのみ行われるという制約があることがあげられる。そのため、ニューロンデータを取り扱う場合、既存技術の適応は困難であり、新たな技術開発が必要となる。本研究では、上記のようなデータに対して、重要な役割を果たすニューロンの検索技術の開発を行った。具体的には、他のデータと最もインタラクションをとっているものを重要なデータと想定・定義し、そういったオブジェクトを検索するオペレータを設計した。本研究の成果は、データベース分野でのトップ会議 ICDE 2019 に採択され、今後多くの研究者の目に止まることが予想される。さらなる効率化やモデルの向上・拡張、および産業界への応用が期待される。

(3) 上野 未貴 研究者 担当アドバイザー: 尾形アドバイザー

「深層学習による 4 コマ漫画のストーリー解析用データセット及びフレームワークの開発」

本研究では、4コマ漫画を題材として、そこに含まれる多様な情報、例えば、絵、言語のマルチモーダル情報と、ストーリーなどの因果関係を情報学の題材として利用できるフレームワークを構築している。具体的には適切な統制下で、機械学習などに利用可能な新しい4コマ漫画データベースを多数の作者、読者との密接な議論を通じて作成した。このデータベースは、コミュニケーションシステムや物語制作など多様なアプリケーションに寄与する貴重なものと言える。その高い独自性から、現状の国際会議等における論文文化には困難を伴ったが、研究期間中にウェブや学会等で漫画活用の情報分野のコミュニティを確立し、国内メディアに取り上げられるなど、国際的にみても意義深い活動へと発展させた点は高く評価できる。複数の企業だけでなく既に国際的な連携活動もスタートしており、今後の社会実装、さらに国際会議等での学術成果につながっていくと期待している。

(4) 牛久 祥孝 研究者 担当アドバイザー: 土井アドバイザー

「多様なデータへのキャプションを自動で生成する技術の創出」

本研究は画像や動画のキャプション生成を対象に、(i)個人の属性や好みへの対応、(ii)詳細な表現への対応、(iii)教師キャプションを持たないデータへの対応の 3 要求を目指すものである。(i)については評価器を、(ii)については視覚的顕著性とアテンションを活用した差分キャプション生成手法を開発した。差分キャプション生成手法に関しては共同研究先との関係から原著論文発表に至らなかったが、加速フェーズにて精緻なキャプション生成を実現してほしい。また画像と言語を統合するキャプション生成の研究リーダーとして招待講演や著作を精力的に行っているが、領域を形成しつつ、新規性にチャレンジすることを期待する。

(5) 大谷 まゆ 研究者 担当アドバイザー: 内田アドバイザー

「映像とテキストを組み合わせたストーリー理解の実現」

本研究は、映像理解のために、映像中のイベント間に関係性を見いだすことを目指したものである。要するに「映像情報だけから、何と何がどのような因果関係を持つのかを推論する」という挑戦的な研究である。一般的な因果推論だけでも依然未解決問題であるところに、映像理解の困難性や映像のみから読み取れる情報の限界が印加されることになる。研究者は、この前例のない問題を明確に定義するために評価データセットの構築を行った。その過程には試行錯誤はあったものの、データセットも作成し、さらにベースライン手法による精度評価(因果を考慮した方が精度が高い)まで至ったことを評価したい。ACT-I 内部でも他のメンバーとのコラボレーションに複数取り組んでおり、国内外での発表を行うなどの積極性が見られた。今後も映像理解の深化に向けた様々な試みに期待したい。実際、本研究と強く関連する映像要約については、計算機科学分野のトップカンファレンス CVPR2019 に論文が採択された。

(6) 河瀬 康志 研究者 担当アドバイザー: 湊アドバイザー

「公平な割当を求めるためのアルゴリズム研究」

本研究は、ゲーム理論の中心的テーマの1つであるマッチング問題を対象としている、ある制約が与えられた問題において、公平性を満たす安定解を高速に求めるアルゴリズムを設計することを目指した。ACT-I 期間において、いくつかの制約付きマッチング問題において公平な解の存在性判定や探索の計算複雑度を理論的に明らかにし、近似的安定解を効率的に求めるアルゴリズムを開発することに成功した。これらの成果により AI 分野のトップ会議である AAAI に 2 年連続で筆頭著者として採択される快挙を含む 4 件の原著論文を発表している。今後は理論だけで終わらずに、実社会の問題に応用することや、どのような近似

的公平性を保証すれば実社会で受け入れられやすいかも含めて研究を進めて行って欲しい。将来、より高いステージで本研究を深化させ、さらに大きな成果を出されることを期待している。

(7) 栗田 修平 研究者 担当アドバイザー:松尾アドバイザー

「大規模テキストからの知識獲得と深層学習による照応・省略解析」

本研究は、自然言語処理分野における深層学習の適用として、省略解析を扱い、大きな精度向上を狙うものである。深層学習の自然言語処理における適用はさまざまな形で行われているが、ここで対象としている省略解析は、本質的には文章の意味理解ができなければ精度が完全に上がりきらないタスクであり、重要性が認識されながらも、深層学習の登場以前はほとんどアプローチが不可能だった課題である。その意味で、課題設定が素晴らしい。研究成果として、自然言語処理のトップ会議である ACL2018 で採択されている。自然言語処理でのジャーナル論文採択、言語処理学会での大会最優秀賞とあわせて、良い成果を出している。このテーマは大変に奥深いので、今後も加速フェーズで魅力的な成果を創出し、このまま分野全体を牽引していってもらうことを期待している。

(8) 樺 惇志 研究者 担当アドバイザー:原アドバイザー

「セマンティック情報を用いた情報検索システム」

本研究は、Web 検索において、語彙情報やクエリのメタ情報などのセマンティック情報を用いてランキングの精度向上を目指すものである。そのために、(1)Web クエリに対する語義の曖昧性解消、(2)タスクごとの適合情報の傾向の分析、(3)テストクエリと同一クエリが学習データに含まれない状況を想定したランキング学習という三つの研究課題に取り組んだ。Web 検索のリランクは歴史のある研究分野ではあるが、セマンティック情報を用いた精度向上については、未だに研究の余地が多くあり、学術的・社会的に重要な課題である。期間内の研究結果は、国内外の会議で公表するなど、一定の成果を達成した。課題(3)については期間内に十分な成果を達成することはできなかったが、その足掛かりとなる重要な知見は得られたものとする。学術的に挑戦性の高い本研究課題の推進を精力的に進め、関連技術を積極的に習得していることから、今後の活躍が期待される。

(9) 小林 努 研究者 担当アドバイザー:千葉アドバイザー

「整合性を保持する形式仕様の自動抽象化システム」「ソフトウェア顕微鏡」の開発」

本研究はソフトウェアの正しさを検証する手法の実用化に関する研究である。ソフトウェアの検証は、その適応の難しさから航空機の制御系など非常に高い信頼性を必要とする場面での利用にとどまってきた。本研究は検証の実用性を高めるため、スライシングと補題の自動合成を用いて複雑な仕様記述の概要を示す技術の開発をおこなった。開発した技術の理論的な基盤については国際的に一流とされる論文誌に掲載され、また別の国際会議論文は best paper award を受賞しており、非常に優れていると評価できる。開発した技術に基づくツールも実装され、一般公開されている。当初の計画にあった全ての事柄について理論的基盤の確立とツールの実装が完遂したわけではないが、短い期間中に十分な成果をあげたといえ、加速フェーズでの研究に期待がもてる。またソフトウェア検証分野での若手のリーダーとして活躍してほしい。

(10) 小林 佑輔 研究者 担当アドバイザー:湊アドバイザー

「縮小するネットワークにおけるアルゴリズム理論の整備」

本研究では、縮小するネットワークを対象としたネットワーク最適化問題を定式化し、その問題に対する理論的保証のあるアルゴリズムの設計を行なった。本研究の主要な成果は、パラメータ化最小スパナ問題に対して、初めての固定パラメータアルゴリズムを与えたことであり、その結果は 2 編の論文にまとめられている。特に、加法的スパナに対する結果は理論的に重要な貢献である。また、長らく未解決であった平面グラフ上の最小スパナ問題の NP 困難性を初めて示し、論文にまとめている。これらの成果は、ACT-I 研究者としての期待を上回るものである。ACT-I 期間中に、本分野では最も有力な研究機関の1つである京都大学・数理解析研究所の准教授に採用されており、今後ますますの活躍が期待されている。今回の ACT-I での経験を、将来の若手研究者の指導などに役立てて欲しい。

(11) 佐藤 重幸 研究者 担当アドバイザー:千葉アドバイザー

「自動チューニング可能な一般化 N 体問題解法枠組みの開発」

本研究は、宇宙論の研究等に現れる N 体問題を応用例として、高性能な並列処理をおこなうためのライブラリの構成法の明らかにしようとするものであった。関数合成や関数融合の手法を活用して、実際に高度な並列化を実現するライブラリの構成方法を明らかにした点は評価できる。N 体問題などに現れる計算の対称性に注目し、それを活かした高速化を可能にする関数の設計を提案した。またプロセッサの SIMD 命令による並列化を表現するための基礎となる関数群の設計も提案した。これらの関数の設計は、高性能な並列化のための領域特化言語の開発につながる基礎となる成果である。短い研究期間の中で一定の成果をあげたことは評価できるが、論文としてまとめるに至っておらず、研究成果を実際に利用するためのソフトウェアの開発が十分とはいえなかった。加速フェーズではそれらの点についても実現してほしい。このような実用性を重視したソフトウェアの研究者は国内に少ないので、今後のさらなる活躍を強く願っている。

(12) 塩川 浩昭 研究者 担当アドバイザー: 河原林アドバイザー

「Data Skewness を捉えた超高速・省メモリな大規模データ処理」

本研究では、大規模データ処理が必要とする計算資源と現在使用可能な計算資源のギャップを埋めるため、多様な計算環境における高精度なデータ処理を想定した超高速・省メモリな大規模データ処理アルゴリズムの開発に取り組んだ。具体的には、実世界のデータの中に含まれているデータ分布の偏りや属性間の従属性などといったデータの偏り (Data Skewness) に着目し、既存のデータ処理アルゴリズムを再設計し、高速かつ省メモリなアルゴリズム群の構築を行った。これらの研究成果のより、密度ベースグラフクラスタリング問題に関して、既存の 500 倍から 1,000 倍程度の高速化性能のアルゴリズム開発に成功した。今後も加速フェーズで、グラフ並列処理、分散処理等の、現在最も活発に研究が行われている分野における本質的な貢献と、さらなるインパクトのある研究成果が出されることを期待している。

(13) 鈴木 遼 研究者 担当アドバイザー: 千葉アドバイザー

「あらゆる人々が情報技術にアクセスすることを目的としたビジュアルプログラミング言語の開発」

本研究では、年齢や母国語、身体能力に配慮した、特に子供向けのビジュアルプログラミング言語・環境を開発した。研究成果として得られたプログラミング言語・環境の完成度は非常に高く、評価できる。カラーユニバーサルデザインや工夫された多言語対応、ブロックとノード(値の参照関係)を上手にまぜたユーザインタフェースなど、細部に実用性を高めるための様々な工夫が見られる。子供向けのプログラミング教室・ワークショップを何度も実施しており、実際の利用現場からのフィードバックを受けつつ開発している点は特に優れている。普及活動や指導者向けのガイドラインの作成にも注力している点も高く評価できる。一方で、研究内容が学術的な探求を進める方向には向きにくかった。実用性や普及に重点を置くのであれば腰を落ち着けて普及に努め、近い将来、プログラミング教育の第一人者となることを期待している。

(14) 相馬 輔 研究者 担当アドバイザー: 湊アドバイザー

「オンライン劣モジュール最適化に対する効率的かつ汎用的なアルゴリズムの開発」

従来の劣モジュール最適化は、最適化すべき劣モジュール関数が既知である必要があったが、本研究では、劣モジュール最適化について不確実性を考慮したオンライン最適化問題へ拡張し、理論保証付きの効率的かつ汎用的なアルゴリズムの開発を目指した。ACT-I 期間の研究の成果として、新しいオンライン非単調劣モジュール最適化の効率的なアルゴリズムを開発し、機械学習の国際会議 AISTATS 2019 に単著論文として採択された。また辞書選択と呼ばれる問題に対して、劣モジュール最適化の技法を応用した高速な貪欲アルゴリズムを与え、機械学習のトップ会議である NeurIPS 2018 に上位 20%論文として採択された。これらの成果は、ACT-I 研究者としての期待を十分に上回るものである。将来、より高いステージで本研究を深化させ、さらに大きな成果を出されることを期待している。

(15) 高谷 剛志 研究者 担当アドバイザー: 五十嵐アドバイザー

「デジタルファブリケーションにおける半透明感と光沢感の表現」

本研究は、半透明材質の上に UV 印刷を行うことによって、半透明感と光沢感を表現しようとするものである。どのような材質とインクで印刷すると、どのような半透明度となるかを計測し、その計測結果を用いて目的とする半透明度の表現を実現している。実際に、局所的に半透明度のことなる例として、サーモンの 3 次元プリントを行い、有効性を確認している。今後は、より多様な素材で有効性を検証するとともに、当初の目的であった、光沢度の表現にも取り組んでほしい。

(16) ちょ しんき 研究者	担当アドバイザー: 中小路アドバイザー
「Image-pivoted paraphrase extraction for deeper natural language and image understanding」	
<p>本研究は、SNS などで大量に生成される同一画像に対する多数のテキストコメントの存在を背景として、画像をピボットとすることで、テキストのパラフレーズ(言い換え)と画像の対応領域の組を自動的に抽出し、機械学習を通して自然言語処理や画像理解につなげることを狙うものがある。ACT-I の期間中に、画像内の視覚的に表現された概念に対応するパラフレーズを表現する VGP (Visually Grounded Paraphrase) という概念を提案し、VGP を自動認識するための、ニューラルネットワークを用いた二つの方式を構築するという高い研究成果をあげた。第一の attention(注意点)に着目した方式は、COLING 2018 という当該領域においてトップクラスの国際会議に採択され、また 第二のフレーズ局地化(localization)を用いた方式は、Precision および Recall 共に、従来のフレーズのみに着目した方式や注意点ベースの方式を上回るものとなり、CVPR 2018 workshop での発表へとつなげた。今後も加速フェーズにおいて、視覚的関連性のための VGP の同定、VGP の類型化、ノイズが多い実環境下での VGP 同定、といった方向での展開が期待される。</p>	
(17) 董 然 研究者	担当アドバイザー: 尾形アドバイザー
「人と操り人形のインタラクション: 文楽操り人形を用いた感情表現動作デザイン」	
<p>本研究では、関節自由度が制限されているロボットの感情表現の動作設計について、人間の動作を直接利用するのではなく、伝統芸能である文楽人形の動作解析を通じて表現力を向上させることを目的としている。従来のロボット分野においてもいくつかの同様の試みが報告されているが、本研究では、各関節動作の解析に多変数モード分解(MEMD)を用いるなどの試みが新たになされ、文楽において「Animation principle」が利用されていることなどを明らかにしている。またロボットモーション作成のプロフェッショナルとの交流などから、動作表現を多角的に検討した点も興味深い。本来、定量的評価が非常に難しい研究であるため論文文化は容易ではないが、伝統的文化としての文楽の動作表現の大規模なデータベースを構築することができた点は意義深い。最終的に実現されたデモンストレーションは、大変興味深い表現を実現しており、今後、音楽領域など様々な分野との共同が期待される。</p>	
(18) 中鹿 亘 研究者	担当アドバイザー: 松尾アドバイザー
「適応型制限ボルトマンマシンの複素拡張に基づくボコーダー不要な非パラレル声質変換」	
<p>本研究は、声質変換というタスクに対して、複素領域での扱いを組み入れた複素制限ボルトマンマシンを用いて、音声を変換することを目的としている。研究の成果としては、かなり苦労をしており、最後まで十分に音声の質が上がらないという問題があった。複素を用いることの有用性も、実験を通してしっかりと示しきれなかった点はある。一方で、論文の成果としては、IEEE の Transaction に採録、トップ会議である Interspeech に単著で採録、ほかにも電子情報通信学会へのジャーナル論文採録と立派な成果を収めており、テーマの新規性を活かして、しっかりと論文につなげている点は高く評価できる。今後、声質変換の質・精度という点からも大きなブレイクスルーを生み出してくれることを期待している。</p>	
(19) 西尾 理志 研究者	担当アドバイザー: 川原アドバイザー
「無線通信制御の自己最適化機構」	
<p>本研究は、機械学習技術を用いた無線通信分野の課題解決に挑んだ。各無線端末が観測可能な情報から現状を把握し、現状態における各パラメータ設定の有効性について機械学習を用いて最適化する研究では、干渉電力からチャンネルを設定する従来手法より 30%程度の性能向上を達成した。また、各無線端末が学習した結果を統合することで、集合知を形成し、効率よく学習を実行する分散協調的学習機構の研究においては、エージェントの持つ通信資源、計算資源、データ資源の差異に着目し、学習に寄与するエージェントのみを選択的に学習に参加させることで、学習の時間効率向上が可能であることを示した。本技術により、学習性能が一定以上に高まるまでに必要な時間を 30%削減された。無線通信システムの効果的な運用には、適切なパラメータの選択が欠かせないが、今後こうした作業が機械学習により最適化できれば産業上の意義も大きいと考えられる。同分野をけん引するリーダーになっていただくことを期待している。</p>	
(20) ハウタサーリ アリ 研究者	担当アドバイザー: 中小路アドバイザー
「Supporting Non-Native Speaker Contribution in Multilingual Collaboration」	

本研究は、多言語を母語とする参加者らによるコラボレーション・ミーティングにおいて、non-native speaker の「苦労」や「困っている状態」を、native スピーカーに伝えたい、という動機づけに基づくものであり、新規性および着眼点の独自性が高いものであった。対面でのリアルタイムミーティング時、および多言語を用いたリアルタイムチャット環境使用時、それぞれにおいて、non-native speaker の支援をゴールとして研究を進めた。前者の目的に対しては、ミーティング当事者ながら第三者的にミーティング参加者全体を観察することを可能とするような機能をしばった non-verbal 情報を伝えるソフトロボットを開発し、ユーザ実験に着手した。また、音声認識により、non-native の理解が難しいと思われる語彙に対してリアルタイムにその翻訳を提示するようなモバイルアプリケーションを開発した。また、翻訳ツールを埋め込んだ多言語オンラインチャットシステムの開発にも着手した。本研究は、難しいテーマに対し果敢に取り組んだものであるが、論文発表といった具体的な形での成果をあげることが難しかったと思われる。開発に着手した複数のツールやシステムの、今後の展開が期待される。

(21)久野 遼平 研究者 担当アドバイザー:井上アドバイザー

「プロパティグラフによる社会データにおける常識の考慮」

本研究は複数の異なる情報源から収集した情報を「異質情報ネットワーク」として分析することで、未知の知見の発見や予測精度の向上を目指したものである。特に、ESG 投資(環境・社会・ガバナンス)に用いられるニュースデータを元に投資除外リストに新たに追加される企業を予想するという具体的な問題設定を行われ、モデルにラベル伝播法の亜種を用いることで一般的に利用されるモデルと比較して予想精度を飛躍的に向上するという成果を出され、またシステムのプロトタイプを完成されるなど、短期間で研究目的をほぼ達成した。研究過程でデータベースの作成等に試行錯誤を重ねられたため、期間中に査読付き論文の採録には至らなかったものの、プレプリントサーバーに投稿した論文は話題を呼び、本研究の成果を活用した共同研究の計画も進められている。今後はさらに、学術および実践の両面から本研究を進められることを期待する。

(22)平原 秀一 研究者 担当アドバイザー:井上アドバイザー

「制限された回路の最小化問題と回路下界の研究」

本研究は計算量理論における超難問である P NP 予想の解決を究極の目標とするものである。このミレニアム懸賞問題の一つである未解決問題に挑戦するため、本研究では「回路最小化問題」と呼ばれる計算量理論において中心的な問題の計算困難性の解明に取り組まれた。その結果、当該問題における「ブラックボックス帰着の限界突破」および「深さ3段の回路クラスに対する NP 完全性の解決」という2つの重要な成果を出された。前者は理論計算機科学のトップ会議 FOCS 2018 に採択され、日本人初となる Machtey Award(最優秀学生論文賞)を受賞された。後者は約40年間未解決であった問題を解決したものであり、計算量理論のトップ会議 CCC 2018 に採択されるなど、国際的に顕著な研究成果を上げられた。ACT-I 加速フェーズにおいても本研究を継続され、P NP 予想の解決という壮大な挑戦を続けられることを期待する。

(23)藤井 庸祐 研究者 担当アドバイザー:五十嵐アドバイザー

「二光子顕微鏡で観察できる細胞の形と動きを一細胞単位でデータ主導型に解析するバイオイメージインフォマティクスの確立」

本研究は、3次元イメージングによって得られた細胞の形を、球面マッピングと球面調和関数による級数展開によって特徴づけようとするものである。実際に形状データを取得し、細胞の形の比較するシステムの実装を行った。生物学と情報学の最新の技術を組み合わせて意欲的な研究であり、実用的な意義も深いと考えられるテーマである。今後、研究の再開が期待される。

(24)ホーランド マッシュュージェー 研究者 担当アドバイザー:尾形アドバイザー

「安全な AI こそ効率的:ロバスト学習による汎化性能向上の研究」

本研究では、機械学習技術において、データノイズに対して高い安定性を有する設計方法の確立と性能の実証的評価を目的としている。データのばらつきに対して従来の手法では、BN などのデータを直接正規化する方法や、損失関数設計などで対応するのが通常であったが、本研究では、データノイズが“勾配”に与える影響を陽にモデル化した点にその独自性がある。本手法は、機械学習のトップカンファレンスである AISTATS 2019 に採択されるなど高い評価を受けている。本手法を発展させた様々なアルゴリズムを提案、

論文文化している最中であり、今後、複数の学術成果につながっていくと大いに期待できる。加えて本研究では、手法の理論的評価だけでなく、実応用を目指したライブラリ構築を行なった点も意義深い。具体的には、深層学習ライブラリ Chainer への実装そしてコードの公開を実現した。今後、様々な学際領域に応用されていくと期待できる。

(25) 松倉 悠 研究者 担当アドバイザー: 土井アドバイザー

「機械学習を用いたケミカルシグナルフローの逆解析」

実環境でのメタンガス計測を目指し、ロボット開発、ガス濃度分布と風向風速の収集、ガス位置推定、ドローンによる気流発生シミュレーションを行った。学術的には、収集データの学習からガス位置推定で従来を上回る精度を実現できた。環境計測は重要な分野であり、環境研など関係部門と強みを生かしつつ協力して、目標とする複数ガス源位置検出を実現してほしい。また実用化において必要になった際には、論文だけでなく特許出願等も視野に入れるとよい。

(26) 宮本 崇 研究者 担当アドバイザー: 内田アドバイザー

「深層学習を用いた SAR 衛星画像からの地震被害域の自動判別」

本研究では、SAR 衛星からの地表画像を対象として、住宅の倒壊状況を画像認識により判断する手法の構築を目指すものである。SAR 衛星からの画像は極めて低解像度であり、一つの住宅あたりにすると、1 辺わずか 10 画素に満たない程度になってしまう。さらに住宅の見え方はそもそも多様であり、また倒壊の様相も多様である。このような困難な課題について、研究者は深層学習を利用し 2 クラス識別を試みた。具体的には画像を時間方向に積層して 3D 画像とした上で 3D-CNN による認識を試みた。さらに問題が imbalanced すなわち正例(倒壊)と負例(非倒壊)の割合が大きく異なることに着目し、imbalance 問題に頑健な rankSVM を 3D-CNN と組み合わせることで利用した識別も導入した。その結果、従来法よりも高い 65.3% の識別精度を実現するに至った。もともと情報系の専門家でないが、積極的に機械学習技術を導入し、難問に取り組んだことは評価できる。さらに領域会議でも積極的に発言・交流しており、今後も加速フェーズにおいて分野をつなぐ人材としての活躍を期待している。

(27) 村尾 和哉 研究者 担当アドバイザー: 川原アドバイザー

「システムからの通知にユーザが対応できないことを利用したセンサデータのアノテーション」

本研究は、ユーザが普段から持ち歩くスマートフォンに搭載されたセンサを活用し、ユーザがスマートフォンに表示された通知にうまく対応できるか否かでインプリシットなアノテーションを付与しようという挑戦的な試みである。研究期間内にはこうしたビジョンを可能にするための、スマートフォンを用いて任意の通知を発生させるアプリの構築とデータ収集に取り組んだ。さらに作成した基盤を用いて状況推定手法に取り組んだ。ユーザの応答時間を用いた状態推定と加速度データを用いた状態推定から最終的な状態推定結果とアノテーションの生成を判断することにより精度の高いアノテーション付与を行うことが確認できた。本研究はコンテキストウェアシステムを実現する際に必要不可欠なアノテーション付きのウェアラブルセンサのデータセットを格段に増やすための大きなチャレンジに取り組むための第一歩と位置付けられる。今後も本研究がモバイルセンサを軸としたデータ駆動の社会を創成する活動へと広がっていくことを期待している。

(28) 山下 聖悟 研究者 担当アドバイザー: 原アドバイザー

「水泳プール中の水の流れを 3 次元計測する技術の開発」

本研究は、プールのように水中に人が存在する環境における流体計測技術の実現を目指して、(A) 人体への危険性が少なく 3 次元空間での流体計測に適したトレーサー粒子の開発、(B) トレーサー粒子の動きをカメラ映像としての計測する技術の開発、(C) 水中特有の技術課題の解決、他領域への応用について、研究を推進した。(A) のトレーサー粒子の開発に関しては、より良い粒子を求めて複数の異なる粒子を積極的に開発し、有効性を検証するなど、顕著な成果を達成した。また、(B) と (C) についても、準備的な技術開発および課題の抽出という観点では貴重な知見を得ることができており、加速フェーズでのさらなる発展が期待される。これらの一連の成果は、複数の国際会議・国内会議で公表され、国際会議で最優秀論文賞を受賞するなど、国際的に非常に高く評価されている。さらに、スポーツや水流計測の専門家など異分野との連携やアウトリーチ活動にも積極的に取り組んでいる。このように学術的・工学的の両面から非常に挑戦的な課題に果敢に取り組む、顕著な成果を達成している点は高く評価でき、今後、情報学とその融

合分野の発展に大きく貢献する研究者として成長することが期待される。

(29) 吉田 博則 研究者 担当アドバイザー: 川原アドバイザー

「廃材の適材適所システム: スキャンした枝による参加型デザインアプリおよび建築への応用」

規格化された材料を用いて低コスト・大量生産に成功したことが、現在の資本主義経済の発展の下支えになっている。それは家具や建築に用いられる木材についても例外ではない。本研究は、これまで商品価値を見出しにくかった大きさや形が様々な木材も、情報と機械加工の力を借りることによって「個性」を生かした高付加価値な家具や建築構造への応用が可能であるのではないかという問いから始まっている。各々の材の特徴をデジタル化したデータを活用し、使いやすいデザインインターフェースとして参加型デザインアプリを開発し、2次元スクリーン、3次元ドームを設計できるシステムを開発し、検証した。研究成果を通じ、伝統的な落葉広葉樹林の管理手法である樺木(こりき)林業との協働を進めるなかで、持続可能な森林管理分野からの期待も集めている。今後も加速フェーズにおいて情報を活用したものづくりを通じて、環境を守り新たな文化を広める新たな活動へとつながることを期待している。

(30) 劉 麗君 研究者 担当アドバイザー: 土井アドバイザー

「時空間並列計算による高性能マルチスケール解析手法の確立」

水素脆化を解明するために、マルチスケール計算ツール、分子動力学シミュレーション、時間並列計算の3点から海外研究者と共同で取り組んだ。マルチスケール計算では反復回数と計算時間の大幅な削減を実現した。分子動力学シミュレーションでは欠陥なしグラフェンでは水素バリア効果を確認した。時間並列計算では奇跡のセグメント化により時間方向の並列化を実現し、国際会議など多数の発表を行った。加速フェーズでは引き続き研究を進めるとともに、将来的に、計算科学と水素研究のどちらに比重を置くのか、あるいは統合領域を開拓するのか、様々な発展が期待できる。

10. 評価者

研究総括 後藤 真孝 産業技術総合研究所 情報技術研究部門 首席研究員

領域アドバイザー (五十音順。所属、役職は2019年3月末時点)

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所 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 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	京都大学 デザイン学リーディング大学院 特定教授
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 特任准教授
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、2019年3月末現在。

(1) 外部発表件数

	国 内	国 際	計
論 文	3	30	33
口 頭	61	25	86
その他	21	10	31
合 計	85	65	150

(2) 特許出願件数

国 内	国 際	計
-----	-----	---

3	0	0
---	---	---

(3) 受賞等

- ・秋山 涼
MIRU インタラクティブ発表賞 受賞(2018.8)
- ・栗田 修平
言語処理学会第 25 回年次大会, 2019. 第 25 回年次大会最優秀賞 受賞(2019.3)
- ・小林 努
Best paper award at The 20th International Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM 2018) (2018.11)
- ・佐藤 重幸
日本ソフトウェア科学会第 35 回大会 (JSSST2018) , 2018 . 優秀発表賞 受賞(2018.8)
- ・塩川 浩昭
情報処理学会 2018 年度山下記念研究賞(2019.3)
第 10 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム , 優秀論文賞(2018.6)
- ・高谷 剛志
第 21 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2018) MIRU フロンティア賞(2018.8)
- ・中鹿 亘
日本音響学会栗屋学術奨励賞受賞(2018.9)
- ・平原 秀一
COMP-ELC 学生シンポジウム最優秀論文賞(2018.3)
電子情報通信学会 2018 年度学術奨励賞(2019.3)
Machtley Award (Best Student Paper Award at FOCS'18) (2018.10)
- ・山下 聖悟
AH2018 (The 9th Augmented Human International Conference), Best Paper Award(2018.3)

(4) 招待講演

- 国際 2件
- 国内 6件

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(2019年3月末現在) (応募時所属)	研究費 (百万円)
秋山 諒 (学生)	光投影による人の視覚特性を利用した錯覚的見かけ制御 (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	5
天方 大地 (委託先機関に所属)	空間データモデリングによるニューロンデータ検索の高速化 (大阪大学)	大阪大学 大学院情報科学研究科	3
上野 未貴 (委託先機関に所属)	深層学習による4コマ漫画のストーリー解析用データセット及びフレームワークの開発 (豊橋技術科学大学)	豊橋技術科学大学 情報メディア基盤センター	5
牛久 祥孝 (委託先機関に所属)	多様なデータへのキャプションを自動で生成する技術の創出 (オムロンサイニックエックス株式会社)	オムロンサイニックエックス株式会社 リサーチアドミニストレイティブディビジョン (東京大学 大学院情報理工学系研究科)	3
大谷 まゆ (学生) (委託先機関に所属)	映像とテキストを組み合わせたストーリー理解の実現 (株式会社サイバーエージェント)	株式会社サイバーエージェント アドテク本部 (奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科)	3
河瀬 康志 (委託先機関に所属)	公平な割当を求めるためのアルゴリズム研究 (東京工業大学)	東京工業大学 工学院	3
栗田 修平 (学生)	大規模テキストからの知識獲得と深層学習による照応・省略解析 (京都大学)	京都大学 大学院情報学研究科	5
櫛 惇志 (委託先機関に所属)	セマンティック情報を用いた情報検索システム (東京工業大学)	東京工業大学 情報理工学院	3
小林 努 (委託先機関に所属)	整合性を保持する形式仕様の自動抽象化システム「ソフトウェア顕微鏡」の開発 (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	3
小林 佑輔 (委託先機関に所属)	縮小するネットワークにおけるアルゴリズム理論の整備 (京都大学)	京都大学 数理解析研究所 (筑波大学 システム情報系)	2
佐藤 重幸 (委託先機関に所属)	自動チューニング可能な一般化N体問題解法枠組みの開発 (東京大学)	東京大学 情報理工学系研究科 (高知工科大学 情報学群)	3
塩川 浩昭 (委託先機関に所属)	Data Skewnessを捉えた超高速・省メモリな大規模データ処理 (筑波大学)	筑波大学 計算科学研究センター	3
鈴木 遼 (学生)	あらゆる人々が情報技術にアクセスすることを目的としたビジュアルプログラミング言語の開発 (早稲田大学)	早稲田大学 理工学術院	5

相馬 輔 (委託先機関に所属)	オンライン劣モジュール最適化に対する効率的かつ汎用的なアルゴリズムの開発 (東京大学)	東京大学 大学院情報理工学系研究科	3
高谷 剛志 (学生)	デジタルファブ리케이션における半透明感と光沢感の表現 (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 情報学研究科	3
チョ シンキ (委託先機関に所属)	Image-pivoted paraphrase extraction for deeper natural language and image understanding (大阪大学)	大阪大学 データビリティフロンティア機構	5
董 然 (学生)	人と操り人形のインタラクション: 文楽操り人形を用いた感情表現動作デザイン (筑波大学)	筑波大学 大学院システム情報工学研究科	3
中鹿 亘 (委託先機関に所属)	適応型制限ボルツマンマシンの複素拡張に基づくボコーダー不要な非パラレル声質変換 (電気通信大学)	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	3
西尾 理志 (委託先機関に所属)	無線通信制御の自己最適化機構 (京都大学)	京都大学 大学院情報学研究科	3
ハウタサーリ アリ (委託先機関に所属)	Supporting Non-Native Speaker Contribution in Multilingual Collaboration (東京大学)	東京大学 大学院情報学環・学際情報学府	3
久野 遼平 (委託先機関に所属)	プロパティグラフによる社会データにおける常識の考慮 (東京大学)	東京大学 大学院情報理工学系研究科	3
平原 秀一 (学生)	制限された回路の最小化問題と回路下界の研究 (東京大学)	東京大学 大学院情報理工学系研究科	4
藤井 庸祐 (学生)	二光子顕微鏡で観察できる細胞の形と動きを一細胞単位でデータ主導型に解析するバイオイメーجينフォマティクスの確立 (京都大学)	京都大学 大学院医学研究科	1
ホーランド マッシュージェイ (学生) (委託先機関に所属)	安全な AIこそ効率的: ロバスト学習による汎化性能向上の研究 (大阪大学)	大阪大学 データビリティフロンティア機構 (奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科)	4
松倉 悠 (委託先機関に所属)	機械学習を用いたケミカルシグナルフローの逆解析 (大阪大学)	大阪大学 大学院基礎工学研究科	5
宮本 崇 (委託先機関に所属)	深層学習を用いた SAR 衛星画像からの地震被害域の自動判別 (山梨大学)	山梨大学 大学院総合研究部	5
村尾 和哉 (委託先機関に所属)	システムからの通知にユーザが対応できないことを利用したセンサデータのアノテーション (立命館大学)	立命館大学 情報理工学部	5

山下 聖悟 (学生)	水泳プール中の水の流れを3次元計測する技術の開発 (東京大学)	東京大学 大学院情報学環・学際情報学府	4
吉田 博則 (学生)	廃材の適材適所システム:スキャンした枝による参加型デザインアプリおよび建築への応用 (東京大学)	東京大学 大学院情報理工学系研究科	3
劉 麗君 (専任) (委託先機関に所属)	時空間並列計算による高性能マルチスケール解析手法の確立 (大阪大学)	大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻 (名古屋大学 情報基盤センター)	5

研究報告書

「光投影による人の視覚特性を利用した錯覚的見かけ制御」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50131

研究者：秋山 諒

1. 研究のねらい

プロジェクタの投影光は有限かつ加算的であるため、投影対象や光源環境の各条件下で色域に限界がある。本研究では、投影光を用いて錯視を誘発することによって、色域を知覚的に拡張する手法を確立することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

色彩は人間にとって重要な要素である。近年、プロジェクションマッピング技術の開発により、プロジェクタは実物体の色彩を動的にピクセルごとに変化させられるツールとなっている。プロジェクタとカメラで構築される系を利用し、実物体の見かけを制御する研究が多くなされている。ただし、プロジェクタの投影光は有限かつ加算的であるため、投影対象や光源環境の各条件下で色域に限界がある。物理的にこの色域を拡張するためには環境を暗くすることやより光量の高いプロジェクタを使用する等の解決案はあるものの常に現実的であるわけではない。一方で、人は一様な光が当たっている環境下では色恒常性の働きによって、実際の色とは異なる色に知覚する場合がある。人は周囲からの影響を受けた相対的なものとして色を知覚しており、それは物理的な色とは異なる場合がある。本研究では、この色恒常性を投影光を用いて誘発することによって、色域を知覚的に拡張する手法を確立することを目指す。本研究は、1) 色恒常性を誘発しながら所望の色を知覚的に表現するための数理モデルの作成、2) 知覚量に基づいた色彩制御を可能とするプロジェクションシステムの構築、の 2 点を実施した。

まず、色恒常性の誘発にはその誘発条件を組み込んだモデルが必要である。色恒常性は、ある一様な色の照明が対象の領域に照射されていると人間が理解した場合に初めて成立する。つまり、この色恒常性を実際は複数の色の光が照射されているにも関わらず一様な一色の光が照射されていると錯覚させ、かつ、対象が所望の色であるかのように思わせる、ということを実現させるにはどのような色や明るさの光を投影する必要があるかを求めるモデルが必要であるということになる。本研究では、A. 対象物体の反射率、B. 対象物体に対する投影光、C. 対象物体の周辺に対する投影光、の 3 点に着目してモデルを作成した。具体的には、対象物体とその周辺への投影光を調整することで、一様な一色の光が投影されている場合の反射光を再現することで、色恒常性を誘発させるモデルを作成した。次に、作成したモデルを適用したプロジェクションシステムの構築に取り組んだ。プロジェクタ-カメラ系を使用して、実物体の反射率を推定し、その反射率を入力された所望の反射率の色に光投影で知覚的に表現する。まず対象の反射率と目標の反射率、その環境の環境光

から表現できる色域を計算し、入力された目標色がその色域外の場合に色恒常性を誘発しながら知覚的に表現する。

(2) 詳細

研究テーマA:「色恒常性を誘発しながら所望の色を知覚的に表現するための数理モデルの作成」

一様の照明下では、その照明色が異なっても、色恒常性によって対象物の色を同一の色として知覚することが知られている。よって、投影対象と目標色の反射率に基づき、対象領域とその周辺領域に一樣な光が照射されるように投影光を制御することで、色恒常性を誘発することが可能である。

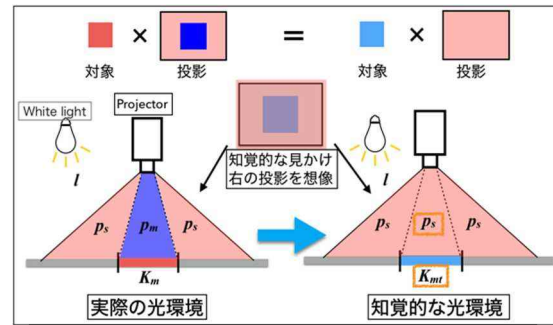


図1 色恒常性誘発の投影色決定の図

図1のように、反射率 $K_M = \text{diag}(k_{M,R}, k_{M,G}, k_{M,B})$ の実物体が無彩色の環境光 $I = (I, I, I)^T$ の下にある環境を想定する。その場合に物理的な反射光 c は、 $c = K_M I$ と表すことができ、この色が一般的に物体色と呼ばれる色である。一般的なプロジェクタを用いた色彩制御では、この反射率 K_M の対象領域のみに有彩色の投影光 $p_M = (p_{M,R}, p_{M,G}, p_{M,B})^T$ を照射し、周辺領域へ無彩色の投影光 $p_S = (p_{S,R}, p_{S,G}, p_{S,B})^T$ を投影する。この際に、反射率 K_M の領域への投影光 p_M は変化させず、周辺領域への投影光 p_S を有彩色へ変更することで、色恒常性の働きにより p_S の影響を受け、反射率 K_M の領域の色の知覚が変化する。この色の知覚の変化が生じた結果、反射率 K_M である領域が目標の反射率 $K_{MT} = \text{diag}(k_{MT,R}, k_{MT,G}, k_{MT,B})$ であるように知覚させることを目指す。そのためには、対象領域が目標の反射率 K_{MT} であり、一様に投影光 p_S が照射されているように知覚させる必要がある。つまり、目標の反射率 K_{MT} に周辺領域への投影光 p_S が照射されている場合に得られる反射光と同一の光を、反射率 K_M の領域に投影光 p_M を投影することによって得ることができれば良い。これを実現するためには以下の式を満たす p_M, p_S を求められれば良い。

$$p_M, p_S = \arg \min_{p_M, p_S} |K_M(p_M + I) - K_{MT}(p_S + I)|$$

(ただし、 $0 \leq p_M \leq p_{max}, 0 \leq p_S \leq p_{max}$ とする)

上記の式を満たす投影色を対象と周辺のそれぞれへ投影することで、実際には図1の左側のような光を投影しているにも関わらず、反射光のみを見ることが出来る人間にとっては図1の右側の光環境であるかのように知覚させることができる。

研究テーマB:「色恒常性誘発モデルを組み込んだプロジェクションシステムの構築」

研究テーマAで作成した色恒常性モデルを組み込んで、実際に実物体の色を知覚的に制御するシステムの構築を行った。具体的には、プロジェクタカメラ系を使用し、対象の反射率

をリアルタイムで推定し、その見かけを入力された所望の見かけになるように投影光を制御するシステムの構築を行った。投影対象とその投影結果を図2に示す。個人差はあると考えられるが、提案手法と単純な重畳投影の投影結果を見比べると、違った色として知覚されるはずである。

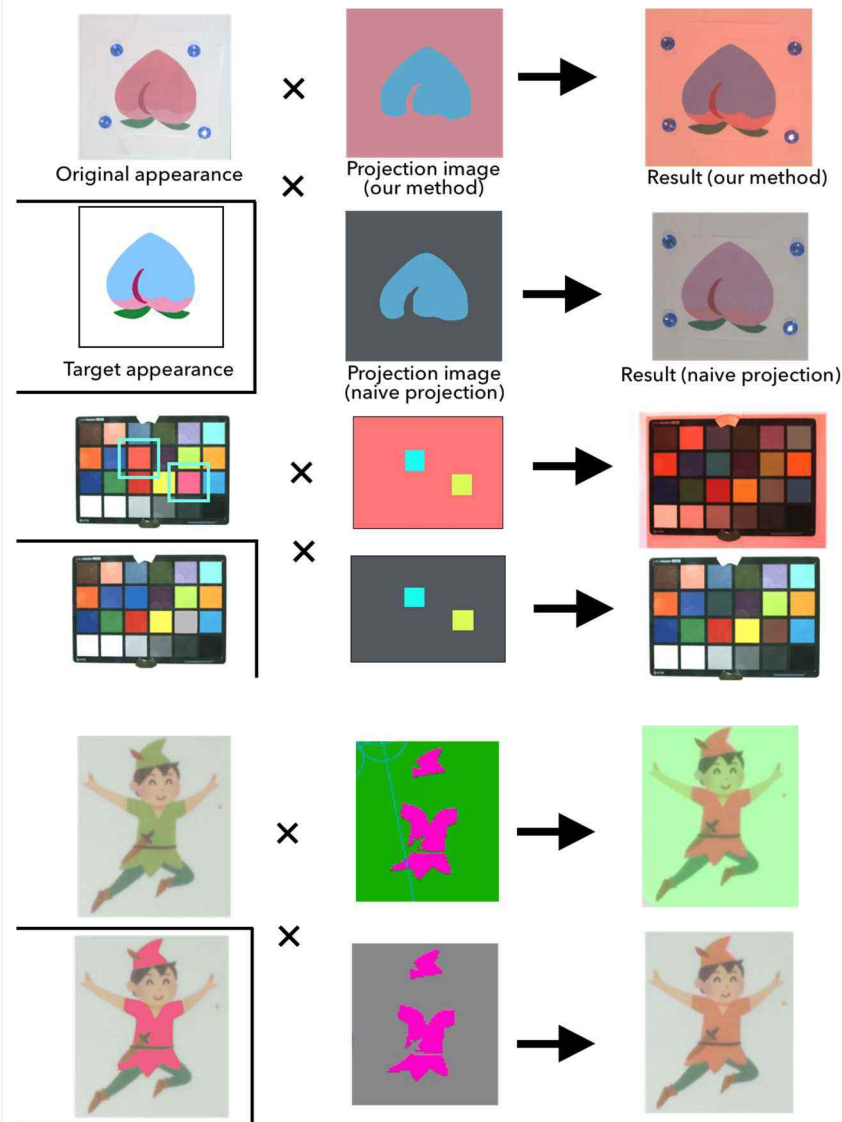


図2 単純な重畳投影と提案手法による投影結果

3. 今後の展開

色恒常性を誘発するモデルは作成できたものの、現在のモデルはあまり濃い色を投影しないことを前提に「一様な色の光が当たっていても人間は実物体の色を白色光下で見た色と全く同じと感じる」という仮定を置いている。この過程はある程度成立するものの、人間の色恒常性はそ子まで完全なわけではないので、正確には間違っている。より正確な知覚的色彩表現を実現するには色知覚モデルの導入が求められる。加えて、現在は周辺への有彩色の投影の範囲は特に限定していない。そのため、対象の色を変更するために周辺の領域全てに有彩色光を投影しなくてはならないという問題がある。色恒常性が成立する照明の範囲については知見がないが、この

研究に特化した条件であっても解明できれば、周辺の色をできるだけ犠牲にしない色表現が実現できると考える。これらがクリアできれば、表現色域の十分に担保するために夜や真っ暗な室内でしか実施できないプロジェクションマッピングを明るい場所でも実現することができると考える。また、目で受光する光の色と知覚する色に着目したものであるため、色弱患者の方の実際には見えない色を本研究のシステムで知覚的に見せてあげる、ということも可能ではないかと考えている。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

ACT-I 採択時当初の目的は概ね達成できたと考えている。ただ、色恒常性の誘発に必要な周辺への投影の広さに関しては、当初から問題意識があったので、そこまで取り組めなかったことは残念である。

博士課程の学生であるため指導教員の先生方にアドバイスを受けることはあったが、基本的には研究実施も研究費執行に関しても主体的に実施できたと考えている。そのおかげで今まで必要だがすぐには手に入れられなかった物品等を自分で購入でき、研究の高速化に繋がったと考えている。

・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(今後の見込みも重視してください。)

本研究は情報学の分野だけでなく心理学の分野に対して学術的インパクトがあると考えている。心理学分野では錯視の研究は多くなされているが、その成立条件や成立具体を調べるものが多く、それを誘発し利用する研究はほとんどない。また、色弱患者のサポートに関しては、色弁別を補助するシステムは多くあるが、「見えない色を見せる」ということを特別な機器の装着なしに叶えるものは類を見ない。

・研究課題の独創性・挑戦性

色恒常性は人間の見る色を一定に保つ働きである。その働きを色を変化させる制御に逆に利用するという本研究は独創性がある考える。また、一様な光が照射されると成立する色恒常性をそれ以外の方法で誘発させるという課題には挑戦性があると思う。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 著者. 発表論文タイトル. 掲載誌名. 発行年, 巻号, 始頁-終頁, その他
--

(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. **Ryo Akiyama**, Goshiro Yamamoto, Toshiyuki Amano, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato. "Perceptual Appearance Control by Projection-Induced Illusion" In *Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality, Osaka, Japan*, 2 pages, March, 2019
2. **Ryo Akiyama**, Goshiro Yamamoto, Toshiyuki Amano, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato. "Light Projection-Induced Illusion for Controlling Object Color." In *Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality, Reutlingen, Germany*, 2 pages, March, 2018
3. **秋山 諒**, 山本 豪志朗, 天野 敏之, 武富 貴史, プロプスキ アレクサンダー, サンドア クリスチャン, 加藤 博一, "色恒常性を利用したプロジェクタの色域の知覚的拡張" 第 21 回 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU 2018), 4 pages, August, 2018 . (**MIRU インタラクティブ発表賞 受賞**)
4. **秋山 諒**, 山本 豪志朗, 天野 敏之, 武富 貴史, プロプスキ アレクサンダー, サンドア クリスチャン, 加藤 博一, "知覚量に基づく光投影による色制御実現に向けた色知覚モデルの検討" 日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究会, MR2017-16, October, 2017.

研究報告書

「空間データモデリングによるニューロンデータ検索の高速化」

研究期間：平成 30 年 11 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50132

研究者：天方 大地

1. 研究のねらい

ニューロサイエンス分野には、ニューロンのモデリングや神経回路の形成メカニズムの解明など、多くの問題が存在する。過去は実験室によるアナログな解析が主流であったが、コンピュータサイエンスの発展により、シミュレーション等による解析が可能となってきている。また、ニューロンの構造や脳を構成するニューロンの数が明らかになるにつれ、現実的なモデルを考慮した際の計算時間が問題となる。例えば、ニューロン間のインタラクション(シナプス結合を成すニューロンのペア)を計算する場合、単純にはニューロンの数の自乗の組み合わせが考えられるため、計算時間が爆発的に増加する。一方、科学的知見を得るためには、システムに対してインタラクトに問い合わせ(高速検索)が可能であることが理想であり、ニューロンの数に対してスケーラビリティを保有する検索アルゴリズムが要求される。

ニューロン間の信号処理やシナプス結合が起きる条件として、3次元空間における近接性が挙げられる。つまり、ニューロンの分析をより高度かつ高速に行うために空間データベース技術が必須である。空間データベースに関する研究は盛んに行われているが、既存研究では一つデータは一つの点と想定している。一方、ニューロンは単一の点ではなく、(離散化することで)大量の点から成る。ここで、ニューロン間の結合は axon と dendrite と呼ばれる部位間でのみ行われるという制約がある。そのため、ニューロンデータを取り扱う場合、既存技術の適応は困難であり、新たな技術開発が必要となる。本研究では、上記のようなデータを想定し、重要な役割を果たすニューロンの検索技術の開発を目的とする(ただし、アルゴリズムの出力を用いた実証実験等は本研究の対象外とする)。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、1つのデータが複数の点で構成されているものに焦点を当てた。これは、ニューロンのデジタルデータに由来する。また、他のデータと最もインタラクションをとっているものを重要なデータと想定・定義し、そういったオブジェクトを検索するオペレータを設計した。

具体的には、ユーザが閾値 r を指定したとき、2つのデータ間に距離が r 以内となる点のペアが存在する場合、それらのデータにはインタラクションがあると定義する。このとき、あるデータの重要度(スコア)は、インタラクションしているデータの数となる。このオペレータは、最もスコアが大きいデータを出力する。この問題を解く単純なアルゴリズムは、全ての点間の距離を計算することで、全てのデータのスコアを計算するものである。データの数を n 、1つのデータに含まれる点の数の平均を m としたとき、このアルゴリズムの時間計算量は、 $O(n^2m^2)$ となり、データ数または点の数が大きいデータ集合に対応できない。また、オンライン

時間で $O(n \log n)$ となるアルゴリズムが存在することも証明したが、このアルゴリズムは空間計算量が $O(n^2)$ で、オフライン処理の計算量が $O(n^2(m \log m + \log n))$ となり、実践的ではない。

そこで、実践的かつ効率的なアルゴリズムを設計した。このアルゴリズムは、新たなデータ構造である BIGrid (a hybrid index of compressed Bitset, Inverted list, and spatial Grid) に基づいて動作する。本問題のボトルネックは、データのスコアを計算する処理であり、高速に解を出力するためには、スコアを計算するデータの数を削減することが重要である。提案アルゴリズムでは、BIGrid を用いてスコアの下界値と上界値を計算することにより、解になり得ないデータをフィルタリングし、フィルタされなかったデータのみ正確なスコアを計算する。また、過去の検索の結果を利用した高速化、および、マルチコアを用いた高速化技術も開発した。これらの成果は、5-(1)-1 および 5-(1)-2 で発表した(する)論文にまとめられている。

(2) 詳細

第1ステップ: 重要なデータ(ニューロン)を検索するオペレータの設計。これは、インタラクションという概念を用いてデータの重要度・スコアを定義し、問題を定式化することによって達成した。(ユーザが閾値 r を指定したとき、2つのデータ間に距離が r 以内となる点のペアが存在する場合、それらのデータにはインタラクションがある。)

また、この問題は、離散数学によってセマンティックを解釈できる。データのインタラクション関係をグラフで表す(図1)。データを頂点、データ間にインタラクションがあれば、それらの頂点に辺があるとすると、頂点の次数はスコアを表し、オペレータが出力するデータは、次数中心性が最大のものとなり、ネットワークのハブを示す(黄色の頂点)。

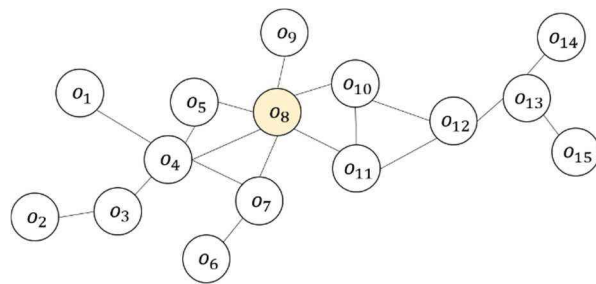


図 1: インタラクション関係のグラフ化

第2ステップ: 問題の難しさ(挑戦度)の解析。上記の問題(オペレータ)は、非常にシンプルであるものの、効率的な解法は自明ではない。まず、解を出力するための単純なアルゴリズムは非効率的であることを示す。以降、データの数を n 、1つのデータに含まれる点の数の平均を m とする。あるデータのスコアを計算する単純なアプローチは、自身の全ての点と、他の全てのデータの全ての点に対して距離計算を実行するものである。そのため、1つのデータのスコアの計算には $O(nm^2)$ 時間かかり、全てのデータのスコアを計算する時間は $O(n^2m^2)$ となってしまう。この結果から、単純な方法はデータ数が多い場合に適切でないことが分かる。

次に、オンライン時間が $O(n \log n)$ となるアルゴリズムが存在することを証明する。まず、全てのデータが他の全てのデータに対して最近傍ペアを計算し、その距離を昇順

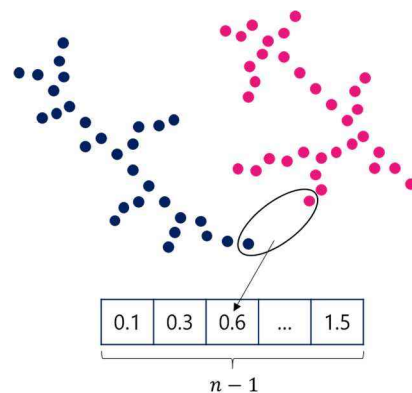


図 2: 最近傍ペアの距離を格納する配列の例

に配列に格納する(図2)。この構造を用いると、 r が与えられたとき、あるデータのスコアは、自身の配列において距離が r 以内となる要素の数となり、この検索は二分探索により $O(\log n)$ で済む。そのため、全てのデータのスコアの計算には高々 $O(n \log n)$ 時間しかかからない。しかし、このアルゴリズムには大きな欠点が2つ存在する。1つ目は、空間計算量が $O(n^2)$ となり、データ数が大きい場合に対応できない。2つ目は、データ構造の構築に $O(n^2(m \log m + \log n))$ 時間がかかってしまい、実際の解析を行えるようになるまで非常に時間がかかってしまう(実験では8時間を超えた)。

以上により、本問題の難しさを理論的に解析できた。この事実を踏まえると、実践的な効率性を持つアルゴリズムが必要となることが分かる。

第3ステップ: 実践的かつ効率的なアルゴリズムの設計。 本問題のボトルネックは、正確なスコアの計算処理である。出力されるデータ数は1つであることと、大半のデータのスコアは解に程遠い値であることを考慮すると、正確なスコアの計算を可能な限り削減することによって解を高速に出力できることが分かる。そのため、スコアの幅(下界値と上界値)を低コストで計算することより、解になり得ないデータをフィルタリングする。

このアイデアを実装するため、データのスコアの下界値と上界値を効率的に計算できるデータ構造である BIGrid (a hybrid index of compressed Bitset, Inverted list, and spatial Grid) を設計した(図3)。これは、グリッドの各セルに圧縮ビットセットや転置ファイルを持たせた構造である。スモールグリッドはスコアの下界値の計算に使われ、ラージグリッドはスコアの上界値および正確な計算に使われる。スコアの下界値と上界値の計算速度は正確なスコアの計算よりも圧倒的に早く、また、解になりえないデータも大量に見えてくることから、処理の高速化を実現できた。

スモールグリッド		ラージグリッド		
セルキー	圧縮ビット集合	セルキー	転置リスト	圧縮ビット集合 圧縮ビット集合(union)
K	$\mathbf{b}(c_K^s)$	K	$I(c_K^l)$	$\mathbf{b}^{adj}(c_K^l)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
K'	$\mathbf{b}(c_{K'}^s)$	K'	$I(c_{K'}^l)$	$\mathbf{b}^{adj}(c_{K'}^l)$

図 3 : BIGrid の構造

さらに、過去の検索において、同じような閾値 r' が指定されていた場合、その検索で計算された結果を用いることによって処理を高速化する仕組みを設計した。これにより、上界値の計算処理を高速化できた。

加えて、マルチコアによる並列処理を可能とするようにアルゴリズムを拡張した。並列処理を行う際に重要なのは各コアの処理量を均一化することである。提案アルゴリズムは、BIGrid の構築、下界値の計算、上界値の計算、正確なスコアの計算の4ステップからなるが、それぞれコストモデルをたて、各コアのコストがほぼ均一になるようにデータ、または点を割り当てるアルゴリズムを設計した。その結果、コア数を増やすごとに処理時間が短縮されることを確認した。

3. 今後の展開

1つのデータが複数の点によって構成されるアプリケーションは、ニューロサイエンスに限らない。例えば、トラジェクトリデータベースやポイントクラウドも同様の構成を持つ。この観点から、本

研究はニューロサイエンスに限らず幅広いアプリケーションに利用できる分析ツールを提供していると考えられ、重要性が増す可能性がある。また、今回は次数中心性にのみ取り組んだが、次数中心性が高いデータが重要とは言い切れない場合もあり、他の中心性をテストする必要がある場合も考えられる。本研究の提案アルゴリズムは次数中心性にのみ対応しているため、他の中心性を取り扱うことはオープンプロブレムである。今後は、本研究を皮切りに関連した問題に取り組む研究が増加することを期待する。

4. 自己評価

- 当初予定していた研究目的は概ね達成できた。本研究では、次数中心性に焦点を当てたが、中心性の定義は他にもいくつか存在する。他の中心性に関するアルゴリズムの設計を行うまでに至ればより良かったように思う。
- 研究は基本的に個人で実施し、サイトビジットでのアドバイスをもとに研究をより良い方向に進めることができた。また、国際会議への参加を通して関連研究の動向を探り、使える技術を参考にすることもできた。また、英語論文執筆の際は、英文校閲が非常に役に立った。
- 本研究の成果はデータベース分野でのトップ会議に採択され、今後多くの研究者の目に止まることが予想される。そのため、さらなる効率化やモデルの向上・拡張、および産業界への応用が期待でき、多くのアプリケーションで利用されるまでに昇華されるものと信じている。
- 本研究では、空間データベースにおける新たなモデル上での検索オペレータとその効率的な解法を提案した。これまでに1つのデータを点集合として考えたオペレータとそのアプリケーションについては議論されていなかったことから、本研究の独創性を見て取れる。また、本研究の挑戦性については、計算時間の面から把握でき、2-(2)を参照されたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 天方 大地, 原 隆浩, 空間データベースにおけるインタラクティブオブジェクトの高速検索, 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(DEIMフォーラム2019), 2019年3月.
2. Daichi Amagata and Takahiro Hara, Identifying the Most Interactive Object in Spatial Databases, Proceeding of the IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE), April, 2019 (to appear).

(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)-2 の国際会議はデータベース分野におけるトップ会議であり、フルペーパー採択された。

研 究 報 告 書

「深層学習による 4 コマ漫画のストーリー解析用データセット及びフレームワークの開発」

研究期間：平成 30 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50133

研究者：上野 未貴

1. 研究のねらい

[研究提案の要旨]

本課題では状況や因果関係を言語と絵で表すマルチモーダルな表現媒体であり、明瞭な話の構造を持つ 4 コマ漫画を対象とし、機械学習のためのオリジナルなデータセットおよび 4 コマ漫画データ解析の要素技術を統合したフレームワークを構築する。具体的には、出現するオブジェクトを指示して漫画を制作し、作者と読者複数名によって話のオチをアノテーションしたデータセットを構築する。研究期間中に、4 コマ漫画画像を入力として、深層学習により感情識別、順序識別をして、オチと話の構造に関するキャプションの出力を目指す。将来的には人間の創作物の制作支援に加え、身体性を有しない対話システムやロボットが事前に前後状況を考慮して一般的に人が想起する発話や行動を学習するための手法として貢献できると考える。

[研究の目的・背景]

本課題では、漫画の話に着目したデータセットの構築および機械学習により解析するフレームワークの構築を目的とする。漫画やアニメは日本の重要な知的創作物であり、言語と絵から構成されるマルチモーダルな表現媒体である。実世界の状況やストーリー、仮想的な世界観などのメタな情報を端的な表現手法で表す形式知であると考えられる。近年、画像識別技術や自然言語処理技術の向上、Generative Adversarial Networks によるイラスト生成から、漫画の解析、自動生成の両面について、情報技術を用いた現実的なアプローチが可能になりつつある。しかしながら、漫画は創作物であり、著作権の問題から、十分な質と量を要したデータの解析が難しく、研究の初期段階で挫折するという重大な問題がある。漫画は、自然言語と絵で人に共感される因果関係のある話を表す、特定状況で成立する対話がコマ内に含まれるという、古くからの人工知能研究の遂行に役立つ課題を多分に含む良質なデータである。加えて、計算機が漫画の話を理解したり、創作することは、人工知能分野での先端課題であるという挑戦性を有している。

2. 研究成果

(1) 概要

既存の漫画のデータセットは本研究開始前に国内外にいくつか存在するが、作家、ジャンルに統一性がない、セリフ中心の話が多いなどの問題があった。また、アノテーションは、位置やキャラクタ名、セリフ、コマの形状などの基礎的な情報に留まっており、感情やストーリーに関わるアノテーションがなかった。本研究では、長さとかまの大きさに規約があり、オチが比較的明確である 4 コマ漫画に着目した。漫画のストーリー理解の技術開発を狙うため、事前にシナリオを共通化し、アノテーションとプロットを十分に定義することで、機械学習に用

しやすい学術利用可能なデータセットを構築した。ストーリー理解に関わる新たな深層学習のタスクを提案、実装し、タスクを組合せることにより創作支援への応用可能性を見据えたフレームワークの概念を示した。

(2) 詳細

研究テーマ A「データセット構築」



図 1 共通シナリオに対する 5 作者の描いた 4 コマ漫画

ストーリーに強く関わる 4 コマ漫画の構造パターンを提案し、キャラクタを制約して、テーマとプロットを共通とし、異なる 5 作者に同一プロットに対する 4 コマ漫画制作を依頼した。あらかじめ画像ファイルのレイヤーの分け方やテキストのフォーマットを指定し、著作権に配慮し、同一の話の表現の分散を考慮可能な機械学習向きのデータセットを構築した。既存研究など研究者側の視点だけでは未知であった創作時に取得すべき情報を、協力を得たアートディレクタや漫画家の方などの創作者側の視点を具体的な制作の中で多く取り入れることができ、研究開始時よりも想定したよりも詳細なデータを整備可能となった。

図 1 に 5 作者の描いた 4 コマ漫画を示す。

研究テーマ B「漫画のストーリー理解に必要なアノテーションの付与」

制作段階から詳細に事項を整備し、台詞、感情、キャプションなどのメタデータを指定し、ストーリー理解に適用可能なアノテーションを付与した。創作者と共同で創作段階から研究に取り組むことで、これまで得ることが極めて困難だった作者側の情報を得ることができ、ストーリーの創作時に考慮される情報を取得することができた。読者に対する大規模アノテーションについては、学術発表やアウトリーチによりガイドラインの策定に配慮すべき事柄が残ることがわかり、今後の公開に合わせて、段階的に実施する。

研究テーマ C「深層学習手法の実装」

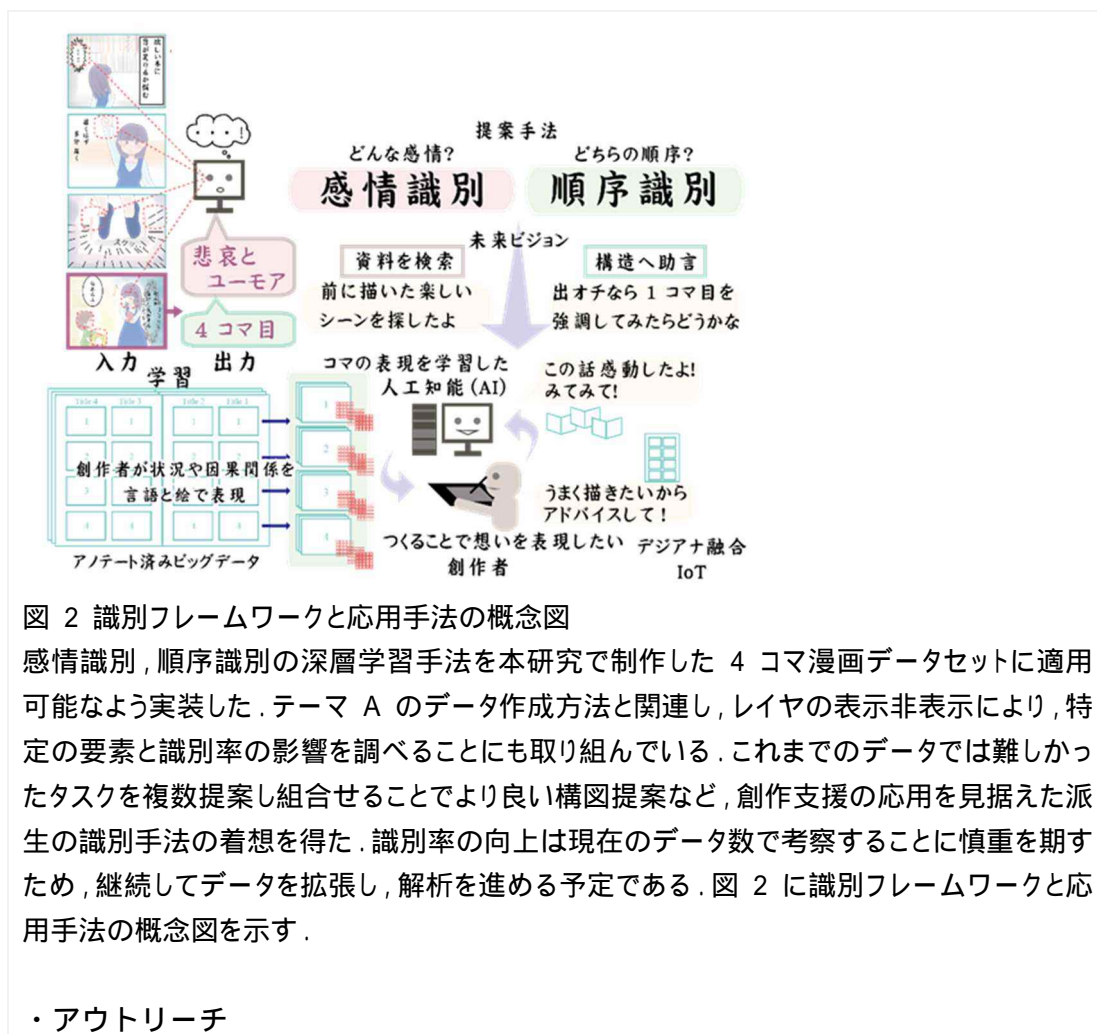


図 2 識別フレームワークと応用手法の概念図

感情識別、順序識別の深層学習手法を本研究で制作した 4 コマ漫画データセットに適用可能なよう実装した。テーマ A のデータ作成方法と関連し、レイヤの表示非表示により、特定の要素と識別率の影響を調べることも取り組んでいる。これまでのデータでは難しかったタスクを複数提案し組合せることでより良い構図提案など、創作支援の応用を見据えた派生の識別手法の着想を得た。識別率の向上は現在のデータ数で考察することに慎重を期すため、継続してデータを拡張し、解析を進める予定である。図 2 に識別フレームワークと応用手法の概念図を示す。

・アウトリーチ

漫画の研究および一部相互発展する形にて並行で研究を進めてきた創作支援システムの記事掲載を通じ、本テーマへの関心が想定より高まり、研究目的を社会に広く伝えることができ、今後の公開や継続的拡張を進めやすくなった。

3. 今後の展開

構造とキャラクタ単位の詳細なマルチモーダルな情報を有するアノテーションを付与したデータをもとに、創作支援に役立つ複数の識別タスクを継続して提案、解析を進める。また、データはレイヤー別に分かれており自動生成に関する研究も増加させる。いずれも、创作者の支援や創作物に関するユーザ支援に役立て、コンテンツが増加した産業への応用へ役立つつことが見込まれる。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

データ制作に関して定義を明確にして学術利用可能なデータを完成させた。識別タスクについては実現により多くのデータが必要であることがわかり、実装に課題が残る部分があるが、新たなタスクの組合せによる応用可能性に係る概念を提案した。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

詳細な定義に基づきデータを作成し、深層学習を用いた識別タスクを提案して実験をした。研究費は公開前提とした学術研究用データ制作および発表や海外機関からの意見取得に対して執行した。

・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

データ制作に関しては期間中に学術面と社会面両方から強い期待が寄せられた。データとコードの公開を順次進めて、学術分野の発展および産業発展の効果を計測する。

・研究課題の独創性・挑戦性

先に部分的な制約を与えることでデータ制作と同時に完備なアノテーションを得ること。研究者自身が創作者と共同で学術利用可能な 4 コマ漫画を創ることにより、創作および研究に役立つことを想定したデータセットを創ることに独創性がある。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 著者. 発表論文タイトル. 掲載誌名. 発行年, 巻号, 始頁-終頁, その他
--

(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)

[主な学会発表]

1. 上野 未貴, "創作者と人工知能: 創作者と人工知能: 共作実現に向けた創作過程とメタデータ付与 4 コマ漫画ストーリーデータセット構築", 人工知能学会, 4Pin1-16, 6 月, 鹿児島, (2018)
2. Miki Ueno, "Structure Analysis on Common Plot in Four-Scene Comic Story Dataset", MultiMedia Modeling(MMM2018), Vol.11296, pp.625-636, Springer, 査読有り, Greece, Thessaloniki(2018),
3. Miki Ueno, "Four-scene Comic Story Dataset for Softwares on Creative Process", New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques(SOMET2018), Vol.303, pp.48-56, 査読有り, Spain, Granada (2018)

[書籍記事]

4. Newton 別冊『ゼロからわかる人工知能 仕事編』(ニュートン別冊), 2018 年 12 月

[報道]

5. AI 4 コマ漫画挑戦/将来は漫画家? 4コマ考えるAI、まだ初心者ですが..., <https://digital.asahi.com/articles/ASL5Z63JWL5ZOBJB00J.html>, 朝日新聞紙面: 2018 年 6 月 1 日夕刊 7 面「AI 4 コマ漫画挑戦」, 朝日新聞デジタル版: 2018 年 6 月 5 日「将来は漫画家? 4コマ考えるAI、まだ初心者ですが...」

研究報告書

「多様なデータへのキャプションを自動で生成する技術の創出」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50134

研究者：牛久 祥孝

1. 研究のねらい

画像や動画のキャプション生成は、データ内の事物とそれぞれの関係性を理解して自然言語で表現する、メディア理解の究極の形態の一つである。本研究では、多様なマルチメディアデータ、特に画像や動画に対する自動キャプション生成技術の創出を目指す。特に、本質的に必要かつ未達の3つの要求機能、(i)個人の属性や好みへの対応、(ii)詳細な表現への対応、(iii)教師キャプションを持たないデータへの対応を実現し、多様なデータへのキャプションを自動で生成する技術を創出することが目的である。

キャプション生成は、入力データを説明する重要な語彙の推定、それらの語彙を文法モデルでつなぐことによるキャプション生成、という前後半のステップからなる。本研究では、上記3要求機能に共通した2つのボトルネック 語彙推定と文法モデルにおける、a 訓練サンプルの偏りと b 少数データしか存在しない状況 が存在すると考え、自然言語処理・画像認識・機械学習といった諸分野の先端的な知見を統合し、これらの解消を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、画像や動画を対象に、各要求機能を満たしたかどうかを報酬として算出する評価器を組み合わせるアプローチをとった。正解キャプションとの差を最小化しつつ報酬の和を最大化し、上記3要求機能を達成する。

(i)個人の属性や傾向への対応については、あるユーザのために生成されたキャプションかどうかの報酬を計算できる評価器を開発した。(ii)詳細な表現への対応については、キャプション内容の差分に注目した。詳細さに欠けたキャプションは、複数の入力データに対して同様の文になると考えられる。生成されたキャプションから逆にデータを検索したとき、入力したデータの順位がそのままキャプションの表現の詳細さとして評価できる。そこで、生成したキャプションからのデータ検索器を報酬として採用した。(iii)教師キャプションが無い状況への対応については、他のマルチメディアデータで教師キャプションが付与されているデータセットやテキストのみのデータからの知識転移を検討した。

(2) 詳細

研究テーマ(ii)「データ中の小さな領域をも詳細に表現できるキャプション生成技術」

(ii)詳細な表現への対応のための生成したキャプションからのデータ検索器については、ユーザがより注目しやすいような差分についてのキャプションを生成するべきだとして、新たな問題定義を提案した。

まず、画像 1 枚 1 枚の差分ではなく、画像内の同種の物体についての差分に注目してキャプションが生成できるかという問題に取り組んだ。具体的には、画像中に複数の人や物などが写っているものを対象として、ある一つの人・物を対象としてキャプションを生成する。逆に、生成されたキャプションを手掛かりとして画像内の人・物を探した時に、入力として与えられた人・物が最もふさわしいものとして見つかるかどうかを評価器で計算させる。このような評価を最大化するキャプションが生成できれば、ある画像内で与えた人・物を表現するのに十分な詳細さのキャプションが生成できたことになる。この技術は直ちに拡張可能で、ある画像群内で与えた画像を表現するのに十分な詳細さのキャプションを生成することで、要求機能(ii)を達成できる。

既存の研究でも生成したキャプションから入力の人・物を検索できるかという評価器を用いるものが存在したが、それらはユーザにとって「探しやすい」つまり、目立つような差分に注目しつつ、冗長な記述で読解の時間を長引かせないよう簡潔に記述できる技術ではなかった。本研究では視覚的顕著性とアテンションを活用した差分キャプション生成手法を提案し、このように人に追って探しやすいような詳細さをもった差分キャプション生成手法を開発した。この研究に基づいた知的財産については国内特許を出願中である。また、レポジトリでのレポートおよびデータセットの公開も進めている。

アウトリーチ活動

本研究分野のアウトリーチ活動についても精力的に進めた旨を報告したい。2017 年 9 月～2019 年 3 月までの間に、キャプション生成の成果を含む講演を、国際会議ワークショップ基調講演を含めて 12 回つとめた。また画像・動画キャプション生成について書籍 1 件、解説記事 2 件を執筆したほか、現在もう 2 件の執筆を予定している。執筆済み解説記事 1 件は、映像情報メディア学会誌 2018 年 9 月号で Vision & Language 分野を俯瞰する特集記事としてゲストエディタを務めるとともに、1 章として画像・動画キャプション生成について執筆したものである。提案者が執筆した章は会員の投票による支持を受け、結果として提案者は当該号のベストオーサーに選出された。

3. 今後の展開

本研究者は、記事や動画といったコンテンツが計算機によって自動的に生成されるという未来ビジョンを持っている。現在はこれらのコンテンツ生成には人的コストや専門知識が必要だが、今後は膨大で多様なテキスト・マルチメディアデータを組み合わせたり、生成したりといった処理によって自動で提供されると考えている。ユーザが望む内容のコンテンツを提供するには、一般的なユーザにとって易しい方法で、コンテンツを編集・再検索できる技術が重要である。従って、ユーザがコンテンツを入手するための入力として自然言語が考えられ、そのためには言語によるコンテンツ理解や検索が必須だと考えている。本研究は、言語を通じて AI とインタラクションしながらコンテンツを入手し楽しむ未来へと繋がる、極めて重要な取り組みである。

ここまで、従来にはない 3 要求機能を満たす新たなキャプション生成技術を掲げ、基礎研究を進めてきた。本研究者は引き続き JST ACT-I の加速フェーズで同研究を継続する予定である。特に、本研究で掲げる問題設定に即したデータセットおよび評価基盤を構築して多くの研究者が挑戦するような研究領域を形成すること、およびこの 1 年半で得られた研究成果をその評価プロトコルに即して応用・発展させていくこと、この 2 点を進める予定である。

研究領域の形成としては、学習用キャプションが少なく、かつ個人適合と詳細な表現が求められるデータセットが必要である。キャプションが限られるのは、そのマルチメディアデータ自体の作成からコストがかかる場合である。また、データの内容が複雑になるほど個人適合と詳細表現の必要性が増す。そこで本研究では、画像としてレシピや組み立て書のような図とテキストが混在したマニュアルを、動画として料理などの作業動画を検討している。これらが言語化されれば、一般的なユーザが新たなスキルや手順を身につける際の検索が容易になり、ユーザが理解する際の大きな手助けとなる。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

本研究の 3 つの要求機能のうち、(i)についてはまず、個人の好みに適合したキャプションかどうかを判定する評価器自体が新規な研究となるため、これを進めた。(ii)については、詳細なキャプションかどうかを判定する評価器の実現のみならず、それを用いて実際にキャプション生成を詳細になるよう改善させる技術確立し、国内特許の申請とレポジトリでの公開を進めた。(iii)の少数データへの対応、およびこれら(i)～(iii)の評価器を統合した評価実験については、今後の加速フェーズで引き続き精力的に取り組む。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

【実施体制】本研究のうち、(ii)データ中の小さな領域をも詳細に表現するという要求機能については、株式会社デンソーとの共同研究として進めた。また、研究遂行に当たっては東京大学の学生 1 名も実験データ収集と解析に従事した。またその他の要求機能について、第 2 年次にはほかの学生 1 名も実験データ収集と解析に従事した。

【研究費執行状況】第 1 年次は概ね当初の計画通りに執行された。第 2 年次は研究者が東京大学からオムロンサイニックス株式会社へ異動し、所属部署自体の研究予算が増加した。そちらを優先して執行した結果、本研究自体の進行は円滑に進みながらも、研究費については 75% 程度の執行となった。

・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

上記のとおり、本研究は既に産業界との共同研究を含めている。本研究は画像や動画などの視覚データを自然言語へと変換するものであり、人間の視覚機能を補助する技術としてすぐに波

及が期待できるものである。

更に本研究は、視覚データと自然言語を融合して理解するための基本的な要素技術を対象としている。最近の周辺学術分野では、人間と計算機とで自然言語のみならず関連する視覚データなどの別モダルデータを含めて対話行為を実現する研究に注目が集まり始めている。本研究での成果は、このような対話行為に(i)個人への適合、(ii)より細部へ注目した対話行為、そして(iii)少数の対話データで学習可能なシステムを提供し、学術のみでの取り組みを産業や社会へ波及させるために必要不可欠な知見を提供すると考えられる。

本研究者は、このような着想の元、研究期間中も精力的にアウトリーチ活動を進め、このような波及効果に共感する研究者および企業とのつながりを広げている。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究者は画像キャプション生成については第一人者であり、世界に先駆けて取り組みを始めている。現在の類似研究では、入力画像領域についての最大公約数的なキャプション生成の精緻化に注目した研究がほとんどであり、提案者と同一の要求機能を掲げる研究はまだ存在しない。

また提案者は、3つの要求機能を実現するための各要素技術についても既に知見を有している。画像認識から自然言語処理、機械学習に至るまでの広範な知識と実績を有する研究者は世界的にも少ない状態であり、本提案を遂行する上での大きなアドバンテージである。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

特になし

(2)特許出願

研究期間累積件数:1件

発 明 者: 板持 貴之、牛久 祥孝、田中 幹大、佐藤 育郎

発明の名称: 説明文章生成装置、対象情報表現システム、及び説明文章生成方法

出 願 人: 株式会社デンソー、国立大学法人東京大学

出 願 番 号: 特願 2018-136333

(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)

- [基調講演] Y. Ushiku, Frontiers of Vision and Language: Bridging Images and Texts by Deep Learning. Workshop of Machine Learning under International Conference on Document Analysis and Recognition, International Conference on Document Analysis and Recognition, Kyoto, 2017/11/11.
- [招待講演] 牛久祥孝, Deep Learning による視覚・言語融合の最前線. 画像符号化シンポジウム(PCSJ) / 映像メディア処理シンポジウム(IMPS), 伊豆, 2017/11/22.
- [招待講演] 牛久祥孝, 視覚と言葉をつなげる技術. 情報処理学会 IPSJ-ONE, 東京, 2018/3/15.

- 米谷竜 (著, 編集), 齋藤英雄 (著, 編集), 池畑諭 (著), 牛久祥孝 (著), 内山英昭 (著), 内海ゆづ子 (著), 小野峻佑 (著), 片岡裕雄 (著), 金崎朝子 (著), 川西康友 (著), 齋藤真樹 (著), 櫻田健 (著), 高橋康輔 (著), 松井勇佑 (著), 画像キャプションの自動生成/コンピュータビジョン 広がる要素技術と応用. 未来へつなぐデジタルシリーズ, 37 巻, 共立出版, 2018/6/28.
- 牛久祥孝 (著, 編集), 山口正隆 (著), 福井啓 (著), 中山英樹 (著), 齋藤真樹 (著), 吉川友也 (著), 重藤優太郎 (著), 竹内彰一 (著), 視覚・言語融合の最前線 . 映像情報メディア学会誌, Vol.72, No.5, 2018.

研究報告書

「映像とテキストを組み合わせたストーリー理解の実現」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50135

研究者：大谷 まゆ

1. 研究のねらい

映像の内容を理解することはコンピュータビジョン分野における大きな目標であり、現在に至るまで、映像中のオブジェクトやアクション認識など多くの取り組みがなされてきた。近年、映像理解タスクとして Video captioning や Video question answering が提案されている。Video captioning は映像の内容を説明する文の生成を目的としており、Video question answering は映像に関する質問に対する回答文を生成するタスクである。これは本来、静止画像理解のために考案されたものであり、この指標で評価可能な範囲は映像理解の一部に過ぎない。このようなベンチマークのために開発された手法の多くは、映像のフレームの並びを無視したものが多く、一方でそのような手法であっても既存のタスクではある程度の性能を達成することが可能となっている。つまり、従来の映像理解タスクは時間方向の変化を扱うことを要求していないといえる。

そこで本研究は、さらなる映像理解手法の開発を推し進めるため、映像の時間に関する構造に着目した新たな映像理解タスクを設計し、現在の映像理解技術の限界を調査する。具体的には、映像中の複数のイベントとその関係性に着目した映像キャプションデータセットを構築する。そしてこのデータセットを使った複数のタスクを現在主流となっているベースライン手法で評価することで、既存の映像理解のための手法における課題を明らかにし今後の映像理解研究の方向性を示す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、これまでの映像理解タスクでは考慮されてこなかった「イベント間の関係性の理解」に着目したキャプションデータセットを開発した。これまでのデータセットの多くは映像を単一のイベントやアクションを撮影した単純なものに限定している。提案するデータセットは映画から時間的に近いクリップを2つ抽出して組み合わせることでストーリー上関係のある複数のイベントを含む映像を構成した。またクラウドソーシングサービスを活用し、映像の内容を説明するキャプションを収集した。

最後に構築したデータセットを使った簡単なタスクを設計し、現在主流となっている映像理解手法のベースラインで評価した。

(2) 詳細

研究テーマ A「映像理解データセットの構築」

本研究ではまず2つのデータセットを検討した。

1. 映像の順序データ

自然言語で記述されたストーリーを手がかりに、映像をそのストーリーに沿った順序に並び替えるタスクを考案し、ストーリーテキスト、映像クリップの組、およびその並び順をクラウドソーシングを使って収集した。このタスクはアノテーターの間でも回答のバリエーションが大きく、映像の順序には高い曖昧性があることが明らかとなった。また既存の映画のキャプションデータセットを用いて予備実験を実施した。実験結果から、簡単な並び替え問題に限定すれば、既存の手法である程度解くことができることを確認した。

2. イベントの関係性に着目したキャプションデータ

映像の並び替えのためのデータは曖昧性が高く、映像理解タスクとしての定式化が困難であると判断し、新たなデータとして、イベントの関係性に着目したキャプションデータ収集に取り組んだ。具体的には映画から抽出した2つのクリップを組み合わせて複数のイベントを含んだ短い映像を作成し、イベントとその関係性を説明したキャプションを収集した。キャプションの収集にはクラウドソーシングサービスを利用した。この時、キャプションのフォーマットを「__ because/but __」と指定した。これにより、アノテーターが複数のイベントの説明を記述し、イベント間の関係性を「because」または「but」から選択することでラベル付するようにした。このデータ収集により図1のような映像とキャプションのペアデータが得られた。

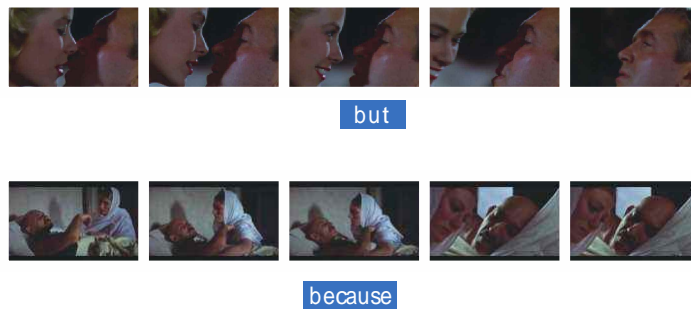


図 1 収集した映像キャプションの例

研究テーマ B「ベースライン手法による映像理解タスク評価」

研究テーマ A により得られたデータセットを用いた簡単なタスクを設計し、ベースライン手法で評価することにより提案するデータセットと既存の映像キャプションデータセットの違いを実験的に調査した。まず映像キャプションデータを用いたシンプルなタスクとして、映像に対して正しいキャプションを選択するタスクを設計し、評価した。例を図2に示す。例ではクエリ映像に対して上段のキャプションを選択することで正解となる。



図 2 キャプション選択問題の例

ベースライン手法として各キャプションがクエリ映像と対応づいたものである確率を出力するニューラルネットワークベースのモデルを構築した。この実験では映像のフレーム順を考慮するモデルとフレーム順を無視したモデルを作成し、その性能を比較した。また既存の映像キャプションデータセットを用いて同様の実験をした。

この実験の結果、従来の映像キャプションデータセットを用いた実験ではフレーム順を無視した手法がフレーム順を考慮した手法より高いスコアとなった。一方で提案するデータセットではフレーム順を考慮した手法がもう一方よりも高い性能を示した。これは本データセットにおいては時間方向の変化が重要な要素であることを示唆している。また従来のデータセットを使った実験に比べ、提案データセットを使った実験では性能が限られていることを確認した。これは既存の映像理解のための技術では時間方向の変化を扱うことが困難であるためであると推測される。

次に、映像の前半とキャプションから、映像の後半を予測するタスクで同様のベースライン手法を評価した。この実験でも前述のキャプション選択タスクと同様の傾向が観察され、提案するデータセットにおいて映像の時間方向の変化を扱うことの重要性が確認された。

3. 今後の展開

今回の成果は従来の研究では考慮されてこなかった映像中のイベント間の関係性に着目した映像理解への研究を進めるために必要不可欠であるデータの収集と、基礎的な分析である。今後はこの成果に基づき、高度な映像理解に向けて時間方向の変化を考慮した手法の発展が期待される。

4. 自己評価

当初に想定した映像の並び替えタスクは調査により、合理性のあるタスクとして定式化することが困難であることが確認され、そこで得られた知見に基づきイベントの関係性に着目した映像キャプションの収集に取り組んだ。研究のアプローチに関しては方向性の転換はあったが、当初の目標としていた映像の時間方向の変化を考慮したタスクの設計とベースライン手法を用いた基礎的な分析は達成できた。

クラウドサービスに詳しいエンジニアが研究に加わり、クラウドサービスを利用したデータ収集環境の構築を担当した。これにより、当初想定したものより大幅にデータのホスティングおよびデータ収集に関わる費用が削減された。これまでの成果は今後国内の学会などで発表し、フィードバックを得ていく。また今回得られた成果を元に研究を進め、国際会議などへの投稿を目指す。

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

該当なし

(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)

該当なし

研究報告書

「公平な割当を求めるためのアルゴリズム研究」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50136

研究者：河瀬 康志

1. 研究のねらい

理論計算機科学における最適化の分野では、一人の意思決定者が、ある性質を満たすものの中で、ある指標について最も良い解を見つけるための手法(アルゴリズム)について研究がなされてきた。一方、経済学のゲーム理論では、複数の意思決定者がいる状況で、達成される解の性質の解析が行われてきた。近年、2つの融合分野である**アルゴリズム的ゲーム理論**が注目を集めている。アルゴリズム的ゲーム理論とは、複数の意思決定者が関わるようなゲーム理論的状况に対して、アルゴリズムを用いたアプローチを試みる理論である。複数の意思決定者が関わる状況で、配分などの解を求めるときには、ある種の**公平性**を考慮する必要がある。

本研究の目的は、**公平性を満たす解を高速に求めるアルゴリズムの設計**である。ただし、完全な公平性を満たす解は存在しないかもしれず、あったとしても見つけることは難しいことがある。そこで本研究では、公平な解の存在性判定や探索の計算複雑度を明らかにし、高速なアルゴリズムが存在しそうでない場合には、近似的な公平性を満たす解を求めることや、入力を制限することで効率的に求めることを試みた。

本研究では、ゲーム理論的状况をモデル化した問題の1つである**マッチング問題**を扱い、オンライン最適化の手法などを用いることで、高速なアルゴリズムの設計を目指した。マッチング問題は実社会によく現れる問題であり、公平な解を高速に求めるアルゴリズムの設計は、実用上重要な課題である。マッチング問題における解(割当)の公平性は、安定性や均衡によって特徴付けることができる。特に、「制約付き安定マッチング問題に対する近似アルゴリズム」と「展開型マッチングゲームにおける均衡」について考察を行った。

2. 研究成果

(1) 概要

安定マッチング問題は多くの応用をもち、安定マッチングに対するアルゴリズムは研修医配属や研究室配属など様々な状況で実際に利用されている。例えば研修医配属の場合には、各研修医はどの病院に配属されたいかについて選好順序をもっており、各病院はどの研修医に来て欲しいかについての選好順序と定員(採用できる研修医の数の上限)をもっている。安定マッチング問題では、このような状況において公平な割当(安定マッチング)を求める。安定マッチング問題には常に安定マッチングが存在し、Gale と Shapley によって開発された受入保留方式と呼ばれるアルゴリズムによって、効率的に安定マッチングを求められることが知られている。

しかし、現実的な制約や選好を考えると、安定マッチングが存在するとは限らない。例えば、病院側が予算制約(研修医を採用した際に発生する給与の合計額を予算以内に収めなくては

いけないという制約)をもつ場合には、選好が加法的効用関数で表されるような単純なものの場合ですら、安定マッチングが存在するとは限らない(図 1)。そこで、与えられたマッチングの安定性判定と安定マッチングの存在判定について計算複雑度を明らかにし、近似的に安定なマッチングを効率よく求めるアルゴリズムを構築した。

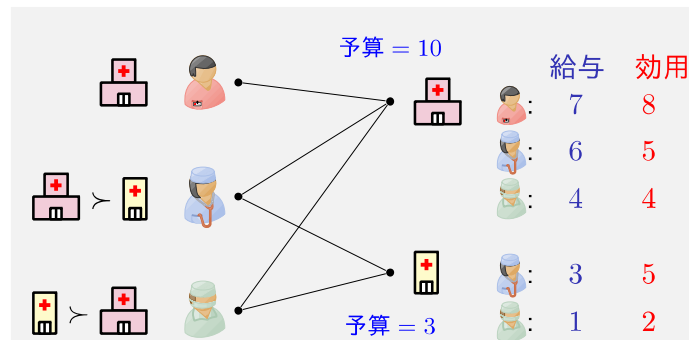


図 1：安定マッチングが存在しない例

また、これまでの多くの研究では、各主体が申告する選好を元に、オーガナイザーが結果を決定する、中央集権型のマッチングメカニズムが前提とされてきた。しかし、社会にはそのような統制がされていない市場も多く、そこでは各主体が周囲の戦略を観測しながら、逐次的な意思決定をしている。そこで、そのような動的な状況を表すモデルとして、展開型マッチングゲームを提案し、このゲームにおける均衡の性質や計算法について考察した。

(2) 詳細

研究テーマ A 「制約付き安定マッチング問題に対する近似アルゴリズム」

制約付き安定マッチング問題とは、予算制約やタイプ制約などが病院に課せられたもとで、病院と研修医との間の安定マッチングを求める問題である。このような制約のある状況では、安定マッチングが存在するとは限らない。本研究では、安定マッチングの計算に関する計算複雑度や、安定性を近似した解を求めるアルゴリズムについて解析した。

本研究では、制約は「定員制約」、「マトロイド交叉」、「多次元ナップサック」の3種類で表されている状況を扱った。どんな上界制約(ある部分集合が実行可能であれば、その部分集合も実行可能である)でも、マトロイド交叉や多次元ナップサックによる表現をもつので、この設定は汎用的であると言える。また、選好は効用関数により表されていると仮定し、効用関数としては「要素数」、「加法的」、「劣モジュラ」という重要な3種類のクラスを扱った。

まず、与えられたマッチングが安定であるかどうかを判定する難しさを調査するために、パッキング問題の計算複雑度との関係を示した。それにより、各制約のクラスと効用関数のクラスの組み合わせについて、効率的に判定できるか(P)、判定が難しいか(coNP 完全)を明らかにすることに成功した。さらに、与えられたマーケットに安定マッチングが存在するかどうかの判定問題について、効率的に判定できるか(P)、判定が難しいか(NP 完全および Σ_2^P 完全)を、完全に明らかにした。

そして、受入保留方式と除去可能オンラインパッキング問題に対するアルゴリズムを組み合わせ

せるという枠組みを提案することにより、近似的に安定なマッチングを効率的に求めるアルゴリズムを構築することに成功した。(論文[1]および、投稿中論文)

研究テーマ B「展開型マッチングゲームにおける均衡」

展開型マッチングゲームとは、各主体が周囲の戦略を観測しながら、逐次的な意思決定を行う状況における安定マッチングの展開型ゲームによるモデル化である。例えば、逐次的に求人者からジョブオファーを受ける求職者が、競合相手の戦略を考慮しながら自身の戦略を決定する状況を扱うことができる。本研究では、展開型ゲームにおける均衡(部分ゲーム完全均衡)として得られるマッチングがどのような性質をもち、効率的に計算できるかについて解析を行った。

論文[2]では、求職者のみが戦略的に動き、各オファーを受けた際、受理するか否かを即座に決めねばならず、その決定はその後覆すことができないような状況を扱った。まず、与えられたゲームに対し、均衡でのマッチングを求めることは、一般には PSPACE 困難となることを示した。また、多項式時間で解くことができる部分クラスを明らかにした。さらに、オファー順を中央からコントロールできる場合には、均衡が安定マッチングとなるような順序を効率よく構成できることを示した。

論文[4]では、求人者側、求職者側、両側がそれぞれ戦略的に動く場合について、展開型マッチングゲームを考察した。ただし、論文[2]とは違い、求人者はオファーを 1 つだけキープできるような状況を扱った。このような状況は、受入保留方式を戦略的なプレイヤーに対して適用していると解釈することもできる。本研究では、求職者側(あるいは両側)が戦略的な場合には求人者にとって最適な安定マッチングが唯一の均衡マッチングとなることを示した。これにより、均衡マッチングは効率よく求めることができると言える。また、求人者側のみが戦略的に動く場合には複数の均衡マッチングがあり得ることを示した。

3. 今後の展開

実際に計算結果を用いるためには、嘘をついても得をできない(耐戦略性を満たす)ことも重要となる。もちろん耐戦略性を満たすことを課すと、解を得ることは難しくなるので、安定性の場合には近似率が悪いアルゴリズムしか作れなくなってしまう。そこで、耐戦略性と安定性の間のトレードオフを明らかにすることは、重要な課題となっている。また、理論だけで終わらず、実社会での応用することも、重要な課題である。また、近似的な公平性という概念は実用上重要であるがほとんど研究がすすんでいないため、ケーキカット問題などの様々な状況に対して解析を進める必要があると考える。

4. 自己評価

研究目的の1つであった一般的な制約をもつ近似的に安定なマッチングに関しては、最初の計画通り、計算複雑度の解析や近似アルゴリズムの設計についてほぼやりつくすことができた。しかし、当初は計画していた戦略的操作不可能性に関する解析は難しく、あまり進捗が得られなかった。動的な状況における均衡マッチングについては、もともとは計画になかった研究テーマであるが、均衡の特徴付けや計算の難しさについていくつかの面白い性質を示すことに成功できた。均衡は戦略的なプレイヤーの相互作用により達成される状態であり、この研究により安定マッ

ング問題における戦略的な行動の結果に関する理解が深まったと言える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki: Approximately Stable Matchings with Budget Constraints, Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI2018), Pages 1113–1120, February 2018.
2. Yasushi Kawase, Yutaro Yamaguchi, and Yu Yokoi: Computing a Subgame Perfect Equilibrium of a Sequential Matching Game, Proceedings of the 19th ACM Conference on Economics and Computation (EC2018), Pages 131–148, June 2018
3. Yasushi Kawase and Hanna Sumita: Randomized Strategies for Robust Combinatorial Optimization, Proceedings of the 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI2019), 8pages, January 2019.
4. Yasushi Kawase and Keisuke Bando: Subgame Perfect Equilibria Under the Deferred Acceptance Algorithm, Proceedings of the 5th International Workshop on Matching Under Preferences (MATCH-UP2019), accepted.

(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)

なし

研究報告書

「大規模テキストからの知識獲得と深層学習による照応・省略解析」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50137

研究者：栗田 修平

1. 研究のねらい

人間のように文章を理解するシステムの開発には、日常会話で用いられるようなこねた文や文章を理解することが欠かせない。そのような文の中では、常識的な事項や、文章の著者および読者にとって既知と思われる事項が省略される傾向がある。このような文を解析するためには、自然言語処理の中でも、既知の事項をその文脈および類似した文中での用例から補う省略解析や、文のもつ意味を解析する意味解析が欠かせない処理となる。特に、省略解析は、自然な文章中に多く出現する省略される対象を推定するタスクで、人間が日常生活の中で接するこねた会話や文章などを処理するためには必須の操作である。一方で、その精度は大きく伸び悩んでおり、人間との円滑なコミュニケーションを目指すシステムに自然言語処理を応用する際、大きな障害となってきた。本研究にて実現される省略解析およびその統合モデルを使用することで、より人間に近い対話や翻訳システムが実現可能となる。具体的には、上に挙げた省略解析の統合モデルの提案・実証後に具体的な応用として、可能な限り人間の意図を汲み取って会話が行える対話システム、会話に特化した翻訳エンジンを使用したリアルタイム多言語チャットサービスなどが考えられる。また、日常会話に基づくスマートフォンやカーナビゲーションなどの操作サービスや、柔軟な会話が可能で対話型の接客・注文サービスなど、様々な分野での新しい応用が期待される。

本研究では、近年、急速な発展を遂げつつある深層学習手法を利用して、大規模テキストから獲得された知識および前後の文脈を考慮した省略解析手法を提案し、その精度を既存手法とは一線を画するほどまで引き上げることを目指す。また、単一タスクでの学習では限界があった、より複雑な知識処理の統合を模索する。まず、Web ページから収集された膨大なテキストを処理して大規模な学習データを作成し、省略解析に必要な常識知を学習させる。加えて、文章の文脈を考慮させるため、近年大きな発展を遂げている深層強化学習の文の意味解析への応用を模索する。このようにして、既存手法ではなかなか困難とされてきた省略解析のさらなる高度化を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、自然言語処理において文内での単語の意味的な関係や省略された事項を解析するための新たなモデルを提案し、特に深層学習の中でも生成的なアプローチおよび深層強化学習と組み合わせることで、既存手法における限界を超える性能を達成するモデルを提案した。本研究では、文の中の多様な意味に対する表現を解析するため、まずは(1) 日本語の述語項構造解析に基づく省略解析モデルに対する敵対的生成ネットワーク(GAN)による学習法を応用した半教師付き学習法を提案し、次に、(2) 英語の意味依存構造解析を深層強化学習により行うアルゴリズム及びモデルを提案した。日本語の省略解析につい

ては、平易で日常的な文に対する解析ほど難しいことが知られている。例えば「空は曇っているけれど、いまから外に干しても大丈夫？」というような例文について、「干して」のヲ格に相当する部分はこの文中に示されていない。このように自然な文章の中で省略されている事項は、主にその周辺の文脈に幅広く依存し、外部知識と呼ばれる一般的な知識も必要となる。このように文脈や外部知識に依存する問題の解決のために、多様な文脈の中で省略された表現を推測する学習データを用意する必要がある。そこで近年活発に研究が行われている敵対的生成ネットワークを応用し、大規模コーパスの処理による学習データの生成とモデルの学習とを両立する手法を提案した。さらに、英語においても深層強化学習手法を利用して文中の平易な箇所から処理を行う新規なモデルを提案した。英語の単語間の係り受けは、従来型の依存係り受け解析のような構造に近いものから、日本語の述語項構造解析に近いものまでが存在する。本研究では、深層強化学習を利用して平易な箇所から順番にグラフを構築していくアルゴリズムを提案し、さらに提案モデルを用いて実証した。今後は、これらの学習手法を深層の事前学習手法や転移学習と組み合わせる予定である。

これらの研究成果のうち、日本語の省略解析については、自然言語処理のトップカンファレンスである ACL2018 に採択され発表を行うなど国際的に高く評価されている。また、深層強化学習を用いた意味依存構造解析は言語処理学会第 25 回年次大会にて発表し最優秀賞に選ばれるなど高く評価されつつある。(主な研究成果リスト[2],[3],[4])

(2) 詳細

本研究では、(1) 敵対的生成ネットワークを利用した日本語の省略解析 (2) 深層強化学習による英語意味依存構造解析の 2 つの分野について、大きな成果を達成した。

(1) 敵対的生成ネットワークを利用した日本語の省略解析

日本語の省略解析については、自然な文章の中で省略されている事項を、その文脈から推測するモデルを提案した。文章中で省略されている事項を推測するためには、多様な文脈の中で省略された表現を推測する学習データを用意する必要がある。しかし、省略解析に用いられる日本語述語項構造解析データセットは高々数千文相当しか存在せず、多様な文脈の中で学習できるとは言い難い。この学習データの不足を補うために、近年盛んに研究が行われている敵対的生成ネットワークを応用した新しいニューラルネットワークモデルを提案した。具体的には、Web から獲得された大規模テキストを生成ニューラルネットワークおよび分類ニューラルネットワークの 2 つのニューラルネットワークで処理を行い、データセットの生成と解析の双方を同時に行うニューラルネットワークを作成した。また、特に日常的に使われやすい表現を多数含む京都大学リードコーパスでの例文に焦点を当てて解析を行なった。これは、WEB ページから作成されたリードコーパスには、日常表現が多くの中に出現する一方で、このような文を解析することは未だ難しく、社会的な需要も大きいものと考えられるからである。本研究は、自然言語処理のトップカンファレンスである ACL2018 にて、long paper として採択され、発表を行った。(主な研究成果リスト[2])

(2) 深層強化学習による英語意味依存構造解析

英語において文内の単語同士の意味的な関係を解決する意味依存構造解析の新規なモデルを提案した。英語の単語間の関係は、従来は主として依存係り受け解析のような文法的

な解析により解決されてきていた。しかし、こうした解析には単語間の関係の表現に制約が大きく、より柔軟に文内の意味を表現できているとはいいがたかった。本研究では、文の中の単語同士の複雑な関係をより柔軟に表現できる意味依存構造解析に焦点を当てた。意味依存構造解析では、単語間の意味的な関係性は係り受け解析よりも複雑なグラフで表せられる。本研究では、そのようなグラフに対し深層強化学習を利用して、平易な箇所から順番に構築していくモデルを提案した。本研究成果は、言語処理学会第 25 回年次大会にて発表し、最優秀賞に選ばれた。(主な研究成果リスト[3])
これらの実験はその多くが GPU 計算機上で行われ、本研究では GPU 計算基盤の整備および GPU 計算技術の精緻化をも同時に追求した。

3. 今後の展開

自然言語文の高度かつ高精度な解析は、自然言語処理が社会に広まる際には必須となる基盤的な技術であり、その応用範囲は、機械翻訳モデルや対話エンジン、SNS などの高度な感情分析など非常に多岐にわたる。日本語の解析については、本研究にて行った省略解析は今後の自然言語処理の基盤となる解析である。英語の意味依存構造解析についても、同様に、既存の解析においては深く扱われてこなかった単語内の意味的な関係について、従来法とは異なるアプローチによる解決を行っている。いずれの研究も、今後はより一般的な知識という観点から、事前学習及び転移学習と組み合わせた研究として発展させていく予定である。また、得られたモデルを一般ユーザが利用できる形での公開を検討している。

4. 自己評価

研究目的の達成状況については、深層学習を用いた日本語の省略解析に加えて、英語の意味依存構造解析も行うなど、当初の予定を大きく超えて進展していると思われる。このような成果に加えて、転移学習や社会的な応用研究などの点においての進展が望まれる。研究の進め方や研究体制については、概ね計画のとおり進展していると考えられる。なお、コペンハーゲン大学 A. Søgaard と深層強化学習を用いた意味依存構造解析に対する共同研究を行った。研究成果の波及効果については、深層学習を利用した文の解析手法により、既存手法では不可能であった解析が行えるようになった。この研究成果は、自然言語処理を利用した機械翻訳や対話ボットなどの応用が幅広い期待される。ACT-i 加速フェーズにおいては、こうした成果物の API やモデルとしての公開の他に、一般ユーザが利用できる形での成果物の公開を目指している。研究課題の独創性・挑戦性については、本研究課題は、深層学習研究の中でも先進的な敵対的生成ネットワーク(GAN)や深層強化学習を自然言語文の解析に応用した、非常に独創性及び挑戦性の強い研究課題に対する解説方策であったと考えている。今後は、この解決方策を発展させ、同時に事前学習や転移学習と組み合わせ成熟させることが重要であると思われる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 栗田修平, 河原大輔, 黒橋禎夫. ニューラルネットワークを利用した中国語の統合

的な構文解析. 自然言語処理. 2019. Vol.26. 231-258.

2. Shuhei Kurita, Daisuke Kawahara and Sadao Kurohashi. Neural Adversarial Training for Semi-supervised Japanese Predicate-argument Structure Analysis. The 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL2018). 2018. P18-1044. 474-484

(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] 栗田 修平, Anders Søgaard. 深層強化学習を用いた意味依存構造解析は自発的に平易優先戦略を学習する. 言語処理学会第 25 回年次大会, 2019. 第 25 回年次大会最優秀賞 受賞.

[4] 栗田 修平. 自然言語処理の既存データセットの制約を超えた文の解析手法. RIKEN AIP Public. 2019 年 2 月. 招待講演(国内).

研究報告書

「セマンティック情報を用いた情報検索システム」

研究期間：平成30年10月～平成31年3月

研究者番号：50138

研究者：櫻 惇志

1. 研究のねらい

本課題では、Web 検索を想定した、語彙情報やクエリのメタ情報を用いたランキング学習への適応を行った。ランキング学習とは、機械学習技術の一種である（半）教師あり学習を用いて、ユーザによって与えられた検索質問（クエリ）に対して正解となる文書を適合度の降順に並べる技術の総称である。既存のランキング学習では、過去に情報検索に関する研究分野にて培われてきた、各種スコアリング手法（単語の重み付け、文書の性質分析など）や各種情報（ユーザ属性、検索履歴など）を特徴量として用いて学習モデルを構築している。その際の課題として、課題（1）単語を記号して扱い、その意味を考慮していない、課題（2）すべてのクエリに対して単一の学習モデルを構築する、課題（3）クエリに対して学習データが存在しない状況を想定していない、が挙げられる。

課題（1）に関して、意味を考慮することで、ユーザが意図していない内容を含む文書を検索結果から除外したり、ユーザが潜在的に求めつつもクエリとして表現できていない内容を含む文書を検索結果として提示したりすることができるようになることが期待される。

課題（2）では、情報検索に関する過去の研究の知見として、検索タスク（人名検索や QA 質問、単語の定義検索やローカル検索など）ごとに異なる検索方針を設計することでより高精度な検索が実現できるということが報告されている。このことから、ランキング学習においても検索タスクごとに学習モデルを構築することでより高精度な検索が実現できることが期待される。

課題（3）において、一般的に Web 検索では非常に多様なクエリが発行され、全体のうち 15% のクエリは 1 度しか発行されていないクエリだと報告されている。このような状況において、蓄積された学習データ中に同一クエリが存在することを仮定することは現実と乖離しているといえる。それに対して、既存のランキング学習では、未知クエリが発行される状況を想定されていないため、未知のクエリに対しても高精度な検索を目指すことはより実用的な技術である。

これらを踏まえ、本研究では上記の三つの課題に取り組むことで、より高精度かつ実用的なランキング学習の実現を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

提案手法について述べるうえで基本的な技術となるランキング学習について述べる。ランキング学習の概要を図 1 に示す。ランキング学習では、文書集合と、クエリ、クエリに対する

文書の適合性評価を持つデータセットを用いてモデル構築を行う。その際、文書（文書特徴量）やクエリ（クエリ特徴量）、それらのペア（文書-クエリ特徴量）から各種統計量などを算出したものを列挙した特徴量ベクトルを作成し、クエリに対する文書の適合度を教師データとして付与する。これら特徴量ベクトルと教師データから学習モデルが構築された後は、通常の Web 検索と同様にユーザが入力したクエリに対して検索結果である順位付きリストを提示する。その際、文書集合は膨大な量となるため、すべての候補文書に対してスコアリングを行うことは非常に高コストとなる。従って、まずは単純なスコアリング手法を適用して得られた上位 k 件の文書（Top- k 文書）を抽出し、それらに対してリランキングを行うことが一般的であり、本課題でもその方針に倣う。

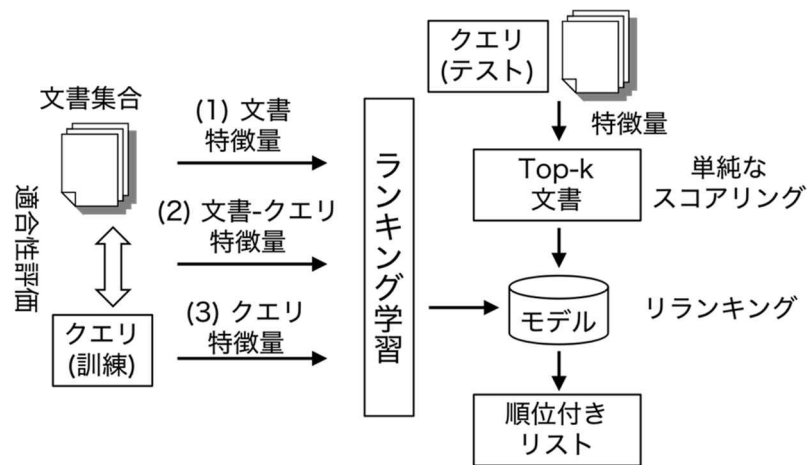


図1 ランキング学習のフレームワーク

これらを踏まえ、本課題の成果として、研究テーマ (1) Web クエリに対する語義の曖昧性解消技術の提案、研究テーマ (2) タスクごとの適合情報の傾向の分析、研究テーマ (3) テストクエリと同一クエリが学習データに含まれない状況を想定したランキング学習手法の提案、を行った。

研究テーマ (1) に関して、課題 (1) で触れた単語の意味を考慮する際に、近年は、各単語を（単語数と比較して）低次元の固定長次元のベクトルで表現する分散表現を用いることが一般的である。文書やクエリをそれぞれ doc2vec と query2vec と呼ばれる分散表現で表現すると、意味的に近い文書・クエリが意味空間中で近接する特徴を持つ、単語と同次元数のベクトルとして構成することができる。つまり、分散表現は、文書やクエリを大域的な観点における意味的距離を計測するアプローチである。その一方で、自然言語処理の分野では、単語単位における意味を考慮する際に語義の曖昧性解消と呼ばれる技術が多用されてきた。これは、自然言語の持つ曖昧性を解消する技術であり、例えば、jaguar という単語の主要な語義（語の意味）としては動物とカーブランドがあり、ある文書中の jaguar がいずれの意味であるのかを周辺の語の生起状況から特定する。特に Web クエリは、構成す

る単語数が高々数語程度であるため、一つずつの単語の持つ影響力は大きい。従って、本研究では、単語の大域的な意味を考慮するための分散表現と、単語の局所的な意味を考慮するための語義情報を用いる。その際、クエリに対する語義の曖昧性解消技術は存在しないため、本課題にて提案を行った。

研究テーマ (2) において、課題 (2) で述べた通り、検索タスクごとに学習モデルを構築することは高精度検索において有用であると考えられるが、検索タスクに依存せずに高精度検索に寄与する特徴が存在することが想定されるため、検索タスクごとに完全に独立した学習モデルを構築するのではなく、特徴量ベクトルの一つの特徴量として付与することでより柔軟なモデル構築を行った。

研究テーマ (3) では、課題 (3) に関して、モデル構築に用いた訓練データに存在しないクエリに対しても高精度な検索が実現できることを目指して、クエリは訓練クエリとテストクエリに分割した。従って、クエリから得られる特徴量だけから適合文書を知る手がかりは得られず、上手く文書-クエリ特徴量の設計を行うことで、適合文書の特定を目指す。

(2) 詳細

研究テーマ (1)

本課題では、文書とクエリの局所的な意味の類似度計測のため、それぞれの持つ単語の語義の比較を行う。なお、自然言語処理分野では、語義の曖昧性解消において、IMS と呼ばれるツールが多用される。これは文単位を入力として想定されており、例を図 2 に示す。入力文のうち曖昧性を持つ単語に対して語義の候補とその確率を付与する。

```

Input:
Friedrichshain is a district of Berlin, Germany.
Output:
Friedrichshain
<x length="1
  語義
  be%2:42:03: 0.144... be%2:42:06: 0.139...
  be%2:42:02: 0.088... be%2:42:05: 0.076...
  be%2:41:00: 0.103... be%2:42:00: 0.083...
  be%2:42:04: 0.093... be%2:42:07: 0.098...
  be%2:42:08: 0.084... be%2:42:09: 0.086...
  確率
>is
</x> a
<x length="1 district%1:15:00::|1.0"> district</x> of
<x length="1 berlin%1:15:00::|1.0">Berlin</x> ,
<x length="1 germany%1:15:00::|1.0">Germany</x> .
  
```

図 2 語義の曖昧性解消

文書に対しては高精度に語義を付与可能な技術であるものの、自然言語に基づかず高々数個の単語から構成されるクエリに対しては、適切に語義を付与することができないと想定

される。従って本研究では、クエリの description を用いて語義の曖昧性解消を行った。クエリの description とは、そのクエリがどのような意図で発行されたのかが自然言語にて記述されており、重要な手がかりとなるため、本課題ではこれを用いた (DescWSD)。ただし、一般的な Web 検索ではこのような description の存在を仮定することはできないため、文法情報を用いず単語間の共起関係のみから語義の曖昧性解消を行う手法 (GrammarlessWSD) の提案も行った。評価実験では、表 1 の通り、DescWSD の方がより高精度となったため、今後 GrammarlessWSD の改良を行う予定である。

表 1 Description を用いた曖昧性解消

	nDCG@20	MAP
DescWSD	.341	.397
GrammarlessWSD	.289	.363

上記によって文書とクエリそれぞれに対して語義が付与されれば、両者の比較を行う。具体的には、同一の語義がそれぞれに高い確率で付与されているほど局所的な意味の類似度が高くなると考えられる。その際、IMS によってもっとも高い確率を付与された語義のみを用いる手法 (BestSense) とすべての語義を用いる AllSense を提案し、実験から BestSense がより高精度であることが示された。既存の特徴量のみを用いた手法 (Common) と比較して統計的に有意に検索精度の工場が確認されたことより、語義の曖昧性解消によって適切に局所的な意味を取り込んだモデルの構築に成功し、研究テーマ (1) は達成された。

表 2 実験結果

	nDCG@20	MAP
[Baseline]		
BM25 [18]	.267	.282
Common	<u>.334</u>	<u>.386</u>
[WS score]		
BestSense	.341*	.397**
AllSense	.333	.397**
[DR score]		
DiffDR	.338	.396**
DistDR	.335	.386**
CosDR	.341	.397**
BestSense+CosDR	.349**	.390*

研究テーマ (2)

クエリに対して付与された検索タスクを特徴量として付与したモデルを構築した場合に、現時点では精度向上に結びつけることができておらず、より詳細な分析を行うため、検索タスクごとにどのような文書、さらにはどのような特徴を持つ箇所が適合情報となるのかを分析した。その結果、検

索タスクごとに粒度や構造の観点において適合情報の性質が大きく異なるという結果が得られた。これらの結果を踏まえて、文書検索よりもより直接的にユーザの求める情報を提示する要約型情報検索においては検索タスクを用いることでより有益な検索結果を提示することができるということが示唆された。従って、研究テーマ (2) は現時点では達成できていないものの、今後達成に向けての手がかりを得た。

研究テーマ (3)

本課題の設定では、クエリは訓練クエリとテストクエリに分割されており、つまり、クエリからは適合文書の特徴を類推することができない。これはつまり、既存研究では文書の分散表現を特徴量として追加することで適合文書の特定に利用しているが、本課題ではクエリの持つ分散表現 (query2vec) の特徴と文書の持つ分散表現の特徴量 (doc2vec) の類似度から推定する必要があるということである。二つのベクトルが同一の情報を持つ場合にはベクトルの差は零ベクトルとなることが想定されるため、DiffDR では非類似度として doc2vec と query2vec の差を特徴量として追加した。また、差ではなく距離として非類似度を計測した手法 DostDR や、両ベクトルのコサイン類似度を用いる CosDR の提案も行った。これらの結果、表 2 の通り、CosDR が最も高精度を示した。また、BestSense と CosDR は独立した特徴量であるため両者をかけ合わせた手法である BestSense+CosDR はすべての手法の精度を上回り、統計的にも有意に検索精度の向上が確認された。このことから、研究テーマ (3) は達成できた。

3. 今後の展開

本課題では文書単位の情報検索に着目して取り組んできた。今後の展開としては、文書中からユーザが求める情報そのものを抽出して提示する要約型情報検索への適応を目指す。本研究において完全に解決し切れなかった課題である検索タスクを考慮したランキング学習に関して、要約型情報検索においては検索タスクごとに適合情報の性質が大きく異なるという知見が得られているため、次世代の検索システムのパラダイムとして見込まれる要約型情報検索においては検索タスクを考慮したランキング学習はより実用的な技術となることが期待される。

また、本研究では、ユーザの状況を考慮していなかったため、ユーザの気分や緊急度に基づいて検索結果の構築方針を動的に調整する機構の実現を目指す。

4. 自己評価

本研究で掲げた三つの課題のうち、課題 (1) と課題 (3) は解決でき、課題 (2) においては解決に向けての取り掛かりを発見できたことから、概ね目的を達成できたと考える。本課題はすべて研究代表者が主体的に取り組み、また、適宜専門家への助言を求めて取り組んだため、研究実施体制は適正であった。また、研究費はルールに則り執行した。本研究の成果は条件的には極めて高性能な結果を示したため、ランキング学習における一つの方向性を示せたと考える。今後取り組む予定の要約型情報検索への適応も実現すれば、情報検索のパラダイムを変更できるポテンシャルを持つと考える。なお、本研究では、これまで十分に検討されてこなかった、自然文法に基づかないクエリに対しても適切な自然言語処理 (語義の曖昧性解消) を行うことを目指したという点において極めて挑戦的かつ独創的であった。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

なし

(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. Atsushi Keyaki, Kazunari Sugiyama, Min-Yen Kan, Jun Miyazaki: “Preliminary Experiments on Semantic Tagged Information Retrieval”, Young Researcher Association for NLP Studies, 2017. (査読なし国内会議)
2. Atsushi Keyaki and Jun Miyazaki: “Analysis of Relevant Text Fragments on Different Search Task Types”, in Proceedings of the 14th Asia Information Retrieval Societies Conference (AIRS), 2018. (査読付き国際会議)
3. 櫻惇志, 宮崎純: “要約型情報検索における適合情報のクエリのタスクごとの複雑性調査”, 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 (DEIM 2019), 2019. (査読なし国内会議)

研究報告書

「整合性を保持する形式仕様の自動抽象化システム「ソフトウェア顕微鏡」の開発」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50139

研究者：小林 努

1. 研究のねらい

近年、高信頼を求められる複雑なソフトウェアシステムが増加している。例えば、IoTをはじめとした物理空間・情報空間をつなぐシステムは環境との相互作用を考えて構築する必要があるなど複雑であり、しかも高度な信頼性が求められる。

このようなシステムの構築のために、システムの仕様を形式的な言語で記述し、その上で定理証明などで検証を行う手法(形式仕様記述手法)が注目され、欧州を中心に産業界でも大規模なプロジェクトで適用され有効性が認知されつつある。形式仕様記述手法の主な利点として、厳密な仕様と証明を、人が読んで理解することができるという点がある。

しかし、現実には大規模なシステムの形式仕様を記述すると、仕様は多くの変数が出現する長大なものとなり、理解が困難である。さらに、その仕様に関する整合性証明は、仕様と同様に複雑であるだけでなく、その複雑さゆえに制約ソルバなどを用いて自動的に証明が行われることが多い。自動証明では、多くの場合仕様の内容の寄せ集めを大量の仮定リストとして与え、ソルバが結論を証明できたかどうかだけが情報としてユーザに提示されるため、証明木が見られない。

そのため、現実にはユーザが仕様や証明を読んで理解することは困難である。

そこで、本研究では、与えられた仕様と整合性を持ち、しかも一部の変数のみを用いて表現した抽象的な仕様・証明を構築する「ソフトウェア顕微鏡」を開発した(のちに「ソフトウェア展望台」に改名)。

ここで、ナイブな手法として、仕様と証明のうち特定の変数のみを用いて記述されている部分を切り出して(スライシングして)くるという手法が考えられるが、この手法だと、スライシングによって仮定となる式が欠落するため、既存の仕様では証明できていた整合性が満たされなくなってしまう。本研究では、入力仕様の整合性証明木の中から、特定の変数のみを用いて表せるような「補題」を獲得して、それを用いて抽象的な仕様を「補修」することを目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、完成した(構築・証明がなされた)形式仕様 s を入力として、ユーザが入力仕様の変数のうちの一部 V を指定すると、 V を用いて記述され、 s と整合性のある新しい形式仕様 s' (抽象仕様)を自動で出力することを目指した。

この目標を達成するにあたり、主に以下の3つの研究テーマに取り組むことを目指した。
 テーマA: 抽象仕様と入力仕様との整合性確保手法の構築 テーマB: 抽象仕様の簡潔な整合性証明木の構築 テーマC: 手法の自動ツールとしての統合
 結果として、テーマAとテーマCのうちテーマA関連の部分を完遂し、テーマBについてもまとめ上げられつつある。また、テーマAに取り組む中で、最終的な目標である「形式仕様の理解容易性向上」を考慮した際に、研究開始時には考慮していなかった「どのような変数を指定して抽象化を行うと効果的かの分析」(テーマD)が重要であることが判明したため、テーマDについても取り組み成果を上げた。
 本研究では近年産業界でも注目されている形式仕様記述手法 Event-B を主な対象として手法の整備を行い、Event-B の開発環境 Rodin ツールのプラグインとして提案手法の実装を行った。プラグインは、抽象化により全体像を見やすくすることを目的としていることから「ソフトウェア展望台」と呼び Web で一般に公開している。

(2) 詳細

研究テーマA: 抽象仕様と入力仕様との整合性確保手法の構築

本研究では、仕様の対象システムの性質を厳密に理解することを補助するため、構築する簡潔な抽象仕様と入力仕様と整合性を持つことを保証することが必要である。
 プログラムコードの理解補助の分野では、特定の変数に影響のある命令や特定の変数が現れる命令を抜き出すアプローチが研究されてきたが、本研究が目的とする、記述に用いられる変数を制限した上で入力仕様と厳密な整合性を持つ手法は提案されていない。
 本研究では、入力仕様で既に行われている整合性証明を拠り所とし、入力仕様の整合性のうちで抽象仕様の変数に関係する部分が満たされるように、抽象仕様を含める必要のある式を獲得することで両仕様間の整合性を確保する手法を提案した。
 例えば、本研究で対象とした仕様記述手法 Event-B における整合性は、主に2種類に分けられる。第一に、仕様には主に対象システムの満たすはずの条件(不変条件)と振舞いとが記述されるが、振舞いが本当に不変条件を常に満たすことを確かめる必要がある。第二に、ある仕様と別の仕様が抽象・具体の関係にあるためには、両者の振舞いをオートマトンで表現した際に、それらが模倣関係にあることを確かめる必要がある。
 提案手法では、これらの確かめる必要のある条件(証明責務)の式を拠り所として、整合性のために抽象仕様を含める必要のある式を獲得する。この際、論理学の定理である Craig の補間定理を利用する。Craig の補間定理は、 $P \vdash Q$ なる論理式 P と論理式 Q があり、 P と Q に共通する記号が使われているならば、 P と Q の両方に使われている記号のみで記述された論理式 X が存在し、 $P \vdash X \vdash Q$ が成り立つというものであり、補間獲得のためのアルゴリズムが提案されている。仕様の証明責務は「(不変条件) (イベント発火条件) (状態遷移の満たす条件) (状態遷移後の不変条件)」のように、「前提 ゴール」の形をしている。
 提案の基本的なアイデアはこの式の補間として抽象仕様を含める式を獲得するというものであるが、前提とゴールの両方に使われている記号(すなわち、補間の式に使われる記号)は必ずしもユーザが抽象仕様を含めたいと指定した記号だけとは限らず、そのまま証明責

務の式の補間を獲得して得た式は直接抽象仕様に含めることができない。そこで提案手法では証明責務の式 f を同値な別の式 g に変換するルールで、前提とゴールに共通する記号がユーザの指定した記号の部分集合となるようなものを定義した。これにより、特定の変数で記述された、整合性のために必要な式を獲得する手法を構築した。

さらに、この手法を Event-B に限らず仕様記述と詳細化を扱う理論 Action systems の枠組みで一般化し、研究成果(1)-2 として Formal Aspects of Computing 誌で発表した。

研究テーマB: 抽象仕様の簡潔な整合性証明木の構築

テーマAの成果により、構築された抽象仕様は入力仕様と整合性を持つことが保証される。しかし、本研究の目的である理解容易性の向上を実用的なツールとして実現することを目指す、なぜ整合性が満たされるのかという証明を分かりやすい形で示すことが重要である。研究期間終了時現在、本テーマの成果は未公開ではあるものの、テーマA遂行において得られた知見をもとに手法を構築しまとめ上げつつある。

研究テーマC: 手法の自動ツールとしての統合

本研究テーマの目的は、自動ツールとして提案手法を統合することである。柔軟で厳密な仕様記述言語として注目を集める Event-B の開発環境 Rodin platform はプラグインを開発することによって機能拡張を行うことが可能である。そこで、Rodin のプラグインとしてツールを実装した。

ツールの主要インタフェースは、Event-B 仕様のビューアである。ビューアでは、チェックボックスで入力仕様の中の変数の一部を選択することができ、さらにそれをもとに入力仕様のうちでそのまま抽象仕様に含めることのできる式を自動で選択する機能を有する。これらの機能を用いてユーザの意向を入力すると、ツールは抽象仕様のひな形を構築する。ここで、Event-B 仕様の文法や記述ルールに従った仕様が構築されるように実装を行っている。

さらに、テーマAの手法を実装した。ここでは、証明責務の式をテーマAで提案したルールで変換し、補間計算機能を有する既存の制約ソルバ Z3 を利用して補間を獲得して得た式を抽象仕様のひな形に追加することで整合性が保証されるようにしている。テーマBの手法は現在実装中である。

構築したツールは、抽象化により全体像を見やすくすることを目的としていることからツール名を「ソフトウェア展望台」と変更し、Web で一般に公開している (<http://research.nii.ac.jp/slicenmerge/>)。

研究テーマD: どのような変数を指定して抽象化を行うと効果的かの分析

研究テーマAを遂行する中で、ある 1 つの仕様に対し、ユーザが選択する変数集合の違いによって様々な抽象仕様の可能性があることに着目した。抽象化を通じた理解容易性を考える上で、これらの抽象仕様の可能性の間の違いは重要である。特に、Event-B のように詳細化を扱うことのできる手法では、多段階の抽象化を考えることができる。

そこで、ソフトウェア展望台を利用して様々な抽象化の戦略を比較する実験を行った。具体的には、例えばある構築済みの多段階の仕様 s が変数 a, b, c を持つような時、ソフトウェア

展望台を用いて抽象化を行うことで変数 a, b を持ち s の抽象版である仕様 t1、さらに変数 a を持ち t1 の抽象版である仕様 t2 を構築できる。さらに、変数 b, c を持ち s の抽象版である仕様 u1、変数 c を持ち u1 の抽象版である仕様 u2 も構築できる。こうしてできる 2 つの多段階抽象化戦略「t2 t1 s」と「u2 u1 s」とでは、仕様のサイズや証明の複雑さなどにどのような違いが出るのかを調査した。

仕様の抽象化は変数の除去と見るができるが、ソフトウェア展望台を用いると、複数変数を 1 ステップで除去するような抽象化を複数ステップに分割することや、逆に複数ステップを結合するような操作を行うことができる。また、複数のステップの順序を入れ替える操作も可能である。実験では、このような操作を入力仕様に適用することにより様々な抽象化の戦略に従った仕様を構築した。

結果として、基本的に多くのステップに分けて少しずつ変数を除去するような抽象化や、ごく一部の不変条件のみに出現する「珍しい」変数を先に除去するような抽象化が複雑さの低減に効果的であることが判明した。Event-B のように詳細化を用いてモデリングを行う際の open problem として、「詳細化戦略の立案」、つまりどのような順序で変数を導入して記述を進めていくと複雑さを抑えたモデリングと検証ができるかという問題がある。詳細化戦略とは、すなわち本実験で扱った抽象化戦略を逆に見たものである。そのため、本実験で得られた知見は、詳細化戦略の立案問題におけるガイドラインを示唆するものであると言える。

この成果は国際会議 ICFEM で発表し、best paper award を受賞した(成果(1)-1、成果(3)-受賞 1)。

3. 今後の展開

本研究では、入力形式仕様に対して整合性を持つ「抽象版」の形式仕様とその整合性の証明を構築することを目的としていた。

今後は、整合性証明の構築部分(研究テーマ B)とツール(研究テーマ C)を論文としてまとめて発表することや本格的な評価実験に加え、自動化を活かした各種応用へ展開することを考えている。例えば、ある仕様を抽象化することによって、仕様のうち再利用可能な部分を抽出し、既存の仕様を対象システムと共通要素のある別の対象システムの仕様を構築する基礎を過不足なく獲得することや、さらに発展させて、既存の複数の仕様の共通要素をくり出すことで、形式仕様の再利用可能なライブラリを構築することも考えられる。

このように、本研究を発展させ、形式仕様を用いた開発に新しいパラダイムを導入するように展開したい。

さらに、同様の手法を Event-B とは異なる仕様記述言語やプログラムコードに適用可能な形に拡張することも考えている。

4. 自己評価

本研究では、形式仕様の整合性ある自動的な抽象化を目指し、「2. 研究成果」に記載した 4 つのテーマに沿って研究を遂行した。

テーマ B とテーマ C について当初の目標を完遂することができなかったことは反省点の一つである。特に、時間のかかる実装の進め方などについては改善の余地が大きく、今回の経験を以降の研究で活かしていく所存である。

一方で、テーマAの研究が理論的な一般性や、提案手法の仕様の理解容易性や再利用性向上への貢献が認められ、当該分野の代表的な論文誌 Formal Aspects of Computing に論文が掲載された。

テーマDの研究については、論文が当該分野の国際会議 ICFEM 2018 に採録され best paper award を受賞した。適切な理論的分析に基づいた自動化手法を活かした新しい視点の実験を通じ、検証手法のみに偏りがちな当該分野の他の研究と異なり、「形式的開発手法をいかに利用し、いかに活かすか」という工学的応用についての知見を獲得したことが評価されたためである。

さらに、ツールはオープンソースで公開しており、提案ツールが他の形式的開発手法利用者に貢献できるようにしている。加えて、「3. 今後の展開」で述べたように、本研究は形式的なソフトウェアの開発手法の新しい形を与える可能性を秘めており、ひいては形式的開発手法の裾野を広げ、世のソフトウェアを安全にすることに寄与できるものと期待している。

以上より、学術・産業・社会の各分野に貢献できたと考えている。

研究体制として、基本的に単独で全ての作業を担当したが、ACT-I のアドバイザーや他の研究者との議論は研究遂行にあたって大変有意義であった。また、国内・海外の専門家との議論やワークショップなどでの発表の機会を多く持つように心がけたことも有効であった。研究経費は主に実験で多数の仕様を扱い自動証明器を実行するための高性能コンピュータや専門家との議論のために活用した。結果として、効率的に研究を遂行することができた他、新たな視点を得る貴重な機会を多く得ることができた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Tsutomu Kobayashi and Fuyuki Ishikawa. Analysis on Strategies of Superposition Refinement of Event-B Specifications. The 20th International Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM 2018). 2018. pp. 357-372. Best paper award.
2. Tsutomu Kobayashi, Fuyuki Ishikawa, and Shinichi Honiden. Consistency-preserving refactoring of refinement structures in Event-B models. Formal Aspects of Computing. 2019. in-press (available online).

(2) 特許出願 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)

受賞 1. Tsutomu Kobayashi and Fuyuki Ishikawa. Analysis on Strategies of Superposition Refinement of Event-B Specifications. Best paper award at The 20th International Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM 2018). 2018.

口頭発表 1. Tsutomu Kobayashi. Analysis on Refinement Strategy of Formal Specifications. Oral presentation at OU-NII-Lero-Khalifa-LYON1 Workshop on Software Engineering for Cyber-Physical-Social Systems (CPSS 2018). 2018.

口頭発表 2. Tsutomu Kobayashi and Fuyuki Ishikawa. Refactoring Refinement of Event-B Models. Oral presentation at Shonan meeting towards industrial application of advanced formal methods for cyber-physical system engineering. 2018.

研究報告書

「縮小するネットワークにおけるアルゴリズム理論の整備」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50140

研究者：小林 佑輔

1. 研究のねらい

本研究では、ネットワーク上の最適化問題に対するアルゴリズム理論の研究を行う。アルゴリズムの理論研究においては様々な種類の問題が扱われているが、中でも「実際に起こりうる諸問題を単純化・抽象化して得られる問題」が注目され、盛んに研究されてきた。例えば、最短路問題のように、ネットワークの中で良いものを見つける形式の問題や、連結度増大問題のように、ネットワークを拡大することでより良いネットワークを構築する問題が例として挙げられる。

近年では、我が国における交通ネットワークのように、現在のネットワークを維持することが困難であり、縮小する必要のあるネットワークが現れつつある。しかし、これまでは縮小するネットワークが「現実のネットワークの単純化・抽象化」として明確に認識されていなかったこともあり、このようなネットワークを対象とするアルゴリズム理論の研究はほとんど行われてこなかった。

そこで本研究では、縮小するネットワークを対象とし、「良いネットワーク」を適切に数理的にモデル化すること、そして「良いネットワーク」を構築するアルゴリズム理論を整備することを目的とする。縮小するネットワークを対象としたアルゴリズムの理論研究を発展させ、将来的に、アルゴリズム理論の非専門家が様々なアルゴリズムを道具として利用しやすくすることを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、縮小するネットワークを対象としたネットワーク最適化問題を定式化し、その問題に対する理論的保証のあるアルゴリズムの設計を行なった。具体的には、元のネットワークに比べて2点間の距離がそれほど長くないという制約の下で辺(リンク)をできる限り多く間引く問題を、最小スパナー問題として定式化した。特に、本研究で扱うネットワークでは取り除く辺(リンク)数が少ないことを想定して、取り除く辺数をパラメータとした効率の良いアルゴリズム(固定パラメータアルゴリズム)を設計する問題を、パラメータ化最小スパナー問題として導入した。

本研究の主要な成果は、パラメータ化最小スパナー問題に対して、初めての固定パラメータアルゴリズムを与えたことであり、その結果は論文(1)-1、論文(1)-3にまとめられている。特に、今まで数学的に扱いにくくほとんど成果の知られていなかった加法的スパナーに対する結果は理論的に重要な貢献であるといえる(論文(1)-1)。また、本問題を扱う

中で、長らく未解決であった平面グラフ上の(パラメータ化でない)最小スパナー問題の NP 困難性を初めて示している(論文(1)-3)。

本研究課題のパラメータ化最小スパナー問題に関する成果以外にも、取り除く辺数をパラメータにする問題が J. Bang-Jensen et al. (2018) で扱われており、今後取り除く辺の数をパラメータにする問題が注目を集め、研究が盛んに行われることが期待される。

(2) 詳細

課題1. ネットワークのモデル化

本研究の第一の課題は、縮小するネットワークを対象とし、ネットワークの良さを適切に数理的にモデル化することである。通常のネットワークと同様に「連結度」や「中心性」、「距離」といった評価指標を基本とすることを考え、その際に縮小するネットワークにおいては、得られたネットワークが現在のネットワークと比べてどのくらい悪くなっているのかの差分を考慮する必要がある点に留意した。その結果、縮小するネットワークにおける基本的な問題として、パラメータ化最小スパナー問題とパラメータ化最小 k 連結部分グラフ問題の2種類を導入した。

スパナーとは元のグラフ(ネットワーク)の部分グラフであり、元のグラフにおける距離に比べてスパナー上での距離がそれほど長くないもののことをいう。スパナーは大規模なネットワークにおけるアルゴリズム設計の前処理として盛んに研究されてきた。スパナーの概念は、「辺を間引いた結果元のネットワークと比べて距離がそこまで長くない」とも解釈できるため、縮小するネットワークの視点でも重要だと考えられる。最小スパナー問題とは、距離がそこまで長くないという制約の下で辺(リンク)をできる限り多く間引く問題である。また、最小 k 連結部分グラフ問題とは、 k 連結性というネットワークの頑健性の制約の下でできる限り多くの辺(リンク)を間引く問題である。

最小スパナー問題や最小 k 連結部分グラフ問題自体は、与えられたネットワークの一部(部分グラフ)を取り出して、ある程度良いネットワークを得るというタイプの問題として既に考案されていた問題である。しかし、既存研究では、与えられたネットワークからリンクの大部分を取り除き、非常に小さな一部分のネットワークを取り出して、ある程度良いネットワークを得ることを目指していた。一方、本研究で扱うネットワークでは、元のネットワークから取り除くリンクはそれほど膨大にはならない状況を考えている。そのため、取り除くリンク数が少ないことを想定して、そのリンク数をパラメータとした効率の良いアルゴリズム(固定パラメータアルゴリズム)を設計する問題を導入した。なお、このパラメータは自然なパラメータであるにも関わらず、今までに注目されておらず、問題の導入自体が重要な貢献であると考えられる。実際、論文(1)-3の査読者にはこのパラメータの導入は高く評価された。

課題2. 最適化問題に対するアルゴリズムの設計

本研究の主要な成果は、パラメータ化最小スパナー問題に対して、初めての固定パラメータアルゴリズムを与えたことであり、その結果は論文(1)-1、論文(1)-3 にまとめられてい

る。また、本問題を扱う中で、長らく未解決であった平面グラフ上の(パラメータ化でない)最小スパナー問題のNP困難性を初めて示した(論文(1)-3)。固定パラメータアルゴリズムとは、取り除く辺の数 t をパラメータとしたときに、計算時間が、(グラフのサイズの多項式) \times (t の関数) で抑えられるアルゴリズムのことをいう。取り除く辺の数 t が指数部分に表れないため、 t が小さいときには比較的計算時間が小さなアルゴリズムになる。

本研究では、まず乗法的なスパナーを扱った。この問題は、指定された k に対して、どの 2 点間の距離も元の距離の高々 k 倍にしかならない、という制約の下でできる限り多くの辺を取り除く問題である。論文(1)-3 の中で、乗法的なスパナーはグラフの局所的な性質だけから特徴づけられる、すなわち比較的数学的に扱いやすい対象であることを明らかにした。そして、この性質に基づいて、乗法的なパラメータ化最小スパナー問題に対する初めての固定パラメータアルゴリズムを与えた。

乗法的スパナーの結果を受けて、次に自然な対象として加法的スパナーを扱った。この問題は、指定された k に対して、どの 2 点間の距離も元の距離より k しか長くならない、という制約の下でできる限り多くの辺を取り除く問題である。一見すると、乗法的スパナーと加法的スパナーの間には大きな差異はないように見えるものの、実際にはこれらの扱いやすさは全く異なるものである。上で述べたように、乗法的スパナーはグラフの局所的な性質で特徴づけられるのに対して、加法的スパナーを扱うにはグラフの大域的な性質を扱う必要がある。そのため、加法的スパナーは数学的に非常に扱いづらい対象であり、これまでに加法的スパナーに関する成果は(我々の問題設定以外の問題に対しても)ほとんど知られていなかった。本研究では、論文(1)-1 の中で、加法的なスパナーの大域的な性質を今回の問題特有の条件を使いつつ扱うことで、加法的なパラメータ化最小スパナー問題に対する初めての固定パラメータアルゴリズムを与えた。結果もさることながら、加法的スパナーを扱う証明手法自体が今までにない特徴的なものであるといえる。

以上のように、本研究の主成果は、パラメータ化最小スパナー問題に対して、初めての固定パラメータアルゴリズムを与えたことである。特に、今まで数学的に扱いにくくほとんど成果の知られていなかった加法的スパナーに対する結果は理論的に重要な貢献であるといえる。

なお、パラメータ化最小 k 連結部分グラフ問題については、本研究期間中に、我々の研究とは無関係に J. Bang-Jensen et al. (2018) により、多くのバリエーションに対して、固定パラメータアルゴリズムが提案された。結果的には、パラメータ化最小 k 連結部分グラフ問題は本研究での成果とはならなかったものの、世界的に見て同じような問題設定の重要性が認識されつつあることを表していると考えられる。本研究課題のパラメータ化最小スパナー問題に関する成果と、J. Bang-Jensen et al. (2018) らの成果を皮切りに、今後取り除く辺の数をパラメータにする問題が注目を集め、研究が盛んに行われることが期待される。

また、本研究では最小スパナー問題以外のネットワーク上の最適化問題についても成果を挙げており、そのうちいくつかは論文として出版されている(論文(1)-2, (1)-4, (1)-5)。

3. 今後の展開

本研究課題のパラメータ化最小スパナー問題に関する成果以外にも、取り除く辺数を k

ラメータにする問題が J. Bang-Jensen et al. (2018) で扱われており、取り除く辺の数をパラメータにする問題が徐々に注目を集めつつある。今後は、距離、連結度以外の条件を考慮した最適化問題に対して、同様のパラメータを導入した問題が重要になってくると考えられる。現時点では、理論的な意味での効率性のみに注目しており、計算速度の意味でも扱える問題の広さの意味でも実用的なアルゴリズムではない。しかし、今後様々な問題設定に対するアルゴリズム理論を整備することで、他の最適化問題のアルゴリズム理論と同様に、将来のアルゴリズム設計の基盤となることが期待される。

4. 自己評価

パラメータ化最小スパナー問題に対する初めての固定パラメータアルゴリズムを与えたことや、平面グラフ上の最小スパナー問題の NP 困難性を初めて示したことは、個々の成果として重要な貢献であると評価できると思われる。その一方で、縮小するネットワークに関する最適化問題の枠組みを作るという段階には至っておらず、今後このトピックに関する成果を積み重ねることで枠組みを構築していく必要があると考えられる。研究の進め方については、本研究は理論研究であり、研究補助者等を必要としていない体制や、研究費の大半を研究打合せ・情報収集のための旅費に使用した点は妥当であると考えられる。研究成果の波及効果は、現時点で明確ではなく、同様の最適化問題の後続研究がどれくらい盛んに行われるかに大きく依存すると考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yusuke Kobayashi: An FPT algorithm for minimum additive spanner problem, arXiv:1903.01047, 2019.
2. Yusuke Kobayashi and Ryo Sako: Two disjoint shortest paths problem with non-negative edge length, Operations Research Letters, 47 (2019), 66--69.
3. Yusuke Kobayashi: NP-hardness and fixed-parameter tractability of the minimum spanner problem, Theoretical Computer Science, 746 (2018), 88--97.
4. Koki Takayama and Yusuke Kobayashi: A strongly polynomial time algorithm for the maximum supply rate problem on trees, Proceedings of the 12th International Frontiers of Algorithmics Workshop (FAW 2018), pp. 54--67.
5. Takehiro Ito, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and Yoshio Okamoto: Algorithms for gerrymandering over graphs, Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2019), to appear.

(2) 特許出願

無し

(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)

無し

研究報告書

「自動チューニング可能な一般化 N 体問題解法枠組みの開発」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50141

研究者：佐藤 重幸

1. 研究のねらい

N 体問題とは、N 個の粒子の相互作用を計算する問題であり、天体シミュレーションなどで一般に知られている。しかし、その作用演算子(カーネル)をパラメタ化すると、一般性の高い計算パターンとして、様々な科学技術計算や機械学習の計算に応用できることが知られている。同様に、N 体問題の高速解法も一般化することができ、それを実装したソルバは、様々な応用問題を高速に解く基盤になりえる。しかし、既存の N 体問題のソルバは、その一般性を捨てて、特定の応用問題に固定した実装になっており、様々な問題設定には適用しにくい。また、既存のソルバは、移り変わっていく計算機環境に対して熟練者による手作業で適応させているため、開発コストも大きい。この問題を解決するために、N 体問題の一般性を毀損しない抽象性と、複数の計算機環境に対して機械的に適応できるようなチューニングパラメタを備えたソルバを開発する。これによって、利用者の計算機環境上で効率良く動作する、多目的利用可能な N 体問題ソルバを、一般のプログラマにとって手軽に利用できるようにし、多くの領域のアプリケーション開発の生産性を向上させる。

2. 研究成果

(1) 概要

全体としては、多目的利用と自動チューニングが可能な N 体ソルバを設計し、特定の応用問題や計算機環境に適応した実装インスタンスを自動生成する枠組みの開発に取り組んできた。個別的には、主に次の 3 つの研究課題に取り組み、それぞれについて成果を得た。

1. 複数の代表的な高速 N 体アルゴリズムを包摂する一般化 N 体アルゴリズムを、並列計算の抽象パターンとして定式化した。
2. 問題仕様の核となるカーネルコードを自動的に効率化する言語処理系を開発した。
3. 効率的な SIMD 化を、半自動的に適用する手法を開発した。

これらの個別的成果によって、目的とする多目的利用と自動チューニングが可能な N 体ソルバの理論と実装の両面の基盤が整った。

(2) 詳細

1. 並列解法パターンの定式化(PPL 2018)

計算パターンと引数演算子(カーネル)に分解して並列計算を定式化する並列パターンは、高水準並列プログラミングに役立つと事が知られている。多目的利用と自動チューニングを両立させるために、複数の典型的な N 体アルゴリズムを、並列パターンの合成によって定式化した。この定式化には、次の 4 つの利点がある：

- 関数合成によってアルゴリズム全体が簡潔に表現され、ライブラリ実装しやすい。

- パラメタ演算子によってアルゴリズムインスタンスを自然に切り替えられる一般性を持つ。
 - 関数融合と呼ばれる既存のプログラム変換を関数合成に適用することで、破壊的実装をハードコードした場合と同等に空間効率の良い実装が機械的に導出できる。
 - 合成される個々の並列パターンは、分割統治型計算であるため、複数のコードテンプレートを再帰的に合成することで、チューニングのバリエーションを機械的に増やせる。
- これは、多目的利用と自動チューニングが可能な N 体ソルバに適した定式化である。

2. 対称性に基づくカーネル最適化 (JSSST 2018, SPLASH 2018 Poster)

N 体ソルバにおいて、カーネルコードの効率化は重要である。とりわけ、対称性を利用したカーネルコードの効率化は、単純だが大きな効果がある。これは、例えばニュートン力学における作用 f_{12} と反作用 f_{21} の対称性 $f_{12} = -f_{21}$ に基づいて、作用・反作用をまとめて計算するようにカーネルを実装 (相互化) することである。知識のある人にとっては単純に見える効率化だが、コンパイラにとっては難しく、既存のコンパイラ最適化では対処できない。そこで、プログラム検証の技術とコンパイラ最適化の定式化を組み合わせ、カーネル相互化をドメイン特化言語 (DSL) 処理系の形で自動化した。

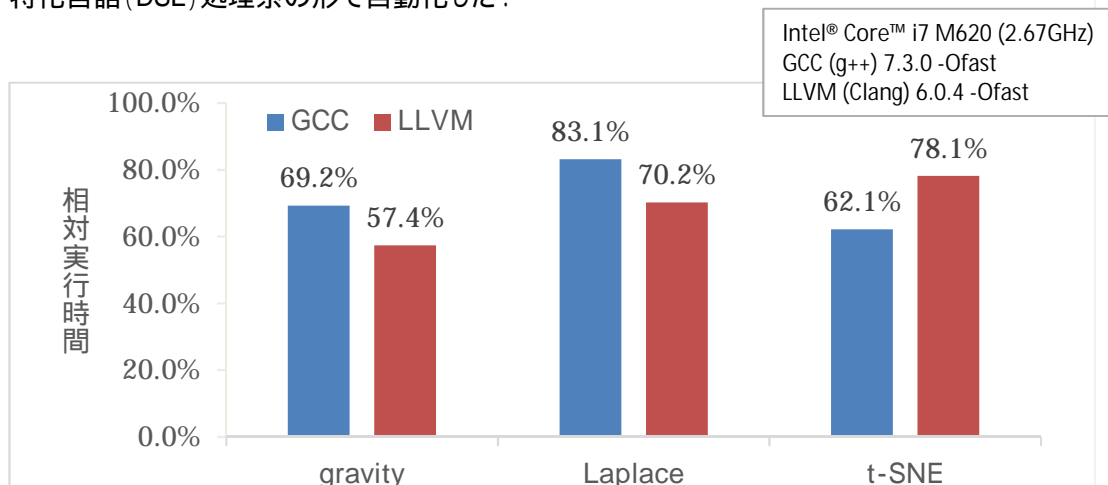


図 1: 相互化による実行時間削減 (相対実行時間が小さいほど効果大きい)

図 1 に示されるように、通常のカーネルを 2 回呼び出す場合と比べて、相互化したカーネルを 1 回呼び出す方が、明確に効率が良い。これは同時に、最新の最適化コンパイラ (GCC・LLVM) でも、相互化と同等の最適化が実現できていないことも示している。開発した DSL 処理系は、モデル式が素直に書き下されたカーネルから、正しく相互化されたカーネルを自動構成する。つまり、生産性の高い簡単な仕様記述と、人の知識による手作業が必要だった効率的な実装を、両立させる。

3. 並列パターンのモジュラーな SIMD 化 (PPL2019 Poster)

SIMD 命令 (単一命令で複数データを処理する命令) を使うようにプログラムを変換する SIMD 化は、プログラム高速化において大変重要である。理想的には SIMD 命令のベクトル

幅 (AVX2 なら 4) 倍に性能向上する一方, N 体ソルバを含めた実際のプログラムに置いて, コンパイラが自動的に SIMD 化できる範囲は極めて限定的である. 故に事実上, 熟練者の手作業を要する高速化となっており, 生産性が低い. そこで, 並列パターンをモジュラー且つ半自動的に SIMD 化する手法を開発した. これを並列パターンで表現された N 体ソルバに適用すれば, 一般性を保ちつつ SIMD 化した N 体ソルバを, ライブラリレベルでモジュラーに実装できるようになる.

図 2 に, 重力カーネルを用いた N 体ソルバに対する, 開発したモジュラーな SIMD 化手法と, ナイーブな手法, 熟練者による標準的手法の性能利得を比べた結果を示す.

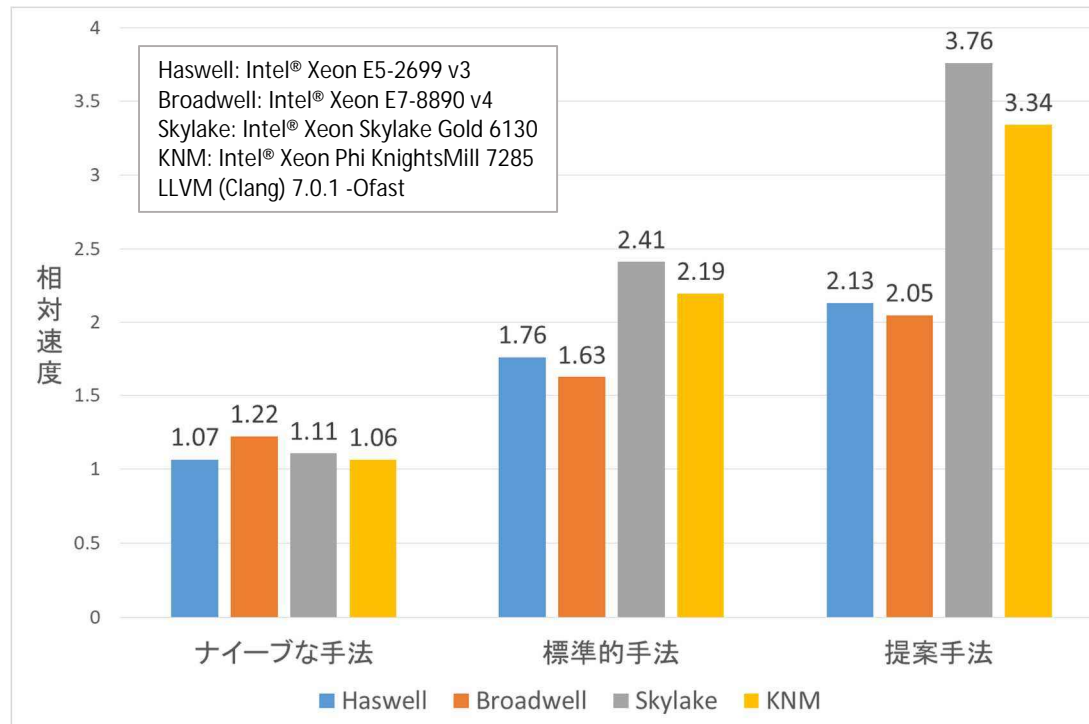


図 2: 各種 SIMD 化の性能利得 (相対速度が大きいほど利得が大きい)

図 2 を見ればわかるように, 単にライブラリとしてモジュラーに実装できるというだけでなく, 熟練者による標準的な手実装と比べても, 高い性能を達成した. その上, 4 つの異なる CPU アーキテクチャ全てで相対的に高い性能を達成したので, 性能可搬性も高い. この提案手法は, SIMD 化をチューニングパラメタに取り入れた N 体ソルバの実装に即座に役立つ.

3. 今後の展開

研究提案当初は, N 体問題という応用範囲に限定された研究成果になることを想定していたが, 試行錯誤して研究を進めていく中で, 特に研究課題 2 と 3 という形で, N 体問題に限定されない, プログラミング言語の設計と実装に関する個別的な研究成果を得た. また, 全体的な問題へのアプローチとして今回採用した, 並列パターンで定式化した上で, DSL 処理系とライブラリレベルでの自動化を実現するというアプローチは, プログラミング言語の観点で筋が良く, 様々な応用問題に適用できる見込みがある. 今後は, 本研究のアプローチに基づいて, 言語処理系の要素

技術を開発することで、扱える問題領域やアルゴリズムクラスの拡大を考えている。

プログラミング言語分野の研究成果は一般に、その言語の利用者が一定程度増えてくるまで、産業や社会への影響は見えて来ないものである。そして、既存のプログラマは、様々な事情から、新しい言語を使わない・使えないこともある。しかし、良い言語設計は、本質的な問題の理解と解決を助けるため、高い教育効果と広い波及効果を生む。新しい世代に向けて、より良い言語基盤を提供すれば、彼らがこれまでの世代よりも高い生産性を以て、社会的に重要な応用問題に取り組めるようになる。N 体問題は、社会的に重要な応用問題を包摂するカテゴリであるため、本研究成果は、未来の生産性を高める 1 つの礎になる。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

研究上の技術的な課題については一通り解決し、当初の想定よりも一般性の高い手法によって、期待以上に効率的な N 体ソルバを得られたという意味で、研究目的は想定以上に達成された。しかし、開発した手法がプログラミング言語としての一般性を持ったが故に、当初の想定よりもソフトウェア開発にコストが掛かるようになり、結果としてソフトウェア整備の面には課題が残った。

研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

立場の都合もあり、学生を巻き込む形での研究チームが作れず、秘書もなく、全て独りで実施した。もし学生を RA などで雇用しつつ、ソフトウェア開発を任せることができたら、最終成果物に対するソフトウェア整備がもっと進んだ可能性がある。

研究期間中に別の所属に移り、研究環境（特に計算機環境）が大きく変わった。特に物品購入などは、新しい環境に適応する形で有効活用できたと考えている。また、未参加だったトップ国際会議に参加できたことは、様々な知見、教訓、繋がりを得ることができたので、費用対効果が高かった。ただし、所属を移るタイミングでの費用執行において、想定外のことが重なり、不本意な国庫戻入が生じたことは反省点である。

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

学術的には価値があることができたことと自負がある。最近では、並列 DSL の研究開発が、学術と IT 産業の両方で盛んなので、それに従事するグループにこの成果を売り込むことで、彼らの成果物に、その要素技術が取り込まれる可能性は大いにある。

研究課題の独創性・挑戦性

研究提案当初は、どこまで出来るかわからない目標であったので、少なくとも私にとって、挑戦性が高かったことは間違いない。そして、本研究のように N 体問題に深い知見に基づいて、言語処理系の研究に取り組むのは、他の研究グループが容易に追従できない程度に、独創的であると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

なし

(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)

- 佐藤重幸. 木上の非構造的再帰関数の融合 高速 N 体問題解法の場合 . 第 20 回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ(PPL2018) , 2018 .
- 佐藤重幸. 対称な関数呼び出しの融合 . 日本ソフトウェア科学会第 35 回大会(JSSST2018) , 2018 . 優秀発表賞受賞 .
- Sato, S. Symmetry-based Optimization of Interaction Kernels. In the 2018 ACM SIGPLAN conference on Systems, Programming, Languages and Applications: Software for Humanity (SPLASH 2018), Poster, 2018.
- 佐藤重幸. カーネル非依存 SIMD 化テンプレート . 第 21 プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ(PPL2019) , ポスター , 2019 .

研 究 報 告 書

「Data Skewness を捉えた超高速・省メモリな大規模データ処理」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50142

研究者：塩川 浩昭

1. 研究のねらい

近年、ビジネスや医療、スポーツなどの幅広い分野においてデータ分析技術の活用が成功を収めており、時々刻々と生み出される大規模なデータを高速高精度に分析処理することの重要性については疑いの余地がない。一方で、高速に高い精度の分析処理結果を獲得するためには、高い計算性能を持った計算機が不可欠である。大規模なデータに対して高速かつ高精度なデータ処理を行おうとした場合、それに見合った計算環境を利用者は準備する必要があり、誰でも容易に大規模データを扱うことが出来るわけではないのが現状である。

本研究では、大規模データ処理が必要とする計算資源と我々が手にすることができる計算資源のギャップを埋めるべく、多様な計算環境における高精度なデータ処理を想定した超高速・省メモリな大規模データ処理アルゴリズムの開発に取り組む。一般的に我々が容易に入手可能な計算環境は、前述の高性能計算機と比較して CPU やメモリ、バス速度などの性能が低い場合が多い。とりわけ、CPU 性能とメモリサイズは、データ処理の規模と性能に直結する重要な要素であり、両者の性能低下は扱えるデータと分析の規模を直接的に制限する要因となり得る。そこで本研究では、超高速かつ省メモリな大規模グラフデータ処理アルゴリズムを開発・提供することにより、誰もが手持ちの計算環境でビッグデータ処理を実現できるようにすることを目指す。

本研究では実世界のデータの中に含まれているデータ分布の偏りや属性間の従属性などといったデータの偏り (Data Skewness) に着目する。例えば、現実世界に存在するグラフデータには特定の部分グラフ構造が頻出するということがこれまでの研究で明らかになっている。本研究は実データの持つ Data Skewness を捉えることで既存のデータ処理アルゴリズムを再設計し、高速かつ省メモリなアルゴリズム群の構築を目指す。特に ACT-I 期間では決定的アルゴリズムの性質に基づいた Data Skewness Caching と呼ばれる高速化手法を提案する。決定的なアルゴリズムは入力に対して処理結果が一意になる。本研究ではこの性質を前提に、上述した Data Skewness に対する計算結果をキャッシングし、Data Skewness との同型性判定を行うことで、大規模データ処理アルゴリズムの大幅な高速化とメモリ使用量の削減を狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

大規模データに対する Data Skewness を捉えた超高速・省メモリなアルゴリズムの構築を目標として、本研究期間ではグラフデータに対する決定的アルゴリズムを対象とした研究開発を実施した。この研究を通じ、比較的理想的なグラフデータ並びにアルゴリズムにおいて、Data Skewness Caching が処理の高性能化に極めて有効に働くことを確認することができ

た。

具体的には、相関に基づく Modularity クラスタリングを題材として、Data Skewness Caching を導入した高速化・省メモリ化に取り組み、本研究の提案アプローチの有効性を 30 億エッジ規模の実データならびに人工データに対して評価を行った。また、ここで開発した手法の特性や性質の議論と効率化を行うために、本手法に対する理論的な解析についても合わせて実施した。Data Skewness Caching の組み込みに際して、どのような構造特徴に着目するかが性能を左右するパラメータとして存在するが、本期間では少数のノードから構成されるシンプルな構造特徴を検証の対象とした。評価結果の詳細は次節にて述べるが、大規模なデータに対して大幅な高速化性能ならびに省メモリ化性能を示すことを実験的に確認した。また、この結果を受けて、比較的シンプルなグラフモデルを前提とした Data Skewness Caching の理論的な性能限界に関する検証も実施し、提案アプローチである Data Skewness Caching は実装の効率化により高速・省メモリなデータ処理を実現できる可能性を示した。

また、本研究では上記の通り開発した提案アプローチ Data Skewness Caching を様々なグラフデータ処理に対して拡張・応用を行った。次節では、本研究で実施した拡張のひとつとして密度ベースグラフクラスタリングの高速化手法について述べる。この手法では Data Skewness Caching に加え、数億エッジ規模のグラフに出現する度数比分布に着眼した動的なノード枝刈り手法を導入した。これにより、従来のアルゴリズムと比較して大幅な高速化に成功した。

(2) 詳細

● Modularity クラスタリングの高速化・省メモリ化手法の開発

局所相関に基づく Modularity クラスタリングの超高速・省メモリ化手法 gScarf を開発した。gScarf は Data Skewness Caching という新たなデータ処理法を提案している。このデータ処理法は、解の決定性が保証されるシンプルな部分グラフ構造の計算結果を動的にメモ化することで、計算に必要な時間・空間コストの削減を図る。

提案手法 gScarf の実行速度を最先端の手法である CorMod [Duan et al., KDD'15]と比較を行い、約 300 万エッジ (YT) から約 30 億エッジ (TW) 規模のデータに対して、最大で 1,000 倍以上の高速化性能を確認した。YT データにおける各手法の計算回数のヒストグラムを図 2 に示す。図 2 の各ピクセルはグラフの各エッジを示し、エッジの計算回数が多いほど対応するピクセルが黄色にハイライトされている。図 2 からわかるように、gScarf は CorMod と比較して計算回数を 1%未満にまで削減することに成功している。

また、提案手法 gScarf は実データに対してメモリ使用量を従来の約 30%程度まで抑制するとともに、その精度は CorMod と同程度になることを実験的に確認している。さらに本研究では、Data Skewness Caching の実行速度・メモリ消費量に関する有効性を理論的に解析し、理想的なグラフに対して時間・空間計算量をグラフサイズの数千分の一まで抑えられることを示した。

● 密度ベースグラフクラスタリングの高速化手法の開発

密度ベースクラスタリング SCAN の超高速化手法 ScaleSCAN [1]を開発した。我々は極め

て大規模なグラフのみにおいて隣接ノード間の度数比が大きく偏るという性質を新たに発見した。この発見に基づき、ScaleSCAN は上述した Data Skewness Caching に加えて、度数比に応じた動的な計算ノード枝刈り手法を導入している。

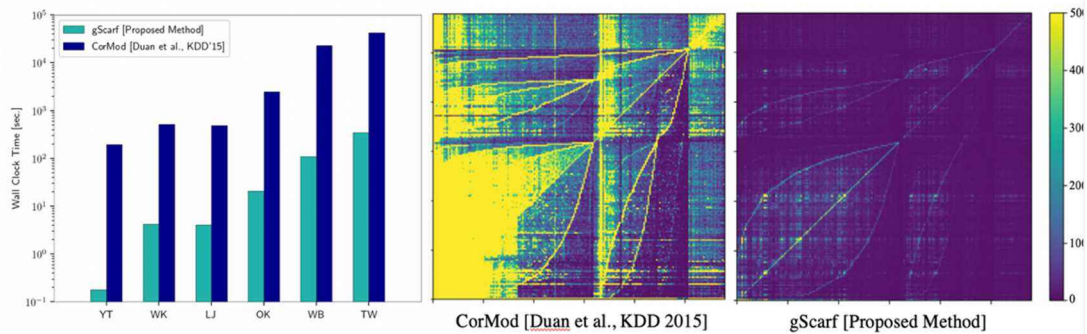


図 1. 実行時間の比較

図 2. 計算回数のヒストグラム (TW データ)

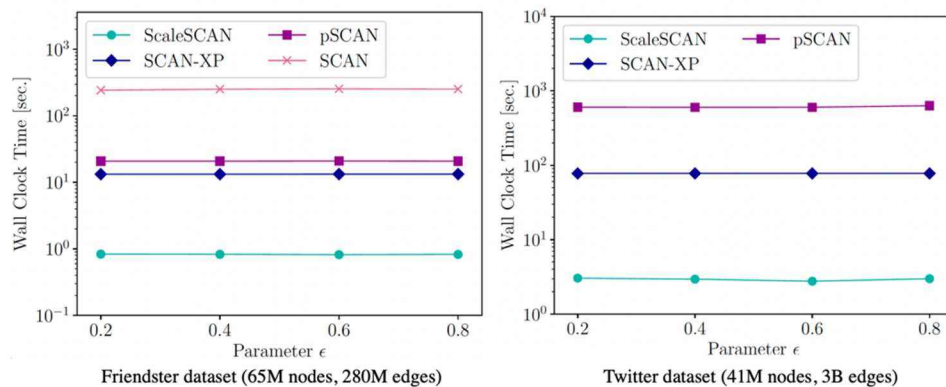


図 3. 実行時間の比較

提案手法 ScaleSCAN の実行速度を、最先端の手法 SCAN-XP, pSCAN ならびにベースライン手法 SCAN と比較を行い、500 倍から 1,000 倍程度的高速化性能を確認した(図 3)。特に、Twitter dataset では、SCAN は 24 時間以内に処理が終了しなかったのに対し、提案手法 ScaleSCAN は約 6.4 秒で厳密解を計算可能であることを確認した。

3. 今後の展開

本研究提案の狙いは、提案技術の開発により、誰もが手持ちの計算環境でビッグデータ処理を出来るようにすることである。本研究は、ACT-I 期間においてグラフデータに対する Data Skewness を捉えた新しい高速化・省メモリ化技術の有効性を実験・理論の両面から確認した。この成果は大規模なデータを処理する際に必ずしも膨大な計算資源を必要としないことを示唆している結果であると考えている。昨今様々な IoT デバイスが普及にともなって、我々が利用可能な計算環境や計算資源の多様化が加速している。このような環境において IoT アプリケーションの高機能化を実現する上では、本研究で開発したアルゴリズムの様な高いパフォーマンスを発揮することが出来るアルゴリズムが必要不可欠になるのではないかと考えている。

更に 2 年間の加速フェーズでは、この技術・発見をグラフデータに限定されず、多様なデータとアルゴリズムに応用することに挑戦する。本研究を通じた将来の見通しとして、Data Skewness という独自の着眼点を基にした様々なデータ処理技術の再設計を行い、高性能な解法群の構築と

体系化を目指したいと考えている。

4. 自己評価

- 研究目的の達成状況

ACT-I 期間の研究を通じて、単純な(重み無し・無向)グラフ構造を対象としたアルゴリズムに対する Data Skewness を捉えたアプローチの構築とその有効性の検証を理論・実験の両側面行った。これは当初計画していた研究目的を十二分に達成しており、幅広いアルゴリズムに対する提案アプローチの有効性を示唆するものであったと考える。

- 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究の実施体制及び研究費の執行状況は、概ね計画通り進捗した。

- 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

ACT-I 期間中は難関会議に投稿した論文の多くが不再録となり波及効果は限定的であったが、いずれの査読結果でも技術的新規性や有用性、論文のインパクトについては高い評価を得ている。したがって、今後着実に論文出版のプロセス(特に難関会議への挑戦)を続けていくことで、学術面への波及効果は次第に大きくなると期待できる。また、主要な提案技術は論文発表と同時にソフトウェア化を行うことで産業面での波及効果を見込んでいる。

- 研究課題の独創性・挑戦性

本研究で提案する Data Skewness を捉えたアプローチ、とりわけ Data Skewness Caching は我々が知る限り例を見ない手法である。また、上述の通り、ACT-I 期間を通じて複数の難関会議に投稿を行い、技術的な新規性や有効性について非常に高い評価を得ている。以上のことから、本研究課題の独創性・挑戦性は高いと自己評価している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. Hiroaki Shiokawa, Tomokatsu Takahashi, Hiroyuki Kitagawa. ScaleSCAN: Scalable Density-based Graph Clustering. The 29th International Conference on Database and Expert Systems Applications. 2018, pp. 18-34 |
| 2. Tomoki Sato, Hiroaki Shiokawa, Yuto Yamaguchi, Hiroyuki Kitagawa. FORank: Fast ObjectRank for Large Heterogeneous Graphs. The Web Conference 2018. 2018, pp.103-104 (poster) |
| 3. Hiroaki Shiokawa, Yasunori Futamura. Graph Clustering via Cohesiveness-aware Vector Partitioning. The 20th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services. 2018, pp. 33-40. |

(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)

- 主要な学会発表

1. 佐藤 朋紀, 塩川 浩昭, 北川 博之, "グラフの構造情報を用いた ObjectRank の高速化," 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 (DEIM2019), March 2019.
 2. 松下 朋弘, 塩川 浩昭, 北川 博之, "メッセージ集約に基づく Affinity Propagation の高速化," 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 (DEIM2019), March 2019.
 3. 山崎 耕太郎, 塩川 浩昭, 北川 博之, "クラスタの収束性を用いた逐次的枝刈りによる RankClus の高速化," 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 (DEIM2019), March 2019.
 4. 真次 彰平, 塩川 浩昭, 北川 博之, "属性付きグラフに対するビームサーチを用いたコミュニティ検索," 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 (DEIM2019), March 2019.
 5. 佐藤 朋紀, 塩川 浩昭, 北川 博之, "選択的重要度先読みを用いた ObjectRank の高速化," 第 10 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2018), March 2018.
- 受賞
 1. 塩川 浩昭, 情報処理学会 2018 年度山下記念研究賞, 2019 年 3 月 15 日
 2. 佐藤 朋紀, 塩川 浩昭, 北川 博之, 第 10 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 優秀論文賞, 2018 年 6 月 22 日

研 究 報 告 書

「あらゆる人々が情報技術にアクセスすることを目的としたビジュアルプログラミング言語の開発」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50143

研究者：鈴木 遼

1. 研究のねらい

本研究では、年齢、母国語、身体能力にかかわらず、あらゆる人々が情報技術を日常生活で主体的に活用することを支援する、新しいビジュアルプログラミング言語「Enrect (エンレクト)」を開発した。コードの見通しをよくするデザインの工夫、タッチ操作に最適なインタフェース、豊富な機能セットの組み合わせにより、従来よりも少ない時間と学習コストで、実用性の高いアプリケーションの開発を達成することを目的としている。

一般に、教育用途に使われるビジュアルプログラミング言語は、学習しやすい代わりに実行できる処理や性能に制約があり、実務に使われるテキストプログラミング言語は、機能と実行時性能に優れる代わりに習得が難しい。本研究では、ビジュアルプログラミング言語に新しいインタフェースを導入し、さらにテキストプログラミングの強みを活用するためのコード変換処理を実装することで、これらのギャップを埋める新しいプログラミング言語を開発した。本研究により、コンピュータによって実現される様々な情報技術にアクセスする際の敷居を低くすることが期待される。

Enrect のインタフェースの特徴は「ブロック」「ノード」「拡大縮小」の3つの要素の組み合わせにある。これらはユーザがプログラミングの文法を学ぶことを容易にし、データフローの制御・可視化を支援し、詳細度の切り替えを可能にすることでプログラムの見通しを良くする。また、マウスや指一本のタッチだけでの効率的な操作を実現するだけでなく、視線入力のような限られた自由度の入力デバイスを用いる操作とも相性の良いインタフェースとなる。ユーザが記述したプログラムはバックグラウンドで C++コードの呼び出しに変換される。様々な入出力デバイス、画像・音声処理、機械学習等のフレームワークとの関係を、既存の豊富なライブラリ資源を比較的容易に活用できる。

2. 研究成果

(1) 概要

ビジュアルプログラミング言語のユーザビリティを改善するインタフェースや技術を調査・検討し、それらを実装した新しいツール Enrect を開発・公開 (<https://enrect.org>) した。Enrect のコンセプトは「身体能力によらない」「母国語によらない」「コンピュータの経験によらない」である。

身体能力によらない

身体のハンディキャップを有していてもプログラミングを楽しむことができるバリアフリーなインタフェースを開発。すべてのプログラミング操作は一本の指または視線入力で行うでき

る。デバイスから音を鳴らす代わりに視覚的に表示するオプションを提供する。登場するブロックはカラーユニバーサルデザインで実装されている。

母国語によらない

精度の高いローカライズと、使用言語に依存しない意思疎通を実現するためのデザインを提案。使用言語に応じて自然な語順が成立するように、ブロック内の引数の順番を変更可能に。また、変数に命名をしなくても簡単なプログラムが書けるようなノードのインタフェースを導入。ツールが提供する変数名を選択することで、使用言語に応じて適切な訳語で表記される仕組みを実装した。

コンピュータの経験によらない

プログラム内にアイコンや画像を直接表示できるようにし、読みやすさを改善すると同時に、コンピュータ初心者には難しい用語を排除できる仕組みを実装した。また、自然言語でプログラムの記述に使うブロックを検索し、同時にパラメータを提案するという、ブロックベースのビジュアルプログラミング言語の生産性を改善する新しいインタフェースを提案した。

(2) 詳細

研究テーマ A「インタフェースのデザイン」

ブロックベースのビジュアルプログラミング言語とノードベースの言語のハイブリッドとなる設計を実装した。処理を記述したブロックを並べ、値ブロックのノードをリンク曲線でパラメータのボックスに接続することでプログラムを表現する[2]。タッチ操作を前提にデザインし、複数の指を使う操作や、キーボード入力是不要である。



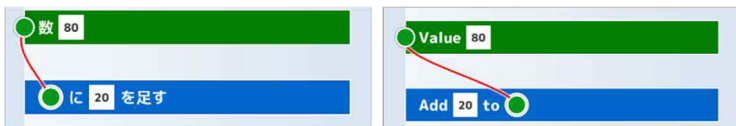
研究テーマ B「アクセシビリティの改善」

音が聞こえない、音を再生できないユーザを想定して、音の再生の有無や音楽と効果音の印象を視覚的に表現[1]。また、重要な UI の配色にはカラーユニバーサルデザインを採用。



ブロックベースのビジュアルプログラミング言語をローカライズする際、ブロックのテキスト

に含まれる引数の順序を並び替えることで、翻訳後のテキストをより自然な表現にできる場合がある。本研究では英語版での順番を基準としてブロックの引数に番号を割り振っておくことで、翻訳者が容易に語順を入れ替えて翻訳結果を記述できる形式でブロックを定義した[1]。また、ツールが提供する変数名を選択することで、使用言語に応じて適切な訳語で表記され、異なる言語間でプログラムを介した意思疎通がしやすくなる仕組みを実装した。



視線入力装置を使い、目の動きだけでブロックの操作、パラメータの入力、コードの実行を可能に。ブロックの配置のような「粗い操作」と、テキスト・数値入力のような「細かい操作」に分類し、後者は視線を停留させずに高速に入力できるインタフェースを開発した。



アイコンと画像をブロックのテキストに取り入れた。単に判別しやすくなるだけでなく、翻訳のコストや、キーボード名など、コンピュータ経験の浅い人にとって難しい用語の利用を抑えることができる。



研究テーマ C「機能の向上」

記述したビジュアルプログラムは内部で C++ および AngelScript コードに変換される。リンクまたはバインドされるライブラリの API を呼び出し、それに相当するブロックのインタフェースをテキストデータで記述することで、比較的容易に機能を追加できる。本研究期間内には、ゲームコントローラからの入力やカメラの映像の取得、画像処理、音声処理などを、機能拡張の例として実装した。

機能の追加に伴い増えていくブロックを、ユーザが素早く見つけ出せるよう、自然言語によるブロック検索機能を実験的に実装。入力した文章からパラメータの候補も同時に提案する。



研究テーマD「デバッグのためのインタフェースの実装」および
研究テーマE「ユーザの自習のためのチュートリアル実装」

達成が不十分であった。ビジュアルデバッガやチュートリアル機能はソフトウェアの最上位のレイヤーにあたり、実装にあたっては、下位の仕様の安定化が必要だが、まだその段階に達していない。

研究テーマF「指導者用のガイドラインの執筆」

成果物を活用する数回のワークショップをとおりて、3 時間の講座をマニュアル化した。現状ではソフトウェアの安定性の問題と、PC のセッティングなどの必要から研究者が監督しているが、数カ月以内には研究者が監督しない授業を実施できる態勢にする。

3. 今後の展開

プログラミングツールはプログラミング教育の現場を支えるインフラであり、「誰もが公平に扱えるように」というアクセシビリティ面での要求は今後ますます大きくなっていくだろう。

文科省の調査では、プログラミング教育の施策が進んでいない地域の過半数について、プログラミング教育を担当できる人材の不足が理由として挙げられている。単一の施策で根本的な解決を図ることは難しいが、適切に設計されたプログラミングツールの開発は、複数の問題を同時に解消し、指導者の負担削減と学習者の体験向上をもたらす特效薬になりうる。

現在、国内の子ども向けプログラミング教育分野においては、多種多様なプログラミングツールが登場している。しかし、自由度が大きく、習熟すればそれなりに複雑なアプリケーションを作成できるプログラミング言語であるほど、前提知識のない教師が、児童グループに対して事前の準備なく指導したり、学習者からの質問に答えたりすることは困難である。プログラミングを教えられる人材の不足や、地方でのプログラミング教育の機会の少なさは、実際はこうしたツールの性質に由来するところが大きいように感じられる。

こうした理由から、中長期的には、プログラミングツールの分野においては、ユニバーサルデザインと、自学の仕組みの導入が重要なテーマとなっていくと考えられる。

本研究の成果物は、身体のハンディキャップを有していてもプログラミングを楽しむことができるバリアフリーな開発ツールである。今後ニーズが高まる学校、特別支援学級等、アクセシビリティ要件水準が高い現場での活用の拡大を目指し、普及活動を進めていく。

成果物を活用した有償のプログラミング講座が開催され、参加者からの評価も高く、今後も継続して実施する予定である。現状はすべてのケースで研究者が監督しているが、よりスケールさせるために、ソフトウェアの品質改善とマニュアルの提供、ユーザ自ら学習できるリソースやチュートリアル機能を実装する。また、容易にローカライズできるインタフェースの特長を活用し、多言語対応・国際展開を進める。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

研究提案時点でプロトタイプが動作していたこともあり、コアとなるインタフェースと機能につい

ではおおむね計画通り実装が進行した。開発途上の成果物を活用したワークショップも国内外で十数回開催され、フィードバックがその後の研究開発に生かされた。2018 年度の中盤以降は、当初の計画に含まれていなかった自然言語処理を活用した機能の実験を始めたが、まだ具体的な成果としては公開した成果物には含まれておらず、さらなる開発が必要である。教育現場での活用事例をベースにした評価のためには、ソフトウェアの安定性の改善と、ある程度の仕様の固定化が必要で、これにはさらに 1～2 年のスパンで取り組んでいく必要がある。

研究実施体制

基本的に個人開発であった。ワークショップの開催や体験者の募集等においては、株式会社早稲田大学アカデミックソリューションや、一般社団法人 CoderDojo の各地域コミュニティなど、プログラミング教室を運営する第三者団体と共同で実施した。これらの取り組みについては双方にとってメリットがあったと評価している。

研究費執行状況

研究期間の前半に研究者が国外に留学していたため、本格的な予算の執行はおもに 2018 年度からであった。タブレット PC の購入と研究発表のための旅費が支出の大半を占める。当初予定していた人件費などを使用しなかったため、増額措置分を含めて計算すると約 15%の残額が生じたが、未執行の予算によって研究目的の達成が遅滞するなどの影響はなかったと考えている。

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

成果物を活用した有償のプログラミング講座が開催され、参加者や教育関係者の評価もポジティブであった。研究成果を活用する事例を拡大しながら、引き続きバージョンアップをしていく。

研究課題の独創性・挑戦性

ユニバーサルデザインの観点で設計され、なおかつテキストプログラミング言語に近い機能セットを持つビジュアルプログラミング言語の事例は初めてである。また、ブロックベースとノードを組み合わせた基本インタフェースも新しい挑戦である。今後のビジュアルプログラミング言語の設計の進化に影響を与えられるよう、さらなるユーザビリティの改善と普及に取り組んでいく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 鈴木遼, 長幾朗. みんなのためのビジュアルプログラミング言語「Enrect」の設計. 第 80 回全国大会講演論文集, 2018, 2018.1: 493-494.
2. Ryo Suzuki, Takuto Takahashi, Kenta Masuda, Ikuro Choh. Implementing Node-Link Interface into a Block-Based Visual Programming Language. 20th International Conference, HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15 -20, 2018, Proceedings, Part II. 455-465.

(2) 特許出願

なし

(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)

アイ・オー・データ財団 第 2 回 研究開発助成 採択

研 究 報 告 書

「オンライン劣モジュラ最適化に対する
効率的かつ汎用的なアルゴリズムの開発」

研究期間: 2017 年 9 月 ~ 2019 年 3 月

研究者番号: 50144

研 究 者: 相馬 輔 (東京大学情報理工学系研究科 助教)

1. 研究のねらい

近年,劣モジュラ関数を利用したモデルが,機械学習,圧縮センシング,ネットワーク科学といった分野で注目されている.劣モジュラ最適化にもとづくアプローチは,モデリングの汎用性が高く,効率的なアルゴリズムが存在することもある.非常に強力である.しかしながら,既存の劣モジュラ最適化によるアプローチは,最適化すべき劣モジュラ関数が既知である必要がある.機械学習などでは,学習対象は本質的に不確実性を持っており,既存の劣モジュラ最適化によるアプローチでは不確実性をもつ最適化問題に対処できない.そこで本申請課題では,劣モジュラ最適化を不確実性を考慮した最適化へ拡張する.具体的には,不確実性を考慮した最適化であるオンライン最適化を,劣モジュラ最適化に対して適用し,理論保証付きの効率的かつ汎用的なアルゴリズムの開発を目指す.

(未来ビジョン) 本課題では,オンライン最適化の技法を通じて,「不確実性を考慮した劣モジュラ最適化」という枠組みを確立することを目指している.既に,劣モジュラ最適化は幅広い問題に応用されているため,「不確実性を考慮した劣モジュラ最適化」は,実問題に即した設定にも適用できる強力な枠組みとなる.また,劣モジュラ最適化の最大の利点は,高速なアルゴリズムに確固たる理論保証があることである.単なるヒューリスティックではなく,理論保証付きの高速なアルゴリズムを提供することは,機械学習の研究コミュニティだけでなく,機械学習を利用したプロダクト開発を行うユーザーにも大きなインパクトがある.

2. 研究成果

(1) 概要

オンライン劣モジュラ最適化に関して,下記の2つの研究成果が得られた.

第一に,非単調劣モジュラ最大化や k 劣モジュラ最大化の拡張である,オンライン k 劣モジュラ最大化に対して,劣線形の $1/2$ リグレットを達成する多項式時間アルゴリズムを得た.本成果は,オンライン非単調劣モジュラ最適化に対する既存アルゴリズムを k 劣モジュラ最大化に拡張しただけでなく,既存アルゴリズムで場当たりのに解かれていた部分を整理して,より簡潔な証明を与えたものである.本成果は機械学習国際会議 AISTATS 2019 に単著論文として採択された.

第二に,辞書選択と呼ばれる機械学習の問題に対して,劣モジュラ最適化の技法を応用した高速な貪欲アルゴリズムを与えた.辞書選択は,圧縮センシングやスパースモデリングで必要となる基底集合をデータから学習するための手法である.既存手法では,難しい非凸最適化問題を解く必要があったり,簡単に解ける荒い近似をしたために実際の性能が劣化するなどの欠

点があった。本研究では、二段階劣モジユラ最適化の技法を圧縮センシングの技法と組合せて、辞書選択に対する高速な貪欲アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、理論的な近似比保証があるだけでなく、非凸最適化に基づく手法で得られる解と同程度の品質の解を 10～100 倍高速に求めることができ、理論的にも実用的にも有効なアルゴリズムである。また、提案アルゴリズムは複雑な疎性制約やオンライン辞書選択にも拡張できることを示した。本研究は、機械学習トップ会議 NeurIPS 2018 の spotlight(採択論文中上位 20%論文)として採択された。

(2) 詳細

研究テーマ A「オンライン k 劣モジユラ最大化に対する no-regret アルゴリズム」

非単調劣モジユラ最大化は、与えられた非負劣モジユラ関数を最大にする集合を求める問題である。オフラインの場合(関数が明示的に与えられる場合)に対する $1/2$ 近似アルゴリズムが存在し、 $1/2$ 近似を破ることは多項式回の関数値クエリでは不可能であることがすでに分かっている。ごく最近、これをオンライン(関数が逐次的に与えられる場合)に拡張したオンライン劣モジユラ最大化に対して、劣線形の $1/2$ リグレットを持つアルゴリズムが Roughgarden-Wang (2018)によって提案された。

本研究では、これをオンライン k 劣モジユラ最大化に拡張した。 k 劣モジユラ関数は、劣モジユラ関数や双劣モジユラ関数など組合せ最適化・機械学習で重要な関数の一般化である。例えば、 $k=1$ の場合は劣モジユラ関数に対応し、 $k=2$ の場合は双劣モジユラ関数に対応する。オフラインの k 劣モジユラ最大化に対しては、やはり $1/2$ 近似アルゴリズムが Iwata-Tanigawa-Yoshida (2016)によって得られている。本研究では、オンライン k 劣モジユラ関数最大化に対して劣線形の $1/2$ リグレットを達成する多項式時間アルゴリズムを与えた。特に、劣モジユラ関数($k=1$)の場合には、Roughgarden-Wang の既存アルゴリズムと同様のリグレット上界を達成する。

さらに、得られたアルゴリズムは Roughgarden-Wang を単純に拡張したわけではなく、より簡潔な解析を与えるものになっている。具体的には、彼らのアルゴリズムでは、サブルーチンとして、エキスパート問題に対して強い形のリグレット保証をもつオンラインアルゴリズムが必要であった。しかしながら、Roughgarden-Wang のサブルーチンは場当たり的に設計されており、正当性の証明はもちろんあるとはいえ、どうしてこのアルゴリズムで所望の強いリグレット保証が得られるのかが不明確であった。また、 k 劣モジユラ関数のような、より複雑な状況に対してどのように拡張すべきか明らかではなかった。本研究では、Blackwell の定理というオンライン学習の結果を利用し、Roughgarden-Wangとは異なるアプローチで、同様のリグレット保証をもつサブルーチンを設計した。これにより、証明が簡潔になると同時に、 k 劣モジユラ最大化への拡張も容易に行えることがわかった。

本研究は単著論文として機械学習国際会議 AISTATS 2019 に採択された。

研究テーマ B「辞書選択に対する高速な貪欲アルゴリズム」

圧縮センシングやスパースモデリングといった機械学習手法においては、与えられたデータをスパースに(疎に)表現するための基底集合が必要である。例えば、通常の写真などであれば、フーリエ基底やウェーブレット基底といった基底集合が用いられる。このような基底集合は、かつては各分野の膨大な知識の蓄積のもとに構築されていた。一方で、そのような知識の蓄積がないドメインに対しても、スパース表現を与える基底を得たいというのは自然である。辞書学習・辞書選

択は、データからスパース表現の基底を求める手法である。

辞書学習はデータのみでスパース表現を学習できるが、難しい非凸最適化問題を解く必要があり、理論的に保証をつけるのが比較的難しく、また実際に運用するとかなりの時間がかかってしまう。辞書選択は、すでに知られている多数の基底集合から基底ベクトルを選び出すことで、スパース表現の基底を求める手法である。データの他に、基底集合の候補が必要になるものの、組合せ最適化の技法で非常に高速に解くことができる。一方で、既存の辞書選択アルゴリズムでは、最終的に得られる解は辞書学習の解に対して品質が劣ることが多かった。

本研究では、二段階劣モジュラ最適化という劣モジュラ最適化の枠組みで用いられた手法を、Orthogonal Matching Pursuit という圧縮センシングの技法と組合せて、辞書選択に対する新たな貪欲アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、辞書学習で得られる解とほぼ同程度の解を10～100倍高速に得られる。また、アルゴリズムの出力に対して近似比保証を与えることにも成功した。さらに、提案アルゴリズムの別の利点として、これまで扱うことが難しかった複雑な疎性制約（平均疎性制約やブロック疎性制約）を扱うことも可能になった。辞書学習で必要となるデータは膨大であり、データをすべて保持することなく逐次的に処理できるオンライン最適化は重要である。提案アルゴリズムは自然にオンライン最適化へと拡張できることもあわせて示した。

上記の成果は東京大学の藤井海斗氏との共同研究で行われたものである。成果は共著論文として、機械学習系トップ会議 NeurIPS 2018 の spotlight paper (投稿論文中上位 20%論文) に採択された。

3. 今後の展開

オンライン k 劣モジュラ最大化のオンラインアルゴリズムは非常に簡潔であるため、オンライン劣モジュラ最大化に帰着される機械学習タスクでは、ベースライン手法として利用されることが期待できる。また、辞書選択の新しいアルゴリズムは、高速に高品質な解を求められるため、既存の辞書学習アルゴリズムの代用、あるいはホットスタート用の前処理として活用できる。

4. 自己評価

- 研究目的の達成状況: NeurIPS 2018 には spotlight 論文が採択、AISTATS 2019 には単著論文が採択され、想定以上の結果が得られた。
- 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況): ACT-I 採択後にオンライン非単調劣モジュラ最大化が海外のグループに先取されるハプニングがあったものの、最終的には共著者の協力を得て2つの成果を取りまとめることができた。また、研究期間中には、ISMP, ICALP, NeurIPS などの国際会議に参加し、自身の成果発表と同時に、先端のアルゴリズム技法の情報を収集した。さらに、Max Planck Institute for Mathematics in Sciences に短期訪問し、機械学習の最新の成果について情報交換を行った。
- 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(今後の見込みも重視してください。): 学術・産業に対する直接の波及効果は「今後の展開で」述べた通りである。また、劣モジュラ最適化を ACT-I に参加する幅広い分野の研究者に広めることができた。
- 研究課題の独創性・挑戦性: 既存の劣モジュラ最適化では、不確実性のある状況設定はあまり考えられてこなかった。この点、不確実性を考慮した劣モジュラ最適化の観点は新しい。また、オンライン最適化のような難しい設定でも理論保証付きのアルゴリズムを与える

ことは、理論上興味深い。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K. Fujii and T. Soma, "Fast Greedy Algorithms for Dictionary Selection with Generalized Sparsity Constraints," Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), pp. 4744–4753, 2018. [Spotlight: 採択論文の中でトップ 20% 論文](#)
2. T. Soma "No regret algorithms for online k-submodular maximization," Proceedings of the The 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 2019, to appear.
3. T. Soma and Y. Yoshida, "A New Approximation Guarantee for Monotone Submodular Function Maximization via Discrete Convexity," Proceedings of the 45th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP), 2018.

(2) 特許出願

なし

(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. 相馬輔, 「No-regret algorithms for online k-submodular maximization」, 応用数理学会連合研究発表会, 口頭発表, つくば, 2019.
2. K. Fujii and T. Soma, "Fast Greedy Algorithms for Dictionary Selection with Generalized Sparsity Constraints," Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), ポスター発表, モントリオール, 2018.
3. 相馬輔, 「No-regret algorithms for online k-submodular maximization」, 本部 SSOR, 口頭発表, 水上温泉, 2018.
4. T. Soma and Y. Yoshida, "A New Approximation Guarantee for Monotone Submodular Function Maximization via Discrete Convexity," the 45th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP), 口頭発表, プラハ, 2018.
5. T. Soma and Y. Yoshida, "A New Approximation Guarantee for Monotone Submodular Function Maximization via Discrete Convexity," the 23rd International Symposium on Mathematical Programming, 口頭発表, ボルドー, 2018.

アウトリーチ活動

1. 相馬輔, 「劣モジュラ最適化入門」, 第3回 ACT-I 応用数学研究会, 講師, 2019.
2. 相馬輔, 「劣モジュラ最適化入門」, 自動車制御とモデル研究部門委員会, 依頼講演, 2018

研 究 報 告 書

「デジタルファブリケーションにおける半透明感と光沢感の表現」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50145

研究者：高谷 剛志

1. 研究のねらい

3D 印刷を始めとするデジタルファブリケーション技術は製造や医療などの様々な業界で活用されており、産業・学术界の両方において研究開発が進められている。主な研究対象は形状と機能性であり、様々な形状の印刷、耐久性・柔軟性などの機能性付加、印刷可能な材質の種類拡大などが挙げられる。一方で、質感に重要な影響を与える外観表現についてはほとんど取り組まれていない。そこで、本研究では、質感において重要な要因である半透明感と光沢感に着目し、造形物においてより豊かな外観を表現することを目的とする。

近年の高機能 3D プリンタは表面的な色を制御でき、フルカラー印刷が可能となっている。しかし、表面的な色のみが対象であるため、内部が半透明で不均一な外観（例えば、人の肌や果物など）を制御することはできない。また、3D プリンタに利用できる材料は半透明度が高いため、不透明もしくは光沢感のある外観を表現することはできない。これらの課題解決として、3D プリンタと UV プリンタの組合せが有効であると考えた。3D プリンタによって異なる材質を層状に重ねることで物体内部の半透明度を変えることができる。UV プリンタは紫外線（UV）硬化式インクを塗布し、瞬時に UV 光を照射することによって印刷を行う。通常のインクジェットプリンタと異なり、様々な材質（例えば、プラスチックや木材、革など）で構成される立体物表面に高精細なカラー印刷が可能となる。また、透明なインクを用いることで表面光沢感を生み出すことができ、重ね塗りによって微妙な凹凸を造ることができる。これらの特徴を活用することによって、所望の半透明感と光沢感を表現することができると考えた。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、対象材質の視覚的質感計測からデジタルファブリケーションによる質感再現までの一貫した系の開発に取り組んだ。本研究の内容は、半透明度の制御、光沢度の制御、デジタルファブリケーションのための質感計測という三つのサブテーマに分けて開発を進めた。最大の成果は、UV プリンタの新しい活用方法によって、半透明度の制御が可能になったことである。また、デジタルファブリケーションによる質感再現を目的とした体積的な質感計測を提案し、物体内部の断層画像取得を可能にした。UV 印刷において透明インクを用いることによって光沢感を付与できることは知られているが、より尤もらしい光沢度を再現する手法は開発途上であり、今後の課題となった。

(2) 詳細

研究テーマ A「半透明度の制御」

本研究では、半透明な材質上への UV 印刷によって半透明度を制御する印刷手法を提案した(論文 5(1)1, 発表 5(3)(ア))。当該提案手法の貢献は、UV プリンタの新しい活用方法を示した点と材質本来の半透明度を活かした半透明度制御が可能な点である。UV プリンタは様々な材質で構成さ



図 1 UV プリンタによる半透明度の再現。

れた立体物への印刷が可能な UV 硬化式インクジェットプリンタである。下地となる被印刷物および UV インクは半透明であるため、通常の利用方法では、最初に白色インクで印刷することによって下地の半透明度を削除する。一方で、当該提案手法では、あえて白色インクを印刷せず、下地の半透明度を活用する。最終的に表れる半透明度は下地の半透明度と UV インクの半透明度の合成となるため、これをモデル化した。所望の半透明度を実現するためには下地材質と UV インクの最適な組合せを特定する必要があるが、ルックアップテーブルの構築によってこの逆問題を解決した。実験では、サーモンや牛肉、キウイなどを対象として計測し、プラスチック字消しやロウソク、アクリル板などの半透明材質に対して UV 印刷することにより、計測に基づく半透明度を再現した(図 1)。

UV プリンタ単体による半透明度制御技術の開発はほぼ完了した。下地材質の半透明度と UV インクの半透明度の影響力を比較すると、前者の方が大きいため、下地材質が決まった場合に表現できる半透明度幅は限りがある。また、UV インクを重ねるとより不透明な外観となるため、制御可能な方向も限られる。これを解決するため、下地として 3D 印刷した材質に置換えし、3D プリンタと UV プリンタの組合せ技術の検討を行っている。

研究テーマ B「デジタルファブリケーションのための視覚的質感計測」

3D プリンタおよび UV プリンタによる視覚的質感再現を目的とした計測技術の開発に取り組んだ。従来の質感計測技術は大きく二つの目的があった。一つは、材質の物性値を知ることであり、材料科学などに応用される。他方は、コンピュータ上での質感再現に特化した表面的な計測で、コンピュータグラフィックスの写實的レンダリングに応用される。本研究テーマの目的は後者に近く、例えばミクロな物性値が実際と異なっていたとしてもマクロな外観が所望のものに近ければ良いという立場である。しかし、コンピュータ上での再現に特化した表面的な計測で

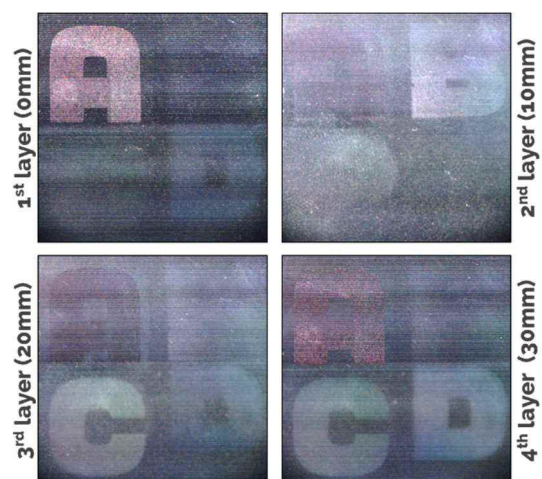


図 2 物体内部断層画像計測の結果。

得られた情報のみでは、実空間における造形での質感再現には不十分である。そこで、両

者の中間に位置する新しい質感計測技術として、体積的な質感計測が必要となった。

本研究では、プロジェクタ・カメラシステムを用いた物体内部の断層画像計測を提案した(特許5(2)1, 発表5(3)(ア))。当該提案手法の主な貢献は、容易に入手可能なプロジェクタ・カメラシステムを用いて構成できる点と物体内部からの光応答をセンチメートルオーダーまでの層状で得られる点である。透視投影プロジェクタからある空間周波数の正弦波パターンを投影し、平行投影カメラで撮影することを考える。投影距離に応じてパターンが広がるため、パターンの空間周波数は比例して小さくなる。この性質を利用すると、周波数解析によって特定奥行きのみを情報を取得することができる。実験では、プラスチックシート状に図形や記号を印刷し、それらを重ねた物体を対象として、各層に対応する断層画像を復元した(図2)。

これまでの研究によって、造形での質感再現を目的とした半透明度の計測技術の開発はほとんど完了したと考えている。一方で、光沢度の計測技術はまだ開発途上である。

3. 今後の展開

研究提案時の未来ビジョンとして、外観デザインの改革を期待していた。義肢の外観向上や社会ロボットに対する心理的嫌悪感の減少など、デジタルファブリケーションの応用分野において外観全般が向上することを想像している。1年6ヶ月の研究期間を終え、未来ビジョンの実現に少し近づいたと感じている。デジタルファブリケーションによる外観デザインは、まだ多くの課題があり、今後も学術的な研究が必要とされる。本研究が対象とする視覚的質感は静的質感であるが、動的に変化する視覚的質感も存在する。現在のところ、そのような研究は取り組まれておらず、今後の課題と言える。産業的には、色の選択しかできない現状の仕組みから質感の選択が可能となる仕組みに移行していくと考えられる。例えば、コンピュータグラフィックスのレンダラでは半透明度や光沢度などのパラメータが存在するが、それと同様に3Dプリンタにおいても質感を設定可能なツールが必要となる。文化的な波及効果としては、デジタルアーカイブへの応用が挙げられる。従来のデジタルアーカイブでは、形状と表面的な色を高精細に記録し、仮想世界で鑑賞することが一般的である。本研究の発展として、質感の計測および再現がより高精細になると、一度アーカイブした有形文化財や貴重な国宝などをいつでも、どこでも、だれでも実世界にて鑑賞することができるようになる。

4. 自己評価

全体として、研究目的の達成状況は50-60%と感じており、使えるエフォート(30%)に対する研究テーマの量が多すぎたと考えている。研究計画の見積もりをより正確にする必要があったと反省しており、後学のためになった。

本研究において、発案から実装および実験に至るまで、全て研究代表者のみで実施した。ただし、研究室内部の研究ミーティングにおいて指導教員などからのアドバイスもあった。短い期間にも関わらず、計測手法から作製手法までを一つの系として構成することができた点は大きな成果であった。ただし、問題点もあった。計測機器については研究室が多く保有していたが、本研究進捗に必要なボクセル3Dプリンタの所持はなく、外注や共同施設利用が必須であった。ボクセル3D印刷の外注は、5cm四方程度で約5万円かつ納期が約1ヶ月となっており、3D印刷については計画していたように研究を進捗できなかった。

本研究の成果は学術および産業への波及効果が大きいと考えている。視覚的質感の計測手法の提案は多い一方で、その作製手法の提案はほとんどない。これは、今回の研究進捗で感じた通り、ボクセル 3D 印刷の利用が容易ではない点が挙げられる。一方で、UV プリントは比較的低価格であり、レンタル利用料も安い。UV プリントの新しい活用方法を示せた点は他の研究者に対しても影響があると確信している。また、主に企業が運営する Imaging Conference Japan に招待された点から、同様の観点において、産業への影響も大きいと感じている(招待5(3)(ウ))。

本研究分野において質感再現の発表がほばないことから、独創性と挑戦性は非常に高いと考えている。独創的で萌芽的な研究に送られる MIRU フロンティア賞を受賞できたことから、独創性については一定の評価を得られた(受賞5(3)(イ))。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Tsuyoshi Takatani, Koki Fujita, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, "Controlling Translucency by UV Printing on a Translucent Object", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 10:7, pp.1-6, 2018

(2) 特許出願

研究期間累積件数:1 件

発 明 者: 高谷剛志, 青砥隆仁, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博

発明の名称: 物体内部の光学特性を計測する計測装置及び方法

出 願 人: 国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

出 願 番 号: 特願 2018-219125

(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)

(ア) 学会発表

Tsuyoshi Takatani, Koki Fujita, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, "Controlling Translucency by UV Printing on a Translucent Object", 第 21 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2018), 北海道札幌市, 2018 年 8 月 5-8 日

Tsuyoshi Takatani, Takahito Aoto, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, "Reconstruction of Volumetric Reflectance using Spatio-Sequential Frequency Correlation Imaging", The 11th ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques in Asia (SIGGRAPH Asia), Tokyo, Japan, Dec. 4-7, 2018

(イ) 受賞

MIRU フロンティア賞, "Controlling Translucency by UV Printing on a Translucent Object", 第 21 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2018), 2018 年 8 月 8 日

(ウ) 招待講演

Tsuyoshi Takatani, Reproducing Translucency by Computational Fabrication, 日本画像学会年次大会 Imaging Conference Japan 2019, 千葉県稲毛区, 2019 年 7 月 2-4 日

研 究 報 告 書

「画像をピボットとしたパラフレーズの抽出による自然言語と画像理解の高度化」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50146

研究者：チョ シンキ

1. 研究のねらい

Natural language and perception are two major ways for human communication and knowledge propagation, making natural language and image understanding indispensable for artificial intelligence. A paraphrase is a restatement of the meaning of a word, phrase or sentence within a single language (e.g., “A snowboarder” and “A man on a snowboard” are paraphrases). Paraphrases have been exploited for natural language understanding, and have been shown very effective for various natural language processing (NLP) tasks, including information retrieval, question answering, summarization, machine translation, text normalization, textual entailment recognition, and semantic parsing. However, as no image information is provided, paraphrases have not been exploited for image understanding.

As manual construction of paraphrases is very expensive and time consuming, two lines of studies have been conducted to automatically extract paraphrases. One is extracting paraphrases from monolingual corpora based on distributional similarity. However, it has been known that the quality of the extracted paraphrases is very low, because other related phrase pairs such as hypernyms and antonyms also share distributional similarity, and thus being extracted. The other is extracting paraphrases from parallel corpora via bilingual pivoting. Bilingual pivoting does not have the problem as distributional similarity. However, the big limitation is that large-scale parallel corpora are only available for a few languages such as European languages and languages paired with English.

In this work, we propose a novel approach that uses images as a pivot for paraphrase extraction. Nowadays, with the spread of the web and social media, it is easy to collect large amounts of images with their describing text. For example, different news sites release news with the same topic using the same image; photos with many comments are posted to social networking sites and blogs. As the describing text is written by different people but about the same image, there are potentially large amounts of paraphrases in the describing text. This work aims to **accurately extract these paraphrases together with their corresponding image regions using images as a pivot**. Together with the image information, the extracted paraphrases have the potential to significantly deepen both natural language and image understanding.

2. 研究成果

(1) 概要

A paraphrase is a restatement of the meaning of a text in other words. Paraphrases have been studied to enhance the performance of many natural language processing tasks. In the ACT-I research period, we studied a novel concept to identify visually grounded paraphrases (VGPs), which are different phrasal expressions describing the same visual concept in an image [2]. Figure 1 shows an example of VGP identification. Our task is to identify the noun phrases that describe the same visual concept (represented as an image region) in the image as VGPs.

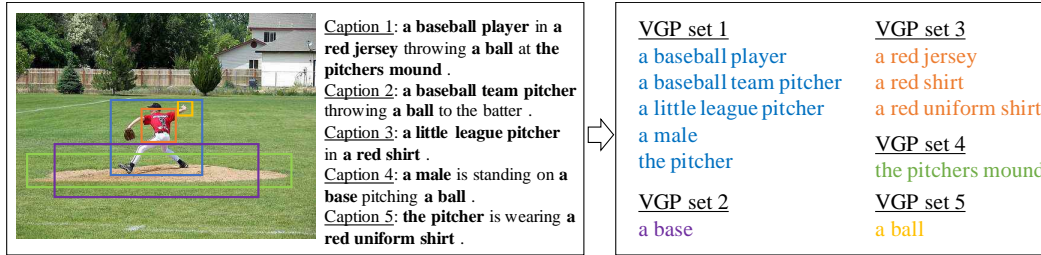


Figure 1: An example of VGP identification.

These identified VGPs have the potential to improve language and vision tasks such as visual question answering and image captioning. Because of the characteristic of VGPs, visual grounding is essential for VGP identification. We proposed two novel neural network based models with different visual grounding approaches for VGP identification, and published our work at COLING 2018 (top conference) [2] and CVPR 2018 workshop [3], respectively.

(2) 詳細

2.1 Attention based VGP Identification

The attention based VGP identification model [2] is illustrated in Figure 2. Given a noun phrase pair and its corresponding image, we construct two separated *fusion nets* for each phrase (Figure 2 (right)). A fusion net represents a phrase with a concatenation of its feature vector and visual context feature. The visual context feature is computed with an attention mechanism, indicating to which part of the image should be paid attention, in order to judge whether the phrase pair is VGPs or not. The outputs of the two fusion nets are then fed into a multilayer perceptron to compute the similarity of the two phrases.

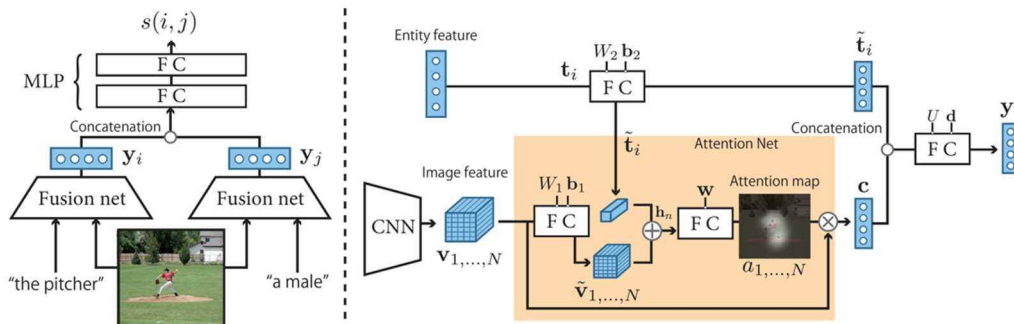


Figure 2: Attention based VGP identification model (left) and its fusion sub-network (right).

2.2 Phrase Localization based VGP Identification

The phrase localization based VGP identification model [3] is illustrated in Figure 3. This model also takes a pair of noun phrases and an associated image as input and predicts whether the input phrases are VGPs or not. The model localizes a region in the image that corresponds to each phrase. Such an image region serves as object-level visual features and allows better similarity modeling. Both language and visual features obtained for the input phrases and the image are fused and fed to a multilayer perceptron that predicts the probability of being VGPs.

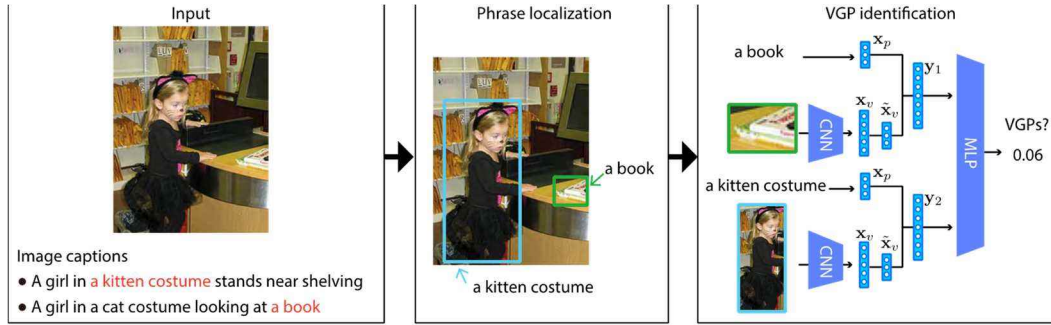


Figure 3: Phrase Localization based VGP Identification model.

2.3 Experiments

We evaluated our models on the Flickr30k entities (i.e., noun phrases) dataset (Plummer et al. 2015). This dataset contains 30k, 1k, and 1k images with 5 captions for training, validation, and testing, respectively. It also provides manually annotated image regions localizing noun phrases in captions. We treated phrases associated with the same image region as VGPs, and the other possible noun phrase pairs from different captions as non-VGPs. The following table shows the results, where phrase-only is a model that only uses phrase features. We can see that the localization based model, which explicitly models the phrase-object correspondence, shows the best performance.

	F1	Precision	Recall
Phrase-only	85.37	84.75	85.99
Attention based	84.16	82.71	85.67
Localization based	87.47	86.61	88.35

Reference

B. Plummer et al. Flickr30k entities: Collecting region-to-phrase correspondences for richer image-to-sentence models. In Proceedings of ICCV, pp.2641-2649, (2015).

3. 今後の展開

We originally created the concept of VGPs and established the fundamental techniques for VGP identification in the ACT-I research period. There are several directions for future work to deepen and promote the research in both language and vision understanding with VGPs. We hope that our work can inspire other researchers work on these directions together with us.

Firstly, VGP identification for visual relations. We have studied VGP identification for entities

(noun phrases) only. For the next, we want to work on VGPs of visual relations, which requires semantic understanding of the relationships between objects in an image. A visual relation is a triplet of (entity1, entity2, relation), where the relation is the interaction between the two entities. We have created a dataset of VGPs for visual relations upon the Flickr30k entities dataset [1]. We plan to propose novel models for identifying visual relation based VGPs.

Secondly, VGP typology creation. Our research until now treats VGP identification as a binary classification task, which ignores various phenomena behind VGPs. E.g., “field hockey” and “lacrosse” are linguistic paraphrases; “competitors” and “a group of bicyclists” describe the same visual concept from different aspects; however, these two pairs of VGPs have been treated equally, which is obvious undesirable. In the future, we aim to create typology of VGPs to elucidate the phenomena behind VGPs and open up novel ways of utilizing VGPs for various language and vision tasks.

Thirdly, VGP identification in the noisy real world. We have only worked on the image captioning dataset, where sentential level VGPs are already annotated. In the real world, such as e-commerce or social networking sites and blogs, sentential level VGPs are unavailable. How to identify VGPs in these noisy scenarios is obviously a more challenging task, for which we want to study in the future.

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

We have successfully achieved our research goal, which was extracting paraphrases pivoted by image regions accurately. We further proposed the novel concept of VGPs.

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

Regarding to the research implementation system, because of the multimodality of the project, we closely collaborated with researchers in the computer vision (CV) field. We also employed RA students for creating visually grounded paraphrase datasets.

Regarding to the research funding execution status, we reasonably used it for purchasing GPU servers, dataset annotation, RA employment, and travel expenses.

・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(今後の見込みも重視してください。)

VGP identification is a novel task, which is crucial for both language and vision understanding. We believe that our pioneering work on VGPs in the ACT-I research period has the potential to make VGPs a new language and vision research field in both NLP and CV fields. We are eager to promote the VGP research field with other researchers.

・研究課題の独創性・挑戦性

We originally proposed the concept of VGPs, which is an achievement inspired by our study in both NLP and CV. Due to the pioneer and multimodality characteristics, this work is very

challenging. We overcame the problems via close collaboration between NLP and CV researchers.

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

(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] 竹林佑斗, C. Chu, 中島悠太. 画像内物体間の視覚的関係の真偽判定データセット. 言語処理学会第 25 回年次大会, pp.1383-1386, (2019).
- [2] C. Chu, M. Otani, Y. Nakashima. iParaphrasing: Extracting Visually Grounded Paraphrases via an Image. In Proc. of COLING, pp.3479-3492, (2018).
- [3] M. Otani, C. Chu, Y. Nakashima. Visually Grounded Paraphrase Extraction via Phrase Grounding. Workshop on Language and Vision at CVPR, (2018).
- [4] M. Otani, C. Chu, Y. Nakashima. Phrase Localization-based Visually Grounded Paraphrase Identification. MIRU 2018.
- [5] C. Chu, M. Otani, Y. Nakashima. Visually Grounded Paraphrase Extraction. In Proc. of NLP, pp.979-982, (2018).
- [6] C. Chu, M. Otani, Y. Nakashima. Extracting Paraphrases Grounded by an Image. CVIM 211, (2018).
- [7] C. Chu, M. Otani, Y. Nakashima. Towards Image-pivoted Paraphrase Extraction. YANS, (2017).

研 究 報 告 書

「人と操り人形のインタラクション：文楽操り人形を用いた感情表現動作デザイン」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50147

研究者：董 然

1. 研究のねらい

本研究の狙いは、今後 10 年間に情報家電のインテリジェントハブとして AI と人工感情をもったホームロボットが普及するために大きく貢献できるロボットと人間のインタラクションデザインを行うことである。

2. 研究成果

(1) 概要

アップルの「Siri」等人工知能アシスタントが実用化されているが、この機能を常用する人はまだ少ない。これは、実際の人間との対人会話感が無いのが原因の一つと推測されている。ユネスコ無形文化遺産「人形浄瑠璃文楽」は、3 人の人形遣いが一体の人形を操作する世界でも例を見ない操作方法を用い、その人形による感情動作表現は「世界で最も美しい動作」「世界の傑作」(UNESCO)と評価され、見る観客の多くに人形への感情移入が起こると言われている。本研究では伝統芸能文楽に着目し、舞台上演じる文楽人形の多様な音や動きを分析する。文楽の音と動きのメカニズムの一端を明らかにし、ロボットのモーションデザインへの適用の可能性を探る。いままで困難であった「人間的な」感情動作表現を解析し、人工的に感情動作表現を行えるコミュニケーションロボットを開発する。

(2) 詳細

研究テーマ A 文楽人形の構造と動きの解析による感情動作の抽出

人形カラクリとその感情表現メカニズムを解明するため、モーションと音楽データ（三味線）を桐竹勘十郎一座の協力のもと文楽劇場で同時に採集する。特に、人間の感情表現と関係する視線誘導、動き（所作）の関係を固有モード分解し、新たにその表現メカニズムを抽出・部品化する。本研究で、特に、文楽人形の「悲嘆」、「怒り」、「嫌悪」、「期待」、「恐怖」などの基本感情表現データを取集できている。さらに、文楽人形遣い桐竹勘十郎氏（紫綬褒章受章）一座の協力を得て、大阪の文楽劇場で文楽の代表演目「妹背山婦女庭訓」の「道行恋苧環」、「杉酒屋の段」のお三輪のモーションデータを取得している。

さらに、NHK でも取材された徳島文理大学の人形浄瑠璃部の部員に、「二人三番

叟」、「傾城阿波の鳴門」など合わせて約 1 時間のデータをキャプチャすることに成功し、ロボットのトレーニングデータ作成のために準備をした。

研究テーマ B 「Animation principle」を用いたロボットモーションデザイン

文楽あやつり人形の構造及び動作メカニズムの解明について研究を行った。すでに採集済みの感情表現のある文楽人形データ「悲嘆」、「怒り」、「嫌悪」、「期待」、「恐怖」に対して、ヒルベルト変換において最も精度の高い多変数経験的モード分解 (MEMD) で解析を進めた。結果として、文楽に「Slow in」、「slow out」や「secondary action」などの「Animation principle」の技が使われていることを、ヒルベルト変換を用いて確認することができた。今まで採集できた文楽のデータ、及び人間が作ったキーフレームアニメーションデータとの比較検証を研究し、三者の異なる「Animation principle」の特徴を抽出することができた。また、応用面について、文楽動作に「Animation principle」等が使われているなどの解析結果を踏まえ、動作編集において応用面での研究を試みた。また、文楽人形のからくり構造を解明し、動作確認するため、ロボットで解析および編集後のモーションデータを確認した。

研究テーマ C 文楽の序破急を用いたロボットモーションデザイン

日本において物語の展開から、謡のテンポのスピードの変化まで序破急は非常に広範囲な概念を示す。本研究では、主に、後述する、リズムの緩急の一般化された様態を序破急と呼ぶ。必ずしも、「序」、「破」、「急」と 3 区分の必要なわけではなく、一番良く研究されている、能ですら、流派によって異なり、文楽と能においても異なる。それ故、確たる定義がなく、曖昧である。そのため本研究では、単に、能や文楽の謡のリズムの緩急を序破急と定義し、研究を進めた。しかし、そのあり方は多岐にわたり、リズムにおいても、必ずしも、明確に「序」、「破」、「急」と分かれる訳ではないが、本論文では、簡便に、物語にあわせたりズムの緩急の一般化された様態とし、往々にして物語に合わせた感情の変化の表現に用いられるとする。

文楽の演出では、人形が大夫の語り（ストーリー）の謡、三味線等に合わせて感情表現を演じる。この、大夫の謡、三味線等のリズムのテンポに速度の緩急が物語に合わせて織り込まれる。文楽人形は日本最古の単純だが、高度な機械的カラクリ構造を持ち、大夫の謡に合わせたやはり、独特の、動きのテンポがあり、優れた感情表現動作ができる事が知られている。本研究では、文楽人形の優れた感情動作表現を用いたコミュニケーションロボットの開発を目的とし、モーションデザインのフレームワークを提案した。

3. 今後の展開

客観的な評価も取り入れながら、文楽人形のエッセンスを利用するロボットモーションデザインフレームワークの改善を行う。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

文楽に基づいたロボットモーションデザインテーマは、達成できたが、客観的に評価するところまで至っていない。

・研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

約 1 時間の文楽ロボットモーションのトレーニングデータを作成するため、学生を中心に研究体制を作った。研究費について、トレーニングデータの作成人件費、使用するロボットおよびモーションデータの設備に使った。

・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

伝統芸能からのロボット創造は、現在世界に注目されている日本文化や日本の感性のテクノロジーを世界へ発信できる学術研究として期待できる。文楽の動き及び感情表現のメカニズム解明により、本研究成果は感情のあるロボット動作生成に寄与できる。また、コミュニケーションロボット・アバターに基づいた AI アシスタントの普及に大きく貢献できる。

・研究課題の独創性・挑戦性

人間共存型ロボット（人型サービスロボット）へのニーズが本格化しており、技術志向で開発された人間共存型ロボットが多い中、人とのコミュニケーションを主目的としたアクトロイドや顔表情ロボなど人型サービスロボットの研究開発は今後急拡大すると予想されているが、情動知能と連動したロボットの感情動作表現法は確立していない。本研究では、その長い歴史を持つ文楽人形の動作に科学的な手法で迫り、その美しい感情表現動作を、コミュニケーションロボットや、アバターの動作に生かす全く新しいモーションデザイン研究である。

5. 主な研究成果リスト

（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）

・国内会議

陳暘，董然，中川志信，檜垣智也，ヒルベルト - ファン変換を用いた文楽の「ず」の抽出，2019 年電子情報通信学会総合大会，2019-03-20

董然，蔡東生，中川志信，檜垣智也，文楽における序破急のメカニズム解析，2019 年電子情報通信学会総合大会，2019-03-20

中川志信、檜垣智也、蔡東生、董然、劉飛、文楽の音と動きの技術を適応する ロボットの感情表現メカニズム、人間工学システム大会 2019、2019 . 3 . 8

中川志信、檜垣智也、蔡東生、董然、劉飛、文楽の音と動きの技術を適応する ロボットの感情表現メカニズム、人間デザイン学会関西支部大会、2019 . 2 . 2

董然，蔡東生，中川志信，檜垣智也，“ヒルベルト－ファン変換を用いた文楽人形動作解析とロボットモーションデザイン”，CG 技術の実装と数理 2018，2018-09-30

中川志信，檜垣智也，蔡東生，董然，“ロボットに適応する文楽における音と動きの制御メカニズム”，日本ロボット学会学術講演会，2018-09-07

- ・ 国際会議

Yang Chen , Ran Dong , Dongsheng Cai , Shinobu Nakagawa , Tomonari Higaki , Nobuyoshi Asai , The beauty of Breaking Rhythms: Affective Robot Motion Design Using JoHa-Kyu of Bunraku Puppet, Siggraph2019 talks (accepted)

- ・ ジャーナル

Ran Dong , Dongsheng Cai , Shinobu Nakagawa , Tomonari Higaki , Robot Motion Design Using Bunraku Emotional Expressions - Focusing on Jo-ha-ky in Sounds and Movements, Advanced Robotics (投稿中)

中川志信、檜垣智也、蔡東生、董然、劉飛、文楽の音と動きの技術を適応するロボットの感情表現メカニズム、日本デザイン学会誌、2019 . 3 . 31 (投稿中)

研究報告書

「適応型制限ボルツマンマシンの複素拡張に基づくボコーダー不要な非パラレル声質変換」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50148

研究者：中鹿 亘

1. 研究のねらい

パーキンソン病や、咽頭摘出を必要とする頭頸部癌、構音障害等、会話に障害を及ぼす疾病は多数存在する。現在医療現場で広く実用されているのは喉頭摘出者に対する電気喉頭装置だが、発声の自然さや明確さが罹患前より大きく劣化する。然る中、声質変換技術を医療器具に導入することで、「自分の声」での会話や、より多様な疾患への貢献が期待されている。当技術にはパラレル声質変換と非パラレル声質変換があり、前者を適用した医療器具の臨床実験は既に行われているが、大量のパラレルデータが必要となり患者に過度の負担が掛る。一方、後者では自由発話で学習可能な為患者への負担が大幅に軽減されるが、現状の技術ではボコーダーが必須であるため、変換音声の品質が低下してしまう。本研究では、子どもから高齢者、疾患や課題を抱える人の音声コミュニケーションに貢献することを目的とし、パラレルデータ不要かつ高品質な声質変換モデルの開発を行う。

本研究により、声質変換精度が向上すれば応用範囲が広がり、医療・福祉・産業など様々な場面において新たなコミュニケーションが生まれることが予想される。例えば、保育園で保育士が母親の声となって園児に話しかける、発達障害の子どもが心を開いて積極的に会話するきっかけ作りなどが考えられる。子どもから高齢者、疾患や課題を抱えている人が、周囲と自然な音声コミュニケーションをとることを支援し、社会的孤立を防ぐことに貢献することが本研究の一つの狙いである。産業界においても本技術の応用は多岐に渡り、好きな歌手になりきって歌を歌う、オリジナルの役者の声で洋画の吹き替えを行う、亡くなった声優を復活させるなどといった、デジタルコンテンツ業界のニーズに応えることができる。

一般に音声信号処理で広く用いられているメルケプストラムは、健常者の発する音声を対象にして圧縮された音響特徴量であり、そのまま構音障害者の音声に対して用いるのは不適切である。構音障害者の音声は、メルケプストラムで表現できない調音が存在する。そこで、メルケプストラムの代わりに直接複素スペクトルを直接表現することのできる複素制限ボルツマンマシンを用いて、構音障害者音声から潜在的な特徴量を抽出することが重要となる。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の目的は、機械学習手法の複素数拡張モデルを用いて音声の複素スペクトルを直接表現することにより、高品質な非パラレル声質変換手法を実現することである。本研究期間では、主に、著者がこれまでに提案した複素制限ボルツマンマシン(複素 RBM)の改良と、適応型制限ボルツマンマシン(ARBM)を用いた声質変換手法の改良を行った。まず、複

素 RBM の改良について具体的に述べる。複素 RBM は可視・不可視の二層の双方向ニューラルネットワークである従来の RBM を複素数へ拡張したモデルであり、これを用いれば音声の複素スペクトルから直接特徴抽出や音声復元が可能となる。これまでの複素 RBM に関する研究では人工的に生成した複素数データのみでモデル検証を行っていたが、そのまま音声モデリングに適用すると、収束速度と音声復元精度に課題が生じていた。そこで本研究では複素 RBM による音声モデリング手法を改良するアプローチとして、複素 Adam による最適化手法、複素 PCA による次元圧縮、複素最尤系列生成による音声スペクトル生成手法をそれぞれ提案し、実験的に有効性を確認した。また、音声スペクトルの持つ時間相関を適切に表現するために、時間的に隣接する隠れ層間の接続を追加した拡張モデル(時相関複素 RBM)および可視素子の自己回帰性を表現する拡張モデル(自己回帰複素 RBM)を提案し、有効性について検証した。次に、ARBM を用いた声質変換の改良に関する研究について述べる。ARBM は上記 RBM に対して話者識別素子を追加することで、音声の中の話者の制御を可能にした拡張モデルであり、ARBM を用いると任意の話者から任意の話者へ声質変換することが可能となる。本研究ではさらに自然な変換音声を得るため、入力話者の自然音声とモデル音声の残差信号を変換音声に加える手法(差分 ARBM)の提案および ARBM の複素数拡張(複素 ARBM)を定式化した。またそれ以外にも、ボルツマンマシンの基礎拡張モデルとして、LSTM のように長・短期記憶構造を持つモデル(LSTBM)、2つの異なる特徴量間を多層にかつ双方向に変換可能なモデル(DRM)をそれぞれ提案し、実験的に有効性を確認した。

(2) 詳細

研究テーマ A「複素 RBM を用いた音声モデリング手法の確立」

これまで著者が提案した複素 RBM は、そのまま音声の複素スペクトルモデリングに適用すると、収束速度が遅く、また音声復元の品質が十分とは言えなかった。そこで本研究では、複素 Adam による最適化手法、複素 PCA による次元圧縮、複素最尤系列生成による音声スペクトル生成手法の3つの改善手法を提案し、有効性を確認した。評価実験では、人工データ・音声の実データ共に、従来の複素最急降下法と比較して、複素 Adam によるパラメータ更新時の収束速度が向上することが確認できた。また、下記表に示すように、改善された複素 RBM(CRBM)と従来の RBM を用いて音声の複素スペクトルを分析・合成すると、提案法の方が客観評価基準である PESQ 値において優れていることが確認できた。音声の分析合成では WORLD と呼ばれる手法が高品質であり一般的によく用いられているが、WORLD の PESQ 値は 2.86 であり、学習データがある程度増やせば複素 RBM の方が品質面で優れていることも確認できた。

学習データを増加させたときの精度比較 (PESQ 値)

# of sentences	CRBM	RBM
50	2.81	2.66
100	2.85	2.71
200	2.94	2.80

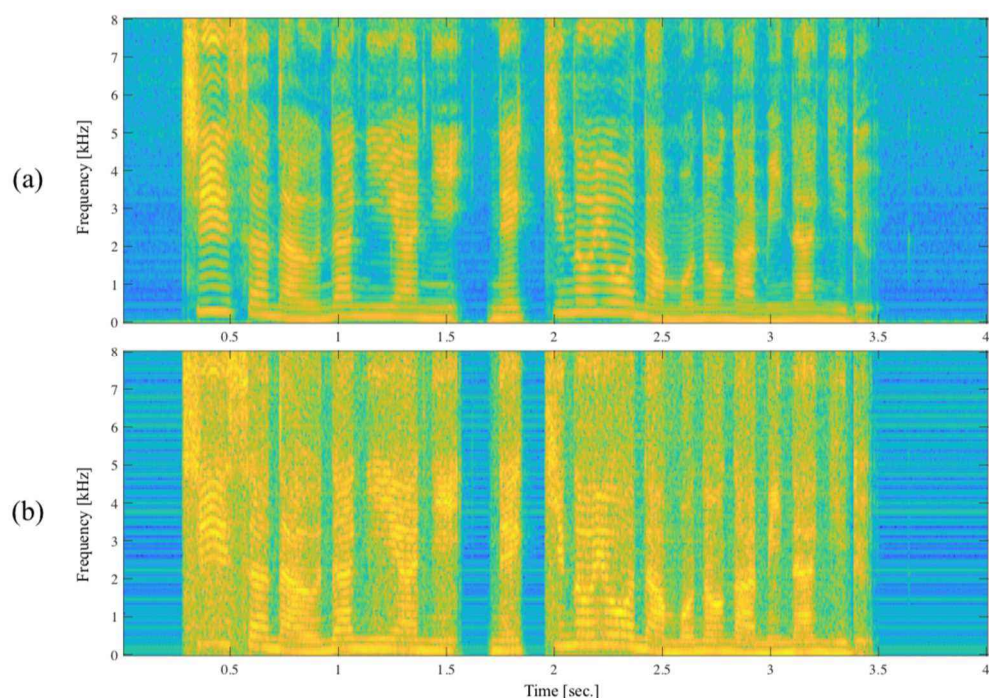
この研究成果として、英語論文誌 IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing へ論文を投稿し、受理された(主な研究成果リスト1)。

研究テーマ B「複素 RBM の潜在変数時系列表現モデル(複素 TRBM)」

これまでの複素 RBM では音声複素スペクトルの各フレームに対して独立にモデリングされていたが、複素スペクトル系列は時相関を持つため定義として不十分であった。そこで本研究では時間的に隣接する隠れ素子間の接続を考慮した拡張モデル(複素 TRBM)を新たに定義し、有効性を確認した。複素 RBM と比較して、時間接続を追加した複素 TRBM は、デコード性能はほとんど変わらないが、より収束速度が向上し、隠れ素子をよりスパースに導ける機能を持つことが確認できた。本成果は「リカレント構造を持つ複素制限ボルツマンマシンによる複素スペクトル系列モデリング」というタイトルで 2018 年 2 月に開催された第 120 回音声言語情報処理研究会にて発表済みである(主な研究成果リスト5)。

研究テーマ C「複素 RBM の自己回帰可視変数表現モデル(自己回帰複素 RBM)」

音声信号は自己回帰性を持つため、複素スペクトル系列もまた複素数の自己回帰性を持つデータとして近似できる。本研究テーマは自己回帰性を持つ複素数データ系列を表現するモデル(自己回帰複素 RBM)を提案し、実験的にその有効性を確認した。評価実験では、PESQ 値が 3.07 となり、従来の複素 RBM や静的な分析再合成手法と比較して、高品質な音声符号化・復号化が可能であることを示した。下図はオリジナル音声の対数スペクトル(a)及び自己回帰複素 RBM によって復元された対数スペクトル(b)を示しており、調波構造や微細構造が視覚的に確認され、音声の特徴を捉えられていることが分かる。



本成果は「音声スペクトル系列の自己回帰性を考慮した複素 RBM の拡張」というタイトルで 2018 年 9 月に開催された 2018 年度日本音響学会秋季研究発表会にて発表済みである (主な研究成果リスト 2)。

時間接続を追加した複素 TRBM は、デコード性能はほとんど変わらないが、より収束速度が向上し、隠れ素子をよりスパースに導ける機能を持つことが確認できた。本成果は「リカレント構造を持つ複素制限ボルツマンマシンによる複素スペクトル系列モデリング」というタイトルで 2018 年 2 月に開催された第 120 回音声言語情報処理研究会にて発表済みである (主な研究成果リスト 3)。

3. 今後の展開

本研究を通じて、従来基礎研究レベルに留まっていた複素 RBM を、実際に音声の複素スペクトルモデリングに応用し、実用的に十分使用できるレベルにまで確立させることができた。本研究のアイデアは画像の複素スペクトルや医療画像、アレー信号、衛星画像など、他の複素数データを表現する際にも適用でき、複素数データから直接潜在的な特徴を抽出させる複素 RBM を用いれば様々なアプリケーションへ応用することができる。例えば周波数を変えて撮影した衛星画像から地震予測をしたり、MRI 画像から悪性腫瘍を検出したりすることが考えられる。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

基礎研究レベルに留まっていた複素 RBM を応用レベルにまで改善させた点については十分な成果を達成できたと言える。一方で、当初の最終目的であった声質変換については、いくつか課題点が残された。

・研究の進め方

大規模演算が可能な計算機サーバ及び GPGPU を導入したことにより、研究を迅速に進めることができた。

・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

前述の通り、複素 RBM(とその派生)を応用レベルに改善させたことで、複素数を取り扱う全ての研究分野及びアプリケーションで波及効果が見られると想定している。

・研究課題の独創性・挑戦性

複素数を扱う機械学習や信号処理は実数のものと比べてほとんど研究されておらず、複素勾配の計算が必要になるなど、本研究は前提から定義を見直さないといけなため挑戦性のある研究でもある。また、数多く研究されているフィードフォワード型のニューラルネットワークを用いず、理論に直結するボルツマンマシンに着眼することは独創的である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. 中鹿 亘、高木 信二、山岸 順一. Complex-Valued Restricted Boltzmann Machine for Direct Speech Parameterization from Complex Spectra. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2018 年, 27 巻 2 号, 244-254. |
| 2. 中鹿 亘. LSTBM: A Novel Sequence Representation of Speech Spectra Using Restricted Boltzmann Machine with Long Short-Term Memory. Proceedings of Interspeech. 2018 年, 2529-2533. |
| 3. 中鹿 亘. 音声スペクトル系列の自己回帰性を考慮した複素 RBM の拡張. 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会. 2018 年, 1135-1138. |
| 4. 中鹿 亘. Deep Relational Model: A Joint Probabilistic Model with a Hierarchical Structure for Bidirectional Estimation of Image and Labels. IEICE Transactions on Information and Systems. 2018 年, E101-D 巻 2 号, 428-436. |
| 5. 中鹿 亘. リカレント構造を持つ複素制限ボルツマンマシンによる複素スペクトル系列モデリング. 第 120 回音声言語情報処理研究会. 2018 年, 1-5. |

(2) 特許出願

研究期間累積件数:1 件

発 明 者: 中鹿 亘

発明の名称: 符号化装置、符号化方法およびプログラム

出 願 人: 電気通信大学

出 願 番 号: 特願 2018-31875

(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)

日本音響学会粟屋学術奨励賞受賞、長・短期記憶構造を持つ拡張ボルツマンマシンの検討、2018/9/13.

研究報告書

「無線通信制御の自己最適化機構」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50149

研究者：西尾 理志

1. 研究のねらい

本研究は、無線ネットワーク、特に無線 LAN の課題である、不適切な運用によって生じる周波数の非効率的な使用とそれに伴うユーザの無線ネットワーク使用体感品質低下の解消に向けた、無線ネットワークの自動最適設定機構の実現を目指す。無線 LAN 端末の総出荷台数は全世界で 300 億台に達し、様々な場所で使用されている。無線通信環境が混雑するとともに、多様化・複雑化し、ユーザの通信品質は低下している。無線 LAN には多数の設定パラメータが存在し、適切に設定することで混雑や通信品質を解消できるが、誤った設定は逆に周囲のユーザの通信に悪影響をおよぼし通信品質低下をまねく。

本研究では、無線ネットワーク自体が自律的に試行錯誤しその結果から学習することで自己の設定を最適化する、無線ネットワークの自己最適化機構の実現を目指す。無線電波やトラフィックなどの観測データから状態を把握し、その状況における各パラメータ設定を評価し、最適なパラメータ設定を導き出す。さらに、同技術に対応した無線端末間で協力し、自身の学習結果を共有することで無線ネットワーク設定に関する集合知を形成し、100 以上のケースで最大性能を発揮する汎用性を持った最適化機構を実現する。

2. 研究成果

(1) 概要

無線通信制御の自己最適化機構の研究課題では大きくは2つの研究成果をあげている。

一つは「無線最適設定の学習方式」である。各無線端末が観測可能な情報から現状を把握し、現状における各パラメータ設定の有効性を評価するモデルを教師あり学習に基づき学習する方式を提案した。本方式により各パラメータを評価し、評価値が最大となるものを選択することで、最適な無線パラメータ設定を実現する。本方式により、従来の設定方式に比べて 30%スループットを向上させることに成功した。

もう一つの成果は「分散協調的学習機構」である。世界には何十億台もの無線 LAN 端末が存在し、毎秒何千もの通信フレームを送信している。本技術では、1 つ目の成果により各無線端末が学習した結果を統合することで、集合知を形成し、効率よく学習を実行する。その際、端末ごとの学習結果の優劣や、学習したモデルの共有の際の無線通信帯域消費を考慮する必要がある。本研究成果では、学習に寄与しそうな端末を選択的に参加させることでより効率的な学習を実現する。本技術により、学習性能が一定以上に高まるまでに必要な時間を 30%削減した。

(2) 詳細

研究成果 A「無線最適設定の学習方式」[業績 2,3,4]

本研究では教師あり学習に基づく最適パラメータ設定方策の学習方式を提案した。AP (Access Point) と複数の STA (Station) からなる BSS (Basic Service Set) が複数共存する環境を想定する。この環境において、1 つの BSS のみが学習方式に対応しているものとする。対応する BSS の AP (エージェントと呼ぶ) は、他の BSS からの干渉電力、他の BSS の送信 STA 数など無線ネットワーク情報の観測、および、送信電力やチャネル、A-MPDU サイズ、RTS スレッシュホールドなど各種パラメータを変更可能とする。エージェントは下記の学習方式に基づき設定方式を学習し、学習完了後はその方式に従いパラメータを動的に変更する。

提案方式は 2 つの学習器、通信品質学習器と、観測をもとにパラメータを決定する設定学習器、およびパラメータ探索器からなる。まず通信品質学習器を学習し、現状と、あるパラメータ設定を用いたときの通信品質推定値を予測可能とする。この通信品質推定値が最大となるパラメータを探索することで、最適なパラメータを決定する。学習の初期段階では、エージェントは初期設定のパラメータを用いて無線通信サービスを提供し、通信品質を観測する。同時に通信品質を特徴づける要因、例えば干渉電力、フレームロス率やジッタ等を観測する。観測値とパラメータを特徴量、通信品質をラベルとした訓練データセットを生成し、通信品質学習器を教師あり学習により更新する。上記の通信品質学習器の訓練手順を、パラメータを一定の範囲内でランダムに変化させながら実施し通信品質学習器の予測精度が一定以上になるまで実施する。

次に学習された通信品質学習器をパラメータの評価器として、最適パラメータの探索と設定学習器の学習を実施する。最適パラメータ探索では、通信品質学習器において観測値を固定し、パラメータ部分を勾配法やメタヒューリスティクスに基づき変化させながら出力が最大となるパラメータ設定を探索する。機械学習では、一般的に推論は学習に比べて高速に実行できるため、パラメータを実際に変更して通信させてその良し悪しを探索する場合と比べて、一回の探索コストは非常に小さい。得られた最適パラメータを用いて設定学習器を教師あり学習により更新する。通信品質学習器の精度が高い限り、設定学習器には最適あるいは準最適なパラメータをラベルとした訓練データが与えられる。

本方式を計算機シミュレーションにより評価した。無線ネットワークのシミュレーションには市販のシミュレータを使用した。BSS が 9 個、互いに干渉を及ぼす範囲でランダムな位置に存在する環境を 10 パターン生成し、各環境にエージェントがいる BSS を一つランダムに配置した。通常の BSS は 3 つのチャネルをランダムに選択し、その他のパラメータは一般的に用いられる設定とした。エージェント BSS はチャネル、RTS スレッシュホールド、A-MPDU サイズ、A-MSDU の有無を設定変更可能とした。各環境で STA の数と配置、エージェントのパラメータを変更しながら 1000 試行の通信シミュレーションを実施し、そのうち 900 試行をすべての環境から集約し、集約したデータを用いて通信品質学習器を訓練した。

図 1 に環境 1 および環境 4 における通信品質学習器の推定したスループットとシミュレーション結果を示す。テストデータにおけるシミュレーション結果と予測結果は概ね一致している。

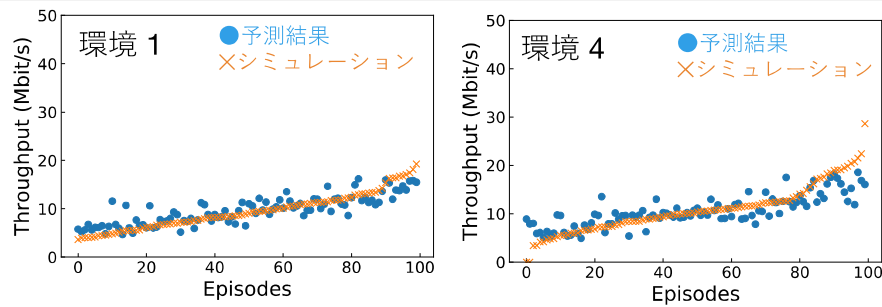


図1 通信品質学習器の精度評価。横軸は各試行スループットが低い順からソートした場合のインデックスである。

この通信品質学習器を用いてパラメータ最適化を行った場合の性能を評価する。各環境で 50 試行のシミュレーションを実施したときのスループットの平均値を図 2 に示す。提案方式はランダム設定に比べ 53%、従来方式(干渉電力からチャネルのみ設定)より 30%程度の性能向上を達成した。

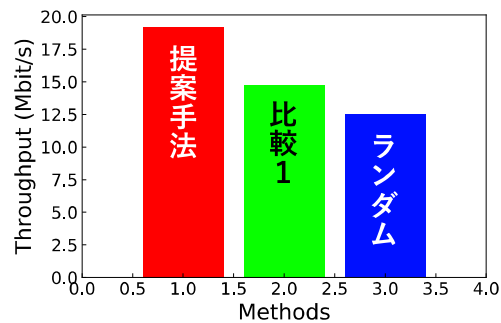


図2 パラメータ最適化方式のシステムスループット評価

研究テーマ B「分散協調的学習機構」[業績 1,2,3,5]

複数のエージェントでの学習を効率よく統合する機構として Federated Learning [McMahan17] に基づく学習機構を検討した。Federated Learning は端末に分散して存在するデータと、その端末の計算能力を活用して教師あり学習タスクを解く学習方法である。本研究課題においては、無数に存在する無線 LAN において、それぞれの学習結果を統合することに応用可能である。一方、通信ネットワーク上で学習結果を統合する際は、それぞれの学習結果の品質の違い、具体的には学習に用いたデータ量の多寡や種類の豊富さや共有時の通信帯域の消費を考慮する必要がある。

本テーマでは、エージェントの持つ通信資源、計算資源、データ資源の差異に着目し、学習に寄与するエージェントのみを選択的に学習に参加させることで、学習の時間効率を向上させる手法を検討した。提案方式では、各エージェントから収集した通信速度、計算能力、データ量の情報をもとに、それぞれのエージェントが学習に参加した場合の消費時間を推定する。推定した消費時間をもとに、一定の時間制約の中でエージェント数を最大化するエージェントの組み合わせを探索する。これは、一般的に Federated Learning の性能がモデルの更新頻度とエージェント数が多いほど良くなるためである。

提案方式の性能をシミュレーションにより評価した。ここでは、学習方式の良さのみを評価するため、一般の画像のクラス分類タスクを用いて評価した。図3に学習経過時間に対する識別精度のグラフを示す。赤色で示された従来方式に比べ、適切に設定した提案方式は、一定の識別精度を達成するまでにかかる時間を、最大で30%程度短縮することができた。

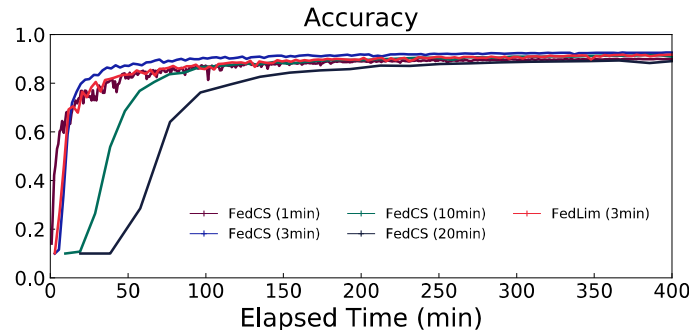


図3 予測精度の時間特性。学習進行に伴い精度が向上。

[McMahan17] H. B. McMahan, et al., “Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data,” Proc. AISTATS, Apr. 2017.

研究目的の達成状況

無線通信制御の自己最適化機構に必要な要素技術である「無線最適設定の学習方式」と「分散協調的学習機構」について、個々の技術として確立できてきた。しかし、両技術を統合しての評価や、統合に伴う課題の発見・解決がまだ残されている。

3. 今後の展開

今後はより複雑な環境での評価、および、両研究成果を統合した最適化機構の設計と評価を行う。加えて、実機実装を行い、実環境で評価することで、本研究アイデアの実現可能性を実証していく必要がある。

本研究成果は市販の無線 LAN 装置へもソフトウェア実装により比較的簡単に実装可能なものであり、産業応用可能な技術である。加えて、本研究成果は、最近の機械学習技術をもとにした無線通信分野の課題を解決する技術であり、通信制御における多数の課題に対しても適用可能であると考えられる。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

要素技術としてはある程度の性能のものが確立できた。一方で、より複雑な環境での評価や、両者を統合した最適化機構の実現までは至らなかった。これは当初は深層強化学習の応用で解決できると思われていた学習タスクが、実環境の制約(得られる情報や探索頻度の制限)を考慮したとき、現状の技術では解決が難しく、方針変更したことに起因する。しかし、それにより新たなアプローチの開発に至った点では、怪我の功名といえる。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

機械学習に精通する米谷先生と協力して研究を進めるなど効率的に研究を遂行できた。
また、研究費執行に関しても計画的に執行し、研究遂行にあたり非常に有効的に活用できた。

・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

本研究成果は無線通信分野において汎用性のあるものであり、多数の無線通信の課題に応用できるものと考えられる。特に、近年は無線通信分野への機械学習応用が盛んに行われており、その中で機械学習方式の一つとして応用する価値があるものとする。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題は、従来のモデル化・最適化に基づく制御からのパラダイムシフトを狙う、独創的かつ挑戦的な課題であった。学習方式についても、強化学習の困難さから、新しい学習方法を検討し、有効性を示した。また、分散協調的な学習機構においても、最新の学習方式を無線通信分野にいち早く取り込むなど挑戦的に研究を進めた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. Takayuki Nishio and Ryo Yonetani. Client Selection for Federated Learning with Heterogeneous Resources in Mobile Edge. Proc, IEEE ICC, Shanghai, China, May 2019. |
| 2. Koji Yamamoto and Takayuki Nishio, Machine Learning and Stochastic Geometry: Statistical Frameworks Against Uncertainty in Wireless LANs, IEEE ICC, Shanghai, China, May 2019. |
| 3. 西尾理志, 【チュートリアル】 無線ネットワークでの機械学習, 電子情報通信学会 CS 研究会, Apr. 2019. |
| 4. 西尾理志, 無線 LAN パラメータの自己最適化に向けた学習メカニズム, 電子情報通信学会 総合大会, March 2019. |
| 5. 西尾理志, 【招待講演】 機械学習の基礎と無線通信制御への応用, 電子情報通信学会 高信頼制御通信研究会, Jan. 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): 0 件

研 究 報 告 書

「多言語コラボレーションにおける非母語話者の貢献支援」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50150

研 究 者：ハウタサーリ アリ

1. 研究のねらい

This research aims to develop novel tools to support communication and collaboration between native and non-native speakers of a language. The focus in this research is on supporting verbal and non-verbal communication during multilingual face-to-face meetings in order to aid non-native speakers in contributing their ideas to the discussion. Secondly, this research aims to support non-native speaker contribution and reduce misattributions made by native speakers in multilingual text-based group chats by detecting and sharing awareness feedback of non-native speakers' language difficulties in real-time.

2. 研究成果

(1) 概要

The aim of this research is to alleviate the problems non-native speakers of a language experience when trying to contribute their comments, opinions and ideas to the other members of a multilingual group. The research focuses on two modalities: face-to-face meetings (Theme A) and text-based group chat (Theme B). The objective in this project is to develop novel supporting technology for multilingual meetings where non-native speakers are a minority.

The focus of this research is on both the native and non-native speaking group members. That is, the goal in this research is to explore how to 1) automatically detect non-native speaker's status, 2) share this information with native speaking participants, and 3) influence the behavior of multilingual group members to include all participants equally in the collaboration.

(2) 詳細

Theme A-1: Development of Table-top Robot System to Support Non-Verbal Multilingual Communication in Face-to-Face Meetings

Development of a table-top robot prototype and sensor system for detecting user's non-verbal behaviors in real time was completed. A group of three table-top robots 'mimic' users' nodding behaviors in real-time based on data from a specialized face-tracking software (Figure 1). The system allows group members to monitor their own and each other's non-verbal behaviors from a third-person view during a face-to-face meeting based on the nodding 'mimicked' by each robot assigned to a human participant.



Figure 1. Table-top robot system prototype using specialized face-tracker software to ‘mimic’ users’ non-verbal behaviors.

The system was evaluated in a series of group discussion experiments, where participants with disparate language abilities discussed a given topic. The results suggested that the table-top robot system influenced both native and non-native speakers’ awareness of their own as well as other group members’ non-verbal communicative behaviors, and that these awareness effects persisted in subsequent face-to-face discussion sessions without the support system. This indicated that the type of feedback provided by the table-top robot system could be used to influence long-term non-verbal behaviors of users during face-to-face meetings.

Theme A-2: Development of a Mobile Application for Automated Real-Time Detection of Difficult Second Language Words during Multilingual Face-to-Face Meetings

Development of a mobile application that automatically detects, displays and translates difficult to understand second language words during face-to-face meetings based on the user’s second language ability was completed (Figure 2). The objective was to provide non-native speakers a method to check their understanding of second language words used by native speakers in an alternative modality, and quickly resolve any comprehension problems that might occur, and thus aid their contribution to the multilingual discussion without increasing their mental workload.



Figure 2. Mobile application that automatically detects, displays and translates difficult second language words during face-to-face meetings based on user’s second language ability.

The system was evaluated in a non-interactive setting, where non-native English speaking participants watched video clips of second language group discussions. The results suggested that the introduction of the system may increase comprehension of second language group discussion content while having no negative affect on the cognitive load experienced by the users.

Theme 2: Development of an Awareness Display for Text Chat Applications to Support Multilingual Text-based Communication

Development for a text chat application that monitors non-native speakers' actions that are normally invisible to other group members (e.g., machine translation use, reading messages) in text chat environments was completed. In this system, the approach is to display detailed information about non-native speaker's behaviors to native speaking group members in order to aid with the pacing and group dynamics in text-based multilingual collaboration, and influence the attributions native speakers make on the challenges non-native speakers face that may affect interpersonal attraction. The approach is to detect non-native speaker's behaviors that affect the latency of their contribution to the discussion, and display an abstraction of this information to native speakers in real-time.

As part of the system development process, a technology installation exploring the effects of awareness about non-responsiveness in text-based chat was displayed (Figure 3).

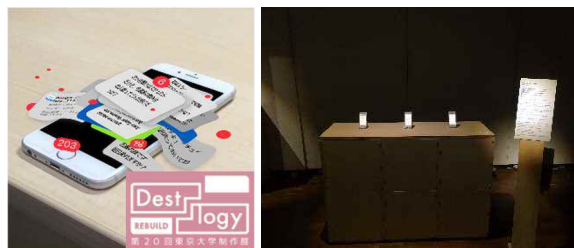


Figure 3. “Absent from Present” installation.

3. 今後の展開

Collaborations between people who do not speak the same native language are likely to only increase in the future. While technologies such as machine translation are useful for overcoming the language barrier when collaborators do not share similar language abilities, currently these technologies only support verbal (i.e., voice or text) communication. My vision on the future of multilingual collaboration support is that non-verbal communication with and without verbal communication support tools (e.g., machine translation, automated speech recognition) will become increasingly important in order to preserve the practical effectiveness of collaborative environments. Moreover, the use of verbal communication support tools will subsequently increase the amount of non-verbal cues that communicators have to monitor making it even more challenging to keep track of group members' status and collaborate efficiently, particularly in face-to-face settings.

However, supporting non-verbal communication is not as straightforward as with verbal communication. Behaviors such as nodding or eye contact communicate rich information to other collaborators regarding a person's status, but are both largely subconscious and often tied to a culture, language, or in some cases the communication tool itself. Hence, invasive or explicit methods that aim to

directly influence users' non-verbal behaviors may be more distracting than effective as users may either feel coerced to act in a way that feels unnatural to them, or perceive that their privacy is invaded by the feedback given to others.

On the other hand, approaches that are largely invisible when not needed, but provide meaningful real-time feedback when collaborators have to be aware and react to their own or others' status may be more successful when supporting non-verbal communication. For example, instead of a system explicitly telling collaborators that one of their group members is having trouble understanding what is being said, a non-verbal communication support system could subtly draw the attention of the group members to the differences in how native and non-native speakers react and behave during discussions.

I believe these type of approaches may lead to better quality collaborations without increasing the cognitive load of users of the system. Along with improvements in verbal communication support performance, systems that improve collaborators understanding of other's non-verbal communication cues will help overcome the language barriers in multilingual organizations, lower the threshold for adopting multilingual communication and collaboration support tools in daily activities, and significantly reduce misattributions and negative outcomes caused by verbal or non-verbal miscommunications.

4. 自己評価

Theme A-1

- The development of a table-top robot system that increases the users' awareness of other group members' non-verbal behaviors during multilingual face-to-face meetings was achieved (research goals 1 and 2).
- As of writing this document, unfortunately the data analysis is still partially underway regarding the effects on the distribution of discussion contributions among multilingual group members (research goal 3), which will be disseminated in a journal paper.
- Robot design that may be effective in influencing user's non-verbal behaviors was achieved (research goal 3). However, further research is required to improve on the present design. Based on the comments from non-native -speaking experiment participants, feedback on head turning may be more effective than nodding during face-to-face discussions. To realize this, improvements on the face-tracking system are needed, for example, by utilizing depth cameras.
- Experiment comparing the effects of feedback from a table-top robot and feedback from a traditional display started at the end of the fiscal year, but will continue towards the next fiscal year as of writing this document.

Theme A-2

- The development of a mobile application that automatically detects and displays difficult to understand words in real-time to aid non-native speakers in face-to-face meetings was developed.
- Presently, only a non-interactive experiment has been conducted to investigate the effects of the system on non-native speakers' comprehension of second language group discussion.

- Interactive experiment investigating the effects of the system on non-native speaker contribution will be conducted with foreign students arriving to Japan.
- Instead of targeting non-native English speakers, this system is likely better suited for foreign students in countries that do not use the roman alphabet, such as Japan.

Theme B

- A text-chat awareness display system that detects non-native speakers' status during multilingual group chats was developed (typing, reading, translating).
- Based on this theme, an interactive installation was displayed in iii Exhibition 2018.
- Preliminary experiment results suggest that displaying awareness information about non-native speakers' status during text-based group chats may have a positive effect on native speakers' interpersonal and task attraction towards the non-native speaker. However, further data collection is needed to confirm the hypothesis.

・研究の進め方 (研究実施体制及び研究費執行状況)

Research on all themes is continued by the principal investigator and two master's students who will complete their master's theses research based on two of the sub-themes (expected graduation: March, 2020).

Theme A-1

- Experiment results with the latest table-top robot system are currently being disseminated into journal publication.
- This project will continue to improve the robot design and sensor system, as well as increase the number of non-verbal communicative cues displayed by the system.
- An experiment comparing the physical table-top robot system and traditional display as a means to provide feedback on non-verbal communication during multilingual face-to-face meetings will continue in April 2019.

Theme A-2

- The system for automatically detecting difficult second language words will continue as a collaborative project, and will be evaluated with foreign students in Japan in a separate experiment.
- Based on further experiment results, the system will be promoted and made available as a supporting tool for foreign students in Japanese universities.
 - o We are currently designing faster ways for non-native Japanese speakers to understand the meaning of a word rather than direct machine translation.
- This approach will also be implemented in a video conferencing system.

Theme B

- The research and development results for the awareness display during multilingual text chats

inform the development of a Slack extension, which is planned to be made available for Google Chrome version of Slack as open source software (late 2019).

・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

Theme A-1

- Results from this research suggest that the table-top robot system may be helpful for supporting non-verbal communication in real working groups, and in larger scale. That is, as the number of people in a multilingual group increases, the harder it is to monitor everyone's status during a group discussion, and the table-top robot system maybe more effective in these contexts.
- However, development of such a large scale system is challenging and requires industry collaboration.

Theme A-2

- A system that detects and displays difficult words to non-native speakers may be most useful for foreign students in countries such as Japan and China, which do not use roman alphabet. A system that helps foreign students to comprehend discussion content and contribute to the discussion more effectively would likely alleviate challenges in cultural adjustment, make them feel more included in the local community or group, and have a positive impact on their mental health.
- This system could also help tourists who have rudimentary understanding of Japanese language. That is, instead of directly translating everything that was said by a native speaker, this system will help the non-native speaker to resolve only the parts of a conversation they did not understand. This might be a less invasive way to support multilingual conversations.
- This system could be further used as a tool for second language learning, where users could review the words they did not understand, learn them and subsequently improve the individual detection accuracy of difficult to understand words based on the learning outcomes.

Theme B

- The text-chat system that shares awareness data on non-native speakers status may be most helpful in academic laboratories with foreign students by helping the native speakers adjust their behavior and attitudes towards the foreign students with language difficulties. This might in turn aid in their cultural adjustment, and help them feel more included in the local community.

・研究課題の独創性・挑戦性

Theme A-1

- To the best of my knowledge, this research theme is the first to explore how to support non-verbal communication in multilingual face-to-face meetings using ICT.
- This research is the first that will report on the effects of feedback on users' non-verbal behaviors

that persist to subsequent discussions (publication underway).

- This topic is very challenging due subconscious nature of non-verbal cues, and the interconnected challenges in technology development.
 - o Discovering a robot design that elicits sense of embodiment (appearance, movement, etc.), and is robust enough for use in real-life environments.
 - o Developing non-intrusive sensors that produce minimal delay, while being able to detect subtle non-verbal cues (e.g., nodding) and filter out noise.
 - o Balancing users' privacy concerns (e.g., with machine learning approaches) with detection accuracy.
 - o Combining sensor data with robot actuators with minimal delay, noise and detection errors.
 - o Designing robot frame that is robust enough to handle actuator feedback, and at the same time elicit sense of embodiment.
- Experiments are currently underway to investigate the differences between feedback from a physical robot as opposed to feedback given through a traditional display, which will be the first study of its kind.

Theme A-2

- A system that automatically displays words based on user's second language ability, as opposed to full transcripts, is a novel tool in any communicative context (i.e., face-to-face, video, audio, text chat).
- One challenge for the system would be to improve the accuracy of what words are considered "difficult" for any one user, and may require the development of a learning algorithm.

Theme B

- No system is currently publicly available that would display the detailed status of a conversational partner during text chats.

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. Hautasaari Ari, 多言語コラボレーションにおける非母語話者の貢献支援、苗村研究室オープンハウス2018、東京大学。(ポスター) |
| 2. Hautasaari Ari, 多言語対面会議における非言語情報を顕在化する卓上アバターの実装、苗村研究室オープンハウス2019、東京大学。(ポスター) |
| 3. Yamaguchi Saho, 多言語対面会議のための難単語翻訳インタフェース、苗村研究室オープンハウス2019、東京大学。(ポスター) |

- | |
|---|
| 4. Ishiyama Kuntaro, 多言語コミュニケーションのための相手の気づきを促進するテキストチャットインタフェース、苗村研究室オープンハウス2019、東京大学。(ポスター) |
| 5. Yamaguchi Saho, Ishiyama Kuntaro, Miyashita Tamami, Tanaka Takuro, Ari Hautasaari, "Absent from Present," The University of Tokyo 20th iiiExhibition "Dest-logy REBUILD". (作品) |

(2) 特許出願: 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): 0 件

研究報告書

「プロパティグラフによる社会データにおける常識の考慮」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50151

研究者：久野遼平

1. 研究のねらい

本研究の狙いは企業、人、商品などに関する情報を複数ソースから集めて異質情報ネットワークとして分析することで、単一ソースの情報だけでは予想することや分析することが困難な諸課題に対して、予想精度の向上や未知の洞察の発見などの実証分析がどれくらい改善するかを検証することにある。無論これではあまりにも抽象的なため、本研究では特にテーマを ESG 投資(環境・社会・ガバナンス)に用いられる投資除外リストと制裁リストの予想に問題設定を絞った。この二つのテーマに絞った理由は両方とも国際的に関心が高まっている話題であること以外に個別にも背景がある。

ESG 投資は、(1)企業が自主的に公開した情報、(2)格付け会社の格付け、(3)過去のニュース情報などを用い行われてきた。(1)の自主公開した情報はエンロンの粉飾決算のように偽装可能性を排除することができない。(2)の格付け情報もサブプライム問題のように利益相反により必ずしも正しく行われているとは限らない。(3)の過去ニュースもメディアの調査報道によって未知の問題を炙り出すことができる反面、蓋然的に問題を抱えているが単に報道されていない企業を把握できないという問題を抱えている。つまり、ESG 投資を支える情報環境はまだ追いついていないのである。これに対し本研究では将来報道によって投資除外リストに企業が含まれる可能性の分析に焦点をあてた。これは従来研究がニュースが出てから反応するなど「泥棒を捕らえて縄を縛う」状況に限定されていたのに対して従来の壁を超える革新的な一歩と呼べる。こうした ESG 投資にまつわる情報環境の問題を背景に本研究では ESG 投資を扱うことにした。

制裁リスト作成は(i)センシティブな特定ソース(米国財務省の対テロ戦争における国際銀行間通信協会データ)に頼った調査法がある一方で(ii)捜査員が複数の情報ソースからの情報を必要に応じ少しずつ手動で入手・検証する調査法もある。前者の方法に関しては捜査対象になりうる組織が特定のソースを回避することで足跡を残さないことができ、後者の方法は捜査員が手動で分析できるデータ量に限界があることに問題がある。本研究のように複数ソースのデータから自動で制裁対象を予想することができれば、捜査対象が足跡を残さないことを困難にすると同時に(ii)の地道な捜査に関して捜査員をサポートすることができるようになる。これが制裁リストも本研究で扱うことにした理由である。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究で取り扱った問題設定を図1に示す。図1(a)にあるように本研究の目的は投資除外リストや制裁リストに新規に追加される企業を予想することにある。無論、リストをただ眺めているだけでは予想はできない。そこで本研究では図1(b)のように複数ソースからの情報を一つの異質情報ネットワークとして管理し、それを辿る方法を開発することで将来リストに追加される企業を予想するアプローチを採用した。図1(b)は Furukawa(2017)に記載がある北朝鮮制裁に関する国連捜査の過程を簡略化し図示したものである。特筆すべきは捜査員が複数の情報(登記簿、船舶、企業関係、所有関係)を手動で取得・検証し、積み重ねることによって捜査を進めている点である。本研究の目指す所はこうした複数ソースを有効活用した捜査をデータの中から自動的にパターンを発見することでサポートすることにある。

図1(a)に対応するリストに関してはまず Dow & Jones が提供する ESG 投資に利用されるニュースデータを元に投資除外リストを構築した。その他にも各国や国際機関が発行する制裁リストのデータは公開情報で入手可能のため、そちらも収集し制裁リストのデータベースを構築した。図1(b)に対応するデータベースに関しては7種類の投資家が利用するデータと2種類のオープンデータを用い構築した(表1)。ネットワークとしてみた場合ノード数が5千万でエッジ数が4億のため豊富に情報が含まれていると言える。

図1(a)(b)のデータを用いラベル伝播法の亜種を用いることで ESG 投資で用いられる投資除外リスト予想に取り組んだ(Hisano et al. 2018)。結果をかいつまんで説明すると、複数ソースを用いる提案モデルは一般的に利用されるモデルに対して予想精度が飛躍的に向上することが判明した。またリコールなど製品に関する問題が報じられる場合は仕入れ販売関係などが関係し、財政問題に関する問題が報じられる場合は債務・債権関係が効くなどそれなりにモデルに意味が通っていることもわかった。残念ながら期間内に査読を通過することはできなかったが比較的野心的な試みであったにも関わらずプロトタイプを完成させたことは成果として大きい。

制裁リスト予想に関してはデータを整備するだけで期間が終わってしまった。しかし上研究が口コミで広がった結果、国内における制裁に関係する有識者と議論をする機会にも恵まれるなど意外な発展もあった。引き続き積極的に取り組んでいく。

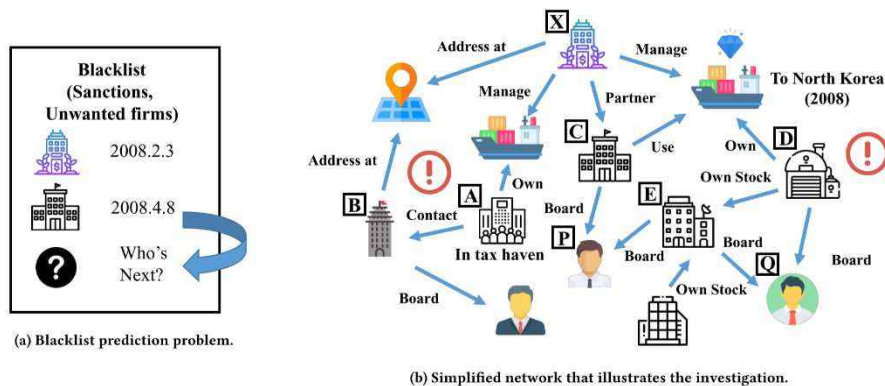


図1: (a) 問題設定 (b) 北朝鮮制裁に関する国連捜査の過程の簡略化した説明(Furukawa 2017)。詳しくは Hisano et al. (2018)参照。

(2) 詳細

研究の狙いに従い本研究ではまず企業、人、商品、株式などに関する情報を複数ソースから集め異質情報ネットワークを作成することに取り組んだ。データに関してはの表1にあるように世界中の上場企業を主な対象にした。これは投資という観点から上場企業は国際的に様々な角度からデータが整備されており、また曖昧な情報が少ないため複数ソースのデータを統合することが可能だからである。データベースの統合作業は何度かやり直す必要があったが、共同研究者や学生など複数人による利用を通じてエラーは大分少なくなったと自負している。

現行のデータベースの概要を表2と図1に示す。表2にあるように企業間の関係だけでなく商品にまつわる関係、株式にまつわる関係、人にまつわる関係など豊富に含まれていることがわかる。また図1に示している本研究で予想対象にする企業は世界中に散らばっているのも確認できる。このデータベースを用い特にテーマを ESG 投資(環境・社会・ガバナンス)に用いられる投資除外リストと制裁リストの予想に絞りモデル作成に励んだ。

ESG 投資はここ10年間関心が高まっている分野である。年金基金、保険会社などに代表される機関投資家は社会の持続的な発展に寄与するように投資することが求められており、実際、諸外国では投資の大部分がESG投資に相当するようになっている(図3)。日本はまだ比較的低いが国際的協調路線を取る我が国においても今後徐々に関心が高まっていくだろう。ESG投資に関する先行研究は、(1)企業が自主的に公開した情報、(2)格付け会社が付与した情報、(3)過去のニュース情報などを用い行われてきた(Hvidkjaer 2017)。

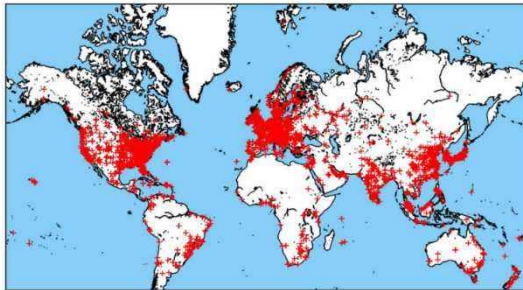
本研究では(3)のニュース情報を用い投資除外リストを作成する方法に関連した研究を実施した。従来研究の限界点は過去情報だけを用い投資除外リストを作成していることで、蓋然性としては非常に高いが単にまだ報道されていない・報道されづらい企業を無視している点にある。要するに「泥棒を捕らえて縄を絢う」状況にある。そこで本研究では投資除外リストを図1の(a)に対応させ、作成したデータベースを図1の(b)に対応させることで蓋然性を考慮できるようにした。モデルはラベル伝播法の亜種を用い複数ソースの情報を使用しないモデルに比べ予想精度が飛躍的に伸びることを示した(図3)。モデルに関してはまだまだ改善の余地があるが、最初のモデルとしては妥当な所と言える。

制裁リスト予想に関してはデータを整備するだけで残念ながら期間が終わってしまった。しかしながら Hisano et al. (2018)が口コミで広がった結果、国内における制裁に関係する有識者と議論をする機会にも恵まれており、引き続き積極的に分析していく予定である。

Source	Date of acquisition	Node types	Relation types	No. of nodes	No
Dow Jones Adverse Media Entity	Dec 2016	Firm	Location, Homepage	132,127	
Dow Jones State-Owned Companies	Dec 2016	State-owned firms	VIP, Employee, Owner	280,995	
Dow Jones Watchlist	Dec 2016	VIPs, specially interested person	Social relations	1,826,273	
Capital IQ Company Screening Report	Dec 2016	Firms	Buyer-seller, borrower etc	505,789	
FactSet	Dec 2015	Firm, goods, industry	Parent-child firm, Issue Stock	613,422	
FactShip	Jan 2017	Firm, goods, invoice etc	Overseas trade etc	16,137,550	3
Reuters Ownership	Dec 2016	Owners, stocks	Issue, own	1,560,544	12
Panama papers	Jan 2017	Entities, officers	Shareholder of, director of	888,630	
DBpedia	Apr 2016	Various	Various	35,006,127	24

表1: 本研究で扱ったデータベースのソース一覧。

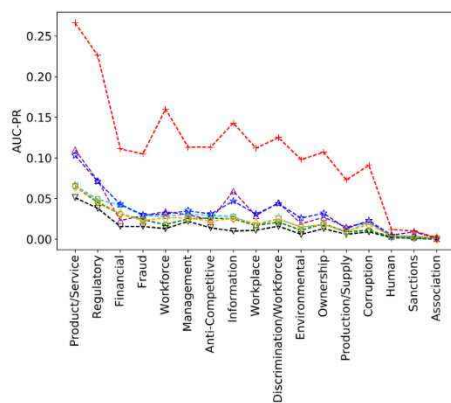
Rank	Relation	Number
1	located_in	2,723,162
2	customer	717,019
3	supplier	713,434



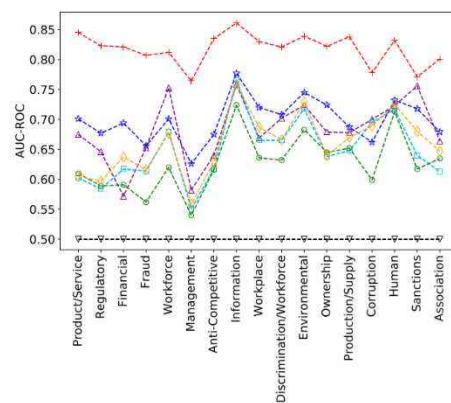
15	domain	131,153
16	distributor	116,262
17	subsidiary	107,119
18	parent-company	107,117
19	associated-person	100,699
20	international_shipping	95,050
21	associate	72,685
22	landlord	62,904
23	http://dbpedia.org/ontology/party	55,653
24	employer	47,901
25	employee	47,184

表2(左): データベースの中の出現頻度上位25の関係型。 .

図2(上): 予想対象企業の本社の住所を緯度経度で描画した散布図。世界中に散らばっていることがわかる。



(a) AUC-PR



(b) AUC-ROC

図3: 提案手法(赤いクロス)とその他の比較手法の比較。(a)の評価尺度は AUC-PR (b)の評価尺度は AUC - ROC。どちらも偽陽性と偽陰性の妥協度合いを一つの数字に集約した尺度である。

[参考文献]

- Furukawa, K. (2017). Kitacyosen Kaku no Shikengen Kokuren Sousa no Hiroku [Funding Source of North Korea: A Note on United Nation's Investigation]. Tokyo Shincyosya. Tokyo. Japan
- Hvidkjaer, S. (2017). ESG investing: a literature review. Report prepared for Dansif. Available at <https://dansif.dk/wp-content/uploads/2019/01/Litterature-review-UK-Sep-2017.pdf>.

3. 今後の展開

ESG 投資はここ 10 年間関心が高まっている分野である。年金基金、保険会社などに代表される機関投資家は社会の持続的な発展に寄与するように投資することが求められており (United Nations 2006; OECD 2017)、特に欧州では投資の大部分が ESG 投資に相当するようになっていく (表 3)。それに対し日本はこの潮流に出遅れているが、国際的な水準にやがては収斂していくのは間違いないだろう。

1. 狙いの繰り返しにもなるが、ESG 投資は、(1)企業が自主的に公開した情報、(2)格付け会社が付与した情報、(3)過去のニュース情報などを用い行われてきた。(1)の自主公開した情報はエンロンの粉飾決算のように偽装可能性を排除することができない。(2)の格付け情報もサブプライム問題のように利益相反により必ずしも正しく行われているとは限らない。(3)の過去ニュースはメディアの調査報道によって未知の問題を炙り出すことができる反面、蓋然的に問題を抱えているが単に報道されていない企業を察知することができないという問題を抱えている。つまり、**ESG 投資に対する関心が高まっている反面、それを支える情報環境はまだ追いついていないのである。**これは国境を越えた資本取引が年々伸びている現代社会において一層深刻な問題になっていると言える。情報環境が成熟していない中、実体を今一つ把握できない国外の企業に投資することが国際社会の持続的発展につながるわけではないのは言うまでもない。

本研究は既に判明しているニュース情報(図 1(a))とファクト(図 1(b))を併せできる限り蓋然性の高いものは把握し国際社会の持続的発展に関連する情報環境の改善を試みる研究である。一番の成果は従来研究がニュースが出てから反応するなど「泥棒を捕らえて縄を縛う」状況に限定されているのに対して、ある程度の先読みを可能にしたことである。同様の方法論が捜査方法にも関連することは前述の通りである。

ただ現状できているものはまだ究極の完成形には程遠いというのが正直な所である。確かに複数ソースの情報を用いる事の効果は示せている。しかしまだまだモデルは改善できる。評価基準も問題がないわけではない。AUC-PR や AUC-ROC 予測器の全体的なパフォーマンスを一つの値に集約する評価基準が実務における有用性に必ずしも対応しているわけでもない。本研究の投資除外リストの裏にあるのはメディアが報道する ESG 関連ニュースである。いくらデータを整備した会社が時間をかけ選別したとはいえ、憶測で裁判沙汰になる可能性に言及している記事など深い調査報道ではなく浅薄な嫌疑によったニュースが含まれている可能性も否めない。そうした一種のフェイクニュース(定義については Zhou and Zafarani 2019 参照)を考慮した分析も重要である。同様に仮にフェイクニュースによってリストに虚偽が含まれていた場合、本研究のアプローチによる予想はどれくらい変化するだろうか？同様の問題は制裁リスト予想も孕んでいる。間違った情報に基づき制裁リストに加えられる企業のダメージは決して小さいものではない。この点を無視している現行モデルは十分とは言えない。

こうした限界点を踏まえると本研究成果は何か「大きく解決した」というよりはパンドラの箱を開けてしまったととめる方が正しいのかもしれない。自分が思い描いていたビジョンが決して容易に達成できるものではないと痛感させられた 1 年半であった。

しかし ESG 投資や制裁リストの予想など十分に集められるテーマに焦点をあて具体的な研究課題を遂行したことは改めて強調に値する。ESG 投資と制裁リストのどちらも社会の持続的発展に直接的に関係する重要な手段である。それらにおける情報環境の在り方に一石を投じた本研究は国際社会の持続的発展に寄与することにもつながる可能性のある重要なものである。

本研究のように包括的に情報環境の在り方を研究するのは最初は ESG 投資や制裁リストなどデータが十分に集められる限定的な分野でしか実施できる研究ではないのかもしれない。しかし、例えばフェイクニュースの問題が社会に至る所で見られるように情報環境の問題は現代社会にとって遍く散見される問題である。将来的にはこうした特定分野を超え広い分野に貢献ができるように今後とも一つずつ丁寧に成果を積み上げていきたい。

Region	2014	2016
Europe	59%	53%
United States	18%	22%
Canada	31%	38%
Australia/New Zealand Asia	17%	51%
Asia		1%
Japan	1%	3%
Global	30%	26%

Source: Data provided by GSIA 2014 and 2016 reports.

表3: GSIA の 2014 年と 2016 年のレポートによる ESG 投資が投資全体に占める割合(Sherwood and Pollard 2018)

[参考文献]

- OECD. (2017). Responsible business conduct for institutional investors: Key considerations for due diligence under the OECD Guidelines for Multinational Enterprises. OECD guidelines (2017). <https://mneguidelines.oecd.org/RBC-for-Institutional-Investors.pdf>
- Sherwood, M. W. & Pollard, J. (2018). Responsible Investing An Introduction to Environmental, Social, and Governance Investments. Routledge. ISBN 9781351361927.
- United Nations. (2006). Principles for Responsible Investment. 2006. www.unpri.org. Accessed March 10, 2019.
- Zhou, X. and Zafarani, R. (2019). Fake News: Fundamental Theories, Detection Strategies and Challenges. WSDM 2019. DOI:10.1145/3289600.3291382

4. 自己評価

1年半という短い期間を考えれば本研究は研究目的を達成できていると言える。データの結合作業自体は予想に時間がかかり、実際作ってみなければ何ができるかわからなかった。そのため比較的オープンエンドで研究を進め、確実に出来そうなことにテーマを絞ったことが功を奏した。次の3点: (1)当初の予定よりははるかに大きいテーマに対して具体的に応用例を完成させたこと、(2) 金融の観点からは従来の ESG 投資に関する研究がニュースが出てから反応するなど「泥棒を捕らえて縄を綯う」状況に限定されているのに対してある程度蓋然性を考慮できるようにし、一般的に問題を抱えているとされる ESG 投資にまつわる情報環境の改善に一石を投じたこと(3) コンピュータサイエンスの観点からは捜査法の分野(ACM 分類: Applied computing → Investigation techniques)に貢献したことを踏まえれば、挑戦的かつ独創的な研究であったにも関わらず一定成果を出した本研究は成功したと言える。

しかしながら反省点がないわけではない。逆にオープンエンドでやっていたからこそ最初自分自身も研究成果がどういう意味を持つのか全体をなかなか把握しきれずコミュニケーションがうまく

いかなかった。スケジュールに関しても何度かデータベース作成からやり直さなければいけなかったこともあり、一人の人間が実施する研究としてはぎりぎりの作業量だったのかもしれない。今後はこうしたスケジュール管理もうまく考慮できるようにしていきたい。

研究費用で購入したサーバーとデータに関しては有効活用させていただいている。計算資源が増えたおかげで並列でアルゴリズムを走らせられるようになったおかげで研究の進みが速くなったのは言うまでもない。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hisano, R., Sornette, D., and Mizuno, T. (2018). Social Blacklist Prediction using a Heterogeneous Information Network. <https://arxiv.org/abs/1811.12166>. Submitted.

(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]

2018 年 12 月 4 日、Predicting Adverse Media Risk using a Heterogeneous Information Network, キヤノングローバル戦略研究所(CIGS): 経済・社会の分野的横断研究会

2019 年 1 月 22 日、Predicting News Events using a Heterogeneous Information Network, 3rd ETH Zürich-UTokyo Strategic Partnership Symposium on the United Nations Sustainable Development Goals and Innovation

研究報告書

「制限された回路の最小化問題と回路下界の研究」

研究期間：平成 30 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50152

研究者：平原 秀一

1. 研究のねらい

情報通信技術は現代の社会にとって必要不可欠になっており、通信の秘密は公開鍵暗号と呼ばれる暗号技術によって守られている。一方で、その安全性は未だ数学的に証明されていない。本研究の究極的な目標は、計算量理論に裏付けされた**絶対的に安全な暗号**の存在を示すことである。残念ながら現在の暗号は**相対的な安全性**に基づいている。すなわち、現在広く使われている RSA 暗号などの安全性は「素因数分解を効率的に解けない」といった証明されていない経験的な仮定に基づいており、真に安全とは限らない。

しかしながら、前述の目標を達成するためには計算量理論(計算の複雑さの理論)における超難問である $P \neq NP$ 予想を解決する必要がある。 NP とは効率的に証拠の正しさを検証できる問題全体のことで、 P とは効率的に計算できる問題全体のことである。 $P \neq NP$ 予想は効率的に正しさを検証できるが、効率的に計算することはできない問題の存在を問う未解決問題であり、暗号の安全性に深く関わっている。この未解決問題はミレニアム懸賞の問題のひとつで 100 万ドルの懸賞金がかけられているが、現状では残念ながら解決への道筋がたっていない。さらに悪いことに、公開鍵暗号の安全性は $P \neq NP$ 予想を解決するだけでは不十分であり、後述の図に示す通り、計算量理論における 4 つの中心的な未解決問題を解決する必要がある。

そこで本研究では、「回路最小化問題(Minimum Circuit Size Problem; MCSP)」と呼ばれる計算量理論において中心的な問題の計算困難性を解明することにより、計算量理論全体に貢献することを目指す。回路最小化問題とは、入力としてブール値関数 $f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$ の真理値表が与えられたとき、その関数 f を計算するような最小のゲート数をもつ論理回路を求めるような問題である。この問題の研究の歴史は 1950 年代ごろまで遡ると言われているが、計算の困難性については未だによくわかっていない。回路最小化問題は前述の 4 つの中心的な未解決問題に深く関連している計算問題であり、この問題の計算困難性を解明することにより、絶対的に安全な暗号の構築に資することができると予想できる。そこで、回路最小化問題が NP 完全かどうか(=他の多くの自然な最適化問題と同様に難しい問題かどうか)という特に重要な未解決問題の解決に向けて、本研究では制限された回路を最小化する問題に着目し研究を行う。特に回路の深さを 3 に制限した場合の回路最小化問題の計算困難性を解析することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の研究成果として、以下の二つの重要な成果を得た。

成果 【ブラックボックス帰着の限界突破】

回路最小化問題について、最悪時計算量 (= アルゴリズムの最も時間のかかる入力

において、計算時間を計る)と平均時計算量(=入力ランダムに生成されたときにアルゴリズムの平均計算時間を計る)が等しくなることを証明した。つまり、回路最小化問題がある一つの入力で計算困難ならば、多くの入力でも計算困難であることを証明した。

この成果は、前述の4つの中心的な未解決問題の一つである「NP問題について平均時計算量と最悪時計算量は等しいか」という問いに、新しいアプローチを与えていると見なすことができる。具体的には、回路最小化問題がNP完全であることを証明しさえすれば、我々の成果と組み合わせることにより、前述の未解決問題を解決することができる。特に回路最小化問題の計算困難性の解析が、絶対的に安全な暗号の構築に実際に資することを証明した。

さらにこの成果が重要な点は、既存の証明技法の限界を突破している新しい手法に基づいていることである。具体的には、平均時計算量と最悪時計算量の同値性を証明するためには、ブラックボックス帰着と呼ばれる証明手法では解決できないことが知られていた。本研究の証明技法はブラックボックス帰着ではない証明手法に基づいており、特にその限界を世界で初めて突破することに成功した。

本成果は国際的に高く評価されており、理論計算機科学のトップ会議 FOCS'18 に採択および日本人初となる Machtey Award (最優秀学生論文賞)を受賞した。

成果 【深さ3段の回路クラスに対する回路最小化問題のNP完全性の解決】

回路の深さを制限したとき、深さ2段の回路クラスに対する回路最小化問題については、Masek が1979年にNP完全性を解決していたが、それをより表現能力の高い回路クラスについて拡張することは約40年間未解決であった。本研究ではこの未解決問題を解決し、OR-AND-XOR という深さ3段の回路クラスに対する回路最小化問題がNP完全であることを証明した。本成果は計算量理論のトップ会議 CCC'18 に採択された。

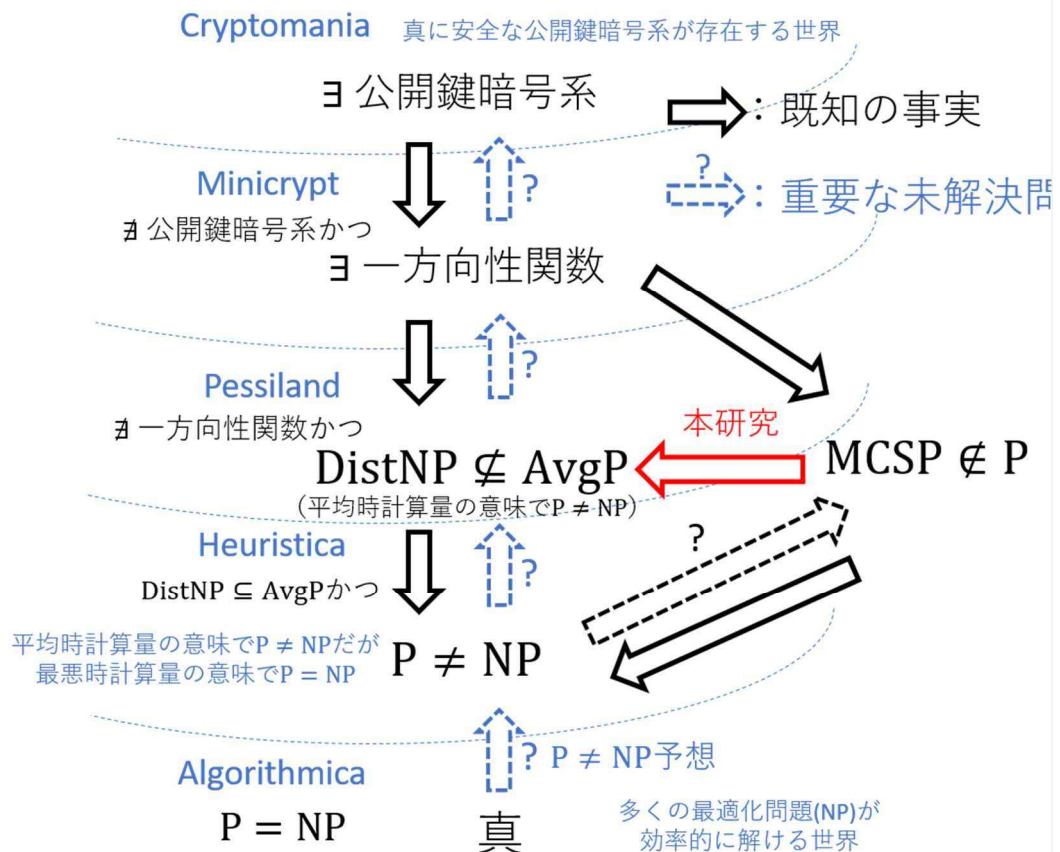
(2) 詳細

成果 【ブラックボックス帰着の限界突破】

安全な公開鍵暗号系を構築するためには、 $P \neq NP$ を証明するだけでは不十分である。実際、「 $P \neq NP$ 」は最悪時計算量(=アルゴリズムが最も悪い振る舞いをするような入力における計算時間を計る)に基づいて定式化されているが、安全な公開鍵暗号方式を構築するためには、平均時計算量の意味での計算困難性を解析する必要がある。つまり、ランダムに秘密鍵を生成したときに、効率的な敵対者が「暗号を破る」という問題を効率的に解けないようにしなくてはならない。

このように「公開鍵暗号系の存在」と「 $P \neq NP$ 」には大きな隔たりがある。平均時計算量や暗号に関する Russell Impagliazzo のサーベイ論文において、この隔たりは明確に解説されている。彼は計算量理論の現在の知識と一貫性のある5つのありうる世界(Algorithmica, Heuristica, Pessiland, Minicrypt, Cryptomania)を提案した。これら5つの可能世界のうち、ちょうど一つが我々の世界に対応している。例えば Algorithmica と呼ばれる世界は $P=NP$ であるような世界のことを言う。この世界では




安全な暗号を構築することはできない。一方で、Cryptomania という世界は安全な公開鍵暗号が存在する世界である。多くの研究者はこの世界に住んでいると予想しているが、数学的には未解決である。計算量理論の究極的な目標は、どれが我々の真の世界に対応しているかを明らかにすることにある。特に「我々の世界は Cryptomania である」という予想を解決することで、数学的に裏付けされた公開鍵暗号系の存在を証明することが究極的な目標である。



これらの重要な未解決問題に関して、例えば「公開鍵暗号系が存在する ならば $P \neq \text{NP}$ 」などは知られている（上図の黒い矢印に対応する）。その逆を示すことが計算量理論における4つの中心的な未解決問題である（青い矢印「⇐？」に対応する）。例えば一番下の矢印は $P \neq \text{NP}$ 予想に対応しており、これを証明できれば Algorithmica を可能世界から除外することができる。下から二番目の矢印は前述の「NP問題について平均時計算量と最悪時計算量は等しいか」という未解決問題に対応しており、証明できれば Heuristica という中間の世界を除外することができる。同様に一つの矢印を除外するごとに一つの可能世界が除外され、最終的に4つの矢印をすべて証明することにより我々の世界が Cryptomania であると結論づけることができる。

しかしながら、上述の未解決問題は計算量理論における中心的な未解決問題であり、現在の証明手法には限界があることが知られている。例えば Heuristica を除外するためには、「相対化のバリア」と「ブラックボックス帰着の限界」という二つの証明手法

の限界を突破する必要があることが知られている。

本研究では、ブラックボックス帰着の限界を初めて突破することに成功した。具体的には、回路最小化問題がある一つの入力で計算困難 ($MCSP \notin P$) ならば、多くの入力でも計算困難であることを証明した ()。これは下から二番目の矢印「  」を示すための全く新しいアプローチを与えている。回路最小化問題の NP 完全性「  」を示すことができれば、我々の赤い矢印と組み合わせることによって青い矢印 (= Heuristica を除外) できる。

成果 【深さ 3 段の回路クラスに対する回路最小化問題の NP 完全性の解決】

もう一つの成果として、回路最小化問題の NP 完全性に関しても進展を与えることに成功した。深さ 2 段の回路クラスに対する回路最小化問題については、Masek が 1979 年に NP 完全性を解決していたが、それをより表現能力の高い回路クラスについて拡張することは約 40 年間未解決であった。そして表現能力の高い回路クラスについて NP 完全性を示すことは、先行研究の論文において明確に述べられるなど、計算量理論のコミュニティの中で重要な未解決問題として明確に認識されていた。本研究ではその約 40 年来の未解決問題を解決することに成功した。具体的には、OR-AND-XOR 回路という深さ 3 段の回路クラスに着目した。これは一段目が OR、二段目が AND、三段目が XOR ゲートからなるような回路クラスである。このような制約の下で最小の回路を求めるような計算問題が NP 完全であることを証明した。

3. 今後の展開

以上二つの成果をまとめると、本研究の成果は計算量理論に次のような意味で貢献したといえる。計算量理論の究極的な目標である安全な公開鍵暗号の構築のためには、Cryptomania 以外の 4 つの可能世界を除外する必要がある。成果 では可能世界の一つである Heuristica を除外するための新しいアプローチとして、回路最小化問題の計算困難性 (特に NP 完全性) を解析すればよいことを証明している。さらに成果 では、一般の回路最小化問題の NP 完全性を解決するための第一歩として、約 40 年来の未解決問題であった深さ 3 段の回路クラスに対する回路最小化問題の NP 完全性を解決することができた。

今後はこれらの研究をさらに推し進め、回路最小化問題を研究の軸としてさらに計算量理論を発展させていくことを目指す。特に、本研究の証明技術を用いて将来的には実用的な暗号が構築される可能性がある。

4. 自己評価

【研究目的の達成状況】

当初目標として掲げていた深さ 3 の回路最小化問題の計算困難性の解析は十分に達成することができた (成果)。さらに成果 では、研究提案時に抱いていた「回路最小化問題の計算困難性を解析することが計算量理論にとって重要である」という直感を数学的に証明することに成功し、予想以上に研究に進展があったといえる。

【研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)】

研究費は主に共同研究のための旅費として使用した。特に成果 は ACT-I 予算により Oxford 大学を訪問したことによって得られたものである。

【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】

本研究は学術、特に暗号の基礎となる計算量理論に対して大きな貢献をしたといえる。また、将来的には本研究で得られた証明技術を用いて、実用的な暗号が構成される可能性がある。

【研究課題の独創性・挑戦性】

本研究課題は「数学的な裏付けのある絶対的に安全な暗号の構築」という非常に挑戦的な未解決問題に貢献するべく、回路最小化問題に着目するという独自のアイディアに基づくものである。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

成果 . Shuichi Hirahara. “Non-Black-Box Worst-Case to Average-Case Reductions within NP.” 59th IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), 247-258, Paris, France, October 7-9, 2018

成果 . Shuichi Hirahara, Igor Carboni Oliveira, Rahul Santhanam. “NP-hardness of Minimum Circuit Size Problem for OR-AND-MOD Circuits.” 33rd Computational Complexity Conference (CCC), 5:1-5:31, San Diego, CA, USA, June 22-24, 2018

(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)

受賞

1. COMP-ELC 学生シンポジウム最優秀論文賞(2018/3/23)
2. 電子情報通信学会 2018 年度学術奨励賞(2019/3/21)
3. Machtey Award (Best Student Paper Award at FOCS'18) (2018/10/7)

研 究 報 告 書

「二光子顕微鏡で観察できる細胞の形と動きを一細胞単位でデータ主導型に解析するバイオイメージインフォマティクスの確立」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 30 年 8 月

研究者番号：50153

研究者：藤井 庸祐

1. 研究のねらい

イメージング技術の発展により、生体内で生きた細胞の有様を一細胞単位で観察できるようになった。しかしながら従来の形と動きの解析には定見がなく、実験者が仮説、実験条件依存で ad hoc に設定しているのが現状である。例えば形については、細胞の表面積、体積、2次元平面上で得られる細胞外周長など 3 次元データを 2 次元として扱って数百個の特徴量を抽出し、機械学習を用いて生物学的特徴との関係を解析している。動きについては従来より、細胞領域を質点とみなして細胞の軌跡を連結して推定し、速度や移動距離の特徴量を抽出している。さらに、ノイズや解析手法の制限により、実験者は眼で見て推定された細胞の形と動きを補正するという作業を行っている。本研究課題では数理・統計学、情報科学の観点から二光子顕微鏡で観察できる細胞の形と動きをデータ主導的に解析することで、客観的なデータ解析とオミックス実験との統合を可能にし、細胞の形と動きに関わる分子基盤の解明の足がかりとなることを目指す。

本研究課題で提案する手法は、実験者が ad hoc に設定していた従来までの主観的で経験依存な解析から脱却し、客観的で頑強性の高い解析を実現できる。データ主導的に解析し、網羅的に細胞の形と動きについてデータを取得するため、「眼で見えていなかった」「着目していなかった」ため捨てられていた特徴量も扱うことができる。そのため、いままで見過ごされていた細胞の形・動きとオミックスデータの関係、ひいては生命現象を見出す可能性がある。近年ではイメージング実験のデータベースの整備も進んでおり、データベース内の実験結果の再利用が可能で、これらのデータに対して本研究課題の成果を活用することで効率的な解析を実現できる。加えて、イメージング中に細胞を標識して拾い出す技術も発展しており、特徴的な形と動きを示す細胞をリアルタイムに解析、抽出することができれば、in vivo での次世代の網羅的解析の新たなモデルを提唱するものとなる。近年、進歩の著しいオミックス実験技術とイメージング技術を融合させ、さらに情報科学によるデータ主導型解析法を導入した画期的な新技術開発を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

二光子顕微鏡で観察される細胞は、蛍光物質で標識されたシグナルデータとして観測される。これらの観測値を計算機上で扱えるようコンピュータグラフィックスで一般的に利用される 3D ファイル形式に変換し、微分幾何学球面マッピングと球面調和関数を用いた級数展開により、細胞の包括的な形情報をパラメータ化することに成功した。球面調和関数により級数展開された特徴量スペクトルは細胞の形ひとつひとつに固有であり、特徴量スペクトルの

パターンをもとに、二光子顕微鏡で経時的に観察している細胞群のなかから分裂する細胞の検出に成功した。

(2) 詳細

(1) 細胞の形

(a) 細胞の 3 次元再構成

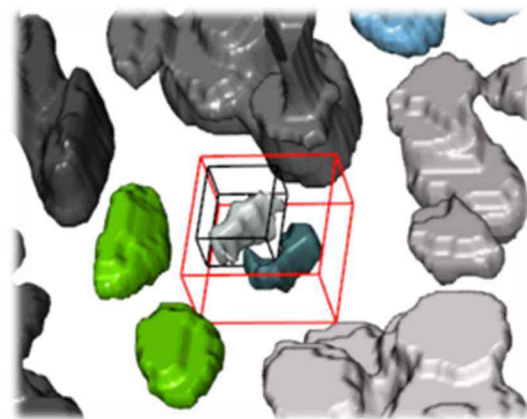
二光子顕微鏡のイメージ画像から細胞の 3 次元データを再構成する。共同研究者の協力を得て、二光子顕微鏡画像をグラフカット法を用いて細胞領域を二値化セグメンテーションするプログラムを組み込み、3 次元ボクセルデータを抽出した。

(b) 細胞の形の特徴量抽出

細胞の 3 次元構造から、データ主導的に形の特徴量を抽出する。上記(a)で細胞領域をボクセル化し、3D メッシュデータに対して微分幾何学的共形変換および球面調和関数による特徴量抽出するプログラムを実装した。形の包括的な情報を保持する特徴量スペクトルが取得でき、3 次元空間内での細胞位置位相を考慮した回転不変量を説明変数のひとつとして、分裂する細胞の検出に応用した(5-3 その他の成果)。

(c) 球面調和関数係数の比較による細胞の比較

細胞の形の定量的な比較は球面調和関数の係数の比較に帰着できる。ふたつの物体の距離は球面調和関数係数ベクトルのノルムとして表現できるが、最小距離解析的な推定は細胞の位置位相を考慮した回転同一視を行う必要がある。微分幾何学的な数学背景の整理と、プログラムの実装に苦慮した。主研究担当者の一身上の都合により研究継続中止となり、以降の研究開発は中止となった。



表面再構成した細胞と分裂の認識検出結果

(d) 実装と公開

実際に二光子顕微鏡に解析サーバーを取り付け、これら一連の解析工程をリアルタイムに実行できるアプリケーションの実装を行う。二光子顕微鏡に直接取り付けたサーバー以外にも、3 次元の物体データ一般に本研究の手法を応用できるように、コマンドライン型および実行ファイル型のアプリケーションを作成し、ひろく利用できるような体制を整える。

細胞のセグメンテーションと形の特徴量を抽出するプログラムは作成できたが、二光子顕微鏡に解析サーバーを連動させ、一連の解析工程をリアルタイムに自動化するアプリケーションの実装までは至らず、主研究担当者の一身上の都合により研究継続中止と

なった。

(2)細胞の動き

主研究担当者の一身上の都合により研究継続中止となり、以降の研究開発は中止となった。

3. 今後の展開

本研究課題で提案する手法は、実験者が *ad hoc* に設定していた従来までの主観的で経験依存な解析から脱却し、客観的で頑強性の高い解析を実現できる。データ主導的に解析し、網羅的に細胞の形と動きについてデータを取得するため、「眼で見えていなかった」「着目していなかった」ため捨てられていた特徴量も扱うことができる。そのため、いままで見過ごされていた細胞の形・動きとオミックスデータの関係、ひいては生命現象を見出す可能性がある。近年ではイメージング実験のデータベースの整備も進んでおり、データベース内の実験結果の再利用が可能で、これらのデータに対して本研究課題の成果を活用することで効率的な解析を実現できる。加えて、イメージング中に細胞を標識して拾い出す技術も発展しており、特徴的な形と動きを示す細胞をリアルタイムに解析、抽出することができれば、*in vivo* での次世代の網羅的解析の新たなモデルを提唱するものとなる予定だったが、主研究担当者の研究中断により開発中止となり、未達成となった。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

二光子顕微鏡で観察できる細胞の形と動きについて、データ主導的な解析手法の構築と実装を目指した。形については実際のデータを使った解析コンテストに共同研究者らと参加し、出力を得ることが出来たことでプログラム実装と公開について一定の見通しがあったが、形の特徴量スペクトルを抽出し細胞のオミックス解析と統合するという目的までは達成できなかった。動きの解析については主担当研究者の一身上の都合による研究中断により、ほとんど目的を達成できなかった。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究実施体制および研究費執行状況については、研究期間中においては過不足なく行うことができた。研究室内外において生物学および情報科学を専門とする共同研究からのデータ提供やプログラム開発支援を受けたり、議論を重ねたりすることで一定の成果を得た。また、ACT-I 内において、本研究課題に応用できる可能性のある研究開発を進めている研究者が存在し、定期的に議論を行った。

・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(今後の見込みも重視してください。)

生物学分野ではオミックス技術の発展により大規模なデータを取得できるが、それらのデータと統合できる形式で形と動きの網羅的特徴量が取得できていなかったため、オミックス実験と形・動きを関連付ける手法というものも存在していなかった。本研究課題は数理・統計学・情報科学

と生命科学の橋渡しとなり、両分野での相互応用の枠を広げるという可能性のある研究課題だったと評価している。

・研究課題の独創性・挑戦性

従来までの形と動きの解析は、そもそも特徴量を抽出することが困難で、体系的・汎用的な解析手法は存在しなかったことから、実験者が仮説・実験条件依存で ad hoc に解析する特徴量を決めていた。従来のように「眼で見て」決めていた特徴量を解析できることは当然として、「眼で見えてなかった」特徴量も扱うことができるため、客観的・網羅的なデータ解析が可能となり、いままで見過ごされていた生命現象の解明につながる独創性と挑戦性があった。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

なし

(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 件

繁田浩功, 藤井庸祐, 瀬尾茂人, 山田亮, 松田秀雄. 細胞領域の抽出・追跡と形状変化による細胞分裂イベントの検出 ~ グラフカット法に基づく細胞領域の検出からのメッシュ化による三次元再構成 ~, 外観検査アルゴリズムコンテスト 2017 (精密工学会 Vision Engineering Workshop, ViEW 2017), 2017 年 12 月, 横浜.

以上

研究報告書

「安全な AIこそ効率的: ロバスト学習による汎化性能向上の研究」

研究期間: 平成 29 年 10 月 ~ 平成 31 年 3 月

研究者番号: 50154

研究者: ホーランド マシュー ジェームズ

1. 研究のねらい

「人工知能」(AI)を目指す機械学習(ML)技術は、音声や物体の認識、テレビゲーム、機械翻訳、商品推薦、自動運転技術といった幅広い応用実績が世間の注目を集めている。期待が産学官の各界で高まるなか、重要度の高い応用問題で開発が難航している。例えば、個人向けの在宅医療診断、言動による感情分析、介護ロボット制御をはじめ、困難な学習課題が多く指摘されており、医療・交通・エネルギーといった領域ではすでに、現行の技術の限界が見えはじめている。また、性能が不安定で実際の働きが予想しにくいと、試行錯誤が避けられず、設計者の監視も不可欠なため、開発の進歩が遅い。この現状を踏まえて、次世代の学習課題が克服できなければ、人工知能技術の更なる発展や社会基盤技術としての普及は見込めない。

この問題の要因を俯瞰すれば、まずデータの性質の変化に注目すべきであろう。インターネットや産業界の各種センサー技術の発展により、膨大で複雑なビッグデータが台頭し、丹念に精査することも整理することも現実的でなく、その作業自体も自動化の対象となる現状である。そのプロセスにおいて、一つの段階でも観測データと学習方法の相性が悪ければ、それによる誤差があとこの作業に伝播され、学習の最終結果まで尾を引いてしまう。数理モデルが現実をうまく表現できていないことも一因であるが、それよりも根源的な問題として提案者が着目するのは、パラメータの自動設定を担う学習アルゴリズムの適応能力の欠如である。データサンプルのばらつきに揺さぶられない学習方法、高い安全性と自律性を持つ学習システムといった未来の AI 技術に向けて、事前情報無しで多種多様なデータに適応する能力が必要条件である。

本研究では、ML 技術のコア部分を見直し、安定性を最優先にした制御方法を掲げる。既存の学習機は、センサー等による観測データに敏感に反応するため、極端な働きを防ぐことが難しい。試行錯誤が避けられないのはこのためである。提案者は、様々な刺激に対して頑健な学習機を設計すれば、開発時間の短縮と安全の確保を一度に実現できると考える。本研究は設計方法の確立と性能の実証的評価を最大の目標とし、世界の AI 開発を加速させる基礎技術を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

上記の「本研究の狙い」で述べたように、本研究の主な目的は、端的に言えば、専門知識と経験則を要しない汎用的学習アルゴリズムの開発と性能検証である。具体的には、以下の条件を満たす学習機の設計法を目指してきた。

- (a) 弱い仮定でも成り立つ統計的性能保証
- (b) 安易な実装

(c) 限りなく小さな計算オーバーヘッド

学習アルゴリズムやモデルの微調整による試行錯誤を減らして、明確な信頼性保証付きの AI 基盤技術を刷新することを究極の目標として掲げてきた。この ACT-I の研究期間中、理論的な土台を踏まえて実用性の高い学習アルゴリズムを新たに提案し、またその深層学習への実装枠組みを新たに開発した。この手法を発表した論文は機械学習のトップカンファレンスの一つである AISTATS (2019) に採録決定され、データに対して特に何も仮定しない (= 事前知識を必要としない) 状況下では従来の手法を大きく凌駕する理論的な根拠と計算効率のバランスを実現した学習アルゴリズムとして評価された。根幹にある新規性の高い学習則に加えて、近代の AI ブームを支えてきた深層学習への拡張フレームワークもツールとして提供できるところまでたどり着いたことから、先述の目標に向けて確かなる進歩であるといえる。

(2) 詳細

ステージ 1: 学習アルゴリズムの開発

(応答方式の設計、フィードバック方式の設計)

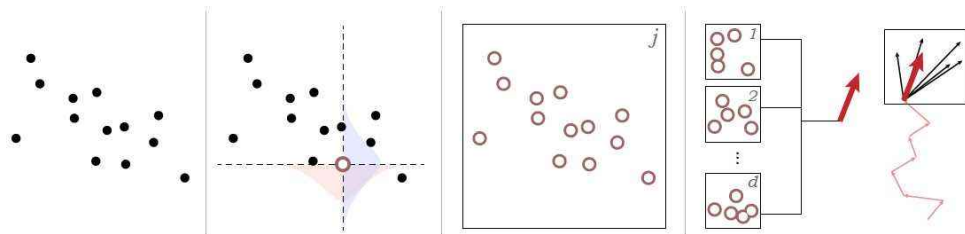
この研究ステージでの成果の要点は下記の通りである。

- データ分布に頑健な勾配推定方法

ノイズをほぼゼロタイムで考慮する最急降下法やそれに近いアルゴリズムも文献上なく、性能解析法も新しい。

- 低コストで高度なロバスト化を図る算法

ロバスト化勾配は陽に表せるため、計算量が少なく、並列化も簡単なため、次元ごとの処理でも速い。



アルゴリズムの中核をなす更新式を上図と右図のように図示した。基本的な考え方は、ノイズが統計的推定をどのように乱しうるか、それを事前に考慮し、学習前に推定量に組み込むことである。これにより、学習時には従来の標本平均とほとんど変わらない程度の計算量で、大幅な頑健性向上を実現することが可能である。換言

すれば、従来の勾配ベクトル推定に、自ら設計したノイズをかける影響をあらかじめ解析的に表現できる工夫が最大のポイントとなっている。この技法の開拓と勾配降下法への適用が本研究の大きな技術的・方法論的な貢献である(原著1)。

本提案の肝

損失関数の勾配

$$\frac{s}{n} \sum_{i=1}^n \int \psi \left(\frac{x_i + \epsilon_i x_i}{s} \right) d\nu(\epsilon_i)$$

名付けて「gradient softening」

$$\hat{w}_{(t+1)} = \hat{w}_{(t)} - \alpha_{(t)} \hat{g}_{(t)}(\hat{w}_{(t)})$$

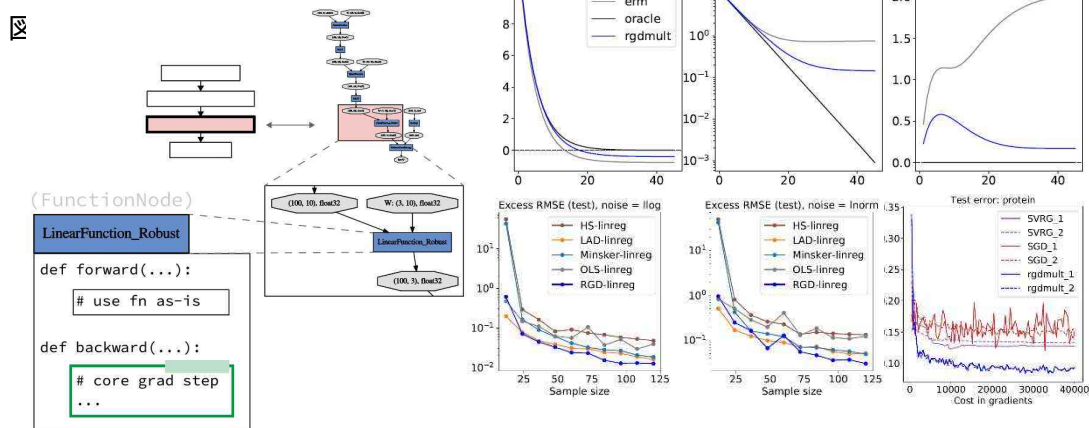
ステージ 2: 学習機の実証的性能検証

(数値シミュレーション、ビッグデータ応用、スモールデータ応用)

この研究ステージの成果の要点は下記の通りである。

- 深層学習向けの応用として、既存 API を生かしたデモ
完全な Chainer 上の実装例、数値実験等のコードを公開。
- 入念な実験的検証
性能保証の裏付けとして、人工+実データで頑健性を確認。

先述の新しい技法では、損失値は使わず、勾配情報のみで構成されるため、従来の最急降下を多少書き換える程度で簡単に実装できる。また、逆伝播法をはじめとして、勾配情報を中心にパラメータ推定を行う深層学習の種々の手法での応用も和合性が高く、本研究では Chainer という著名な深層学習 API を用いて、完結した実装例とその数値的な性能検証のデモンストレーションをインターネット上で公開し、深層学習の新たな方向性を示唆する結果となった(実装の仕組みの事例: 下



さらには、提案学習アルゴリズムを対象に、緻密に設計された数値実験を行い、学習効率 (= 計算資源 vs. 汎化誤差) を検証した。機械学習の業界標準となるベンチマークデータに加えて、実に多種多様な学習問題を数値シミュレーションにより体系的に構築し、学習課題の条件の変化が提案手法の学習効率にもたらす影響を明らかにした(上図、右)。この成果の意義については、次のような新しい知見が得られた。一つ目に、理論上の性能保証は学習アルゴリズムにとってもっとも不都合のデータを想定しているため、担保されている性能よりも実際の性能が良い場合もあり、従来の手法との優劣の差が実際に出ない可能性が原理的にはあるが、数値実験の結果、理論的に「優位であるはず」という条件はもれなく優位であったことから、本研究で指摘している従来手法の脆弱性は無視できないものであることがわかった。二つ目に、理論的な性能保証は確率モデルの仮定をいくつか利用しているが、現実世界ではこの仮定が成立しないことは当然考えられる。本研究の数値実験では、仮定の緩和が提案手法の性能に及ぼす影響を調べた結果、重要な仮定を相当弱めても、提案手法の安定性も相対的優位性も変わらなかった。具体的には、真の確率分布の分散につい

ての事前情報がある前提での性能保証が、一切この事前情報を持たずにデータから推定した場合でも、事前情報を用いた最良設定の場合と比較して多少の性能低下こそあれ、従来の学習則よりもはるかに広い確率分布のクラスでの高い汎化能力が確認できたことから、提案手法の実際の性能は確率モデルの仮定に対して頑健であることがわかった。

3. 今後の展開

研究開始時点から、「学習機に学習を任せる」ことを可能にすることの重要性を主張してきた。また、その技術的なカギを握るのは、ロバスト性の高い統計的推定方法にほかならないと提唱し、独自の理論研究を土台に、新たな学習アルゴリズムの枠組みを構築してきた。先述の通りに研究成果はあったが、その成果を踏まえて新しい課題も多く見えてきた。代表例として、産業界に浸透しつつある深層学習では無数のパラメータを有するグラフが使われているが、すべてのパラメータの推定を学習開始時点から終了時点まで均一にロバスト化するという方法は、必ずしも最適とはいえない。ロバスト化は統計的推定の精度を上げ、学習の安定化にも寄与するが、計算コストがかかる上に、いささかバイアスを推定結果に加えてしまう。学習しようとしているモデルの構造と学習用のデータの特性を総合的に考慮し、学習過程においてどのタイミングで、モデルのどの部分を対象にロバスト化を実行すべきか、計算資源と標本外の性能を明示的に扱った新しい方法論が求められる。

4. 自己評価

全体的には、本研究が順調に進んだと考えている。研究開始時点では「高速かつ十分にロバスト」といえる手法は文献にはなく、新しい手法を独自の切り口で開発することが本研究の最大の目標の一つで、それを提案の「soft gradient」による降下法で実現できたことは評価できると考える。新規性は高く、トップレベルの国際会議に出した初版でも査読者から高い評価を受け、手法の方向性の確かな手ごたえを得た。また、ニューラルネットワーク向けの実装方法やそれを踏まえた数値実験の設計では技術的な苦難はたくさんあったが、最終的には Chainer を母体とした実装例が一般向けにもわかりやすく、多くの利用者がプロトタイプづくりに使える形が仕上がったことも満足している。反省点としては、GPU サーバを納入するにあたって、学内の事務手続きが想定していたよりも相当長く、GPU を生かした本格的な数値実験の実施が大幅に遅れてしまった。その決裁・納入を待つ間は小規模の数値実験を現有物で行うことができたので、研究自体は 1.5 年を通して絶え間なく続けることができたが、高額な設備導入の時間的コストを今後の研究計画により正確に反映させていこうと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Holland, Matthew J. Robust descent using smoothed multiplicative noise. Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2019, to appear). 2019.
2. Holland, Matthew J. Classification using margin pursuit. Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2019, to appear). 2019.

(2) 特許出願

該当なし。

(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)

Holland, Matthew J. Leveraging Uncertainty to Robustify Deep Learning Algorithms. 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2018). ポスター発表. 2018.

Holland, Matthew J. Fast robustification of gradient descent using multiplicative noise. 21st Information-Based Induction Sciences Workshop (IBIS2018). ポスター発表. 2018.

研究報告書

「機械学習を用いたケミカルシグナルフローの逆解析」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50155

研究者：松倉 悠

1. 研究のねらい

廃棄物埋立地では、微生物が廃棄物を分解する過程でメタンガスが発生する。メタンガスは高い温室効果を持つので、地球温暖化防止のため、埋立地からの発生量を正確にモニタリングし、発生を抑制するための対策を早急に講じることが求められる。しかし、メタンガスの発生箇所や発生量に関するデータが不足し、有効な対策が取られていない。現状では、メタンガス発生量を計測するために、地面に直径 50 cm 程度の覆いを被せ、一定時間に覆い内に溜まったガスの濃度を測定する方法(チャンバー法)が用いられる。しかし、数キロメートル四方の大きさの埋立地の中で、小さなチャンバーを用いて人の手で計測できる測定点の数には限りがあり、埋立地から発生するメタンガスの総量を正確に求めることは困難である。

本研究では、ある場所である濃度のガスを検出した際に、そのガスがどこから発生したかを逆算し、メタンガスの高精度モニタリングを実現することを目指す。空気中に放出されたガスの挙動は移流拡散方程式などの非線形方程式に従うため、これを逆解析してガスの発生箇所や発生濃度を推定するのは困難である。これまでの研究例を見ても、ガス源の個数が既知の場合や、気流が定常で一様な場合など、ごく単純な状況下でしか推定に成功していない。現実環境では、風速や風向が絶えず変動し、それに伴ってガスの挙動も乱れる。この乱れを反映して逆問題を解析的に解くことは困難である。

そこで本研究では、現実環境における測定で得られたデータを基に機械学習を行うことを提案する。乱れがある中で測定されたガス濃度や風向風速の時系列データを入力として機械学習を行うことで、精度良くガス源位置を推定することを目指す。もともと乱れを含むデータを用意し、その時系列値を学習に用いることで、風向風速やガス濃度の変動を考慮しながらガス源位置を推定することを可能にする。

本研究では具体的な目標として、20 m 四方の領域において 5 m 程度間隔で測定を行い、1 m 四方の分解能でガス放出位置を推定することを目指した。廃棄物埋立地におけるメタンガス発生を想定し、屋外でメタンガス(または、メタンと比重や拡散係数の近いガス)を放出する実験を行い、自律移動ロボットや地面に固定したガスセンサアレイによりガス濃度分布を計測する。ガス濃度分布と風向風速の時系列データを学習させ、ガス発生位置を推定するソフトウェアを開発する。

2. 研究成果

(1) 概要

ガスの挙動は、移流拡散方程式などの非線形方程式に従うため、これを逆解析して発生箇所や発生濃度を推定するのは困難である。しかも、現実環境では風速や風向が絶えず変

動し、それに伴ってガスの挙動も乱れる。そこで本研究では、現実環境における測定で得られた乱れを含むデータを基に機械学習を行うことを提案した。ガス濃度の時空間分布を測定し、ガス発生箇所を推定することを試みた。

初めに、メタンガスの空間分布を計測するロボットシステムを構築した。自律移動ロボットの上に、パンチルト雲台を介してレーザメタン計を固定したシステムを製作した。レーザを様々な方向に向けて照射し、地表付近に存在するメタンの濃度が測定できることを実験的に確認した。

また、地表にガスセンサを並べたセンサネットワークを用意し、ガス濃度の時間変動データを収集する実験も行った。与えられた環境を 1 台のロボットでスキャンし、センサデータを収集した場合に比べ、センサネットワークを用いると同時に多点で測定したデータが入手できるため、ガス源位置の推定には有利である。縦 9 m、横 7.5 m の実験領域を 1.5 m 四方のセルに区切り、各セルの中央に半導体ガスセンサを、領域の中央には三次元超音波風向風速計を設置した。エタノール飽和蒸気を 500 mL/min の流量で放出するガス源を 30 個のセルのうちの一つに設置し、実際に屋外環境でガスセンサの応答値と風速ベクトルの時系列データを収集した。

このようにして集めたデータを用い、深層学習ニューラルネットワークを用いてガス源位置を推定することを試みた。ガス源の位置を変えて測定を行い、CNN-LSTM ニューラルネットワークでガス源の位置を推定した結果、95%の正解率を得ることができた。ガスセンサアレイで測定したガス濃度の空間分布の特徴を CNN(convolutional neural network)を用いて抽出し、LSTM(long short-term memory neural network)を使って時間変動を学習する。粒子フィルタを用いてガス源位置推定を試みた先行研究(J.-G. Li, et al., Auton. Robot., 30, 281–292, 2011)では同様の環境で 80%の正解率しか得られておらず、正解率を大幅に改善することができた。

(2) 詳細

研究テーマ A「レーザメタン計を搭載したロボットの作製とメタンガス濃度分布測定」

レーザメタン計をパンチルト雲台に固定し、図 1 に示すように屋外走行用ロボットベースに搭載した。パンチルト雲台を動かせば、レーザを様々な方向に向けて照射でき、ロボットを移動させることなく、測定領域内のメタンガスの濃度を素早く測定することができる。



図 1 作製したロボット

図 2 は、実験室内において行った様子を表す。2 m 四方の領域を確保して実験を行なった。爆発限界に達しないように、3%の濃度に調整したメタンガスを充填したガスボンベを用意してメタンガスを放出し、20 cm の間隔でレーザを床面に照射した。その結果、3 分ほどで 2 m 四方の領域内をスキャンするように測定することができた。

このロボットを屋外で使用すれば、20 m 四方程度の領域において 1 m 程度の間隔でガス濃度分布を計測することが可能である。しかし、二次元平面をスキャンしてガス濃度分布を計測する手法では、データ収集に時間を要する。気流場の時間変動が大きい場合には、ガス濃度分布の変動が捕らえきれず、ガス源位置を特定することができない欠点がある。

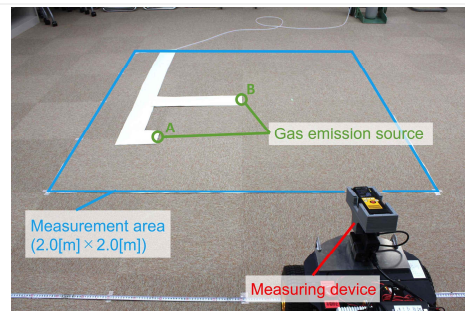


図 2 屋内における実験の様子

研究テーマ B 「ガスセンサアレイを用いた屋外におけるガス濃度分布と風向風速の収集」

ガス発生源の位置を機械学習により求めるためには、時間的・空間的に緻密なセンサデータを用意した方が有利となる。そこで、二次元平面上に固定式のセンサを配置したセンサネットワークを用意し、センサデータを収集する実験を行なった。実験の様子を図 3 に示す。屋外に 9 m x 7.5 m の領域を確保して 30 個のセルに分割し、各セルの中央にガスセンサを 1 個ずつ設置した。また、三次元超音波風向風速計を実験領域の中央に一つ設置した。



図 3 実験の様子

一つ選択したセルにエタノールの飽和蒸気を放出するガス源を設置し、各センサの応答を 30 分間測定した。ガス源を設置するセルを変えて測定を行い、得られたデータを x 軸や y 軸に関して反転させることで、全てのセルそれぞれにガス源が存在するデータを得た。この時系列データを 300 タイムステップ(150 秒)ずつに分け、学習用と評価用のデータセットを 180 個ずつ用意した。

研究テーマ C 「深層学習によるガス源位置の推定」

本研究で用いたニューラルネットワークの構造を図 4 に示す。本研究ではガスセンサアレイを用い、ガス濃度の二次元分布の時系列データを取得した。この二次元分布を画像に見立て、画像認識などでよく用いられる畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を利用し、特徴を抽出する。その後、様々な時系列データの解析に実績のある LSTM (Long short-term memory)と呼ばれるニューラルネットワークで、ガス分布と風向風速の変動を解析する。最終的に、LSTM から出力された信号を深層学習ニューラルネットワーク

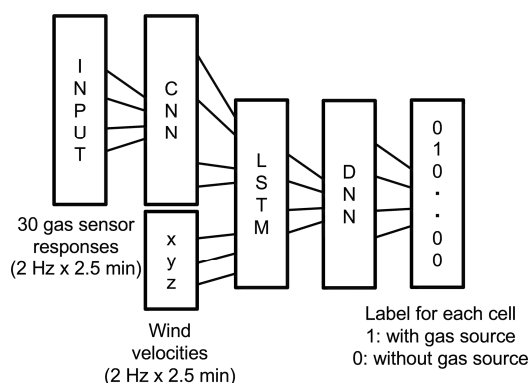


図 4 ニューラルネットワークの構造

(DNN)に入力する。二次元平面を分割したそれぞれのセルにガス源が存在するかないかを、0 から 1 の数値(0:ガス源が存在しない、1:ガス源が存在する)で出力する構造となっている。

このニューラルネットワークに、センサネットワークから得た 2.5 分間の時系列データを入力した結果、95%の正解率でガス源位置を推定することができた。また、LSTMとDNNのみを接続したネットワークを用い、ガス源位置の推定に必要なセンサデータの長さを調べたところ、20 秒程度の長さのセンサデータを用意すれば高い確率でガス源位置を推定できることが確かめられた。

研究テーマ D「ドローンによる気流操作」

研究テーマ A では、ガスの空間分布を計測する陸上走行式ロボットを開発した。しかし、車輪で走行するロボットを不整地や湿地で用いることは困難である。そのため、ガスセンサを搭載したマルチコプタによりガス源探索を実現することも試みた。

マルチコプタには位置や姿勢が制御しやすいという利点があるが、飛行する際にロータから強い気流を吹き降ろす。この気流が地面に到達すると放射状に広がり、地上付近を漂うガスを撒き散らしてしまうため、マルチコプタにガスセンサを取り付けても、ガスを検出することは困難である。

しかし、この下降気流を上手く使えば、地表付近を漂うガスをマルチコプタ上のセンサで検出することが可能となる。図 5 に示すようにマルチコプタを低空飛行させると、複数のロータで生成された下降気流が地表を広がり、互いに衝突して上昇気流が発生する。このような上昇気流を作れば、地表付近を漂うガスが巻き上げ、マルチコプタ上のセンサで検出することが可能となる。数値流体力学シミュレーションや実験により、本手法が実現可能であることを確かめた。

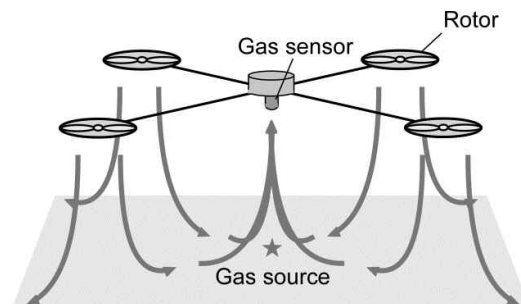


図 5 ドローンの気流を利用したガス捕集

3. 今後の展開

本研究では、ガスセンサネットワークを用いて高い時間分解能、空間分解能でガス濃度分布データを測定し、機械学習を用いてガス源位置の推定を試みた。その結果、2.5 分間の測定データをニューラルネットワークに与えるだけで、95%の成功率でガス源の位置を推定することに成功した。気象条件が変化した場合にも同様に高い成功率が得られるか、今後、検討を進める必要がある。しかし、実際に屋外環境で実験を行い、ここまで高い成功率を得た例は、現時点で他にない。

本研究期間において、センサネットワークやメタンガス計測ロボットを構築し、実際の廃棄物埋立地で実験を行う準備を整えることができた。今後は、各所の廃棄物埋立地で実験を行い、提案した手法の有効性を確かめることを計画している。ガス源の位置を推定することができれば、その場所にロボットを移動して詳細な測定を行い、地中から大気中に放出されるメタンガスの総量を正確に求めることができる。したがって、地球温暖化対策の策定などに大きく貢献するものと期待される。また、高濃度のメタンガスが放出されている場所が分かれば、その位置にガス抜き管を打

ち込み、メタンガスを回収することも可能となる。埋立地の適切な管理に貢献するだけでなく、回収したメタンガスを資源として再利用することも可能となる。

画像処理の分野では、画像圧縮などのアルゴリズムの性能を比較するために、各種画像を集めたデータベースが公開され、広く利用されている。しかし、ガス源探索の分野では、このようなデータベースは存在していない。本研究では、今後も屋外環境におけるデータ収集を継続し、得られた結果をデータベースとしてまとめ、公開する予定である。このデータベースを使えば、機械学習だけでなく様々なガス源位置推定アルゴリズムをテストすることが可能になり、この分野の研究の進展に貢献できるものと期待される。ガス源位置やガス放出量の計測技術が進展すれば、廃棄物埋立地におけるメタンガス発生モニタリングだけでなく、森林における水蒸気・二酸化炭素放出量の計測など、環境モニタリングに幅広く応用することが可能になると期待している。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初は、ガス源の位置だけでなく、そこから発生するガスの量まで推定することを目的としていた。また、提案した機械学習手法を様々な気象環境下でテストする計画であった。以上の点は今度の課題として残ってしまったが、センサデータ収集に必要なセンサネットワークや移動ロボットを作成し、実際に屋外環境で測定したセンサデータを使い、ガス源位置を推定することに成功した。当初の目的を達成する準備は整っており、今後も研究を継続する所存である。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

初年度は年度途中で研究が採択されたため、学生のマンパワーが不足していたが、東京農工大学のグループの協力を得て、途中からは研究を加速できた。

初年度に各種購入物品の手配を行うところで時間を要したが、その後は適切なタイミングで研究費を執行し、研究を進めることができた。

・研究成果の波及効果

本研究では、十分な量のセンサデータを用意すれば、高い精度でガス源の位置を推定できることを示した。実際に屋外環境で 95%の成功率を出した例は、他にない。ガス源探索システムの研究を、基礎研究から応用フェーズへと進めることができた。廃棄物埋立地におけるメタンガス発生モニタリングだけでなく、提案した計測手法が様々な環境センシングに活用されるものと期待する。

・研究課題の独創性・挑戦性

実測したガス濃度や風向を基に、ガス源の近くにロボットを誘導する研究(中国・天津大学)や、ロボットやドローンで測定したガス濃度を、そのまま補完してマッピングする研究(高知工科大、スウェーデン・Örebro 大学など)は既にある。しかし、国内外において、実測値に機械学習を適用し、数メートル四方程度の領域でガス位置推定を行った研究は前例が無い。今後、異なる気象条件下で実験を行い、提案した手法の評価を行う必要はあるが、機械学習の高いポテンシャルを示すことはできた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Christian Bilger, Akifumi Yamamoto, Maki Sawano, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida. Application of Convolutional Long Short-Term Memory Neural Networks to Signals Collected from a Sensor Network for Autonomous Gas Source Localization in Outdoor Environments. *Sensors*. 2018, 18(12), 4484, 12 pages.

(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. (学会発表) Kento Tanaka, Saki Koguchi, Ryohei Sato, Jane Pauline Ramos Ramirez, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida. Using Airflows Generated by Multicopter for Gas Detection in Midair. 17th International Meeting on Chemical Sensors. 2018, pp. 470-471.
2. (学会発表) 山本晃史, Christian Bilger, 松倉悠, 石田寛. 風防付きガスセンサを用いた領域絞り込み法によるガス源探索. 第35回「センサマイクロマシンと応用システム」シンポジウム. 2018, 30pm4-PS-56, 3 pages.
3. (学会発表) 松倉悠, Christian Bilger, 山本晃史, 澤野真樹, 石田寛. ガスセンサアレイおよび風向風速計を用いた深層学習によるガス源位置推定の検討. 電気学会ケミカルセンサ/バイオ・マイクロシステム合同研究会. 2019, pp. 31-33.
4. (学会発表) Akifumi Yamamoto, Christian Bilger, Maki Sawano, Haruka Matsukura, Naoki Sawada, Chee-Siang Leow, Hiromitsu Nishizaki, and Hiroshi Ishida. Application of Sequence Input and Output Long Short-Term Memory Neural Networks for Autonomous Gas Source Localization in an Outdoor Environment. IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose. 2019, 発表採択.
5. (招待公演) Haruka Matsukura. Gas Source Localization Using Deep Learning Neural Network with Gas Sensor Array. IEEE International Conference on Sensors and Nanotechnology. 2019, 7月発表予定.

研究報告書

「深層学習を用いた SAR 衛星画像からの地震被害域の自動判別」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50156

研究者：宮本 崇

1. 研究のねらい

近年、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震によって大きな被害が発生するなど、大地震による被害が頻発している。周期的な大地震の発生が不可避な環境にある我が国においては、地震に対する防災・減災は現在においても重要な課題である。

地震災害時において、被害量を軽減するための応急対応を公的機関が取るうえでは、第一に被害情報が迅速に収集される必要がある。中でも、住宅構造物の被害分布を把握することは、倒壊した建物からの人命救助の可能性を高めるなど、人的被害の軽減という観点から極めて重要となる。住宅の倒壊を含む各種の被害情報は、現在では地方公共団体や防災機関によって人的に収集・統合されている。しかし、災害直後の混乱や人手の不足、情報の重複・錯綜といった問題により、包括的な災害情報が得られるまでには時間を要しており、災害直後の情報空白と混乱は避けられない現状にある。申請者自身、2016 年熊本地震時には直後に現地調査を行ったが、被害の全貌に関する情報は地震発生から 10 数時間を経ても得ることができず、被害域や被害量を即座に検知する技術の必要性を実感した。

日本を始めとして、世界で多発する自然災害による被害状況を即座に収集する手段として、人工衛星からの観測データを用いるリモートセンシング技術の利用が有力視されている。特に、合成開口レーダ(SAR)衛星から取得される地表画像は、昼夜や天候を問わず明瞭なデータを得られることから、災害直後における被害の全体像の把握への活用が期待されている。SAR 衛星画像の分析は、地震時における地殻変動や斜面崩壊の検出といったマクロな災害事象の検出に関する研究事例が蓄積されているほか、画像の高解像度化も進んでいることから、現在では住宅 1 棟単位での地震被害を抽出する試みもなされており、実用化に向けた抽出精度向上の研究が行われている。

そこで本研究では、地震災害直後における SAR 衛星からの取得画像の分析に対して、情報抽出の精度の高さから近年注目されている深層学習手法を適用し、地震直後における住宅構造物の被害分布を即座に把握する技術を開発することを目的とする。この技術の開発により、SAR 衛星画像からの住宅被害の抽出精度を実用的なレベルにまで向上させ、国内外における災害被害の全体像の把握を迅速化し、被災直後の応急対応の高度化・効率化を図る。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、SAR 衛星から得られる大地震直後の地表画像に対して畳み込みニューラルネットワークを適用することにより、画像から倒壊住宅を個別に判別する技術を開発することを目標とし、この技術を実装するために、(1)衛星画像と地理空間情報の統合処理による住

宅画像の抽出, および(2)畳み込みニューラルネットワークを用いた住宅画像の被害判別, という2つの項目の研究開発を行った。

(1)の項目においては, 地理空間情報データベースから住宅構造物の平面形状を構成するノード群の空間座標を抽出するアルゴリズムを実装し, 衛星画像に付与された位置座標と統合処理することによって, 個々の住宅構造物の撮影画像の検出を行った。熊本県益城町におけるデータを用いて上記処理を適用し, 100%の精度で住宅個々の画像を抽出できることを確認した。

(2)の項目においては, 震災前後の2時期の衛星撮影画像を入力とする深層学習モデルの開発, および非倒壊構造物画像と倒壊構造物画像のデータ数が均一でない不均衡な学習データに対する適切な分類器の検討を行い, これらを組み合わせた被害検知モデルを開発することによって, 従来の研究と比較しても高い検知精度を得ることができた。

(2) 詳細

研究テーマ(1): 衛星画像と地理空間情報の統合処理による住宅画像の抽出

地理空間情報から, 住宅構造物の平面形状を構成するノード群の空間座標を抽出することによって住宅の形状や位置を特定し, この情報を元に個々の住宅を個別に包含する矩形領域を設定した。次に, 設定された矩形領域に一致するピクセル群を衛星画像から抽出することによって, 個々の住宅構造物の撮影画像の検出を行った(図1)。熊本県益城町におけるデータを用いて上記処理を適用し, 100%の精度で住宅個々の画像を抽出できることを確認した。

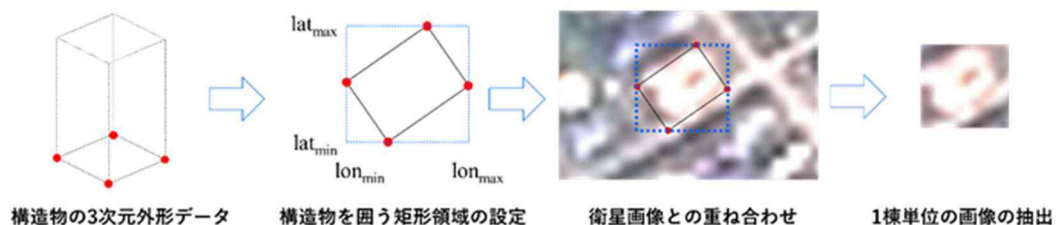


図1 住宅単位の小画像の抽出スキーム

研究テーマ(2): 畳み込みニューラルネットワークを用いた住宅画像の被害判別

地震の生じる前後2時期の光学衛星撮影画像を用いた, 時空間方向での3次元畳み込みニューラルネットワーク(3D-CNN)を適用する手法を提案し, 通常の空間方向のみのニューラルネットワークを用いる場合よりも被害判別の精度が向上する結果を得ることができた。

また, 地震被害を受けた構造物の画像に比較して, 無被害であった構造物の画像は多く取得できることを利用し, 無被害構造物の画像を多く学習データに採り入れることによって学習データの規模を増大させると共に, そのような不均衡なデータから学習を行う分類器として rankSVM を適用し, その性能を検証した(図2)。

こうした要素技術を組み合わせた被害検知モデルでは, 従来の研究で達成された被害検

知精度と比較しても十分に高い被害検知精度を達成できることを検証した(図3)。また、本研究による被害検知モデルを衛星画像に適用することにより、地域ごとの被害の大小といった被害傾向や1棟単位の被害の有無を適切に判別できることを確認した(図4)。

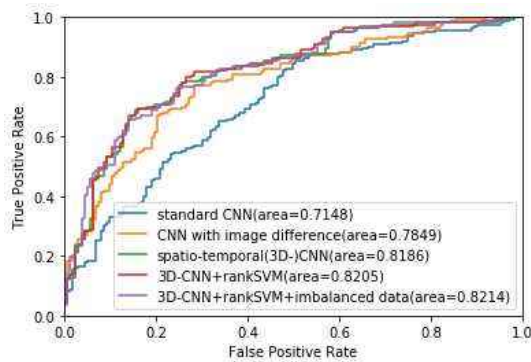


図2 ROC-AUC 指標を用いた各機械学習モデルの性能の比較

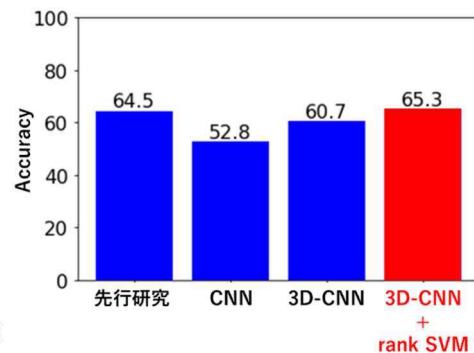


図3 SAR 衛星を用いた被害検知精度の比較

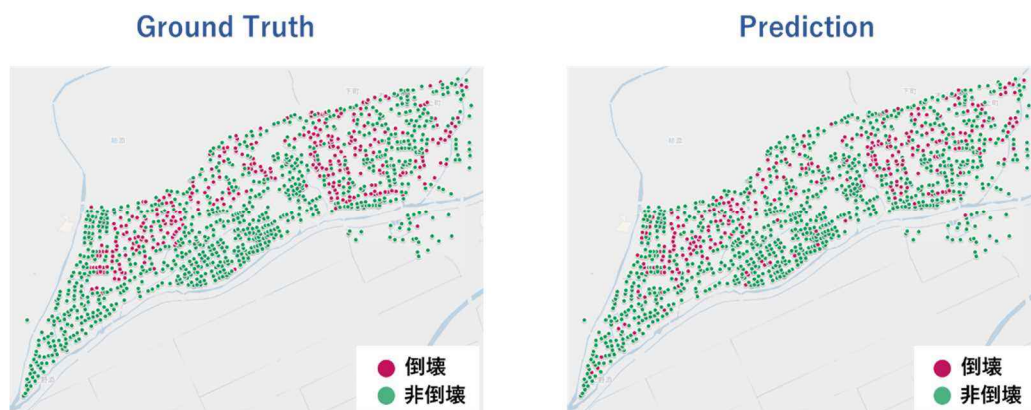


図4実際の被害分布と提案手法による被害検知結果の比較

3. 今後の展開

本研究の成果から、衛星撮影画像から地震時の倒壊構造物を検知する精度を従来水準から向上させることが出来た。このような成果は、様々なセンシングデバイスや情報処理技術を用いた次世代の防災体制を構築していく中で、基幹的な要素技術の一つとして活用が期待されるものであり、我が国や世界各国における地震被害の軽減に資することが期待される。

また学術的な観点からは、本研究での検討を通して

- ・複数の撮影画像を時系列の空間データとして取り扱うことの有効性
- ・取得の容易な多量の正常データを学習データに加えた、不均衡データからの学習による性能向上の可能性

という、衛星リモートセンシングデータを扱う上で重要な2つの着眼点を得ることが出来た。こうした着眼点を発展させることは、より高精度な機械学習モデルの構築につながると共に、時空間データの利用と不均衡データの活用という、防災工学分野における人工知能技術の発展において汎用的に活用可能な知見への手がかりになるものと考えられる。

4. 自己評価

当初に掲げた研究目的について、計画していた2つの研究項目を十分に達成することができた。特に今後の展開に記載した、時空間データの利用と不均衡データの活用という2つの着眼点は、本研究で行った検討を通して得られた当初の計画以上の成果であった。一方で、従来の研究と比較したときに、当初期待していたブレイクスルー的な精度の向上にはつながらなかったため、今後の研究ではそのようなインパクトの大きな精度向上を狙いたいと考えている。

本研究は、ACT-i 研究プログラムにおける領域会議やサイトビジット等の行事をマイルストーンとして計画的に行うことができた。特に、上記2つの行事の中で参加者間との議論を通して得られた知見を研究にフィードバックするなど、研究プログラムを活用した体制の下で本研究を実施することができた。また、研究費の執行も、当初の計画から大きな変更はなく、研究の進捗に応じて適切に行うことができた。

本研究の成果は、我が国や世界各国における地震被害の軽減につながることが期待され、社会的な意義の大きなものだと考えている。また、本研究で得られた時空間データの利用と不均衡データの活用に関する知見は、研究者の所属する防災工学・土木工学分野の諸問題に対して広く応用が可能であると考えられ、学術的な発展にも資することが期待できる。

本研究では、深層学習を始めとした機械学習モデルを衛星撮影画像の分析に利用できるよう改良して利用したが、近年の深層学習の発展性を鑑みると、より独創的なアプローチが可能であったと考えている。本問題に特化した独自の機械学習モデルの開発といった、独創的な試みと分野横断的な挑戦性は、今後の研究の中で必要になる要素であると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 宮本崇, 濱崎泰知. 光学衛星の時空間畳み込みニューラルネットワークによる地震被害の判別. 日本リモートセンシング学会第 64 回学術講演会論文集. 2018 年 5 月, pp.103-104.
2. 宮本崇, 丸山諒. 不均衡データからの分類タスクに対する rankSVM の性能検証と地震被害検知への応用, 第 65 回理論応用力学講演会講演論文集, in press.

(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. Building Damage Detection from Optical Satellite Imagery Using Time-Spatial Convolutional Neural Network, GPU Technology Conference 2018, March 2018.
2. 震災前後の衛星撮影画像を入力とした深層学習モデルによる地震被害の判別, 第 9 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム, 2019 年 1 月.
3. Earthquake Building Damage Detection Using 3D Spatio-Temporal Convolutional Neural Network and Multi-temporal Satellite Imagery, 2019 Artificial Intelligence for Natural Disasters Workshop, January 2019.

研究報告書

「システムからの通知にユーザが対応できないことを利用したセンサデータのアノテーション」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50157

研究者：村尾 和哉

1. 研究のねらい

種々のセンサを搭載したスマートフォンやウェアラブルデバイスの普及により、時間や場所を問わず人間の行動や状況をセンシングして加速度や角速度、光、脈拍、位置、電波状況、操作履歴などのデータを収集し、ネットワーク上に蓄積できるようになった。人間の行動や状況をセンシングして得られるデータは、健康管理や労働作業、医療、スポーツ、エンタテインメント、認証などの分野において、これまでは手作業や人間の勘、人海戦術で行われてきた作業の支援や、実現困難であった高度な支援への応用が期待されている。センサデータから人間の行動や状況を推定する処理は、アノテーションが付与されたセンサデータのセットを用いてユーザの行動や状況を解釈するモデルを事前に構築し、未知のセンサデータを識別する。そのため、モデルの高性能化や性能評価のために多量かつ多様なアノテーション付きデータセットが必要となる。

本研究では端末が行う通知に対するユーザの対応をもとに、そのときのユーザの行動や状況を推定することを目的とする。通知に対するユーザの応答速度や操作を数値化し、フィルタリング、特徴量抽出、機械学習を用いて事前に与えられた候補からユーザの行動や状況を推定する。推定されたユーザの行動や状況は、端末で同時に取得されるセンサデータにアノテーションとして付与される。

アノテーションは正確性が重要であるため、本人が記録して収集する必要があり、アプリで一般のユーザから幅広く収集することは困難である。現状では、少数の研究グループが公開しているデータセットから適したものを探し出すか、研究者が被験者を募ってデータを採取している。ひとつの研究グループで収集できるデータはせいぜい100名程度であり、1400万枚の画像からなる画像認識データセット Image Net と比較すると規模は桁違いである。また、画像や音声、テキストは人間が理解できるため後からアノテーションを付与できるが、加速度や地磁気、位置から状況を判断できないハンデキャップがある。一方で、端末が扱うデータの多様化、高品質化、大容量化によって、端末からユーザへの通知が絶え間なく発生し、存在に気づかない通知や無視せざるを得ない通知が出現する。私は、人間がデータを処理できないことを逆手にとり、端末からの通知に反応がないことも一種の反応であると考え、通知への対応からユーザの行動や状況を推定できるという着想を得た。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では Android 端末で発生する通知に関する情報およびセンサデータを取得してリ

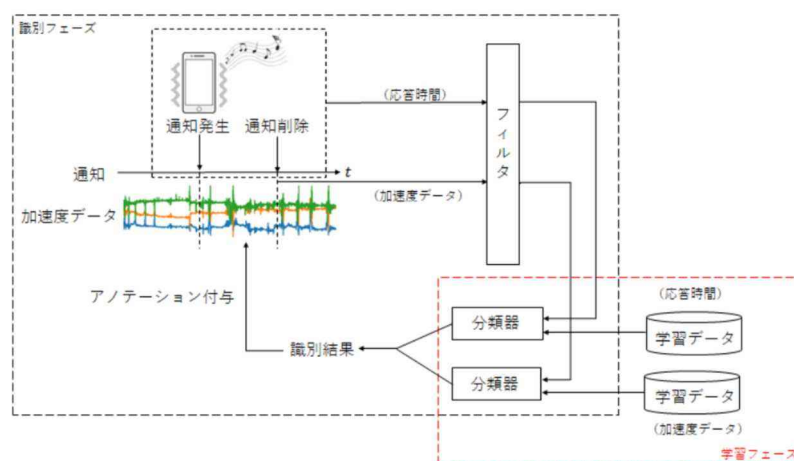
アルタイムでサーバに送信し、かつ通知を任意のタイミングで遠隔生成するシステムを構築した。また、通知発生から削除までの応答時間による状態推定と端末内の加速度センサの値を利用した状態推定を併用して、ユーザや端末の状態推定を行う手法を提案した。応答時間による状態推定結果と加速度データを用いた状態推定結果の集合和をとり、最終的な状態推定結果をおよびその結果をアノテーションとして出力するか否かを判断する。推定結果がきわめて確信度が高い場合センサデータへのアノテーション付与を行う。8種類の状態のデータを収集し、本提案手法の評価実験を行った。実験室環境の実験の結果として学習データとテストデータが同一人物の場合、適合率は平均 98.2%と高い精度で状態推定を行うことができた。また、自然(実験室外)環境の実験を行い、収集した通知の情報のうち 88%に正しいアノ

テーションが付与し、12%には確信度の高い判断が行えずアノテーションは付与されなかった[2]。

(2) 詳細

研究テーマ A「任意の通知を発生させるアプリの構築とデータ収集」

システム構成を下図に示す。事前に学習フェーズとして通知発生から通知削除までの応答時間と通知発生から通知削除までの区間の端末の加速度データを採取しておき、付与したいアノテーションの種類でラベル付けし、分類器のモデルを構築しておく。識別フェーズとして通知発生から通知削除までの応答時間と通知発生から通知削除までの端末の加速度データを取得し、応答時間が長いデータは破棄するフィルタリングを適用し、フィルタリングを通過したデータについて、応答時間と加速度データを並列して、事前に作成した分類器にかけて分類結果を得る。応答時間による分類結果と加速度データによる分類結果を合わせた識別結果の確信度が極めて高い場合のみ分類結果をアノテーションとしてセンサデータに付与する。



通知の種類、内容、通知発生時刻、通知削除時刻、通知発生時のサウンドの有無、通知発生時のバイブレーションの有無などを取得できるシステムを開発した。ユーザがもつ Android 端末内にインストールするアプリは通知のデータと各種センサデータを取得し、クラウドストレージにアップロードする。Android アプリは Firebase Cloud Messaging (FCM) の受信を可能としており、遠隔で任意の端末に任意のタイミングで、任意のふるまいをする通知を

生成できる。

研究テーマ B「状況推定手法の構築」

通知発生から通知に反応するまでの時間と通知に反応した際の加速度データから通知を取得した時点のユーザの状況を推定して、アノテーションとしてセンサデータにフィードバックする手法を提案した。通知の発生時刻と通知バーからタップにより開封される、またはスワイプにより削除された時刻の差を通知の応答時間として取得する。また、通知の発生時刻と削除された時刻の区間の 3 軸加速度データを切り出す。応答時間が長い場合、ユーザの状況を推定することは困難であるため、応答時間が 10 秒以上の場合は状態推定を行わずに破棄する。提案手法は、推定したい状態ごとに応答時間のヒストグラムを作成し、ユーザが通知に対応した際の応答時間から各状態の尤度を計算する。算出された尤度の高い状態を状態推定の推定結果とする。尤度が閾値以下である場合は推定結果なしとする。

加速度データの処理に関は Dynamic time-warping (DTW) を用いる。DTW とは、動的時間伸縮法とも呼ばれ異なる時系列の 2 つの波形の類似度を算出するアルゴリズムである。事前に収集した各状態の加速度データと実際にユーザが通知に対応した際の加速度データの距離を計算する。DTW 距離が最短のデータに付与されている正解ラベルを状態推定の推定結果とする。ただし、提案手法では DTW 距離に閾値を設定し、最短の DTW 距離が閾値以上である場合は推定結果なしとする。これは、想定している状態以外で通知が取られた場合に、偶然 DTW 距離が最短となる場合に、結果を出力しないようにするためである。

提案手法は応答時間を用いた状態推定の結果と加速度データを用いた状態推定結果から、最終的な状態推定結果およびその結果をアノテーションとして出力するか否かを判断する。応答時間を用いた状態推定結果と加速度データを用いた状態推定が共通するものをシステム全体の推定結果とし加速度データにアノテーションを付与する。

2 種類の評価実験を行った。一つ目はアノテーションを付与したい 5 種類の状態で通知反応時のデータを採取してアノテーション付与の精度を評価する実験室環境の実験であり、適合率 98.2%となった。アノテーションは付与された情報の精度(適合率)が重要である。二つ目はアノテーションを付与したい状態を考慮せずに 2 日間採取したデータに対して提案手法を適用したときの結果をみる自然環境の実験であり、通知に反応した回数の 88%に正しいアノテーションを付与でき、12%は何の情報も付与しなかった、つまり判断が困難であるため無理やりアノテーションを付与するのではなく正しく諦めている。この結果より、スマートフォンで発生する通知を取得するだけで極めて高精度のアノテーションを自動で付与できることを確認した。

3. 今後の展開

行動認識の実世界応用を見据えたときに、行動認識の基盤となるセンシング、ネットワーク、信号処理、機械学習は再利用性の高いパッケージが公開され、情報科学の進歩と共に着実に発展している。しかし、画像認識や音声認識、自然言語処理などの分野と比較して公開されているデータセットが乏しいため、システムの有効性や汎用性、頑健性などの検証が十分に行えず、行動認識を利用したシステムやサービスは社会に対して貢献できないことを危惧している。本研究の成果によって、センサデータの収集と同じコストでアノテーションも収集し、インターネットな

どを通じて誰もが容易にデータセットにアクセスできる環境を構築することで、行動認識技術の発展と普及に貢献していく。

4. 自己評価

ACT-I 研究では、スマートフォンで採取される人間行動データに自動でアノテーションを付与する手法を提案することが目的であり、その有効性を確認できたため、当初の研究目標は達成できたといえる。私は研究室を主宰する立場にあるため、独立して研究を遂行でき、研究期間中は研究補助者 3 名および所属学生 1 名と研究を実施した。研究費はすべて計画通り適切に執行した。現時点では ACT-I 研究の成果の論文等での発表は国内のワークショップ 1 件のみであるが、現時点で国内シンポジウム 1 件の投稿を完了しており、4 月中に国際会議論文を投稿する予定である。

端末やユーザが扱う情報量の増大にともない、大量の通知が絶え間なく発生することで、フラストレーションによる通知の開封率の低下や注意散漫によるユーザの生産性の低下が指摘されてきた。通知への応答速度や開封率を向上させるために、眼球運動や心電などの生体情報から認知負荷を計測して適切な通知タイミングを検出する手法があるが、ユーザに機器を装着させる必要がある。従来研究は「通知を制御」するアプローチであるが、本研究は「通知をセンサ」として着目しており、このようなアプローチは私の知る限り存在せず、新規性および独創性は高い。また、アノテーション収集はユーザとの対話的方法が基本であり、ユーザの回答率の向上、対話回数の削減、ユーザビリティの改善、半教師あり学習という観点で研究が行われてきた。これに対して、端末の通知を介してユーザの状況をセンシングするというアイデアはまったく新しいものであり、試行錯誤をとまなうことが予想される挑戦的な研究である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. L. Wang, H. Gjoreskia, K. Murao, T. Okita, D. Roggen, "Summary of the sussex-huawei locomotion-transportation recognition challenge," in Proc. of the 6th International Workshop on Human Activity Sensing Corpus and Application: Towards Open-Ended Context Awareness (HASCA2018), UbiComp/ISWC2018 adjunct pp. 1521-1530 (Oct. 2018).
2. 澤野亮太, 村尾和哉, "スマートフォンの通知の取られ方にもとづく状態認識手法の提案," ユビキタスウェアラブルワークショップ 2018, p.8 (2018).
3. 澤野亮太, 村尾和哉, "スマートフォンの通知の取られ方にもとづくユーザおよび端末の状態認識手法," 情報処理学会シンポジウム DICO2019 (2019, to appear).

(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)

- 村尾和哉, "ウェアラブルセンサによる人間行動解析," 日本バイオメカニクス学会誌 バイオメカニクス研究, Vol. 22, No. 3, pp. 131-134 (2019, to appear).
- 村尾和哉, 京都新聞コラム, 2018 年 11 月 28 日夕刊.

- 村尾和哉, 5 分で分かる ! ? 有名論文ナナメ読み : Ling, B. and Intille, S. S. : Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data, 情報処理, Vol. 60, No. 2, pp. 170-172 (Jan. 2019).
- 村尾和哉, “センサデータ処理と人間行動認識,” IEICE HPB 第 18 回研究会招待講演, 東京 (21 Feb. 2018)
- 村尾和哉, “モノの使われ方からヒトを知る”, 情報処理学会全国大会 IPSJ ONE, 福岡 (16 Mar. 2019).
- H. Yamada, K. Murao, T. Tsutomu, M. Tsukamoto, Journal of Information Processing (JIP) Specially Selected Paper (Jan. 2018)
- 山田浩史, 村尾和哉, 寺田 努, 塚本昌彦, 情報処理学会第 59 回ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 優秀論文 (Sep. 2018).

研 究 報 告 書

「水泳プール中の水の流れを3次元計測する技術の開発」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50158

研究者：山下 聖悟

1. 研究のねらい

本研究では、プールのように水中に人が存在する環境において流体計測を実現する技術を開発する。この技術は、水泳などの水中競技のトレーニング効率を向上する。例えば、水中での推進力の向上には泳者周辺の水の動きを理解することが重要であることが知られている。もし水泳プール中の水の流れが計測できれば、今までのコーチの経験に基づいたトレーニング法に加えて、推進力を数値化したデータに基づいた水泳フォームの矯正などが可能になることが予測される。しかし、既存の流体計測手法には、計測範囲の制限や人体への悪影響などの問題があった。そこで、本研究では、人体への危険性が少なく、より広い3次元空間で流体計測を行うことができる技術を開発する。流体計測には、流体に微小な粒子(トレーサー粒子)を散布し、レーザーの照射によってそれらを周囲よりも明るくし、カメラによって観測可能にすることで、水の流れを計測する手法が用いられる場合が多い。しかし、レーザー光による粒子の散乱光・蛍光を用いる既存手法には、プールのように人が存在する広域な3次元空間において流体計測を実現することが難しいという問題があった。計測範囲に制限が発生する大きな原因としては、光学系を拡大することが技術的に難しいことや、カメラから見て粒子が重なった場合、後ろにある粒子を観測することができないことなどがあげられる。また、計測環境に人が存在する場合、水中に散布された粒子による視野の妨げや、強力なレーザー光の照射や粒子の誤飲による人体への悪影響が問題となる。そこで、本研究では人体に悪影響を与えない程度の光を用いて計測用のカメラにのみ粒子を可視化することで、より広い3次元空間中の水の動きを計測する技術を開発することを目指した。また、誤飲された際にも人体への悪影響が少なく、プールの透明度への影響も少ないトレーサー粒子の開発を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、人体への危険性が少なく、かつ既存手法より広い3次元空間で流体計測を行うことができるトレーサー粒子と、その計測手法の実現を目指した。人の泳動作による水流を計測することで、水中での人の推進を妨げる抵抗の発生原因や位置等を明らかにできる。本研究の成果は、未だに明らかにされていない人の水中での推進メカニズムの解明や、より効率の良い泳ぎ方の発見などに貢献することが期待される。本研究では、人体に悪影響を与えない程度の光を用いて計測用のカメラにのみ粒子を可視化し、水の動きの計測を可能にする技術を開発する。粒子の可視化には、プール中に設置された2枚の直行する偏光角を持つ偏光板(あるいは円偏光板の対)による遮光と、その間を漂う粒子による偏光面の回転によっておこる明暗差を用いた。この光学系は、室内灯に使われる光源と同程度の光量でトレーサー粒子の可視化を可能とし、従来手法のように、やけどや失明などの人体への影響が考えられる強力なレーザー光を用いない流体計測を実現した。また、本研究では、プール中の水流計測に適したトレーサー粒子の開発を目指した。具体的には、誤飲した際に安全である素材から構成される、透明度が高く水泳者の視野を阻害しない、周囲に比べて十分に明るくなるなどの特性を持つトレーサー粒子の開発を行った。

(2) 詳細

研究テーマA「トレーサー粒子の開発」

トレーサー粒子による水の透明度の低下を防ぐためには、トレーサー粒子が無色透明で屈折率が水と非常に近い値であるか、粒子のサイズが非常に小さい必要がある。また、誤飲した際の人体への悪影響を少なくするため、トレーサー粒子は食品グレードの素材で構成される必要がある。加えて、偏光板による遮光と粒子による偏光面の回転を用いて粒子を可視化するためには、粒子が旋光性あるいは複屈折という偏光面を回転する光学特性を持つ必要がある。本研究では、これらの特徴を持ち合わせる素材について調査・検証し、トレーサー粒子のプロトタイプを開発した。まず初めに、吸水ポリマーに旋光性を持つ果糖などを含ませたトレーサー粒子について検証した[主な研究成果リスト3、図1]。成果は国際学会AH2018にてBest paper Awardに選ばれた。この粒子はプールの透明度の低下を防ぎ、かつ提案する光学系中で十分に明るくなるという特性を持っていたが、粒子径が大きく比重が水に比べて高いため水の流れに追従する能力が低いことがわかった。そのため、次に人工いくらなどとして広く扱われているアルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウムが反応した際に生成される球状の膜で構成したトレーサー粒子を提案した[主な研究成果リスト2、図2]。この粒子はそのほとんどが水で構成されているため、水と比重が近く水への高い追従性を発揮した。しかし、この粒子にはゆっくりと水の底へ沈んでしまうという特性があった。検証の結果、これらを解決する方法として、粒子サイズをマイクロあるいはナノオーダーまで小さくすることが有効であることがわかった。理由は、粒子が非常に小さい場合、終端速度が遅く水中での沈殿速度が非常に遅くなるためである。これらを踏まえて、粒子サイズが微少であっても強い複屈折を見せるセルロース微結晶をトレーサー粒子として用いてその有効性を確

かめた[主な研究成果リスト1、図3]。

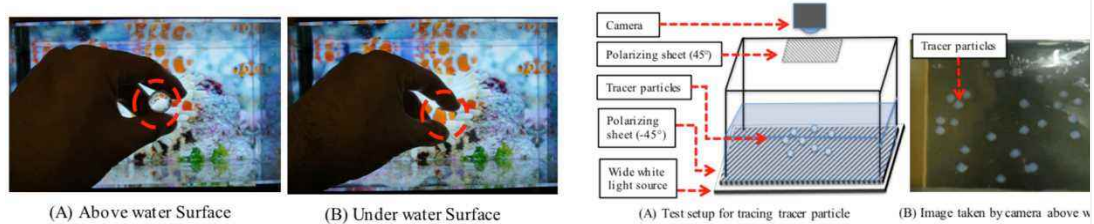


図 1 吸水ポリマーに旋光性を持つ果糖を含ませたトレーサー粒子

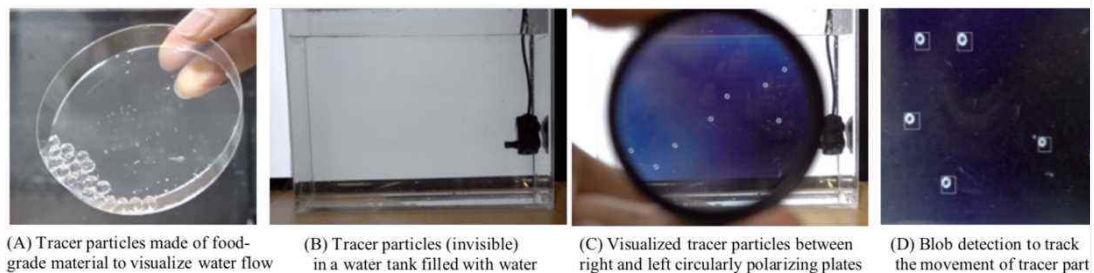


図 2 アルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウム(人工いくら)で構成したトレーサー粒子

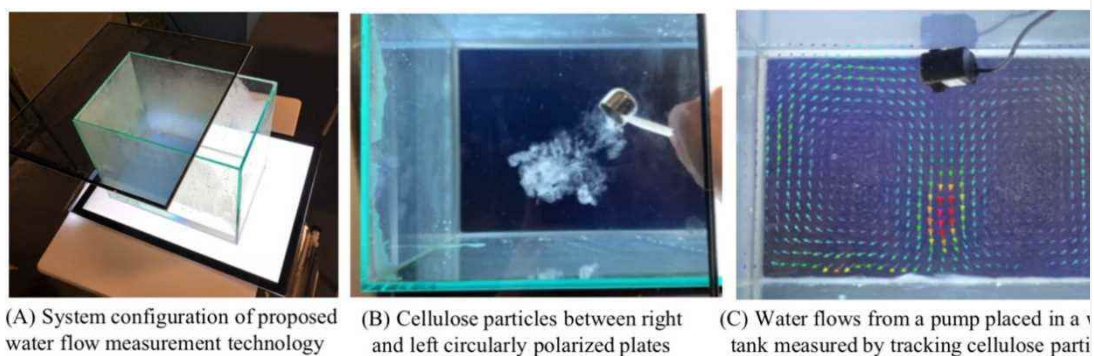


図 3 セルロース微結晶を用いたトレーサー粒子

研究テーマ B 「トレーサー粒子を計測する技術の開発」

本研究では、トレーサー粒子をカメラによって計測可能にするために偏光を用いた。直行する偏光角を持つ2枚の偏光板を重ねた場合、後部からの光が透過しなくなる遮光が起こる。2つの偏光板に挟まれた位置に偏光面を回転する能力(旋光性、複屈折)を持つ粒子がある場合、偏光板の外から見ると粒子のある位置のみが明るくなる。粒子のみが周囲に比べて大幅に明るく見える場合、カメラを用いた粒子の追跡が可能となる。本研究では、提案するトレーサー粒子に対してどのような粒子追跡手法が有効であるか検証した。結果として、流体計測に従来から使われるアルゴリズムが本光学系とトレーサー粒子を用いた場合も、ある程度有効であることがわかった。図4は粒子一つ一つの動きを追跡する PTV(Particle Tracking Velocimetry, 粒子追跡法)を用いて複数のトレーサー粒子を追跡した結果である。本研究では、熟練した泳者に大型の水槽中で泳いでもらい、スクロールによって発生した水流を計測した[主な研究成果リスト2、図5]。結果として、泳者の腕に追従するような水流と、

周辺に発生した渦状の水流が計測された。計測には PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法) を用いた。3 次元的空间中の水の流れを計測するためには、水中で撮影した際に発生する歪曲収差の解決方法や、カメラの設置方法などに関する更なる検証が必要となる。

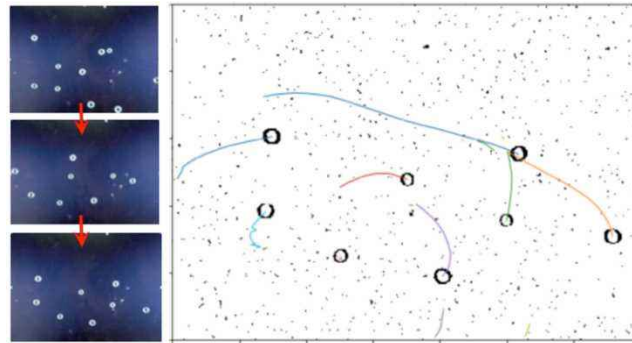


図 4 PTV(粒子追跡法)を用いて複数のトレーサー粒子を追跡した結果

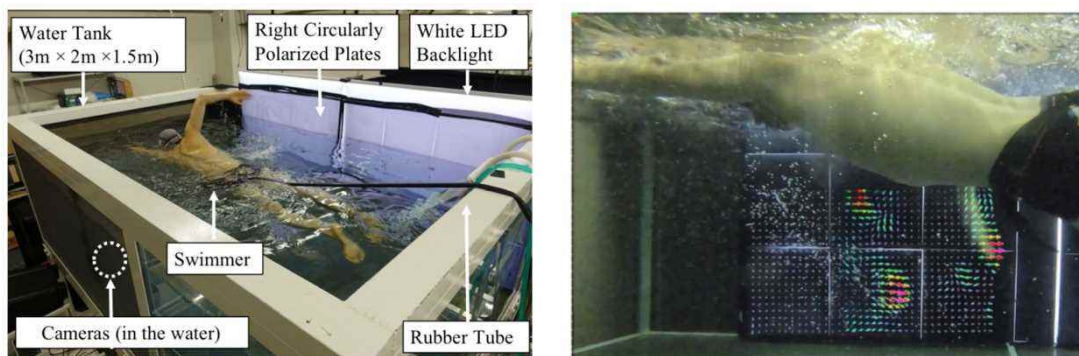


図 5 熟練した泳者のスクロールによる水流を大型の水槽中で計測した結果

研究テーマ C 「水中特有の技術的課題の解決、他領域への応用」

偏光板の設置によって付随的に解決できる水中特有の問題などについて検証した。例えば、偏光した光の照射とその反射光を用いた水中でのモーショントラッキング手法の開発[主な研究成果リスト 4]や、アクアリウムにおける問題の解決手法[主な研究成果リスト 5]などを提案した。本研究は国際学会 ACI2017 にて Best Paper Award を取得した。

3. 今後の展開

加速フェーズにおいても現在の研究課題である“水泳プール中の水の流れ 3次元計測する技術の開発”をより深めていく。具体的には、水泳、流体計測を専門とする研究者との共同研究の推進、実用性の向上を目指す。また、提案技術を学校やスイミングスクール等の一般社会においても使用可能な製品にすること目標に研究開発を行う。加えて、提案手法を他研究領域へ応用する。例えば、本技術の光学系は透明な身体を持つゾウリムシやミジンコなどを可視化することもできるため、水中微生物の行動観察に役に立つことが明らかになっている。流体だけではなく気体への応用も可能であることが予測される。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

本研究では、人体への危険性が少なく、かつ既存手法より広い3次元空間で流体計測を行うことができるトレーサー粒子とその計測手法について研究開発した。熟練した泳者周辺の水の流れの計測や、水槽中の物体周辺に発生する乱流の計測等によって、提案手法の有効性が確認された。3次元空間中での流体計測については計測可能な粒子のサイズや個数に制限があるなど、未だに技術的課題が残されている。加速フェーズでは、これらの技術的課題を解決するとともに、水泳を専門とする研究者らと共に、水泳に用いられるプールなどの実環境での検証実験を進める。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

概ね当初予定された通りに研究が実施された。検証実験のための費用が予定よりも多くかかることが予測されたため、増額措置に申請した。

・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

ACT-Iの研究期間中に、提案手法の有効性がある程度証明された。そのため、今後は開発したプロトタイプをより製品に近いものにし、他領域の研究者やスポーツ関連設備が本研究の成果を活用できるようにする。本研究成果は、他領域の若手研究者とノーベル賞受賞者が世界各国から集まる第11回HOPEミーティングにて発表された。また、本研究成果を販売することに興味がある会社等との会議や特許出願なども進めている。来年度は、提案手法のための光学系をより実用的にするために深セン(中国)などへ訪れ、製品開発を進めることを予定している。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題の進行にはスポーツ、流体計測、光学、画像処理などの複合的な知識と技術が必要である。流体計測は水中でのスポーツに関する研究にとって非常に重要であるが、流体計測技術の開発はスポーツを専門とする研究者が得意とする領域ではなかった。また、流体計測を専門とする企業や研究者は、主にエンジンやプロペラ等の開発支援を目的に研究開発を進めることが多いため、人体への安全性や広い範囲での流体計測に注力することはあまりなかった。本研究課題は、コンピューターによって人を支援することを専門とする申請者が、これらの領域の中心に入り、それぞれの問題を解決することを目指した挑戦的な課題である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Feasibility Study on Water Flow Visualization Using Cellulose Particles and Pervasive Display", The 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays(PerDis 2019), June 12-14, 2019.
2. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Water Flow Measurement for Swimmers using Artificial Food-grade Roe as Tracer Particles", The 5th International ACM In Cooperation HCI and UX Conference(CHlUXiD 2019), April 8-9, 2019
3. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Investigation of Tracer Particles Realizing 3-Dimensional Water Flow Measurement for Augmented Swimming Training", The 9th Augmented Human International Conference (AH2018), Article No. 2, 9 pages, February 7-9, 2018.
4. 山下 聖悟, 諏訪 俊一, 味八木 崇, 暦本 純一, "水泳体験を向上させる水中没入型バーチャルリアリティ環境: AquaCAVE の設計と実装", 日本ソフトウェア科学会 コンピュータソフトウェア. Vol. 35, No. 2, pp. 52-63, April 24, 2018.
5. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Jun Rekimoto, "AquaPrism: Dynamically Changing the Color of Aquatic Animals without Injury by Augmenting Aquarium", The 4th international conference on Animal-Computer Interaction (ACI2017), Article No. 11, 9 pages, November 21-23, 2017

(2) 特許出願

研究期間累積件数:

国内特許出願 1 件、優先権主張出願 1 件

発 明 者: 山下 聖悟

発明の名称: 3次元流体計測法

出 願 人: 東京大学

出 願 番 号: 2018-12298 (優先権主張出願; 2019-13324)

(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)

- Best Paper Award の受賞, AH2018 (The 9th Augmented Human International Conference), 2018 年 3 月
- Best Paper Award の受賞, ACI2017 (The Forth International Conference on Animal-Computer Interaction), 2017 年 11 月
- The 11th HOPE Meeting への参加, 2019 年 3 月

研究報告書

「廃材の適材適所システム:スキャンした枝による参加型デザインアプリおよび建築への応用」

研究期間: 平成 29 年 9 月 ~ 平成 31 年 3 月

研究者番号: 50159

研究者: 吉田 博則

1. 研究のねらい

戦後の針葉樹林化に伴い落葉広葉樹林の減少また、安価な輸入材により人工林の放置が問題となっている。広葉樹林を維持管理するには択伐による小径木や枝の処理が必要であるが、これらはチップ化され燃やすしかなかった。本研究の狙いはこれらの使いづらい多様な形状の木材を、より高付加価値を持つ家具や建築に活用できるようにすることである。落葉広葉樹は堅く密度も高いので成木だと高価だが、択伐から出る材なので安価に入手可能である。これらの材は使い方を工夫すれば、高付加価値を持つ家具や建築構造に十分応用可能である。

従来の伝統工法では経験ある職人によって材の特徴を見極める適材適所が行われていたが、人手不足や国内林業の衰退もあり今後ますますこのような材を使う機会は減っていくと考えられる。本研究では各々の材の特徴をデジタル化したデータを活用し、適材適所を誰もが実現できるワークフローを社会実装することを目指す。このようなワークフローの実現に向けて、1. 使いやすいデザインインターフェースを実現し、これらの材の需要を高める 2. これらのデザインと実際の林業から発生する枝をリンクし、生産工程に落とし込む包括的なワークフロー の 2 点に着目し開発を進めていく。

適材適所が実現されると小径木にも需要が生まれる。需要があると落葉広葉樹林に恒常的に手が入り、本来の森林の姿である適地適木にもつながる。最終目標として持続可能な循環型社会の実現に貢献したい。

2. 研究成果

(1) 概要

Act-I 期間では大きく分けて 2 つの項目を達成した。1 つは参加型デザインアプリを開発し、誰もが簡単に曲がったり枝分かれている材を使って 2 次元スクリーンを設計製作できるようにした。2 つ目は、3 次元曲面および利用可能な材を入力として、曲面に沿った枝の配置パターンを生成し、それらに利用可能な材を割り当てるシステムを開発した。どちらも枝の採取、スキャン、レイアウト設計、そして加工まで一気通貫したワークフローの開発を目指した。

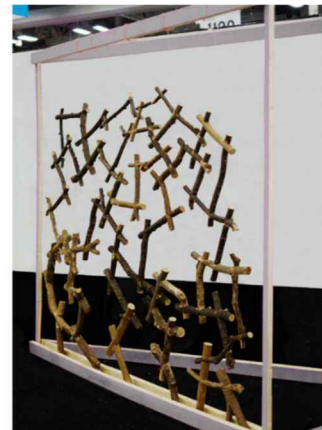
(2) 詳細

研究テーマ 1 「廃材として木の枝を用いた参加型デザインアプリの開発および検証」

廃材の利用例として、木の枝に着目し、ユーザーが自ら見つけた枝を用いて簡単に平面の壁材を設計できゲームアプリ Branch Connect を開発した。ユーザーは自ら見つけた枝をモバイルデバイスを用いてスキャンし、ウェブサイトにアップロードできる。ウェブサイトから枝のデザインゲームにアクセスできる。ユーザーはスコアと視覚効果を見ながら簡単に所定の要求を満たすようなレイアウトを達成できる。要求を満たしたレイアウトの各枝の交差部分にはラップジョイント（仕口）が自動的に設計され、2.5 軸の CNC 切削機によって加工できる。実現可能性を検証と展示会でのデモといった、2つのケーススタディを通してワークフローの実用性を検証した。成果を論文としてまとめ、TEI'19 (TANGIBLE, EMBEDDED, AND EMBODIED INTERACTION) に採択され発表した。またその成果物であるスクリーンウォールは South by South West (SXSW) 2018 Trade Show にて展示された。



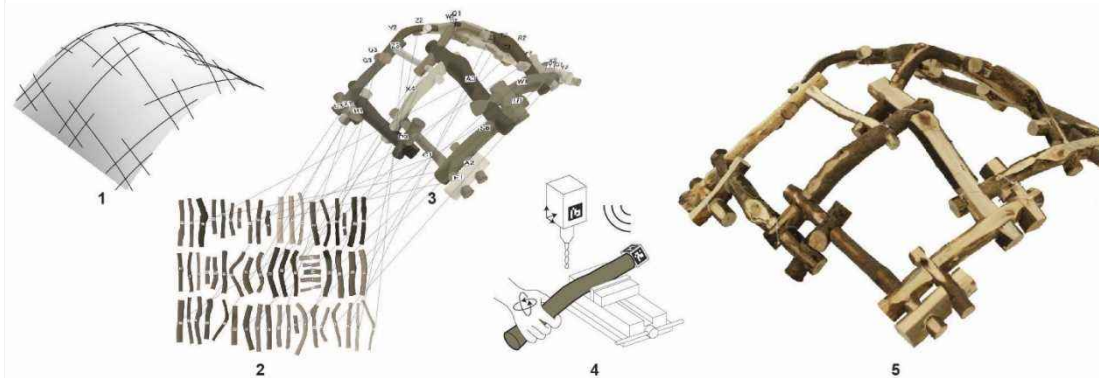
Upcycling Tree Branches through Collaborative Design and Fabrication (accepted to TEI'19)



Robotically Fabricated 2D screen wall
(exhibited at the SXSW Interactive Show 2018)

研究テーマ2 「3次元ドームの設計製作ガイダンスシステム」

研究テーマ1では2次元平面の設計に限定されていたが、本テーマでは枝の3次元形状に着目し3次元形状の設計および製作を可能にするシステムを開発し検証した。テーマ1と同じように各交差部に対して仕口を設計するのだが、3次元形状の枝に対して3次元で仕口を配置していくため、従来の2.5次元CNC切削機では加工が困難である。そこでユーザーが加工ベッドに枝を3次元的に配置する際に、性格に配置をする手助けをする音声ガイダンスシステムを開発した。



3. 今後の展開

徳島県牟岐町で 300 年以上続いている伝統的な落葉広葉樹林の管理手法である樵木(こりき)林業との協働を通じて、実際の林業で発生した小径木を高付加価値を持つ家具や建築材料に応用することを目指す。樵木林業では択伐による小径木が日常的に発生するが、用途が薪やシイタケの原木等に限られており、林業市場の縮小もありこ樵木林業の目指す持続可能な森林管理が困難となっている。そこで今回開発している適材適所システムを応用し、樵木林業とともに ACT-I で開発したシステムの社会実装を推進する。なお本研究内容は ACT-I 加速フェーズに採択されている。



徳島県牟岐町



択伐による小径木



地区で唯一の樵木の担い手

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初提案した研究テーマ 1 は達成され、さらに研究テーマ 2 につながった。

・研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

国内外での発表を通じて一緒に研究体制は整いつつある。研究費は主に加工機械や材料費および場所代として執行され、当初計画していた通り適切に処理されたと考えられる。

・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

海外ではリサイクルよりもアップサイクルという考え方が広まりつつある。リサイクルが材料を粉々にするのに対し、アップサイクルは材料をできるだけそのままの形で別の用途に用いる。ACM で Upcycle を検索してもヒットする論文数は限られるが、本研究の考え方は今後 HCI および情報学が持続可能な社会の実現に貢献する際に、重要かつ先駆的な研究例として挙げられると期待できる。また文化的にも本研究のテーマである、適材適所はそもそも日本の伝統構法から発想を得ており、日本の伝統文化の海外への発信という意味でも期待できる。参加型設計製作も結から着想しており、SNS のような情報と人をつなげる手法に実際の素材や経験を介して情報、人、モノをつなげるようなサービスに発展することが期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hironori Yoshida, Maria Larsson, Takeo Igarashi. 発表論文タイトル Upcycling Tree Branches as Architectural Elements through Collaborative Design and Fabrication 掲載

誌名 TEI '19 Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction

発行年 2019, 巻号, 始頁-終頁 Pages 589-593

, その他 Tempe, Arizona, USA —March 17 - 20, 2019

ISBN: 978-1-4503-6196-5ACM

(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):0 件

研 究 報 告 書

「時空間並列計算による高性能マルチスケール解析手法の確立」

研究期間：平成 29 年 10 月～平成 31 年 3 月

研究者番号：50160

研究者：劉 麗君

1. 研究のねらい

水素脆化は燃料電池車などのクリーンなエネルギー使用の観点から解決すべき重要課題と考えられている。しかしながら実験的研究では実験上の制約から困難が多く、数値解析に期待が集まっている。そこで本研究では、水素脆化のメカニズム解明に向けて、反応分子動力学計算とマクロスケールの有限要素解析を連成させる高速なマルチスケール連成計算手法を新たに開発することを目的とする。高速計算を行うにあたり、従来通りのモデルの空間分割による並列計算だけでなく、時間領域の分割も併せて実行し、時間と空間の両側面で分割した時空間ハイブリッド高速計算の概念を新たに導入することが新規点である。これにより大幅な計算時間の短縮だけでなく、マルチスケール計算の難点である時間スケールの違いも克服することができる。今回提案した計算手法は水素脆化のみならず、任意の材料物性解析、またその材料を巨視的に用いた場合の解析を一貫して行うことが可能となる。そのため材料開発から企業の製品開発まで、計算力学的手法による材料の評価やスクリーニングが可能となり、科学技術の進展に大きく寄与する計算プラットフォームを提供すると考えられる。よって、水素脆化などの様々な材料力学的諸問題を解決できるツールを提供しうる点で産業応用上も非常に価値の高い研究であると位置づけられる。さらに本計算スキームを未だ解明されていない水素脆化メカニズム調査に応用することで、真の水素脆化メカニズムが明らかになるインパクトは将来の低炭素化社会実現に向けて大きなマイルストーンとなるものである。またこれまで研究開発分野で用いられてきた空間分割のみの解析手法から脱却した、空間だけでなく時空間分割の概念を導入したマルチスケール連成解析手法は、従来の空間分割のみの高速計算手法に比べて、大幅な計算時間の短縮を可能とする点で学術的に意義深いと考えられる。

2. 研究成果

(1) 概要

連続体力学と分子動力学計算を組み合わせた低計算コストかつ高精度を同時に実現させるマルチスケール計算ツールを創出するために、線形方程式を解く高速数値計算手法を提案した。収束しにくい線形問題に対して提案した COMINRES-QLP は優位性を示した。既存の手法で解けない問題も解けるようになった。多倍長精度を利用した提案手法は既存手法より反復回数 77%、計算時間 62%の削減を達成した。

また、水素脆化メカニズム解明意外にも水素脆化を防止するためのグラフェン水素不透

過構造を提案し、分子動力学シミュレーションによる検討をおこなった。欠陥無しグラフェンの場合、水素バリア効果を確認した。点欠陥を導入した場合、水素は欠陥部分にトラップされた現象も観察でき、新たな応用可能性もあることを示した。

さらに時間並列計算に関しても、新規計算手法のアイデアを見いだした。軌跡をセグメントに分解することにより時間方向の並列化を実現し状態(States)のラベリングにより終了と開始状態がマッチングするセグメントの連結を実現する。開始状態を予測することにより並列性能を向上することが予想されており、本アイデアは引き続き ACT-I 加速フェーズにおいて継続検証をすすめていく。

(2) 詳細

高速線形方程式ソルバーの開発

複素対称線形システムをいかに効率良く解くかは、材料力学だけでなく電磁気学、音響学、量子力学などの幅広い用途において非常に重要な問題である。例えば、電子デバイスの設計や品質管理の過程において、電磁場解析を行う際、有限要素法を使用した数値モデルの離散化は複素対称線形システムをもたらす。そのため、複素対称線形システムを解くための効率的な数値解法が求められている。今回マルチスケールシミュレーションを行うに辺り、分子動力学計算と有限要素解析の融合により、大規模な系での計算時間の大幅な増加が問題点であったため、新規高速線形ソルバー開発を行った。

本研究の計算方法の詳細と他手法との比較検討結果は投稿論文[電気学会論文誌(2019/2 投稿済)]にまとめられ、発表予定である。概略だけ説明すると、共役直交基底を構築するための Lanczos 法を採用し QLP 分解を適用する COMINRES-QLP 法を新たに提案した。本手法ではこれまでの経験により相対許容残差を設定する収束判定則ではなく、行列の条件数を推定し、その影響を考慮した収束判定則も新たに提案している。条件数が大きい(解にくい)複素対称線形問題に対して、同程度の相対誤差が得られた時に、COMINRES-QLP 法の反復回数は COCG 法の約 70%であることがわかった。計算時間についても COCG 法と比べ計算時間も約 70%まで削減することに成功した。(表 1)これより、悪条件問題において高い精度の近似解を得る場合は特に提案手法の優位性が高いことが分かった。

COMINRES-QLP 法は複素対称線形システムだけでなく、微小非線形システムにたいしても優位性を示した。図 1(a)に示したように、既存手法 COCG 法が解けない問題に対して収束するようになった。

さらに、多倍長精度の QMR-SYM 法も開発した。図 1(b)は倍精度、混合精度、倍々精度、可変精度の倍々精度から倍精度の変換、可変精度の混合精度から倍精度の変換を用いた結果を示した。悪条件問題に対して、同レベルの精度の解を得るために、高精度計算手法の有効性を示した。

表 1 線形方程式における提案手法と既存手法の計算性能の比較

Method	# of iter.	Time(sec.)	Relative error
COCG	10172	1442.06	0.0047
COMINRES-QLP	6966	1056.49	0.0047

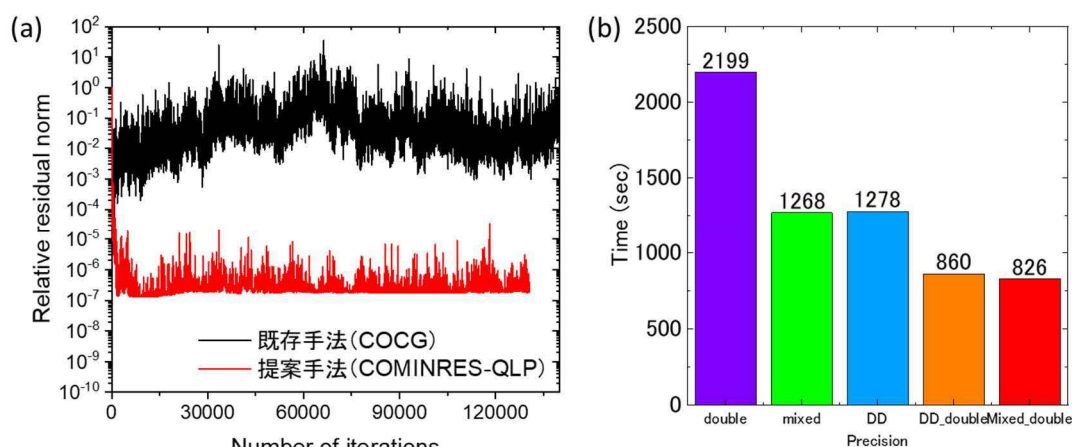


図 1(a) 既存手法と提案手法の収束性検証結果 (b) 各精度における計算時間比較結果
グラフェンによる水素不透過構造の検討

グラフェンは機械強度、電気伝導度に優れる材料だが、近年酸素の侵入を防いで金属の酸化を防止したり[S. Chen et al., *ACS Nano*, **5** 1321 (2011)], He 以上のすべての原子の透過を防ぐことが報告[J. S. Bunch et al., *Nano Lett.*, **8** 2458 (2008)] されている。そこで本研究では、水素ぜい化の未然防止の目的でグラフェンの水素不透過性について反応性分子動力学による解析を行った。具体的には分子動力学シミュレーター(LAMMPS)の使用環境構築を行った上で、まずは鉄中に欠陥を模擬した系を水素雰囲気中に配置して、鉄中の水素拡散解析を行い、水素による鉄のぜい化の検証を行った。その結果、鉄中の欠陥周辺に水素が集まり、強度が約 20%程度低下することを確認した。

さらにグラフェンを鉄の表面に配置したものと同様の系で、水素の侵入の有無を調査するシミュレーションを行った。グラフェンの欠陥密度は実験で作製される欠陥密度(10^{10} - 10^{13} 個/cm²)を模擬するため、以下 3 条件で計算を実施した。欠陥無し 10^{12} 個/cm² (欠陥 0.1%) 10^{13} 個/cm² (欠陥 1%) 計算結果の一部を図 2 に示す。欠陥の無いグラフェンでは、圧力 60MPa 計算時間 1ns の範囲において、水素バリア効果があることがわかった。(図 2(a))

グラフェンの欠陥密度依存性の計算結果から、欠陥がある場合は、水素は欠陥部分にトラップされる減少を確認した。(図 2(b))

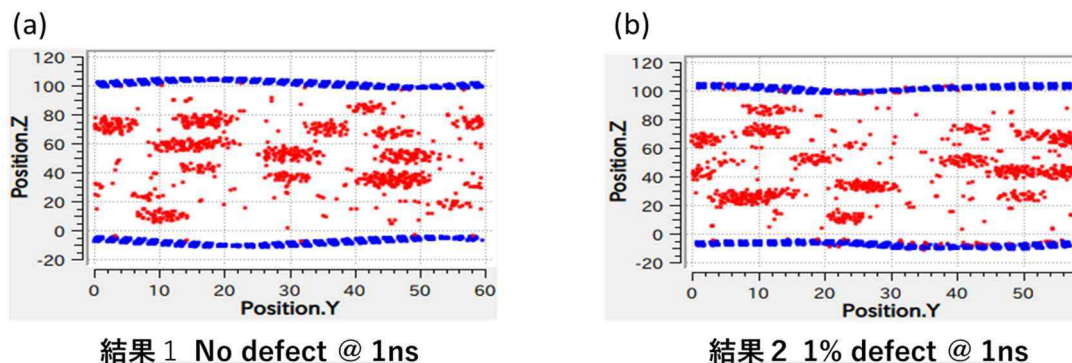


図 2 反応性分子動力学法によるグラフェンの水素透過シミュレーション(1ns 計算時間経過)

後)

(a) 欠陥無しの場合 (b) 欠陥 1%導入の場合

3. 今後の展開

本研究テーマである高性能マルチスケールシミュレーションに関する研究は、計算主体の超高速研究開発を行うことができるため、社会的波及効果が大きい。さらに空間並列計算、時間並列計算については情報学の分野における基礎研究の側面も強く、高精度かつ高速な計算手法の学理を探究できる点でも意義深い。今後は、今回対象とした水素ぜい化だけでなく、電子デバイスや結晶成長、鉄鋼材料分野など幅広い分野で使用される汎用性の高いシミュレーターへの応用展開も視野に入れた研究に取り組んでいく。情報学の知識をフル活用して工学の知識と融合させることで幅広い分野で使われるシミュレーターを創出することで世の中に研究成果の形で社会還元して貢献していきたい。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

マルチスケール計算を行うための有限要素解析と分子動力学解析のカップリングコード開発において Prof. G. Queisser (Temple Univ., USA) との国際共同研究を開始できている。現在大まかな連成コード開発が終わり、詳細のすりあわせを行っている段階である。隔週での打ち合わせにより強固な連携関係を築けており、ACT-I 加速フェーズにおいて本カップリングコードのプロトタイプ版開発を完了させる予定である。

空間並列計算に関しては、新規線形ソルバー (COMINRES-QLP) 法を開発し、既存のどの手法よりも計算精度・計算時間削減の点で優位性を示すことができた。成果は国内の学術雑誌に投稿済み、国際論文誌に関してはデータを追加している関係で投稿が遅れているが、2019 年前半での投稿予定である。

時間並列計算に関しても新規計算手法をアイデアとして提案し、現在コーディングを進めているところである。機械学習を採用した手法でまずは機械学習向け PC 環境構築を ACT-I 加速フェーズにおいて進める計画である。

上記以外にも空間並列計算手法の成果を応用して Prof. J.-L. Bredas (Georgia Tech., USA) との有機半導体デバイス向け的高速電磁場解析シミュレーター開発や、研究代表者 chair となった国際ワークショップ開催など、研究代表者の今後の国際飛躍につながる成果を創出することができている。

研究の進め方(実施体制、研究費執行状況)

2018 年 7 月に名古屋大学(研究員)から大阪大学(特任助教、2019/4 より助教)に異動した関係で、予想以上に新研究環境構築と教育業務の負荷が大きく、論文執筆などの点で遅れが見られた。しかしながら新しい研究環境に移ったことで、固体力学の専門家などが身近にいる研究環境に身を置くことができ、新規研究テーマにも着手できている、多くのメリットも享受できている。

今後は助教の身分のため、引き続き学生の補助はなく代表者 1 名での研究となるが、今後は 1 年半の ACT-I の成果を国際学術雑誌にまとめていき、成果報告を迅速に実施する予定である。

研究費執行に関しては通常の予算配分による研究環境構築・成果だしを行った。2018 年度後

半の追加予算配分によって、Prof. G. Queisser (Temple Univ., USA)との国際共同研究を迅速に進めることができています。さらに国際学会発表も行うことができ、効果的に研究費を執行することができ、追加予算による研究への効果は非常に実りの多いものとなった。

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

本研究テーマである高性能マルチスケールシミュレーターの創出により、計算主体の超高速研究開発を行うことができるため、社会的波及効果が大きい。さらに空間並列計算、時間並列計算については情報学の分野における基礎研究の側面も強く、高精度かつ高速な計算手法の学理を探究できる点でも意義深い。

今回対象とした水素ぜい化だけでなく、電子デバイスや結晶成長、鉄鋼材料分野など幅広い分野で使用される汎用性の高いシミュレーターを開発することで世の中に研究成果で貢献していきたい。

研究課題の独創性・挑戦性

従来の空間並列計算に加えて、時間並列計算手法を導入した点に独創性があり、新規点である。さらに空間並列計算自体も従来よりも大幅に高精度で高速な計算を可能にする線形ソルバー開発に成功している。情報学の知識だけでなく、固体力学やなどの工学分野の知識融合した分野を横断型の学際的な本研究は、産業応用上価値が高いことに加え、高い挑戦性がある。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Koki Masui, Masao Ogino, and **Lijun Liu**. Multiple-precision Iterative Methods for Solving Complex Symmetric Electromagnetic Systems. Accepted by Lecture Notes in Computational Science and Engineering. (Accepted)

(2) 特許出願

特になし。

(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]**Lijun Liu**, Katsumi Hagita, Jun Hirotsu, A reactive molecular dynamics study of graphene as a protective barrier against hydrogen embrittlement, *Proceedings of the 9th International Conference on Computational Methods*, Rome, 6-10 August, 2018.
- [2] **Lijun Liu**, Masao Ogino, Kazuaki Sekiya, Mixed Precision Iterative Methods for Complex Symmetric Systems, *Proceedings of the 13th World Congress on Computational Mechanics/2nd Pan American Congress on Computational Mechanics*, New York City, 22-27 July, 2018.
- [3] **Lijun Liu**, Masao Ogino, Iterative Substructuring Methods for Solving Large-scale Complex Symmetric Linear Systems in Electromagnetic Field Analysis, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems*, Chengdu, China, 15-18 October, 2017.
- [4] 劉麗君, 萩野正雄, 榎井晃基, 複素数対称システム向けの多倍長反復法の開発, 第23回計算工学講演会, ウィンクあいち, 2018年6月6日-6月8日