

# 研究報告書

## 「多階層感染症伝播モデルの構築と流行予測への応用」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：浅井 雄介

### 1. 研究のねらい

近年、生命科学分野の発達により、新興ウイルスを検出するゲノムシーケンスの解析技術や、迅速診断技術が生まれ、さらに新たな薬剤・ワクチンの開発と治療デザインの最適化など、より効果的な医療政策の施行が可能となった。また、統計科学、計算機科学の発展により、感染症の流行予測も実現しつつある。その一方で、現代では国をまたがる貿易も多く、航空機によるヒトやモノの移動が活発化しており、この移動に付随し、遠い外国の感染症が日本に持ち込まれる輸入例も多発している。環境変動の影響による生態系の変化も感染症の拡散を促進しており、事実、今まで出会ってこなかった未知の細菌やウイルスとの接触も増加傾向にある。感染症は公衆衛生上大きな問題であり、感染症の輸入や輸出から見られるように、世界経済上で大きな負担となり続けている。

ウイルス感染から細胞内での増殖を記述するウイルス動態モデルや、感受性人口と感染者の集団、免疫保持者の集団の相互作用を記述した SIR (Susceptible-Infected-Recovered) モデル、また各国における航空ネットワークとヒトの移動量を用いた感染症の輸入時刻の推定など、感染症伝播の仕組みの解明や医療政策の効果推定ために、様々な研究がなされてきた。一方で、ウイルスと細胞、ヒトとヒト、ヒトの移動と各国での感染症流行は、お互いが密接に関わっているものの、現在までこれらの現象を統合し、一つのモデルとして取り扱う枠組みは構築されてこなかった。そのため、投薬の効果と移動制限といった異なるスケールへ介入する医療施策の効果の比較は不可能であった。

感染は、体内でのウイルス産生と感受性人口への接触により拡大していく。本研究では、ウイルス動態モデルとヒト-ヒト感染を結合した多階層モデルを構築し、ウイルススケールの変化がヒトスケールにどのような変化をもたらすか定量的な解析を行う。特に確率過程を伴う微分方程式により感染者の体内での異質性や感受性人口との接触における非均一性を記述し、投薬によるウイルス産生の抑制、ワクチンによる効果、感染者の隔離、移動制限の4つの医療政策が、最終的な感染者数にどのような影響を与えるかシナリオ分析を行い、より効果的な医療政策の施行と最適な施行時期を特定する。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

医療政策を講じる上で、感染規模の予測や重症化の推定は不可欠であり、この推定には地域の人口構造やワクチン接種の有無による影響を加味する必要がある。そこで、2017年度の AIP チャレンジの目標として、各地域の年齢・免疫獲得状況といった人口属性と各年齢階級別の接触確率を統合し、地域ごとの感染症伝播リスクマップの構築を掲げた。さらに、構築したリスクマップを基に、各都道府県間の交通ネットワークと移動するヒトの総数で各都市を

結ぶことで、国内への感染症患者が輸入された場合に、何日後に各都市に感染症が到達するのか、地域ごとの感染症輸入リスクの定量的評価を行った。

結果、地理的に遠い都市でも、北海道のように他都府県とヒトの行き来が多い場合では、感染症が伝播しやすいことが確認できた。また、接触制限を講じた場合のシナリオ分析では、20-40歳への5%の接触制限では、1/3、60歳以上では1/2まで感染者数が下がることが示唆された。

## (2) 概要

2017年度のAIPチャレンジでは、ある国で感染症の流行が起きたという仮定の下、日本の各都道府県の年齢構造と各年代に属する人口の他地域への移動確率に焦点を当て、各都道府県における感染症輸入確率を算出した。さらに、年齢階級別の接触確率を用いて接触制限による効果推定を行った結果、移動の多い中年層への制限が感染拡大を抑制することが明らかとなった。年齢構造を実装したモデルにより、医療政策のターゲットとなる集団が特定できたが、各感染者の異質性は考慮せず、同質である仮定していた。

2002年のSARSの流行では、感染者の体内でウイルスが爆発的に増加し多くの2次感染者を出すのに至ったのに対し、2015年の韓国でのMERSの流行では、感染者が複数の医療機関を受診することで2次感染者が増加した。さらに、HIV/AIDSでは、体内のウイルス量と感染力に正の相関があることが知られている。これらの事実から、感染症流行予測を行う上では、感染者の特異的な行動や、感染力をウイルス量による関数としてヒト—ヒト感染のモデルに実装することが不可欠であることがわかる。そこで本研究では、ウイルスの体内動態とヒト—ヒト感染という2つの異なるスケールを統一的に扱う多階層感染症伝播モデルを構築した。このモデルにより、移動制限といったヒトスケールへの介入の影響評価だけでなく、ウイルス量の変化が最終的な累積感染者数に与える影響を評価することが可能となった。

構築したモデルは、時間の遅れと確率過程を伴う微分方程式により記述されているが、この2つの要素を同時に扱うことの可能な数値計算法は十分に議論されていない。そこで、本研究では、数値実験を行うための数値計算法を新たに構築し、任意の収束次数を満たすことを証明した。さらに、ウイルス動態モデルを用いてシミュレーションを行い、決定論的モデルや時間遅れのないモデルに比べより現実に即した数値実験が可能となることを確認した。

感染者の体内でのウイルス産生や細胞の増殖率、またヒト—ヒト感染における感受性人口と感染者の接触確率を確率過程で記述することで、モデルに異質性を持たせた状態で、医療政策の効果推定を行った。本研究では特に、投薬によるウイルス産生の抑制、ワクチンによる感受性人口の保護、感染者の隔離、移動の制限といった4つの医療政策を考え、それぞれの政策開始時期を変化させつつ、シナリオ分析を行い、累積感染者数の比較を行った。

## (3) 詳細

### 課題1「不確実性を加味したウイルス動態モデルと感染症伝播モデルの構築」

従来の研究では、ウイルス動態とヒト—ヒト感染の動態は独立したモデルとして記述されてきた。一方で、ウイルス量は感染力と正の相関があることが知られており、より精度の高い感染症流行予測を行う上では、これらの異なるスケールを統一的に扱う多階層モデルが不可欠

である。また、今まで多くの現象が決定論的モデルにより記述され、感染者体内の異質性や感受性人口と感染者の接触の非均一性が反映されてこなかった。そこで本研究では、この異質性を確率過程の形で微分方程式に実装した。確率を伴う微分方程式の中でも、確率微分方程式は長い歴史があり、様々な分野で利用されている。本研究ではまず確率微分方程式によるモデル構築を行った。しかしながら確率微分方程式では、ウイルス量が低い場合に負の値が生じてしまい、結果として解の振動が見られた。そのため、ランダム微分方程式に幅を持った確率過程を実装、この非負性の問題を解決し、極端にウイルス量が少ない場合など様々なシナリオ下で数値実験可能なモデルを構築した。

本研究では、インフルエンザウイルスの動態に加え、HIV および C 型肝炎ウイルス (Hepatitis C virus, 以下 HCV) の動態もランダム微分方程式を用いて記述した。インフルエンザウイルスでは、感染から数日でウイルス量のピークを迎え、7 日から 10 日で感染者の体内からウイルスが除去されることが知られている一方、HIV や HCV では、細胞の感染年齢によりウイルスの生産量が異なることが知られている。感染細胞に年齢構造を入れ、RNA のコンパートメントを感染細胞内に組みこんだ多階層モデルを構築し、基本再生産数 (一人の感染者が全感染期間において生み出す二次感染者数の期待値) を解析的に導いた (業績 2)。さらに、臨床研究・先行研究により得られた HIV、HCV およびインフルエンザウイルス動態が構築したモデルにより記述されることを確認した。

## 課題 2「シミュレーションのための数値計算アルゴリズムの構築」

薬剤の投与といったウイルス動態への介入や、移動の制限といったヒト-ヒト感染モデルへの介入は、その効果が時間の遅れを伴って現れる。そのため、時間の遅れを取り扱うことの可能な数値計算法が不可欠であるが、時間の遅れを伴うランダム微分方程式の数値解析法は存在しない。一般に、数値計算法は解を Taylor 展開し、任意の次数以下の剰余項を省くことで得られる。一方で、ランダム微分方程式の数値解法では、解の微分可能性から従来の Taylor 展開による数値解法の構築は困難である。本研究では、導関数により記述される増分を Taylor 展開し、積分下に現れる導関数を低い収束次数の近似式で記述した。近似式を入れ子の形で外挿していくことで、微分可能性の問題を解決し、任意の収束次数の数値解法が構築できることを示した (業績 1)。

構築した数値解析法を細胞の感染からウイルス産生までの時間遅れを加味したモデルに応用、解の振動が起きないことを確認、また与えられた収束次数を満たすことを示した。

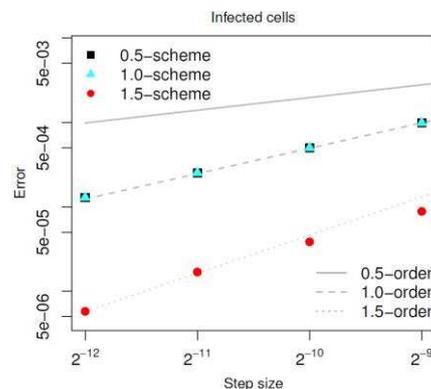
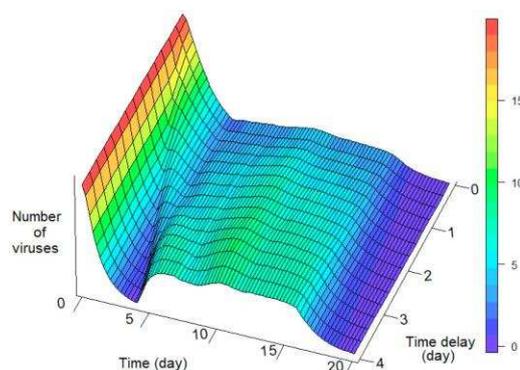


図1. 左:細胞の感染からウイルス産生までの時間遅れとウイルス量の経時変化. 遅れのない状態(奥)と遅れのある状態(手前)でウイルス量が大きく異なる. 感染力を算出するにあたり, 現実に即した遅れを実装することが不可欠であることがわかる. 右:数値計算におけるステップ幅と誤差の関係. 0.5 および 1.0 次の数値計算法は 1.0 次の収束, 1.5 次のものでは, 1.5 次の収束を満たしており, 与えられた精度を満たしていることが確認できる.

### 課題3「構築したモデルによる感度分析とシナリオ分析」

細胞の増殖率は感染者の日内変動による影響を受ける. また, ウイルスの生産量は一定ではないことが知られている. これらの異質性を加味するため, 高い増殖率と低い増殖率の2値を取る確率過程と, ある有限の幅を持った確率過程を各パラメータに実装した. さらに, ヒト-ヒト感染では, 感受性人口と感染者の接触確率は一定ではなく, 感染症から回復するスピードも感染者によって異なる. これらのパラメータも確率過程により記述し, ヒトスケールでの異質性を持たせた.

インフルエンザの流行が起きたと仮定し, 医療政策として, 投薬によるウイルス産生の抑制, ワクチンによる感受性人口の保護, 感染者の隔離, 移動の制限といった4つを考えた. 投薬によるウイルス産生の抑制では, 薬剤によるウイルス産生の抑制を15%とし, 投薬開始時期を感染から1, 3, 5, 7, 9, 11日後, ワクチンによる感受性人口の保護では, 単位時間あたり5%が保護されると仮定し, 流行開始から1, 5, 9, 13, 17, 21日後にワクチンを開始するというシナリオを設定した. 感染者の隔離では, 感染してから1, 2, 3, 4, 5, 6日後以降の感染者の隔離を設定し, その隔離の割合は単位時間あたり5%, 移動の制限では同じく5%が移動を制限されると仮定し, 制限の開始日は1, 5, 9, 13, 17, 21日後に設定した. シナリオごとにモンテカルロシミュレーションを行い, 総人口1000人中の累積感染者数を求めた.

投薬による介入では, 全てのシナリオで累積感染者数の中央値が800以上という結果が算出されたのに対し, 感染者の隔離やヒトの移動制限では, 1日目での中央値が1.0および12.9, 2日目では1.0および29.4と低い値の累積感染者数が算出されたが, 3日目以降では198.6および172.1, 4日目では915.8および467.6とほぼ全数および半数が感染するという結果が得られた. 一方で, 段階的にワクチンを投与していくシナリオでは, 5%のワクチン接種でも, ワクチン開始が流行から1日目だった場合は19.7, 5日目の場合は70.7とより多くの人口が保護されることが示された.

感染して1日目および2日目の感染者の隔離の効果非常に高いことが明らかとなったが, 感染から2日から4日目で症状が出ることを考慮に入れると, 感染者の隔離は難しい. 実際, 4日目以降の感染者の隔離ではほぼ全ての感受性集団が感染していることから, 医療政策としての隔離が現実的であるとはいいたが, 移動制限についても同じことがいえ, 流行開始後3, 4日以内の施行は難しく, 時期が遅れるとほぼ全ての人口が感染することがわかる. 他方, ワクチンによる保護は, 継続的なワクチン接種は必要であるものの, 流行開始から9日目の施行でも, 累積感染者数が279.3と他の医療政策よりも多くの感受性人口の保護が可能であることが明らかとなった. 投薬によるウイルス産生の抑制では, 15%の抑制では十分ウイルス量を減らせず, 感染力を抑制することは困難であり, 大流行を起こす可能性があることが数値実験により明らかとなった.

### 3. 今後の展開

本研究では、異なるシナリオ下でシミュレーションを行い、医療政策や医療政策介入時期の違いにより、累積感染者数を比較した。その結果、ワクチン接種が効果的であり、施行開始時期が流行開始から10日以降でも感染症流行抑制に大きく寄与することが示された。感染者の隔離では、感染してから3日目以降の感染者の隔離では流行を抑制することはできず、感受性人口の大部分が感染していることが確認された。インフルエンザでは、潜伏期間が2日から3日間であり、医療機関で診断を受けた時点ではほぼ感染から4日から5日経っている状況である。隔離を開始する前に大勢の2次感染者を出していることが本研究の結果から示唆され、流行拡大を阻止するためには、隔離という政策ではなく、自発的な行動の制限(調子が悪いと思ったときは他人との接触を避けるなど)の予防対策が有効であることがわかる。

本研究では、インフルエンザを例に投薬、ワクチン接種、感染者の隔離、移動制限という4つのシナリオ下での数値実験を行ったが、ワクチン接種と移動制限など複数の医療政策を同時に施行するというケースも考えられる。また、感染性の高い感染症におけるシナリオ分析、またヒト—ヒト感染ではなく動物や昆虫が媒介する感染症への応用は今後の課題である。異なる感染の仕組みを持つ感染症についても、ウイルス・細菌の増殖メカニズムやヒトや媒介生物のコンパートメントを数理モデルにより記述し数値実験を行い、累積感染者数を比較することで、様々な感染症における医療政策の効果や介入時期の最適化が議論できるようになる。

さらに、本研究で構築したモデルを、ヒト—ヒト感染およびヒトの移動のモデルと統合することで、各集団、つまり国や街、さらにその内部における免疫獲得割合や年齢構造といった各人口属性における流行予測へと拡張できると考えている。

2018年10月、アメリカ疾病対策センターから予防接種や過去に感染歴のない妊婦の訪日を控えるよう勧告が出された。2019年より、風疹の公的予防接種を受ける機会がなかった世代への定期接種が始まる。しかしながら、集団免疫を獲得するまでにはまだ時間が必要だと考えられ、今後、日本が感染症の輸出国になる可能性も否定できない。本研究を麻疹や風疹、ヒトパピローマウイルスはワクチン接種により感染を防ぐことが可能である。本研究の手法を異なる感染症流行予測に応用することで、ワクチンによりどれだけヒトが助かるかを算出でき、医療費の抑制だけでなく、経済的な損失も防ぐことが可能になると考えられる。

### 4. 自己評価

#### 【研究目的の達成状況】

多階層感染症伝播モデルの構築、数値実験に用いる数値計算法の構築、さらに異なる医療政策の効果と医療政策の介入時期の判定の3つの課題は達成できたと考えている。一方で、インフルエンザやHIVといった限られたヒト—ヒト感染による伝播のみを扱うモデルによる結果であり、異なる感染ルートを持つ感染症流行では、異なる結果が得られることが予測される。媒介生物を介した感染症や麻疹など感染力が非常に高い感染症、さらにノロウイルスなど環境に起因する感染症のモデル構築と数値実験までは到達できなかった。

#### 【研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)】

研究の進め方については、おおむね予定していたとおりに進めることができた。

研究費として人件費を計上していたが、統計ソフトや数学ソフトの使用により、人件費の節約が可能となった。本研究は、疫学や数値解析だけでなく、ウイルス動態や公衆衛生といった幅広

い分野にまたがる知識が必要であった。人件費を旅費や学会参加費として使用することにより、理論疫学・数理生物学分野以外の研究者と交流ができ、そこで得た助言が本研究には多いに役立った。

#### 【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】

本研究では、4つの医療政策を累積感染者数という指標を用いて直接比較を行った。投薬の効果や感染者の隔離の割合など、パラメータ値は文献によっていたため、本研究の結果を直接政策に応用するには壁があると考えている。しかしながら、本研究で構築したモデルと数値計算法は異なる感染症にも応用可能であり、今後、より現実的な設定でシナリオ分析を行うことで、ワクチン接種の開始時期の見積もりや、移動制限を行う人口の割合算出など、医療政策を議論する上で指標となる数値を提供することができると考えている。

#### 【研究課題の独創性・挑戦性】

異なるスケールをつなぎ合わせ、現象を解析する研究は、ガン細胞の増殖モデルなど近年盛んになってきているが、ウイルス動態とヒト-ヒト感染、特に年齢構造や異質性を考慮に入れたモデルはまだない。本研究により、投薬というウイルススケールへの介入と、感染者の隔離や移動制限といったヒトスケールへの医療政策が、累積感染者数という指標を用いて直接比較することが可能となった。異なるスケールへの医療政策の効果比較はいままでなされておらず、新しい研究だと考えている。一方で、用いたパラメータ値は文献によるものが多く、必ずしも一般化できるわけではない。感染症の流行データをもとに医療政策の効果を推定しつつシミュレーションを行うなど、より実際の状況に近い設定で政策の効果を測るべきであり、本研究は挑戦の部分が少なかったように感じている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Asai Y. and Kloeden P.E. Numerical schemes for ordinary delay differential equations with random noise. *Applied Mathematics and Computation*. 2019. 347. 306-318.
2. Kitagawa K., Kuniya T., Nakaoka S., Asai Y., Watashi K. and Iwami S. Mathematical analysis of a transformed ODE from a PDE multiscale model of hepatitis C virus infection. *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019. (in press)

### (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)

1. Asai Y. Development of hepatitis C virus dynamics model and numerical methods for random ordinary differential equations with time delay. DMS seminar, Auburn University, Alabama, USA. (01/2019)
2. 浅井雄介. ランダム微分方程式の数値解法と生物学・医学モデルへの応用. 京都駅前セミナー～非線形現象の数理を考える～. キャンパスプラザ京都. (11/2018)
3. Asai Y. Estimation of the basic reproduction number using genome information. The 77<sup>th</sup>

Annual Meeting of Japanese Society of Public Health. Fukushima. (10/2018)

4. 浅井雄介. Numerical methods for random ODEs with time delay. 軽井沢グラフと解析研究集会 II. 日本大学軽井沢研修所. (10/2018)

5. 浅井雄介. ランダム環境下でのジカ流行動態と数値シミュレーション. 第15回生物数学の理論とその応用. RIMS 共同研究, 京都大学数理解析研究所, 京都. (09/2018)

# 研究報告書

## 「父子相互作用における神経基盤の解明」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：浅野路子

### 1. 研究のねらい

人間の脳は環境への影響に反応し、特に男児の脳は初期の逆境に特に敏感であることが明らかになっている。日常場面における母子相互作用における研究では、母親の共感性が低い群の幼児は、全脳における脳灰白質体積が少ないことが明らかになっており (Vaheshta et al., 2017)、子どもの後の人生でメンタルリスクを高めることが示唆されている (Murray et al., 2010)。しかしながら、母子相互作用の質の違いが、母親の脳とどのように関連しているのか明らかになっていない。昨年度の研究では、定型発達児をもつ母親と自閉症スペクトラム障害児 (ASD 児) をもつ母親を対象に、母子遊び場面における子どもとのかかわりの質を評価し、定型発達児を持つ母親と ASD 児をもつ母親との遊びの質と脳形態との関係を明らかにした。

一方、これまでの子どもを対象とした研究では、母子相互作用を調べた研究が多く、父子相互作用を調べた研究は少ない。ASD 児を対象とした研究では、子どもの向社会性の獲得には、母親だけではなく父親の応答や働きかけが重要であるとの報告があり、父親の子どもとのかかわりの重要性が示唆されている。しかしながら、父親の相互作用に関連する神経基盤を明らかにした研究は未だ無い。また、昨年実施した母親の研究では、子どもの特性にかかわらず、相互作用と幸福に関連する脳部位との関連性が示唆された。しかし、父親と母親では、子どもに対する評価の違いがあるとの報告があることから、相互作用に関連する神経基盤の違いがある可能性がある。本研究では、定型発達児の父親と ASD 児の父親を対象に、父子間の相互作用の質を評価し、その質と神経基盤との関係を明らかにする。さらに昨年度の研究で明らかになった母親の神経基盤と父親の神経基盤の違いを明らかにする。

本研究は、父親と子どもの相互作用を脳科学の側面から評価し、その神経科学的機序を明らかにできる可能性がある。幼児期の子どもの向社会性の獲得には、親の果たす役割が大きい側面であり、子どもに基礎的な環境を適切に整えるという、養育上、最も基本的で重要なポイントにエビデンスを提供できる可能性があり、相互作用についての科学的なメッセージを出す意義は大きく、挑戦的な研究である。また、ASD 児は早期援助が必要であるとされているが、父子相互作用を調べることで、父親からの援助についての理解が深まり、次の支援への動機付けが高まる可能性がある。さらにコミュニケーション介入・援助に父親を効果的に関与させる方法を提案できる可能性がある。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

これまでの子どもを対象とした研究では、母子相互作用を調べた研究が多く、父子相互作用を調べた研究は少ない。ASD 児を対象とした研究では、子どもの向社会性の獲得には、母親だけではなく父親の応答や働きかけが重要であるとの報告があり、父親の子どもとのかかわりの重要性が示唆されている。しかしながら、父親の相互作用に関連する神経基盤を明らかにした研究は未だ無い。また、昨年度実施した母親の研究では、子どもの特性にかかわらず、相互作用と幸福に関係する脳部位との関連性が示唆された。しかし、父親と母親では、子どもに対する評価に違いがあるとの報告があることから、相互作用に関連する神経基盤に違いがある可能性がある。本研究では、定型発達児の父親と ASD 児の父親を対象に、父子間の相互作用の質を評価し、その質と神経基盤との関係を明らかにする。さらに昨年度の研究で明らかになった母親の神経基盤と父親の神経基盤の違いを明らかにする。

### (2) 概要

昨年度の研究では、母子遊び場面における母親の相互作用とそれに関わる母親の神経基盤との関係について調べ、母親の関わりは幸福と関係する脳部位(右楔前部)との間に相関傾向があることが示唆された。これまでの子どもを対象とした研究では、母子間での相互作用を調べた研究が多く、父子間の相互作用を調べた研究はあまり多くない。ASD 児を対象とした父子間の研究では、ASD 児を持つ父親は、子どもの要求に敏感に応答する(Rodrigue et al., 1992)という報告や、ASD 児の言語能力の獲得には、母親だけではなく父親からの言語応答の働きかけも重要である(Michelle & Linda, 2015)ことが報告されており、父親の子どもへのかかわりの重要性が示唆されている。しかしながら、その神経基盤について明らかにした研究は未だ無い。

また、ASD 児を持つ父親は、子どもを評価する側面が母親とは異なっており、育児に対するストレスレベルが高いことも示唆されている(Davis & Carter, 2008)。昨年度の母親の研究では、子どもの特性にかかわらず、相互作用と『幸福』に関係する脳部位との関連性が示唆されたが、先行研究で示されたように、父親と母親では、子どもを評価する側面が異なるとするならば、父子相互作用時に関連する神経基盤に違いがある可能性がある。以上のことから、本研究では、定型発達児の父親と ASD 児の父親を対象に、父子遊び場面における子どもとのかかわりの質を評価し、遊びの質と神経基盤との関係を明らかにすることを目的とする。さらに、母親と父親では、子どもを評価する側面に違いがあるならば、父母間における子どもとの相互作用と関連する脳部位にも違いがある可能性がある。昨年度の研究で明らかになった母親の神経基盤と父親の神経基盤の違いを明らかにすることを目的とする。

ASD 群は、昨年度参加してもらった家族の父親とその子ども(男児)に実験参加依頼を行う。定型発達群(男児)は、リクルート会社を通して実験参加を依頼した。

子どもの発達を調べるために、発達検査(KIDS)、父親に対する質問紙として、健康調査質問紙(GHQ)、自閉症スペクトラム指数(AQ)の質問紙調査を行った。

父子間の相互作用を評価するために、ままごとセットを用い父子遊び場面を5分間ビデオ撮影を行った。父親のアイコンタクトと随伴性(逆模倣、微笑み、返答)をコーディングし、子ど

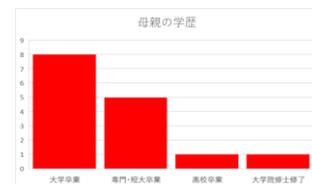
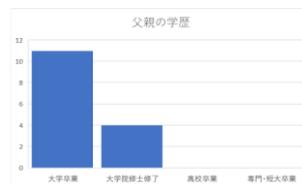
もへの働きかけの程度を測定する。また、子どものアイコンタクトと随伴性もコーディングした。次に、父親に対し、父親が子どもと遊ぶ際にかかわる局所脳部位を同定する目的で、脳磁器共鳴画像(MRI)を用いて脳形態画像を撮像した。また、白質線維の異方性を調べる目的で拡散テンソル画像を収集した。

### (3) 詳細

#### 被験者特性

3-6歳の定型発達児とその父親40組を対象とした。そのうち、15組に父子遊びに参加した。

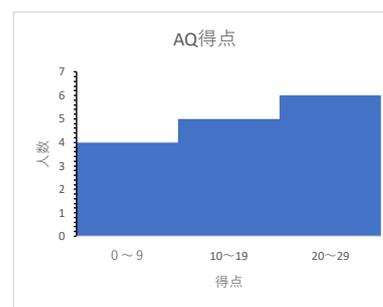
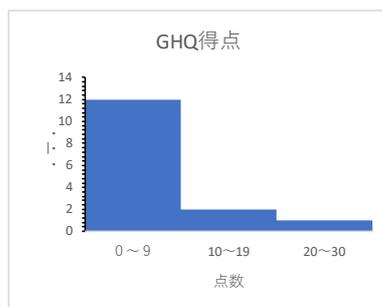
	男児	父親
年齢	3.9(±0.85)	40.53(±5.06)
N	15	15



#### 心理検査の特性

定型発達児童(N=15)におけるKIDSの発達指数は、平均が112.7(±12)であり、発達の遅れは認められなかった。

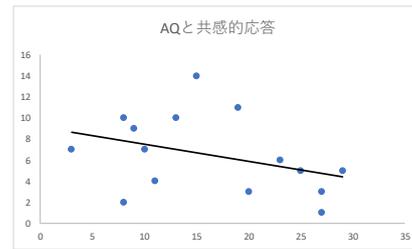
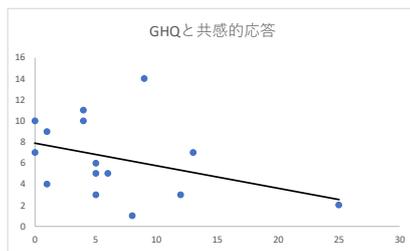
父親の心理検査の結果については、下記のとおりである。GHQによる精神健康調査では、身体症状、不安、不眠、社会的活動状態、うつ傾向などを、普段の生活や気分に関する質問から確認した。カットオフ値を超えたものは1名であった。AQ得点は、社会性、注意切り替え、細部関心、コミュニケーション、想像力から構成されている。カットオフ値を超えたものは、3名であった。GHQ得点とAQ得点の間には、相関は見られなかった。



#### 行動データ

父親のアイコンタクトと随伴性(逆模倣、微笑み、返答)をコーディングし、子どもへの働きかけの程度を測定した。また、子どものアイコンタクトと随伴性もコーディングした。その結果、父親のアイコンタクトと子どものアイコンタクトの間には有意な相関は見られなかった。さらに、父親の随伴性と子どもの随伴性の間にも有意な相関は見られなかった。

一方、父親におけるGHQ得点と共感的応答の間には、負の相関の傾向がみられた。また、AQ得点と共感的応答の間にも負の相関傾向がみられた。



### 脳画像データ

2月～3月で収集予定である。行動指標と脳画像データを用いて、父親が子どもと遊ぶ際にかかわる局所脳部位を同定する。また、白質線維の異方性を調べる。さらに昨年度の研究で明らかになった母親の神経基盤と父親の神経基盤の違いを明らかにする。

### 3. 今後の展開

昨年度の研究において、ASD 児及び定型発達児と母子相互作用における脳形態との関係について、明確なエビデンスを明らかにすることができなかった。その一つの理由として、被験者が少なかったことが考えられる。また、本年度の研究では、ASD 児と父子相互作用における脳形態との関係について、明らかにすることができなかった。今後、子どもの特性における、母子間、父子間の相互作用の神経基盤を明らかにするために、それぞれの群で人数を増やし比較検討をする必要がある。

発達障害を持つ子どもは、早期援助が必要であるとされているが、父子相互作用や母子相互作用の特性や相互作用と脳との関係を調べることで、神経科学的な理解が深まり、次の支援への動機付けが高まる可能性がある。さらにコミュニケーション介入・援助など教育の分野において、母親のみならず父親をも効果的に関与させる方法を提案できる可能性があると考えられる。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

東京大学のMRI運用上の制限があり、2月の実験スタートとなった。報告書を提出する時点で、行動データのデータが15名、脳画像データが5名での報告となり、3月末までに残り35名（行動データ25名）のデータを収集し、解析を行う予定である。また、昨年度実施した定型発達児における母子相互作用の結果と本研究の結果を比較検討する予定である。

一方、ASD 児と定型発達児を対象に父子相互作用における比較研究を行うことが目的だったが、ASD 児のデータを収集することがかなわなかった。ASD 児の親子のリクルートをするためには、あらかじめ十分な信頼関係を築いたうえで行う必要があり、そのためには時間をかけたリクルートが必要だと考える。

#### ・研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

父子を対象とした実験のため、リクルートが難しく、リクルート会社を通して被験者募集を行った。父子相互作用の行動実験と父親のMRI実験は、別日に行った。MRI実験に関しては、研究補助者を同伴する必要があり、研究費から人件費として計上した。被験者リクルート代金、

MRI 使用料として、行動解析ソフト、脳画像解析ソフト、解析用 PC や人件費などで満額執行予定である。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果(今後の見込みも重視してください。)

発達障害を持つ子どもは、早期援助が必要であるとされているが、父子相互作用や母子相互作用の特性や相互作用と脳との関係を調べることで、神経科学的な理解が深まり、次の支援への動機付けが高まる可能性がある。さらにコミュニケーション介入・援助に父親を効果的に関与させる方法を提案できる可能性がある。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究は、父親と子どもの相互作用を脳科学の側面から評価し、その神経科学的機序を明らかにできる可能性がある。幼児期の子どもの向社会性の獲得には、親の果たす役割が大きい側面であり、子どもに基礎的な環境を適切に整えるという、養育上、最も基本的で重要なポイントにエビデンスを提供できる可能性があり、相互作用についての科学的なメッセージを出す意義は大きく、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

なし

(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)

なし

## 研究報告書

### 「たんぱく質構造の正当性検証のための高性能アルゴリズムと精密なアロステリー予測手法」

研究期間: 2018年8月～2019年3月

研究者: Adnan SLJOKA

#### 1. 研究のねらい

To understand proteins biological function and in drug discovery, it is critical to probe their flexibility and obtain accurate models of their 3-dimensional structure. Structures are solved with X-ray crystallography or Nuclear Magnetic Resonance (NMR) experiments and atomic coordinates are deposited into the protein data bank (PDB). To make a sensible and reliable use of protein structure, it is vital to know evaluate the quality of the solved 3D structures. Both X-ray and NMR structural models have uncertainties and are prone to various errors (i.e. geometry of solved structures is not realistic, structures do not match well the experimental input data etc). While it is possible to have a fairly good estimate of the quality of X-ray crystal structure, estimating the accuracy of NMR protein structures is largely an unsolved problem [1,2]. This is a problem not only for users of protein structural information, but also for the scientists who calculate the structures, since it is difficult the judge how good their solved NMR structures are.

In the last AIP Challenge, we proposed a high-throughput method for validating NMR structures, which compares Random Coil Index (RCI) [6] (developed by David Wishart at University of Calgary) which experimentally quantifies protein flexibility, together with FIRST-ensemble [7,8,11,14] (developed by Principal investigator Sljoka) - a method based on rigidity theory algorithms for fast protein flexibility prediction. We designed a first version of implementation of the RCI/FIRST-ensemble (from now on we refer to it as RCI/FIRST) validation methodology and showed on test cases the usefulness of RCI/FIRST for validation of NMR structures. In continuation work, we proposed to improve our validation method and analyze and validate large number of NMR PDB structures, working with current data sets, with ultimate future plan to validate all NMR structures. A public database of annotated high quality NMR structures would be very powerful as it would serve as a calibration set and quality standard for NMR validation and deposition process and we have already attained validation on large data sets. Moreover, since NMR structures are represented as an ensemble of structural models, it is not clear which models are good quality, creating a lot of confusion to users of PDB. The other important purpose of this research is to apply RCI/FIRST and identify good and bad ensemble members in NMR structures. We want to identify regions in the protein within each member of the ensemble that are reliable and at same time annotate regions within structure models that are likely to have errors, providing very valuable local information on accuracy of structural ensemble. The long term goal of this research is to set up an NMR validation server and incorporate it to the PDB web servers, where anyone can submit structures and perform validations. This work is of high significance as for first time allows us to

assess the accuracy of NMR structures and improve structure calculation process. Another importance of this project deals with improved functional analysis of proteins, for example using the rigidity transmission allostery (RTA) analysis that the applicant has developed in 2012 (Sljoka dissertation, York University, 2012) and applied it in (Sljoka et al Science 2017, Nature Communication 2018 [12,13]) and demonstrated it can predict allostery in enzymes and receptors. As RCI/FIRST methods enables us to identify high quality structural members of the ensembles, we can obtain improved prediction of allostery or other structure-function analysis.

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

Proteins are a constituent element of all living organism and play crucial roles in immunity, catalysis, and metabolism and are targets in drug therapeutics. To deeply understand protein function, it is important to analyze their flexibility and know how their various components move within their 3D structure. Advancements in the field of mathematical rigidity theory and algorithms have opened up opportunities for fast computational predictions of protein flexibility and their dynamics. The principal investigator Sljoka A. has played a key role in advancing this area of research over the last 10 years.

The most important initial step and input for computational protein flexibility-dynamics and function analysis is an accurate representation of proteins complex 3-dimensional structure. Protein structures are solved experimentally (with X-ray crystallography and NMR) and deposited into the Protein Data Bank (PDB). Unfortunately, protein structures are model representation of experimental data and are prone to interpretation and measurement errors [1-5]. The validation task force of protein data bank (PDB) is increasingly concerned about validation of protein structures [1] (ie the development of a set of objective measures of the quality of each structure) and this is rightly so, since protein structures are only useful if one knows how trustworthy (ie accurate) they are. While it is relatively easy to validate X-ray protein structures, validating NMR protein structures is significantly more challenging and remains an open problem. This is mainly because there is no direct connection between the input experimental NMR data and the final solved 3D structural models. This is a significant issue to users of PDB, as structures are only useful for protein function analysis when structures are accurate and reliable.

In the initial AIP Challenge we proposed a novel and first high-throughput method for validating NMR structures. This method relies on comparing the previously developed Random Coil Index (RCI) [6] together with FIRST-ensemble [7,8,11,14] (developed by Principal investigator Sljoka). RCI is a computational methods which inputs experimental derived NMR chemical shift data to quantify local rigid and flexible regions in protein structure. On the other hand, FIRST-ensemble is a computational method based on rigidity theory and graph theory algorithms which give fast protein flexibility prediction by decomposing a protein structure into rigid and flexible regions.

In the AIP challenge, we designed and implemented a first version of the RCI/FIRST-ensemble

(RCI/FIRST) validation methodology and their comparison for NMR structure validation. We had also developed the algorithm and methodology how to best output the results of FIRST-ensemble that gives the most robust match to the experimental RCI values and a Pearson-Spearman correlation comparison of RCI vs FIRST-ensemble. Given the implementation, we had showed on a small test cases of NMR protein structures the usefulness of our methodology RCI/FIRST for validation of NMR structures. We have demonstrated that on previously experimentally supported accurate NMR structures, both RCI and FIRST-ensemble give a similar rigidity measure (i.e. high correlation) and on inaccurate NMR structures the output of FIRST-ensemble and RCI were not in good agreement (i.e. low correlation) (see Figure 1).

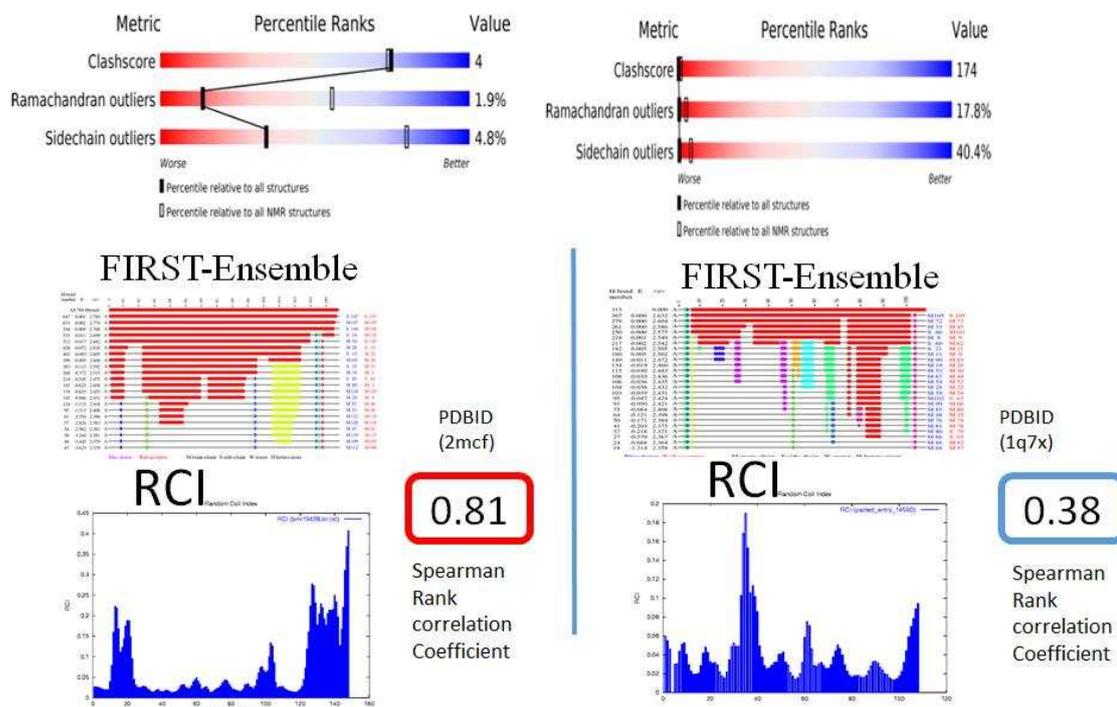


Figure 1: Top part: Geometric assessment of NMR structure obtained from Protein Data Bank (PDB) which evaluates the quality of structure based only on geometric criteria. Left structure has good geometric quality and right structure has poor geometric quality. Geometry is an important measure but alone is not sufficient for validation. RCI/FIRST goes beyond geometry and assesses how well the structures match the experimental input NMR chemical shift data. Middle and Bottom part: FIRST-Ensemble and RCI output showing flexibility prediction and validation comparison with prediction of high correlation on a high quality NMR structure and low correlation on a low quality structure.

## (2) 概要

Our novel NMR protein structure validation RCI-FIRST addresses the missing link between the input experimental data (i.e. NMR chemical shifts) and the output 3D NMR model structures. RCI assesses the experimental NMR shifts of backbone atoms and gives a flexibility score for each

residue. FIRST-ensemble uses mathematical concepts in rigidity theory [9,10] to decompose a protein (NMR PDB structure) into flexible and rigid regions. RCI and FIRST-ensemble report on similar outputs, using independent directions and inputs (NMR spectra vs NMR structures) and their comparison provides a residue-by-residue test of how the rigidity of the structures (from output of FIRST-ensemble) compares to the experimentally determined 'true' rigidity (from RCI), as we had shown in last AIP challenge on test case proteins.

The first thing we did during PRISM research is to improve FIRST-ensemble vs RCI comparisons. We currently calculate a single correlation coefficients to see the global relationship between FIRST-ensemble and RCI. That is, for every amino acid in the protein, we assign a value of flexibility prediction from FIRST-ensemble (i.e. lowest hydrogen bond energy strength where the corresponding residue's C-alpha atom is part of a large rigid cluster containing at least 20 atoms) and obtain RCI value for each residue which gives a direct amount of flexibility per residue according to the input of experimental NMR chemical shift data. We then calculate a Spearman's rank correlation coefficient to assess how similar are two predictions of rigidity and flexibility of protein structure (see Figure 2 and Table 1 and 2).

We performed predictions and obtained correlation coefficients on several large sets of NMR structures obtained from studies such as Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014), Rosato et al (J Biomol NMR, 2015) and others. In a number of these sets, NMR structures were refined in hope of quality improvement and often the same protein structures were also obtained from X-ray crystallography making it easier to judge the quality of NMR structures. On these large sets consisting of several hundred NMR PDB structures and several thousand ensemble models we have calculated correlation coefficients and shown that RCI and FIRST-ensemble is a robust method for validation of NMR structures.

Another issue with NMR structures is they are always represented as a set of typically 20 models, however it is unclear which models are useful and accurate. To deal with this, on large sets of NMR structures, we demonstrated we were able to successfully validate accuracy of individual NMR models and distinguish which models are high quality and which models are poor and can be neglected from NMR ensemble. As such we have begun to collect and annotate a large data sets of poor and high quality structures, and also ranking each model in the ensemble based on correlation similarity of FIRST-ensemble and RCI.

The other major result we obtained is about local predictions of quality by comparison of FIRST-ensemble and RCI on secondary structure parts of a protein (helices, beta sheets and loop regions). That is we could localize predictions of quality to separate regions of structure based on secondary structure classification. More detailed achievements are listed in next sections.

### (3) 詳細

The purpose of the AIP Challenge PRISM is to further develop our RCI/FIRST-ensemble methodology and illustrate its usefulness in validation of NMR structures and perform more large scale validation of NMR structures. This work is of high scientific importance as it provides a

first method that allows us to assess the accuracy of NMR structures and improve structure calculation process for experimentalists depositing solved NMR structures to PDB. Specific achievements and results, figures and data of the project are put in the next private research results section (非公開の研究成果) as many of the results are still unpublished.

**References:** [1] Montelione et al 2013 Structure 21:1563. [2] Vranken, Prog NMR Spectrosc 82:27, 2014. [3] Snyder et al 2005 Proteins 59:655. [4] Saccenti 2008 J Biomol NMR 40:251. [5] Vuister 2014 J Biomol NMR 58:259. [6] Wishart 2008 J Biomol NMR 40:31. [7] **Sljoka** & Wilson 2013 Phys Biol 10:056013. [8] Jacobs et al 2001 Proteins Struct Funct Bioinf 44 150–165. [9] Whiteley 2004 Phys Biol 2:S116. [10] Tanigawa & Katoh 2011 Discr and Comput Geom 45 647–700. [11] **Sljoka** et al 2015 Plos One 10(3). [12] **Sljoka** et al Science 2017 355, 262–287 [13] **Sljoka** et al Nature Comm. 2018 1 9:1372. [14] **Sljoka** et al Frontiers Immun. 2018 9 413. [15] Fenton, Trends Biochem. Sci. 2008, 33.

Specific achievements of AIP PRISM are:

- Improved RCI/FIRST-ensemble methodology for predictions. We can now obtain a single global measure of similarity between RCI and FIRST-ensemble for an overall score of quality of NMR structure or quality assessment of individual models.
- We obtained results on comparison of FIRST-ensemble and RCI on large number of NMR structure and data sets of NMR structure which have a corresponding solved crystal structures, hence obtaining further quality measures of NMR structures.
- Obtained predictions of quality and accuracy of individual members of the NMR ensemble on large number of NMR structures, hence we can have a large dataset and corresponding database of annotated good vs poor structures
- Improved RCI/FIRST-ensemble methodology for local prediction of quality in the protein structure by differentiating quality based on the type of secondary structure (helices, sheets, loops) quality assessment and its implications in validations
- Generated a large set of poor vs high quality structures and ensemble structural members for comparisons and further studies
- Comparisons and correlations of quality of structure predictions from RCI/FIRST-ensemble vs root mean square deviations (RMSD) between corresponding X-ray crystal structures and NMR structures
- Preparing a draft paper for publication
- Results obtained using RTA allosteric method on high quality NMR structure and comparisons to X-ray structures

Here we put a sample of outputs in figures and tables to demonstrate some of the listed achievements.

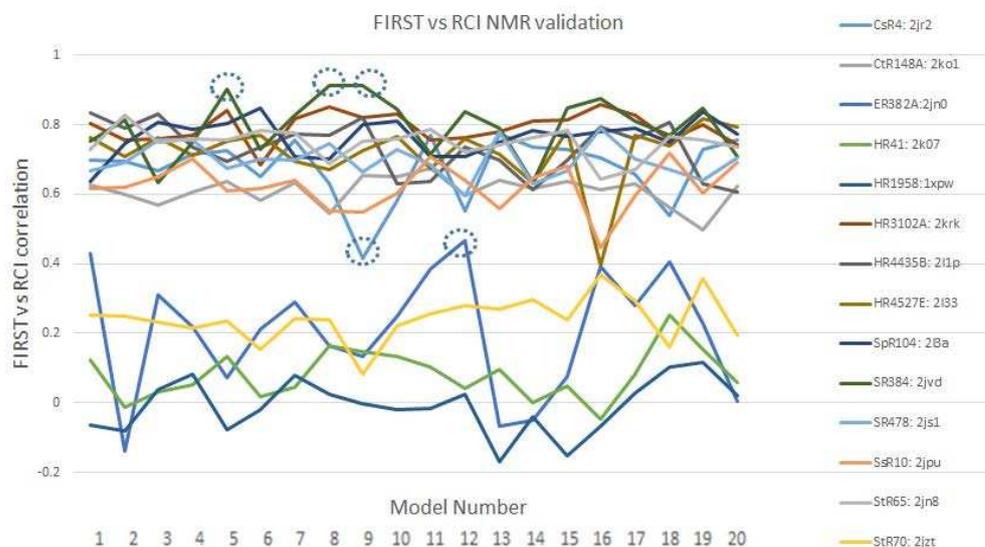


Figure 2: Validation of NMR structures using RCI/FIRST-ensemble using our method showing sample of results from one data base from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014).

Structures with high correlations we predict are high quality NMR ensembles. Structures with low correlations are poor NMR ensembles. The strength of correlation for each model of NMR ensemble is calculated. This indicates which models are of high quality and also indicate any poor structural models in the ensemble. For a high quality NMR structure, most models in the ensemble have high quality, conversely for a poor NMR structure most models do not have high accuracy.

model	2k2e	2jqn	2jr2	2kcu	2ko1	2kyi	2kpu	2kcz	2jn0	2k5p
1	0.701795	0.499199	0.696875	0.616858	0.628585	0.049442	0.411024	0.294888	0.430936	0.550490
2	0.638181	0.384595	0.696271	0.497726	0.598721	0.210382	-0.043820	0.391379	-0.139820	0.499033
3	0.612980	0.287733	0.669086	0.412366	0.570451	0.302629	0.005229	0.254500	0.311957	0.508773
4	0.720784	0.510206	0.714510	0.496102	0.605582	0.098390	0.164312	0.408662	0.220017	0.713868
5	0.674015	0.372749	0.726098	0.425189	0.638019	0.352601	0.267498	0.222897	0.071337	0.359362
6	0.609078	0.415609	0.649254	0.400284	0.582943	-0.324674	-0.122532	0.109305	0.211258	0.459872
7	0.678728	0.273353	0.754761	0.402937	0.633985	0.378246	-0.200878	0.308990	0.288586	0.348566
8	0.532721	0.284426	0.629765	0.648333	0.546227	0.169703	0.252282	0.326691	0.165895	0.682551
9	0.582144	0.195465	0.415430	0.548660	0.654253	0.113094	0.161280	0.430388	0.132664	0.608135
10	0.698473	0.484790	0.583535	0.410580	0.651550	0.017155	0.130570	0.150045	0.249985	0.488686
11	0.697350	0.428968	0.768129	0.624851	0.673717	0.205364	0.064276	0.337916	0.385950	0.657754
12	0.670444	0.357844	0.550566	0.612572	0.596574	0.115026	0.360303	0.420527	0.467309	0.502480
13	0.646509	0.462711	0.774403	0.633046	0.640636	0.093904	0.117194	0.321634	-0.066735	0.436252
14	0.699227	0.409223	0.735259	0.376438	0.615874	0.014693	0.152118	0.245993	-0.050750	0.497926
15	0.466289	0.498340	0.727847	0.591163	0.636683	0.466381	0.138309	0.182002	0.076997	0.609105
16	0.699616	0.318858	0.704040	0.641255	0.613396	0.222528	0.190237	0.304563	0.390683	0.576298
17	0.619905	0.532564	0.655879	0.583238	0.630476	0.274563	0.315841	0.145791	0.279910	0.687037
18	0.614999	0.476560	0.540068	0.560990	0.561127	0.236790	0.114758	0.419811	0.404756	0.540146
19	0.741269	0.448358	0.729901	0.600963	0.497094	0.198602	0.202631	0.186721	0.229143	0.658559
20	0.693818	0.371157	0.755533	0.462614	0.622347	0.321201	0.295508	0.299651	0.002613	0.485640

model	2k07	1xpw	2krk	2khn	2l1p	2l33	2kpw	2kpp	2kkz	2kfp
1	0.123371	-0.063120	0.802595	0.570835	0.833488	0.763778	0.558219	0.470160	-0.367561	0.421496
2	-0.012374	-0.081269	0.757035	0.530895	0.789590	0.709918	0.654344	0.556981	0.331658	0.276744
3	0.032075	0.040005	0.759777	0.566733	0.832427	0.762608	0.559442	0.537817	-0.134648	0.430025
4	0.052034	0.080960	0.769155	0.566878	0.736039	0.713519	0.630205	0.506363	0.161374	0.537105
5	0.134654	-0.075739	0.842937	0.583630	0.695411	0.751403	0.633733	0.548476	-0.169733	0.548430
6	0.017389	-0.021050	0.684400	0.539299	0.734413	0.770589	0.371521	0.635309	-0.324853	0.494598
7	0.044777	0.079030	0.818045	0.631061	0.774634	0.694469	0.534553	0.552323	-0.034320	0.438297
8	0.163928	0.023585	0.852273	0.478555	0.769679	0.669982	0.619198	0.513373	0.150481	0.446469
9	0.145788	-0.003330	0.821702	0.584190	0.819637	0.725321	0.682068	0.668755	-0.163276	0.593964
10	0.134450	-0.018731	0.829958	0.591623	0.628877	0.766566	0.581572	0.442368	0.198291	0.334478
11	0.102595	-0.014825	0.757150	0.464682	0.638563	0.675919	0.661459	0.535194	0.194566	0.549344
12	0.041629	0.023397	0.763020	0.589759	0.736324	0.760689	0.571034	0.484757	-0.358417	0.392036
13	0.096164	-0.169913	0.781475	0.491284	0.696890	0.716232	0.685708	0.490394	0.355265	0.448656
14	0.002452	-0.039078	0.808961	0.601968	0.613183	0.632182	0.592742	0.632004	0.070504	0.527769
15	0.049022	-0.150853	0.814842	0.666565	0.697725	0.782804	0.626631	0.506150	-0.083025	0.557714
16	-0.045745	-0.067158	0.858104	0.645531	0.793006	0.397067	0.292489	0.571130	-0.130730	0.337313
17	0.082074	0.027256	0.827874	0.558638	0.758686	0.771211	0.553475	0.512908	-0.065244	0.517811
18	0.252719	0.101336	0.755732	0.541163	0.806800	0.740443	0.572092	0.567762	0.151199	0.581477
19	0.153535	0.116133	0.799434	0.518962	0.629688	0.816942	0.623151	0.431503	-0.484098	0.444743
20	0.057628	0.021015	0.741885	0.489524	0.606430	0.794840	0.579610	0.538656	0.220044	0.436173

model	2kw2	2jx2	2kw5	2l06	2juw	2l3a	2hfi	2jvd	2jsl	2jpu
1	0.643346	0.191216	0.602577	0.586609	0.496248	0.638281	0.324722	0.752356	0.666457	0.615479
2	0.634080	0.580478	0.640741	0.622733	0.713213	0.747234	0.286581	0.812586	0.691684	0.620317
3	0.660240	0.583127	0.534150	0.568096	0.662813	0.807222	0.343230	0.633896	0.756856	0.649760
4	0.623938	0.183300	0.607388	0.591371	0.568882	0.786731	0.397180	0.748455	0.757587	0.701981
5	0.597629	0.583475	0.582576	0.585289	0.621514	0.804372	0.435676	0.901660	0.674416	0.608595
6	0.676363	0.387350	0.537381	0.562526	0.663896	0.848328	0.505392	0.729303	0.702628	0.616517
7	0.683747	0.373977	0.594806	0.582824	0.281503	0.709615	0.344318	0.828147	0.697062	0.638860
8	0.691827	0.194569	0.534979	0.573018	0.632079	0.700719	0.455639	0.911765	0.744516	0.551381
9	0.562763	0.349240	0.617191	0.535321	0.674289	0.799907	0.253824	0.911052	0.664323	0.548309
10	0.613103	0.664050	0.547262	0.606714	0.672030	0.812033	0.392840	0.843003	0.729826	0.603991
11	0.712540	0.377585	0.622495	0.424174	0.537358	0.707414	0.183351	0.713858	0.684244	0.708341
12	0.662702	0.482846	0.592172	0.571386	0.663798	0.706944	0.240840	0.837589	0.594914	0.641513
13	0.508886	0.544196	0.618772	0.601483	0.756101	0.749662	0.425501	0.790533	0.780501	0.557279
14	0.601806	0.351243	0.636220	0.541491	0.648793	0.783944	0.263785	0.634286	0.631071	0.647258
15	0.652527	0.563671	0.561529	0.506719	0.443467	0.765598	0.401570	0.847808	0.668831	0.679816
16	0.674815	0.197699	0.597743	0.539056	0.689450	0.780554	0.239953	0.873676	0.789014	0.447574
17	0.695052	-0.109799	0.619736	0.594190	0.606187	0.789423	0.334717	0.811980	0.700968	0.595024
18	0.668794	0.000251	0.484950	0.533770	0.450093	0.748740	0.441143	0.768373	0.670522	0.719766
19	0.691986	0.103958	0.638038	0.564417	0.584202	0.837336	0.294372	0.847392	0.641703	0.604522
20	0.596462	0.627920	0.635235	0.500233	0.633440	0.773894	0.418816	0.708609	0.706482	0.690360

Table 1: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database of NMR structures. Correlations for each model are achieved.

model	2krk	2jr2	2k07	2jzt
1	0.802595	0.696875	0.123371	0.254192
2	0.757035	0.696271	-0.012374	0.249146
3	0.759777	0.669086	0.032075	0.230819
4	0.769155	0.714510	0.052034	0.215916
5	0.842937	0.726098	0.134654	0.236750
6	0.684400	0.649254	0.017389	0.155085
7	0.818045	0.754761	0.044777	0.243087
8	0.852273	0.629765	0.163928	0.237742
9	0.821702	0.415430	0.145788	0.081608
10	0.829958	0.583535	0.134450	0.220648
11	0.757150	0.768129	0.102595	0.257107
12	0.763020	0.550566	0.041629	0.281098
13	0.781475	0.774403	0.096164	0.269855
14	0.808961	0.735259	0.002452	0.296306
15	0.814842	0.727847	0.049022	0.237372
16	0.858104	0.704040	-0.045745	0.369837
17	0.827874	0.655879	0.082074	0.293184
18	0.755732	0.540068	0.252719	0.160328
19	0.799434	0.729901	0.153535	0.358455
20	0.741885	0.755533	0.057628	0.195184

Table 2: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble, here shown on part of structures obtained from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database. Correlations for each model are achieved. Here showing a pair of two good NMR structure (2krk and 2jr2) and two bad NMR structures (2k07 and 2jzt).

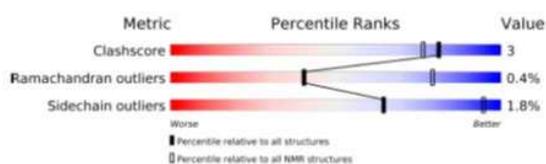
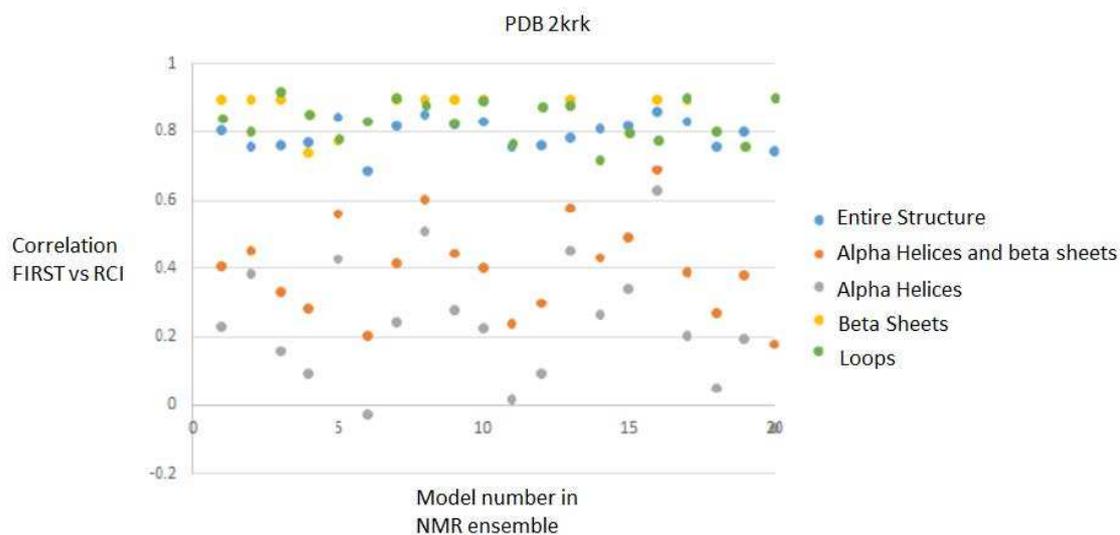


Figure 3: An example of good overall quality NMR structure on (pdb id 2krk) predicted with our validation method RCI/FIRST-ensemble. Top of figure: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database of NMR structures on whole structure (global measure) and on secondary structure type (local measure) – alpha helices, beta sheets and loops. Correlations for each model are obtained. Bottom of figure: geometric quality assessment obtained from Protein Data Bank showing high geometric quality.

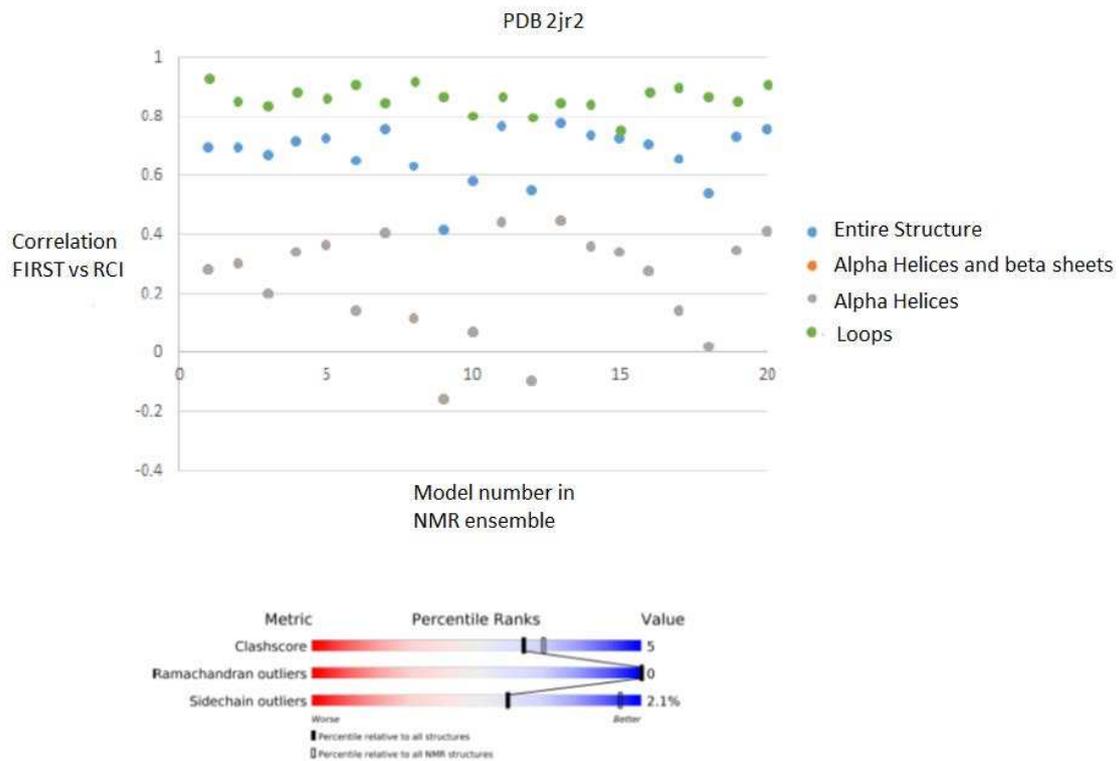


Figure 4: An example of good overall quality NMR structure on (pdb id 2jr2) predicted with our validation method RCI/FIRST-ensemble. Top of figure: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database of NMR structures on whole structure (global measure) and on secondary structure type (local measure) – alpha helices, beta sheets and loops. Correlations for each model are obtained. Bottom of figure: geometric quality assessment obtained from Protein Data Bank showing high geometric quality.

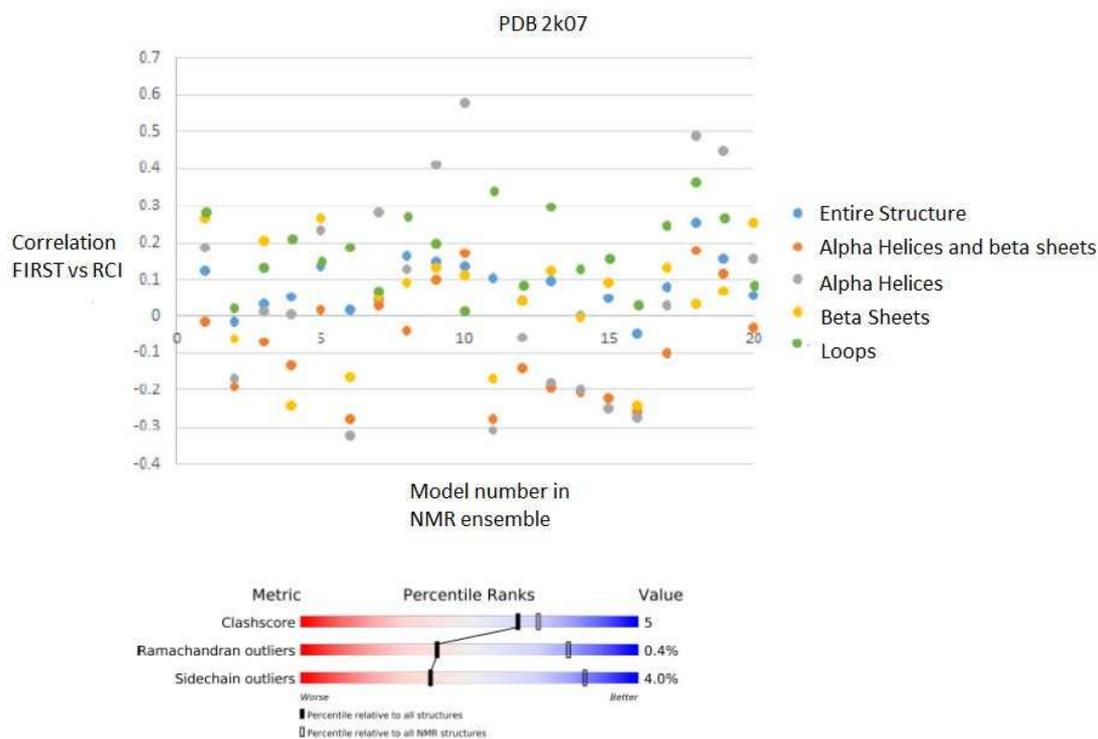


Figure 5: An example of poor overall quality NMR structure (pdb id 2k07) predicted with our validation method RCI/FIRST-ensemble. Top of figure: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database of NMR structures on whole structure (global measure) and on secondary structure type (local measure) – alpha helices, beta sheets and loops. Correlations for each model are obtained. Bottom of figure: geometric quality assessment obtained from Protein Data Bank showing poor geometric quality.

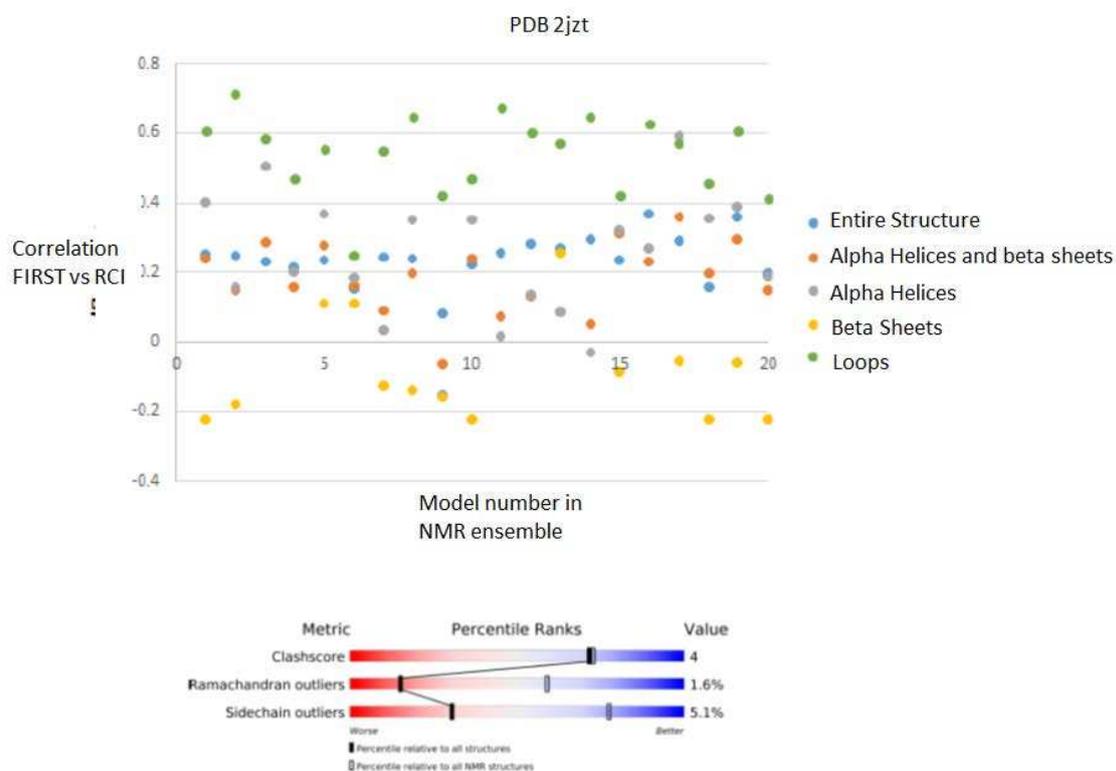


Figure 6: An example of poor overall quality NMR structure on (pdb id 2jzt) predicted with our validation method RCI/FIRST-ensemble. Top of figure: Sample of correlation calculations between RCI and FIRST-ensemble as measure of validity of NMR ensemble from Mao et al (J. Am. Chem. Soc. 2014) database of NMR structures on whole structure (global measure) and on secondary structure type (local measure) – alpha helices, beta sheets and loops. Correlations for each model are obtained. Bottom of figure: geometric quality assessment obtained from Protein Data Bank showing poor geometric quality.

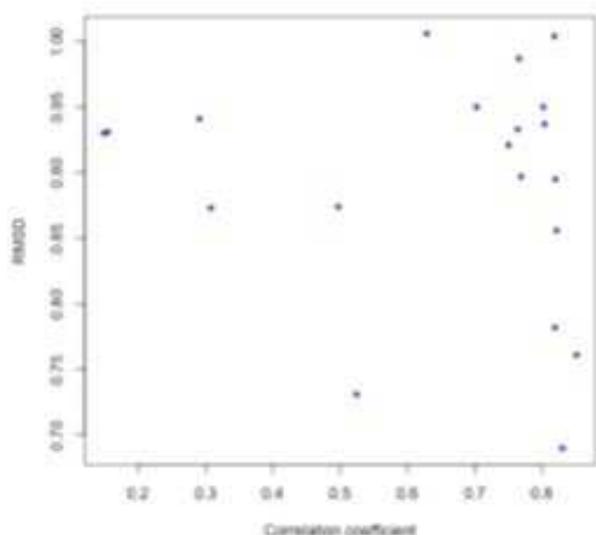


Figure 7: An example of output of RCI/FIRST-ensemble correlation vs Root Mean Square Deviation (RMSD) of NMR structure and corresponding x-ray crystal structure.

On large data sets, we found no correlation between the quality of NMR structure as predicted by RCI/FIRST-Ensemble validation methods and RMSD between NMR structure and corresponding X-ray crystal structure. Hence, how close NMR structure is to X-ray crystal structure does not indicate quality.

### 3. 今後の展開

The results that were achieved during AIP-PRISM challenge have positioned us with a strong base to propose to structural biology community a first tool for NMR validation. Our method is unique as it is the first NMR validation method that goes beyond only geometry quality assessment as it provides the missing link between the input experimental data (i.e. NMR chemical shifts) and the output 3D NMR model structures. We are continuing to develop and improve our method for NMR validation. We have already tested and applied our method on many data sets of NMR structure. More work remains to apply our method and test and validate all available NMR structures in the protein data bank. Our initial plan also included a preparation of a webserver for NMR validation which is ambitious for an 8 month project, as this is a large multi-year project. With our new already achieved improvements to the methods and validation on NMR structure, development of a webserver is an important next step in NMR validation. Our NMR validation method is expected to have a big impact on protein research, in particular validation of protein structures which is the fundamental component for more accurate protein function analysis and in drug design. The expected outcome is that our work will create paradigm shifts in how we assess the quality of molecular structures, particularly protein structures obtained by NMR. Moreover, this work has

important consequences for accurate computational analysis of protein function, in particular the applications of rigidity theory-based algorithms that the applicant has developed in 2012 and has appeared in journals Science and Nature Communication for analysis of allosteric communication (i.e. signaling) in proteins.

#### 4. 自己評価

· We made many achievements as were listed in above section, based on the original plan. These include: improvements to RCI/FIRST-ensemble method, global correlation measure of NMR structural quality, local measures of quality based on secondary structure, quality assessment on individual models, validation on large data sets of NMR structures, we are generating a large data set of good and poor NMR structures, comparisons of quality by comparison to RMSD between NMR structure and corresponding X-ray crystal structure, RTA analysis and comparison on high quality NMR structures and X-ray crystal structures. The other major aim is development of an NMR validation webserver and it was a too ambitious goal for a short time. Webserver development will be an important next goal. This is a large several year program and will require further work and inclusion of larger collaboration.

· Protein structures are instrumental in analysis of protein function and in design of novel drugs. High quality protein structures enable us to more accurately analyze their flexibility, dynamics and ultimately how they perform their biological function, while poor models of protein structures become less useful. Currently it is difficult to validate the quality of NMR structures. Our NMR validation method, as we have already demonstrated in AIP-PRISM is a fast and powerful high-throughput method and it is expected to have a big impact on protein research.

We expect this work to create paradigm shifts in how we assess the quality of NMR molecular structures, and have ripple effects on the power of mathematical algorithms in biological sciences. This work has other wider applicability, such as applications of rigidity theory-based algorithms in allostery analysis.

· This research brings a completely novel way of assessing the quality of NMR structures, which is an open problem in structural biology. This is a large multi-year challenging project that will require further ongoing work to validate all currently known NMR structures, and collaboration with NMR experimentalist to provide further validation and support.

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Kazuhito Nishiyama, Toshiki Saitoh, Adnan Sljoka, Validation of NMR protein structures using rigidity theory and chemical shifts, Research report Bioinformatics (BIO), 2018 – BIO – 56, No. 6, 1 – 2, 2018 – 12 – 07.
---

2. Journal paper under preparation.

(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)

- ・ Keynote talk: Adnan, Sljoka, Rigidity theory and its applications to protein function analysis, Workshop of CREST Big Data Applications, Shonan-Village, Japan, January 16-17, 2019.
- ・ Invited Talk: Adnan Sljoka, Rigidity theory and application to protein biology, Kyoto University, Kyoto, Informatics Seminar, Jan 24, 2019.
- ・ Invited Talk: Rigidity theory and protein function design, Central University of Rajasthan, India, November 29, 2018.
- ・ Invited Talk: High throughput analysis of protein function with rigidity, 3DSIG: Structural Bioinformatics and Computational Biophysics, 26<sup>th</sup> Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology, International Society of Computational Biology, July 10, 2018, Chicago.

# 研究報告書

「A Probabilistic Framework for Unsupervised Grounding of Combinatorial Grammatical Structure of phrases in Situated Human-Robot Interaction」

研究期間: 2018年8月～2019年2月

研究者: Amir Aly

## 1. 研究のねらい

Creating interactive social robots able to collaborate with human users in tasks requires high-level spatial intelligence that could make them able to discover their surrounding spaces that have been primarily shaped by human agency. A stubborn challenge that I address in this project is to ground unknown synonymous words through semantic information, and to infer the latent grammatical structure of phrases, which embraces grounding Parts of Speech (POS) (e.g., nouns, verbs, and prepositions) (*outcome of H29 AIP Challenge*), and induction of Combinatory Categorical Grammar (CCG) through visual perception. This constitutes the main target and the basic research milestone to investigate during this work. This research direction could help in making a robot able to understand syntactic relationships between words (i.e., phrases).

The literature reveals different approaches towards grounding words through perception; however, grounding phrases through appropriate computational modeling is still, no doubt, a major challenge in developmental robotics and AI. This project takes a step forward towards understanding the latent syntactic structure of language so as to pave the way to grounding phrases through perception.

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

In AIP 2017 challenge “*Towards Understanding Object-Directed Actions: A Generative Model for Grounding Syntactic Categories and Dependencies of Speech through Visual Perception*”, my research was centered around building a computational model for grounding parts of speech through visual perception. This model allows a robot to learn the meaning of words in a sentence like verbs, nouns, adjectives, prepositions and spatial relationships between referents and landmarks. However, the proposed model was only able to deal with words separately, which means that it was not able to learn the latent syntactic structure between words (i.e., phrases). This last point constituted my motivation (in the current PRISM project) for investigating the latent syntactic structure of language at the phrase level so as to open the door to ground phrases through perception.

### (2) 概要

In the PRISM project, my research contribution focused on:

1- Investigating the effect of different representations of words (i.e., syntactic

and semantic) on grounding daily human language instructions to a robot. The semantic-syntactic representation is obtained through the vectorial representation of each word using the Word2Vec model. The effect of this vectorial word representation on grounding language instructions is compared to the representation with syntactic POS tags. The results showed that semantic information is very important in grounding unknown synonymous words (i.e., new words but with the same meaning of words in the training phase).

2- Investigating language understanding at the phrase level (not only at the word level as in point 1). To this end, I worked on Combinatory Categorical Grammar (CCG) induction that uses the grounded POS tags (the outcome of the AIP challenge 2017-2018) as a basis for generating CCG categories in an unsupervised manner. The results show good performance from the framework in generating accurate grammar categories for phrases compared to a gold standard parsing. This opens the door to studying the way to create a vectorial representation of the generated grammatical categories, where each vector representing a syntactic category can combine with other vectors in space so as to allow for understanding compositionality in language and grounding phrases through perception.

### (3) 詳細

In the research theme: “*Evaluation of Word Representations in Grounding Natural Language Instructions through Computational Human-Robot Interaction*”, a Bayesian model was proposed to ground new words but with the same meaning to those that the robot was trained on using semantic information (e.g., move and shift & car and Toyota). The results showed that embedding vectors can highly improve the grounding process if being combined with POS tags for object and action words compared to embedding vectors only or POS tags only.

In the research theme: “*A Probabilistic Approach to Unsupervised Induction of Combinatory Categorical Grammar in Situated Human-Robot Interaction*”, a Bayesian framework was proposed to induce CCG categories for grounded words through visual perception. The HDP-CCG model uses the grounded POS tags of words to induce grammar categories. The performance of the grammar induction process was successfully evaluated through a gold-standard parse file and different POS tagging systems: BROWN clustering, BMMM clustering, and the HMM clustering system proposed at AIP challenge 2017-2018.

### 3. 今後の展開

Making a robot able to understand phrases is the real milestone to achieve from this work and its development in the future. Most of the related research studies in the literature considered language understanding as a problem of understanding words only, while it is more related to a higher-level understanding for phrases. This could be effectively allowing robots to better collaborate with human users in workspace, and to better interact with normal users at home environment.

Currently, I am working on developing a probabilistic model to represent the generated CCG categories of phrases through a compositional vector space so as to define the

new “HOL-CCG: Holographic Combinatory Categorical Grammar” that could facilitate grammar grounding. In the proposed HOL-CCG methodology, each generated grammar category corresponding to a phrase will be represented as a vector that could combine with other vectors so as to create a sentence (using the CYK parsing algorithm). Representations in this compositional vector space would be grounded and updated online through sensorial information that back propagates in the space so as to open the door to define the aspects of language emergence.

#### 4. 自己評価

1- Research achievement status: I believe that I am progressing in the good direction, and the framework that I am building step-by-step is very promising and interesting. I am collaborating with researchers in computational linguistics for this purpose to help accelerating my achievement in this research line. During the current year, I will complete the grounding step of the generated grammar categories, which will be the real state-of-the-art in cognitive robotics and artificial intelligence related research.

2- How to conduct research (research implementation system and execution of research expenses): I have attained the core targets that I have mentioned in the project plan, but it will be completed in 2019. Moreover, the PRISM funding helped me a lot to attend different conferences in AI and computational linguistics which was indeed so efficient to inspire me with new ideas.

3- Originality of research subject (challenge): This research topic bridges between different communities: computational linguistics, robotics, and AI and already the current research achievement is standing beyond the actual state-of-the-art in the related research. The expected achievement in 2019 (i. e., completing the grounding model of grammatical categories) will close the loop and will be an outstanding outcome of my work and my scientific contribution.

#### 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. A. Aly and T. Taniguchi and D. Mochihashi “A Probabilistic Approach to Unsupervised Induction of Combinatory Categorical Grammar in Situated Human-Robot Interaction”, Proceedings of the 18 <sup>th</sup> IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), China, 2018.
3. O. Roesler and A. Aly and T. Taniguchi and Y. Hayashi “Evaluation of Word Representations in Grounding Natural Language Instructions through Computational Human-Robot Interaction”, Proceedings of the 14th ACM/IEEE Human-Robot Interaction Conference (HRI), South Korea, 2019.
4. A. Aly and T. Taniguchi and D. Mochihashi “A Bayesian Approach to Phrase Understanding through Cross-Situational Learning”, Proceedings of the International Workshop on “Visually Grounded Interaction and Language”, in Conjunction with the 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), Canada, 2018.
5. O. Roesler and A. Aly and T. Taniguchi and Y. Hayashi “A Bayesian Framework

for Human Language Understanding: Grounding Word Representations through Cross-Situational Learning” , Cognitive Systems Research (under submission), 2019.

(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)

なし

# 研究報告書

## 「寄り添う AI を用いた発達障害児のためのプレジジョン・ケア」

研究期間：平成 30 年 8 月～平成 31 年 2 月

研究者：大野 美喜子

### 1. 研究のねらい

本研究は、現在、ほぼ皆無であった発達障害児向けの傷害予防を実践するため、行動解析技術やテキストマイニング技術など、近年利用可能になってきた IoT や AI などを用いることによって、多様な発達障害を有する児童に対して個別適合（プレジジョン・ケア）できる事故予防法を開発することを狙いとした。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、発達障害ごとに行動パターンや事故の傾向を整理し、安全な環境づくりを支援するための個別適応型教育支援ツールを開発することを目的に、1) ヒヤリハット・事故事例の分析、2) 発達障害児の行動データの収集、3) プレジジョン・ケア提案システムの開発を行った。1) ヒヤリハット・事故事例の分析では、発達障害児支援施設「スタジオそら品川戸越」と連携し、施設に勤務する発達支援療育士を対象に聞き取り調査を行った。スタジオそらでは、毎月 2 例のヒヤリハット・事故事例を記録し、今後の療育方法の改善につなげる仕組みがあり、本研究では、品川戸越が開設した 2017 年 6 月から 2018 年 12 月までに記録された全 38 件のデータを分析した。その結果、ヒヤリハットの種類でもっとも多かったのは、誤飲（7 件）と転倒・転落（7 件）、次いで、衝突（6 件）、挟む（3 件）、飛び出し（3 件）となった。ヒヤリハットに関連した製品の種類では、誤飲に関するヒヤリハットの原因となったクーピーペンシル、ストロー、紙くず、転倒の原因となった平均台、ボルダリング、バランスボールなどがあつた。2) の行動データ収集では、施設担当者と協議し、施設内 4 か所（出入口、運動部屋の入り口、運動部屋、微細活動部屋）に RGBD カメラを設置した。2018 年 11 月 21 日にカメラの設置が完了し、2019 年 2 月 1 日現在、約 2 か月半の行動データ記録に成功した。3) のプレジジョン・ケア提案システムの開発では、性別、年齢、障害の種類、場所、事故・ヒヤリハットの種類、事故・ヒヤリハットに関連した製品など、自分の知りたい検索条件を入力すると、具体的な事故・ヒヤリハットの事故情報と、その事故に関連する動画が見られる機能をもったシステムを開発した。また、1) で収集した事故・ヒヤリハットデータに基づき、発達障害児をもつ保護者向けの傷害予防パンフレットを作成した。今後の展開として、本研究で連携したスタジオそら品川戸越では行動データの収集を継続し、アースキッズ株式会社が、2019 年 2 月に新しく開設する未就学児専門の療育施設でも、行動データの収集を開始する予定である。また、発達障害児を対象とした事故調査票を作成し、療育施設への導入を目指す。

## (2) 詳細

### 「スタジオそら」の概要

「スタジオそら」は、アースキッズ株式会社が運営している児童発達支援・放課後デイサービスを提供している施設である。全身を使って運動の基礎を学び粗大運動、公園などを活用して脳や五感に刺激を与えるための自然体験、絵を描いたり、靴ひもの結び方など日常で必要とされる手先の動きや力の加減を学び微細運動、読み書き、算数などの学習支援、感情コントロールなどのソーシャルスキル・トレーニング、音楽を通して身体の動きや指先の使い方を学ぶ音楽療育などを行っており、東京都内に 10 施設、神奈川県に 2 施設を開設している。本研究で連携したスタジオそら品川戸越は、現在 80 名（男 67 名、女 13 名）が利用している。

### 研究テーマ A「ヒヤリハット・事事故事例の分析」

スタジオそらでは、療育サービスの質を高める目的で、各施設ごとに月 2 件の事故・ヒヤリハットデータを収集している。本研究では、連携施設「スタジオそら品川戸越」が開設した 2017 年 6 月から 2018 年 12 月までに記録された全 38 件のデータを分析した。まず、発生したヒヤリハットでもっとも多かったのは「誤飲：7 件」、次いで、「転倒・転落：7 件」、「衝突：6 件」、「挟む：3 件」、「飛び出し：3 件」であった。これまで産総研が収集してきた子どもの傷害データの分析結果と比較してみると、事故の種類でもっとも多いのは「転倒・転落」が圧倒的な割合を占めているのに対し、スタジオそらのデータでは、「誤飲」が第 1 位を占める結果となった。誤飲の具体的な事例には、“コップに泡状の石鹸を入れて飲もうとする”、“色塗りをしているクーピーを食べようとする”、“床に落ちているゴミを口に入れようとする”などがあった。発達障害児の場合、このような誤飲の事例が、ある程度年齢の高い子ども（就学児童）にもみられる傾向があり、発達障害児の事故の特徴の 1 つである。

次に、関連した製品の種類を見てみると、誤飲に関するヒヤリハットの原因となったクーピーペンシル、ストロー、紙くず、転倒の原因となった平均台、ボルダリング、バランスボールなどがあった。報告されたヒヤリハットの頻度と発達障害の種類の間を見てみると、自閉症スペクトラム（ASD）が 16 人でもっとも多く、次いで「注意欠陥・多動性障害（ADHD）の疑い」が 7 人、「ADHD（診断確定）」が 3 人、「難病・肢体不自由」が 3 名となった。人数の多かった ASD および ADHD 傾向・ADHD に焦点を当て、発達障害の種類とヒヤリハット事例の関係を分析した結果を図 1 に示す。

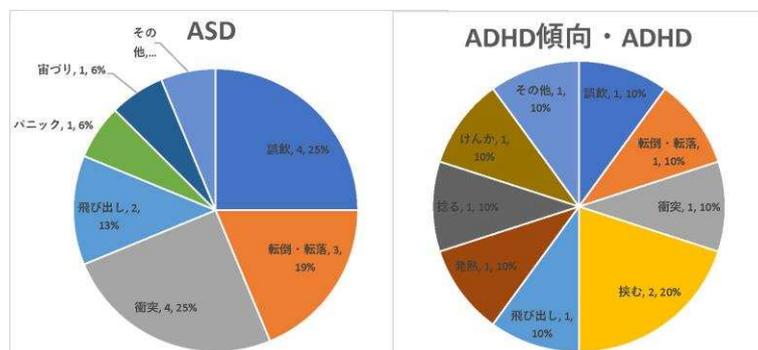


図 1:発達障害の種類とヒヤリハットの関係

ASD の子どもの場合、誤飲、転倒・転落、衝突の 3 種類で全体の約 70%を占めるのに対し、ADHD 傾向・ADHD の子どもの場合には、ヒヤリハットの種類が多岐にわたることがわかる。このような違いは、どのような事故予防に取り組むべきかの優先度を検討する場合に非常に役立つ知見であり、今後さらにデータを蓄積することで、発達障害の種類ごとに、より適切な事故予防対策を講じることが可能である。

#### 研究テーマ B「発達障害児の行動データの収集」

発達障害児の行動データ収集は、産業技術総合研究所人間工学実験委員会の承認を得て実施した（人 2016-659H）。データ収集に伴い、施設を利用している子どもとその保護者に対して本研究の目的などを説明し、77 名から同意を得ることができた。2018 年 11 月 21 日、Microsoft の Kinect カメラの設置を完了し、2019 年 2 月 1 日現在、約 2 か月半の行動データ記録に成功した。カメラの設置場所は、施設担当者と協議し、施設内 4 か所（出入口、運動部屋の入り口、運動部屋、微細活動部屋）に設置している。図 2 に取得した行動データの例を示す。



図 2：取得した行動データの例（左から：トランポリン，塗り絵，バドミントン）

療育を行っている子どものダイナミックな動きや細かい作業の様子、子どもと療育士との距離など傷害予防につなげるために重要な情報が取得できていることが分かる。子どもが活動を嫌がる様子や、療育士が子どもを抱っこする様子などのデータも取得できていた。このような子どもと療育士とのインタラクションデータは、療育士への教育にも活用でき貴重なデータである。また、転倒している子どもの様子を図 3 に示す。

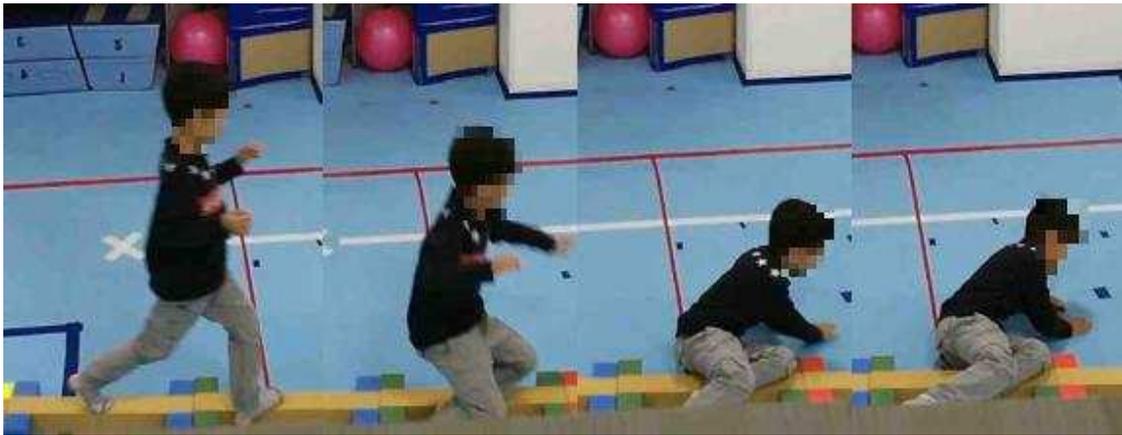


図3：平均台の練習中に子どもが転倒する様子

このデータを見てみると、活用されている平均台は高さ10センチ程度のもので低く、床材は衝撃を吸収する柔らかいマットの上で練習しているため、転倒しても重症なケガにつながる危険性は低い。一方で、転倒した子どもは靴下を履いており、平均台を移動中にすべって転倒していた。この場合、靴下を履いたまま粗大運動はさせないなど、新しい規則を設定することで、より転倒リスクを軽減させることが可能である。このように、事故やヒヤリハットに関連する行動データには、傷害予防の3E（Enforcement, Environment, Education）\*の観点で安全対策を検討するために重要な情報が多く含まれており、より安全な環境づくりや療育サービスに活かすために貴重なデータである。

※傷害予防のためには1) 法制化（Environment）、2) 環境改善（Environment）、3) 教育（Education）の3つの側面から対策を行うことが重要であるとされており、英語の頭文字をもって傷害予防の3Eと言われている。

#### 研究テーマC「プリジジョン・ケア提案システムの開発」

テーマA・Bで取得したデータを活用し、プリジジョン・ケア提案システムを開発した。具体的には、性別、年齢、障害の種類、場所、事故・ヒヤリハットの種類、事故・ヒヤリハットに関連した製品など、自分の知りたい検索条件を入力すると、具体的な事故・ヒヤリハットの事故情報と、その事故に関連する動画が見られる機能を持っている。システムのスクリーンショットを図4に示す。

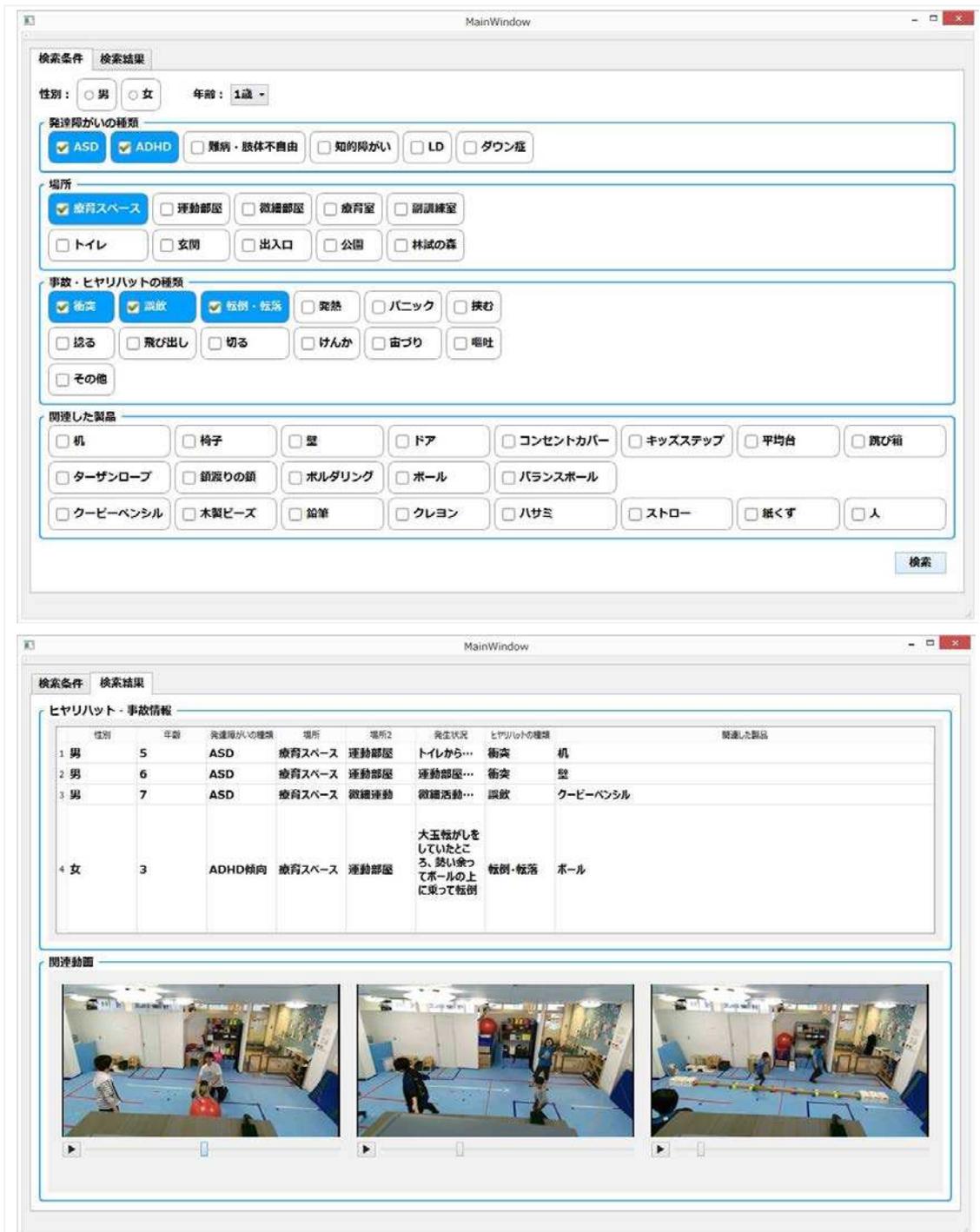


図 4：プリジジョン・ケア提案システムの例

また、今回収集したデータを用いて、発達障害の子どもを持つ保護者向けのパンフレットを作成した。パンフレットには、事故やヒヤリハットの事例を分かり易くイラスト化した危険地図、①誤飲、②やけど、③転倒、④中毒の4テーマに対する事故予防策の解説、傷害予防の3Eと事故予防の基本的な考え方の解説、スタジオそらと傷害予防に取り組むNPO法人Safe Kids Japanの紹介を入れた。作成した危険地図の例を図5に示す。

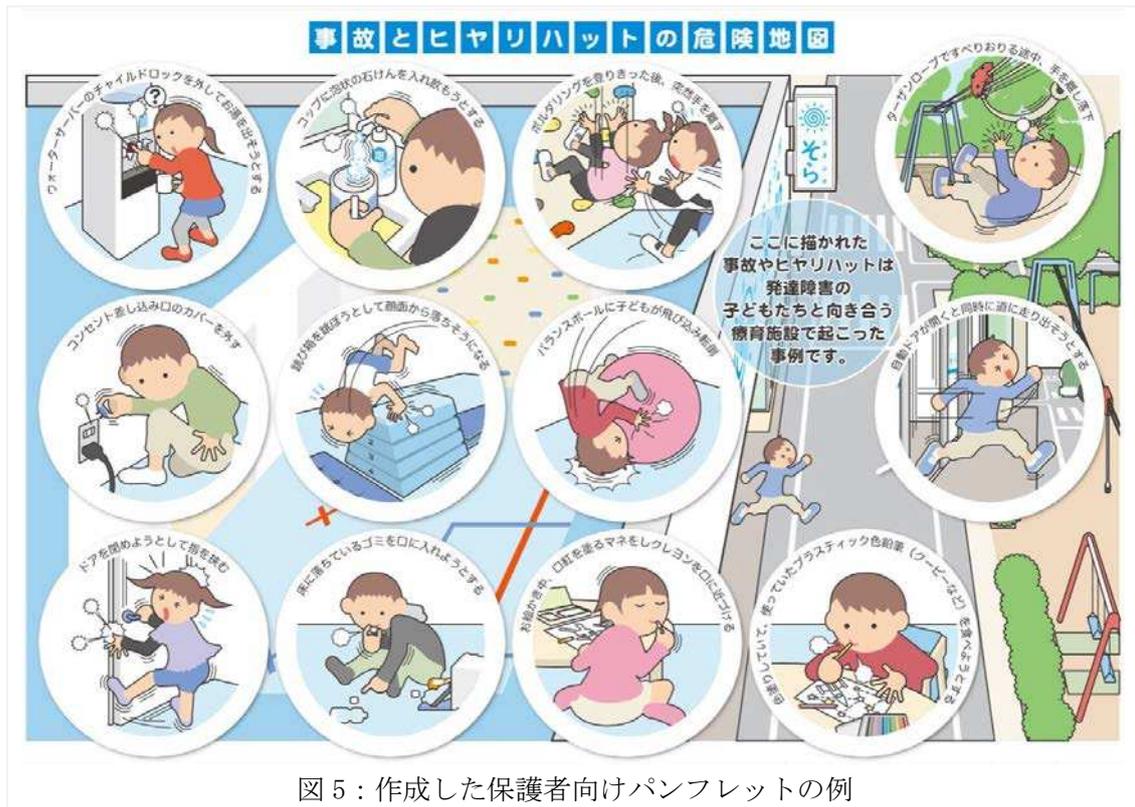


図 5：作成した保護者向けパンフレットの例

### 3. 今後の展開

平成 24 年に文部科学省が全国の公立小・中学生約 5 万人を対象にした調査によれば<sup>1)</sup>、発達障害の可能性があると判断された生徒は全体の 6.5%であった。すでに特別支援学校などに通っている発達障害児の子ども数を考慮すると、実際の発達障害児の数はさらに多いと考えられ、我々の身近にいて当たり前といってもよい。このような状況にも関わらず、これまで発達障害児を対象とした事故予防はほとんど取り組まれておらず、本研究で実施した行動データの取得は、世界的にも初の取り組みだったと言える。今後は、本研究でカメラを設置した施設でのデータ収集は継続し、2019 年 2 月に新しく開設された未就学児専門施設でも行動データの収集を検討中である。また、本研究で開発したプリシジョン・ケア提案システムは、事故・ヒヤリハットデータおよび行動データを追加し、システムを精密化すると同時に、実際に療育士に活用してもらいながら新しい機能も追加していく予定である。連携施設の療育士からは、発達障害児では高年齢になっても公園へ移動中に突然走り出し見失いそうになったり、誤飲のようなヒヤリハットや事故が見られるという特徴がある。療育士だけでなく、教員や保育士も、発達障害のない子どもとは違った側面の知識を身に着ける必要があり、本研究で取得した行動データは、子どもの保育や教育に関わるすべての人にとって非常に役に立つのではないかという意見もあった。今後、その第一歩として、本研究で収集した行動データを活用し、これまでにスタジオそらとすでに連携を進めている世田谷区と共に教育プログラムを展開する予定である。また、発達障害の場合、気持ちの切り替えを上手く行うことが困難いう特徴があるため、発達障害のない子どもに比べて、その日にあった出来事などに心理状態が大きく左右されやすい状況がある。それが、その日の事故やヒヤリハットのリスクを高めており、療育を開始する前に、その

子どもの心理状態を把握することも、傷害予防の観点ではとても重要なパラメータになる。今後、例えば、子どもが来所した際に、その日の気分などを簡単に入力できるシステムを導入できれば、事故の傾向と子どもの心理状態との関係を把握することも可能になると考えられる。最後に、本研究では、発達障害児を対象とした事故調査票の作成を進めてきた。取得した行動データの分析で得られた知見をもとに項目を精査し、傷害サーベイランスの導入・開始をすすめる予定である。

- 1) 文部科学省 (2012). 通常の学級に在籍する発達障害の可能性のある特別な教育的支援を必要とする児童生徒に関する調査結果について. アクセス日: 2019年2月1日: [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/tokubetu/material/\\_icsFiles/afieldfile/2012/12/10/1328729\\_01.pdf](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/tokubetu/material/_icsFiles/afieldfile/2012/12/10/1328729_01.pdf)

#### 4. 自己評価

本研究では、発達障害児の特性に基づいた傷害予防法を開発するため、近年利用可能となった IoT や AI の技術を援用し、発達障害の種類によって多様性のある行動データを収集することに成功した。これは、これまでほぼ皆無であった発達障害児を対象とした傷害予防研究という新しい研究領域において「プレジジョン・ケア (精密ケア): 多様な発達障害を有する子どもに対して個別適合できる傷害予防」を具体化させる第一歩となったと確信している。本研究の研究項目であった 1) 傷害データの収集と分析, 2) 行動データの収集, 3) プリシジョン・ケア提案システムの開発の達成状況については以下の通りである (○: 達成, ●: 未達成)。

研究項目	詳細	達成状況	備考
傷害データの収集と分析	発達障害児を対象とした調査票の作成とその調査票を活用した傷害データの収集	○	発達障害は、障害の種類を明確に分類できない場合や、発達障害の種類が複数にまたがっている場合が非常に多いため、連携施設の担当者と協議し、事故の傾向は、過去のデータを分析することで対応し、調査票の項目の選定を、本研究を通して非常にきめ細かく行うことに研究計画を変更した
	傷害・ヒヤリハットのデータ収集	○	
行動データの収集	発達特性を把握するための ASQ-3 と呼ばれるアセスメントの実施	○	すでに連携施設が把握している発達障害の種類や障害傾向のデータを活用したため ASQ-3 は実施不要であった
	障害の種類と行動と	○	

	ヒヤリハットとの関係分析		
プリシジョン・ケア提案システムの開発	個別適応型教育支援ツールの開発	○	

研究の進め方に関しては、連携施設スタッフの協力体制が整っており、短期間の研究にも関わらず、データの収集やカメラの設置など予定通りに実施することができた。カメラによる行動データ収集に関しては、研究開始当初、保護者からの同意取得が懸念点であったが、普段からの施設スタッフと保護者との関係性に助けられ、ほぼすべての利用者から同意を得ることができた。

本研究で得られた成果を活用し、収集したヒヤリハット事例をもとにした危険マップの作成および保護者向け事故予防パンフレット「一人ひとりの理解と目配りでケガを防ごう！傷害予防のための3E～発達障害児支援の現場から～」を作成し、まず、スタジオそらの会員である約1000家庭、および、スタジオそらが連携している行政や教育施設に配布した。また、本研究で開発した提案システムを、施設スタッフに実際に活用していただき改良を進める予定である。今後の行政との連携可能性も見えた。具体的には、本研究で開発したプリシジョン・ケア提案システムを、学校関係者向けの教材として活用し、学校現場での発達障害児へのケアに役立てる教育プログラムを計画中。

近年、高齢者の分野では、ビデオ画像を活用した傷害予防が始まっており、世界的には、Robinovitch氏がカナダの老人ホームで行ったビデオ観察による転倒の研究<sup>1)</sup>が有名である。日本でも、経済産業省が「ビンテージソサエティの実現に向けた高齢者等の行動データ収集事業」を行い、平成29年度には行動ライブラリの公開が始まっている<sup>2)</sup>。先述したように、行動データは、傷害予防の3Eの観点で安全対策を検討するための多くの情報が含まれており、従来の文章や一瞬を映し出した写真による事故状況の記録データと比較しても、情報量が飛躍的に増加している。今後、このようなデータを予防に活用しないという方向は考えにくく、どう取得し、どう予防につなげるかが、学術的にも社会・文化的にも傷害予防の分野を大きく進展させる鍵となり得る。また、安全な製品開発という産業にも行動データの活用の期待は大きい。本研究では、これまでほぼ取り組みがされてこなかった発達障害児を対象とした傷害予防研究という具体的な課題に、行動データを収集するための新しい技術を適用し、傷害予防の新しい研究手法を実践できたこと、この研究手法が、新しい予防策の立案に大きく貢献できる可能性を示せた点においても、本研究で得られた成果は非常に大きいと考える。

個人的には、過去10年間、子どもの傷害予防に取り組んできたが、発達障害児を対象とした傷害予防の経験はなく、本研究が初めての取り組みとなった。IoT・AIの技術が急速に発展し、新しい手法でのデータ収集に挑戦できたことに加え、年齢だけでなく、行動特性という特徴でカテゴリー化し、より個別適合型傷害予防研究の広がり可能性を実感できたことは、研究者として成長する上でも貴重な糧になったと考える。

1) Robinovitch, S.N., Feldman, F., Yang, Y., Schonnop, R., Leung, P.M., Sarraf, T., Gould, J.S., Loughin, M.: Video capture of the circumstances of falls in elderly

people residing in long-term care: an observational study. Lancet 381, 47-54 (2013)

2) 産業技術総合研究所：<https://www.airc.aist.go.jp/lirt/vintagedemo.html>

## 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

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)

「一人ひとりの理解と目配りでケガを防ごう！傷害予防のための3E～発達障害児支援の現場から～」パンフレット

# 研究報告書

## 「地震津波災害時の企業間取引への波及推定」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：小川 芳樹

### 1. 研究のねらい

大規模自然災害においては、人的、物的被害が発生するだけでなく、経済的にも大きな被害が発生するが未だ十分な対策は行われていない。そのため、サプライチェーン（以下 SC）における事業継続への各企業の取組み（BCP）の重要性が再認識されている。津波などの広域災害においては、複数の都道府県の市区町村や民間企業に対して同時多発的に応援要請が届くため、適切な災害対応が難しくなる。そのため多層化する取引ネットワークの広域的分析・可視化の必要性が問われている。近年自然災害が多発しているにもかかわらず BCP の策定率は 27.4% の低水準にとどまっている。アメリカのように BCP が義務化されていないこと、また策定するのに必要な地震発災時の被害や経済的影響が全体の影響額で示されるだけで SC を対象とした被害推定や分析まで十分に行われていないことが原因である。また、BCP が策定されていても、取引先企業と連携した BCP を策定している割合は BCP を策定している企業の 3 割にも満たない。そのため、地震津波によりどのような被害が発生し、SC ネットワークを通じた経済的な影響がどのように発生し、復興するのかを推定・可視化することは極めて重要である。

既往研究において、SC を考慮した企業のリスク・復興分析では、SC 全体の各企業・従業員を取り扱い、地震被害シミュレーションをインプットした統合シミュレーションをしているものは見られない。これは、各企業の SC リスク分析が対象とするデータの空間単位は企業単位に対して、マクロ的に見る産業連関表（統計表）が経済分析においては用いられているからである。しかしながら、近年は携帯電話の GPS データを用いることで人単位の人流や捉えることが可能になり、SC を網羅的に把握出来る企業間取引データも利用可能になりつつあり、企業のリスク推定精度が大幅に改善される可能性がある。また既往研究における企業の被害波及復興モデルには経験則的な統計による推定のみで AI を用いた数値シミュレーションによる意思決定モデルはなく本研究では深層強化学習を用いる挑戦的な研究であるといえる。本研究の特色は、①大規模携帯電話 GPS データや建個別建物データにより非集計分析を可能にし、各企業間取引被害を全国の SC 全体にまで拡張する点、②強化学習＋深層学習を用いて災害時の企業の意思決定をモデル化し、復興シミュレーションに取り込む点である。これらによって、企業リスク・復興分析手法を高度化させた経済的な影響評価モデルを構築することにある。本研究により防災分野におけるビックデータ\*AI の応用の可能性を示す。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

H29 年 AIP チャレンジでは、高知市を対象として南海トラフ地震津波後の企業の生産回復過程を多様なジオビックデータを用いてシミュレーションする枠組みを構築した。そのために、南海トラフ地震・津波の人的・物的被害をシミュレーションし、各企業の物的被害と人的被害を携帯電話 GPS データから推定した。そして全国 160 万社の企業間取引データを用いて被害波及を多段階的に SC 全体に静的なモデルでシミュレートすることで SC を考慮した企業の生産復興シミュレーションを行う枠組みを構築した。その結果、時間、シナリオ、業種による被害影響が復興にどの程度影響するかが明らかになった。またネットワーク分析を組み合わせて SC 全体の媒介中心性を計算することでボトルネック企業を抽出する手法を提案した。

### (2) 概要

PRISM 加速支援では南海トラフ地震時に SC を通して企業間取引への経済的被害がどのように波及して復興していくかを推定するために多様なビッグデータと AI 技術を応用してシミュレーションする手法を開発した。また産業立地構造が与える影響と災害時の企業の意思決定の最適化にモデル化して AI の適用可能性を明らかにした。そのためにまず、南海トラフ地震津波における各企業の人的・物的被害を推定した上で災害直後の被害波及から復興段階まで SC ネットワーク上でシミュレートした。手法は強化学習 + 深層学習を組み合わせた Deep Q Network を用いたマルチエージェントシミュレーションにより、各企業が市場価値を最大することを目的とした最適行動モデルを構築した。また本モデルには自社の設備復旧、取引を失った場合の代替取引の発生といった行動をモデルに入れ各企業の意思決定を学習させることで復興に向けた行動の最適化を試みた。モデルの中には、他のエージェントの Q 関数を共有することで良い行動をするように他のエージェントを参照する進化型のアルゴリズムを入れることで、より早く復興する協調行動をとるようにした。最後に地震津波に対する産業立地構造の在り方と各企業の意思決定が SC 全体にどのような変化をもたらすか定量的に明らかにした。その結果、学習初期においては、各エージェントはランダムに行動を選択して行動するため復興までに時間を要していたものが学習するにつれて復興への最短行動をするように行動の組み合わせが最適化されることで早期復興することが可能になった。すなわち戦略的な行動を取ることで復興スピードは格段に速くなることを示唆している。また復興過程の企業間取引ネットワークを地図上に可視化することで学習前と学習後の復興過程の違いを視覚的に理解しやすいようにした。加えて、本研究では研究期間に発生した西日本豪雨を受けて地震津波災害だけでなく豪雨災害のケーススタディとして荒川洪水における企業への被害波及推定も行った。

### (3) 詳細

本研究では、まず既往の建物被害モデルや人的被害モデルを適用し、企業の設備資本と労働資本の被害を推定する。そして日本全国 160 万社の事業所間取引データ（本社間

取引データを事業所単位に分解したデータ)を用いて複数の自治体にまたがる広域かつ多層化する取引への被害波及と復興過程をシミュレーションする手法を開発した。また本研究では2012年に四国エリアで1回でも観測があった全国の約8万ユーザの携帯電話GPSデータを用いることにより発災時間による従業員数の位置情報を加味した分析を可能にした。

また、本研究では南海トラフ地震における被害推定結果及び大規模事業所間ネットワークデータを組み合わせることで、SCネットワークにどのように被害影響が及び復興するかをエージェントシミュレーションする手法を提案し、高知が発災した場合をケーススタディとしてシミュレートして可視化した。シミュレーションの分析結果から、被災地(高知)から距離の近い地域だけでなく3大都市圏(東京・大阪・名古屋)でも被災事業所と直接取引関係を持つ事業所が多く存在しており当該地域への経済的な影響が地理的にも大きいことが明らかになった。また、部門別にみると高知でのメイン産業である建設業や農林水産業への被害影響が大きく、発災シナリオや部門による違いがシミュレーションにより明らかになった。高知以外の地域が被災する場合においても、その地域の地震動と津波遡上シミュレーションデータを用いることで、同様にシミュレーション可能である。

#### 研究テーマA「各企業の被害推定技術の確立」

南海トラフ地震・津波で起こり得る地震・津波シナリオの下で高知市、土佐市、南国市、須崎市、香南市の各企業の事業所の被害推定(津波、火災、倒壊の人的・物的被害)を行った。

##### 1. 設備資本被害推定

資本被害については、建物被害と同等であると仮定して地震動と津波を対象とした建物被害率を算出する。地震動による建物被害率については、地震動(地表最大速度)に対する建築年代と建物構造別の建物被害関数を用いて建物被害率を推定する。津波による建物被害率については、内閣府中央防災会議の手法を用いて津波遡上シミュレーションから得られる最大浸水深と建物構造から被害率を推定した。

##### 2. 労働資本の被害推定

労働資本被害は各事業所の従業員の被害と同等であることから、事業所ごとに建物被害による死者数と避難者数を内閣府(2012)の手法を基にシナリオごとに求める。倒壊による死者数と避難者数は発災時の各従業員の滞留場所である建物被害率に死者率と避難者率をそれぞれ掛け合わせてダブルカウントを考慮して集計することで求めた。また、津波による死者率も滞留場所と流動場所を基に津波避難シミュレーションすることで同様に求めた。その際に、各従業員は発災時間により(1)勤務中、(2)移動中(通勤)、(3)自宅、(4)その他(買い物、旅行など)の被災状況考えられるため、各人の1年分のGPSの移動履歴を元に推定した自宅・勤務先を考慮した上で各従業員が属する事業所側の労働資本へ被害を反映させる処理をした。

#### 研究テーマB「マルチエージェント深層強化学習シミュレーションによる復興シミュレーションの開発」

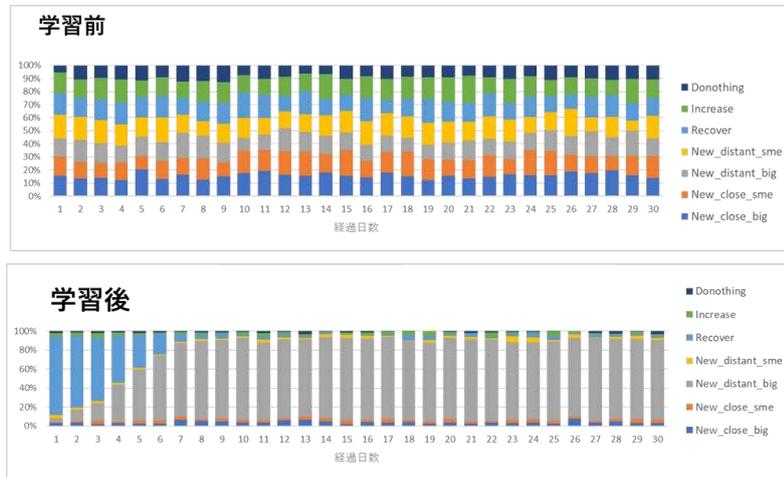
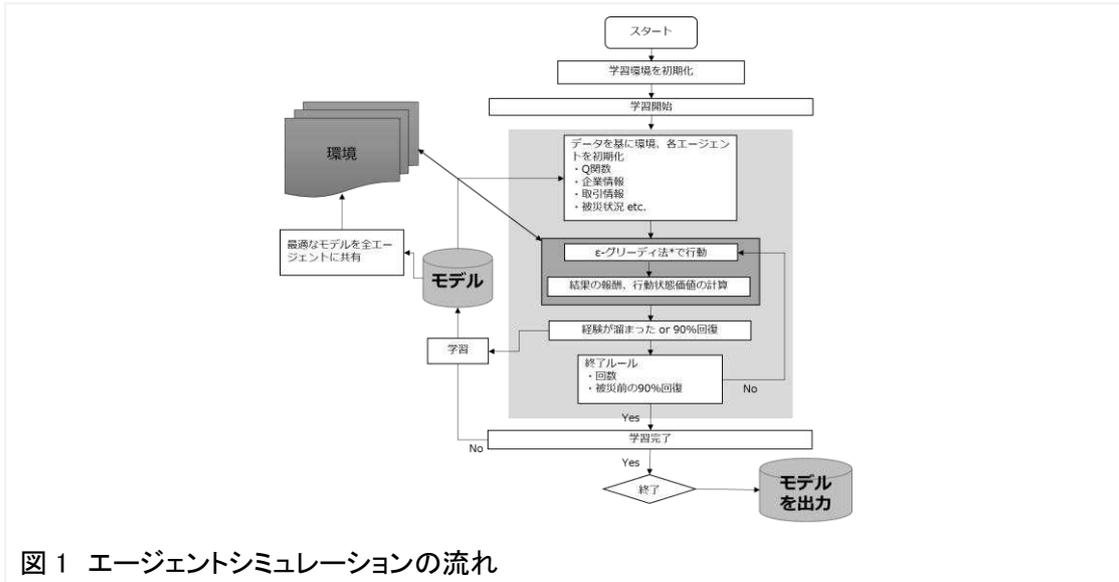
本研究では、ある事業所が発災するとSCネットワークを通じて川下事業所に影響が

及ぶとする。一方で災害後には、被災企業が復興もしくは取引を失った企業は代替取引をすることで復興しようとする。そのような復興行動を最適化するために本研究では企業が適切な行動を取るように Q learning を用いて学習させるエージェントシミュレーションのフレームワークを構築した。これに被災企業がエージェントとなり、復興への最適化行動を学習することが可能になる。本研究では最適行動価値関数をニューラルネットワークを使った近似関数で求める Deep Q Network を用いた。本研究におけるエージェントシミュレーションのフレームワークを図 1 に示す。シミュレーションのゴールは全ての企業が、災害前の取引量の 70% まで回復するための最適行動を得ることである。企業エージェントは企業情報(企業コード、売上高、従業員数、業種、取引先の情報など)を持っている。企業エージェントの状態変数は、企業同士の取引状況、取引先、取引金額である。各エージェントとの行動パターンは 7 種類設定した。まず、取引先を失った場合に新しい取引先を探す場合は、規模の大きさや立地によって取引を結ぶコストが違うと考え規模と距離を考慮して次の 4 種類設定した。

- ① 新しい取引先：大中企業でエージェントから近い距離に立地、
- ② 新しい取引先：大中企業でエージェントから遠い距離に立地
- ③ 新しい取引先：小企業でエージェントから近い距離に立地
- ④ 新しい取引先：小企業でエージェントから遠い距離に立地

また、⑤既存の取引先の取引額を増やせる取引がある場合は増やせる行動も導入した。これは、復興早期においては、取引額が復興状況に応じて変わるため、被災前に比べて取引額が小さい場合は、既存の取引額を増やせる。さらに、被災企業の行動として被災率を取引に考慮しているため⑥復興作業をモデルにいれた。すなわち被災した場合は、復興作業を行わないと取引を再開できないモデルとなっている。最後に、⑦取引先が見つからない場合や上限の取引額に達している場合は行動しないというアクションをいれた。ただし、新しい取引先は既存の取引先数の 1.5 倍の企業数しか取引出来ないルールを設けている。

本研究では被災企業 300 企業をエージェントとしてシミュレーションをした。その結果、図 2 に示すように学習初期ではランダムに行動して取引回復率が低く復興が上手くできていないが、学習後期では安定して行動するようになり最終取引額も大きくなるようになった。業種別の傾向を見ると、建設業と運輸通信業の回復率が高い一方で、卸や製造業の回復率が低い傾向にあった。これは、対象となる企業が前者の方が大きく、多く取引先を持てるためである。また復興過程における行動を集計したものを図 3 に示す。学習前はランダム行動していたものが、学習後は早期に自社の復興をして後期にかけては、被災エリア外の大きい企業と取引を結ぶ行動を取ることで復興しているのがわかる。以上によりエージェントシミュレーションによる復興過程の最適化をすることが可能になった。また最良のモデルを 100 回繰り返して再現性の検証をしたところ、95 回において復興することができた。



### 3. 今後の展開

本研究では、多様なデータによるシミュレーションの基盤を作ることができたが、今後多くの課題と目標を残している。第一に、本研究の数値事例ではいくつかの重要なパラメータを仮定により与えている。例えば被災企業の企業の生産活動はライフラインなどの様々な要素に左右される。そのため、より正確な経済的影響の推定をするのには道路やライフラインの停止といった被害も考慮する必要がある。また各被害推定モデルの改良だけでなく、利用している携帯電話 GPS や企業間取引データの観測精度が向上することでより正確な経済への被害波及推計が多様なシナリオで可能になると考えられる。シミュレーション手法の検証についても、2011 年東日本大震災や 2017 年熊本地震を対象に行い手法の信頼性の評価を行う予定である。

今後は、より広域で多数のエージェントを対象としたシミュレーションを行い結果の分析をする予定である。一方で、企業レジリエンス向上のために必要な対策や産業構造が復興過程に与える影響をより詳細に明らかにしていきたいと考えている。また地震津波災害だけでなく、豪雨災害に対しても本研究の技術は利用可能であるため検討していきたい。社会的にも、西日本豪雨以降、事業継続計画の在り方について議論されていることから本研究のような数値シミュレーションが最終的に政策の場で活用できないかを合わせて検討していきたい。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

当初の目標を概ね達成できた。8 か月という短い期間の中で目標設定を高め設定したにも関わらず、大規模な SC データに対する深層強化学習の実装などの目標が概ね達成できた。このフレームワークが達成できたことで今後の研究の発展性も見えてきただけでなく色々な課題が具体的に見えてきたことは大きい。一方で研究開始が遅れた影響もあり、政策の違いによる影響をモデルに入れ込むといった一部目的は達成できなかった。しかしながら、研究期間中に発生した西日本豪雨を受けて当初計画にはなかったが、荒川洪水が発生した場合の経済的な影響評価を行うことが出来た。

#### ・研究の進め方

研究は基本的には 1 人で進めた。ただし、簡単なデータ処理や可視化などについては学生にアルバイトを依頼して効率的に研究を進めた。また強化学習の実装のところについては、AI が専門分野ではなかったため、カーネルゲーメロン大学のコンピューターサイエンスの AI ラボに行き指導やアドバイスを受け、手法の改善及び実装のサポートにより研究を加速することができた。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果(今後の見込みも重視してください。)

本研究は防災における経済的評価に対して既往研究手法には無い全く新しいアプローチをしているため学術的意義は非常に大きい。特に計算機の性能が良くなり観測データが蓄積している中、本研究のようにビッグデータに深層強化学習を応用することで社会科学シミュレーションを行い、社会的事象の最適化を図ることは society5.0 にも貢献できる。また防災という分野は従来、経験則的な統計手法による被害推定をしてきたが、

本研究のような様々な要因を数値シミュレーションに入れ込む手法を提案することで、現象そのものの理解とより高精度な被害推定や復興シミュレーションが可能になると考えられる。発災から復興までの数値シミュレーション結果をもとにBCPを策定することが可能になれば復興にも焦点をあてた対策が可能になり事前に代替取引先を決めることや在庫の確保などによる復興スピード向上も期待できる。

**・研究課題の独創性・挑戦性**

本研究の特色は、①大規模携帯電話GPSデータや建個別建物データにより非集計分析を可能にし、各企業間取引被害を全国のSC全体にまで拡張する点、②強化学習+深層学習を用いて災害時の企業の意思決定をモデル化し、波及シミュレーションに取り込む点。これらによって、企業リスク解析手法を高度化させた経済影響評価モデルを構築することにある。これらの点に対して概ね目標を達成できたが今後手法の改善をしていくことで本研究の完成度を上げていきたい。

**5. 主な研究成果リスト**

**(1)論文(原著論文)発表**

- |   |
|---|
| 1. Yoshiki Ogawa, Yuki Akiyama, Muneta Yokomatsu, Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Estimation of supply chain network disruption of companies across the country affected by the Nankai Trough Earthquake Tsunami in Kochi city, Journal of Disaster Research, In press        |
| 2. Ogawa, Y., Sato, T., Akiyama, Y., Shibasaki, R. and Sekimoto, Y., Developing a Model for Estimating the Home Return of Evacuees Based on the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami -Utilizing Mobile Phone GPS Big Data,Advances and New Trends in Environmental Informatics, 227-240, 2018 |
| 3. 小川芳樹・秋山祐樹・金杉洋・柴崎亮介, ジオビッグデータを用いた多様なシナリオに基づく南海トラフ地震津波の人的被害推定ー高知市周辺を対象としてー, E-journal GEO, 13(1), 140-155, 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】**

**・査読有論文**

- |   |
|---|
| 1. Yang, S., Ogawa, Y., Akiyama, Y., Shibasaki, R. and Ikeuchi, K., Estimation of the economic impact of large-scale flooding in the Tokyo metropolitan area, 2018 IEEE International Conference on Big Data, 3190-3199, 2018 |
| 2. 楊少鋒・小川芳樹・秋山祐樹・柴崎亮介・池内幸司, 荒川流域における大規模水害を対象とした経済的影響の推定, CSIS DAYS 2018 研究アブストラクト集, 64 (D11), 2018  |
| 3. 小川芳樹・秋山祐樹・横松宗太・関本義秀・柴崎亮介, 南海トラフ地震・津波を想定したサプライチェーンへの被害波及と復興シミュレーション, CSIS DAYS 2018 研究ア   |

ブストラクト集, 65 (D12), 2018.

・査読無論文

1. 小川芳樹・秋山祐樹・篠原豪太・柴崎亮介・関本義秀, 本社間取引データを用いた事業所間取引データの推定, 第 27 回地理情報システム学会講演論文集, D-7-4, 2018.
2. 楊少鋒・小川芳樹・秋山祐樹・柴崎亮介・池内幸司, 荒川流域における大規模水害を対象とした経済的影響の推定, 第 27 回地理情報システム学会講演論文集, B-3-3, 2018.

・受賞

1. Environmental Informatics of the German Informatics Society 「Best paper award」 (2018)

# 研究報告書

## 「子供の ASD 患者の発話分析による自動診断」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：崎下 雅仁

### 1. 研究のねらい

産まれてくる子供達の15%は何らかの発達障害を抱えて生まれ、知的障害や言語障害を伴うこともある。ご本人にサポートが必要であるのに加え、ご本人のご家族や医療機関、福祉や行政への科学技術での様々なサポートが必要である。本研究では発達障害、中でも自閉スペクトラム症 (ASD)の診断は検診時の状況や診る人、環境で変わることがあるということに着目した。これまでに症状定量化のための様々なアセスメントツールが開発されているが、これらを完全自動化した研究は存在しない。本研究ではアセスメントツールの自動化を行うことを目標にした。自然言語処理分野においては、ASD 者の発話を対象とした研究は少なく、特に日本語の先行研究はほとんど存在しない。そのような背景もあり、私はこれまでに発話から ASD の普遍的な特徴を見つけるために1から発話コーパスを作成し、機械学習や自然言語処理技術を用いて発話特徴の解析を行ってきた。AIP-PRISM 研究では構築してきた発話コーパスの被験者と一人当たりの発話時間を拡張し、重症度予測システムを作成する。本研究を通して潜在的に ASD を特徴づけている発話特徴を見つけ、ASD の重症度を自動で数値化することを目指すことで、臨床現場での検診プロセスや言語訓練のサポートの足がかりにする。

### 2. 研究成果

#### (1)研究の背景

2017年度 AIP チャレンジでは発話から発達障害の特徴を見つけ、診断の補助を行えるシステムを目標とした。当初予定は電子カルテ内の発話記録を利用することを想定していたが、実際の電子カルテには発話の詳細な記載がなかったため、発話音声を手でアノテーション付きのテキストに書き起こしたコーパスを作成した。対象の障害は自閉スペクトラム症 (ASD) であり、ある程度流暢に会話ができる成人のみを対象とした。コーパスの対話音声と重症度評価は ASD のアセスメントツールである自閉症診断観察スケジュール (ADOS)評価に基づくものであった。日本語の ADOS の様子を収録した音声を書き起こしたコーパスはこれまでに例がない。コーパスを用いて ADOS の評価得点 (重症度)を機械学習手法で自動予測するシステムを作成した。

#### (2)概要

発達障害の一つである自閉スペクトラム症 (Autism Spectrum Disorder, ASD)の有病率は現在 2.2%とされ、半世紀で有病率が 100 倍になるという爆発的な増加を認めている。対人コミュニケーションの偏りから、社会生活上のトラブルに至ったり、その軋轢から自身がうつ病を発症したりすることが多く、社会問題になりつつある。ASD の診断や重症度の特定は非常に複雑で、行動・言語・対人コミュニケーションなどを総合した評価がなされる。しかし、これらの評

価は評価基準があいまいで評価者は一定のトレーニングを積む必要がある。本研究ではその一部の自動化を目指し、ASD 児・者の会話を通じた ASD の重症度の自動推定を行うことを目標とした。浜松医科大学子どもこころの発達研究センターにおいて施行された自閉症診断観察スケジュール (Autism Diagnostic Observation Schedule, ADOS) の録画記録の音声を、アノテーション付き文字に書き起こし、ADOS コーパスを作成した。ADOS は ASD の重症度を測定し、診断の材料にするためのスタンダードとして用いられている。本コーパスは日本の ASD 児・者の発話を書き起こしたものの中では最大サンプル数、最長時間である。このコーパスを使用し、発話特徴を抽出して ADOS スコアを機械学習手法で推測した。その予測結果は人間の ADOS 専門家が求められる精度に近い誤差で予測することができた。また、ADOS のパート別に分けた (「パズル組み立て+絵本のストーリー組み立て」、「絵の説明」) 分析ではそれぞれで誤差を示し得点予測に影響する ADOS パートを明らかにした。全体としての結果は将来的に精神科医や臨床心理士の ASD の症状評価の補助や言語聴覚士による言語リハビリへの応用が可能であることを示唆している (Sakishita et al., 2019)。

### (3) 詳細

#### 「ASD 発話者コーパスの構築」

浜松医科大学で収録された自閉症診断観察スケジュール (ADOS) の映像記録を元に ASD 発話者コーパスを構築した。

本研究では発話に焦点を当てているので、映像内の音声データのみを使用している。同様の理由で、言語解析ができるよう、複雑な会話を含むことができるモジュール 3 とモジュール 4 を使用する。コーパスに使用した ADOS 検査記録は同じ検査者 (臨床心理士) によってすべての ADOS が記録され、実施された。この検査者は研究目的の ADOS 実施に係るライセンスを取得している。被験者は、米国精神医学会診断と統計マニュアル第 4 版 (DSM-IV-TR) に依拠し精神科医により診断され、全例において ADOS の診断アルゴリズムと一致した。ADOS の録音音声は転記ソフトを用いて人手で書き起こされた。17 種類のアノテーション (休止、引き伸ばし、詰まり、語の中断、上昇調、フィラー、応答形感動詞、言いさし意図された語が同定可能、言いさし意図された語が不明、いい誤り、漢字表記できなくなった文字、仮名、歌、聞き取れない言語音、笑い、呼吸、読み仮名) を使用した。「おもちゃのパズル組み立て」部分、「文字の無い絵本のストーリーの説明」部分、「絵の叙述」部分を使用した。合計被験者数は 43 人で合計時間は 740 分、被験者の年齢幅は 8~55 歳となる。本研究で作成したコーパスは日本語 ASD 発話者コーパスとしては ASD の発話者数、合計時間ともに世界最大である。

2017 年度 AIP チャレンジで作成したコーパスより収録時間は 320 分から 740 分に、被験者数は 26 名から 43 名に、年齢幅は 17~44 歳から 8~55 歳に、ADOS 課題数は 2 から 3 に拡張することができた。

#### 「ASD 発話者コーパスを用いた実験」

##### ① ADOS 得点予測

モジュール 4 の被験者の ADOS 得点 (ASD 重症度) を、機械学習手法を用いて予測する。学習に用いた特徴量は被験者のプロフィール特徴量 (性別、年齢)、言語特徴量 (名

詞の数、名詞の平均数等)、そして非言語特徴量 (フィラー、不明瞭語等)である。学習に使用する特徴量には臨床心理士の発話特徴量は含まれない。学習モデルはサポートベクトル回帰 (SVR)を使用した。カーネルには Radial basis function(RBF)カーネルを使用し、gamma、cost、epsilon のパラメータチューニングを行なった。予測結果は 5 分割交差検証によって得た。臨床心理士が ADOS の資格を得るためには、正解と完全一致する得点を割り当てることが求められる。ADOS 得点は整数であるが、少数値を出力するシステムに当てはめると、合計得点項目以外の得点の誤差が 0.5 より小さく (EYE の場合は 1.0)すれば完全に正答し ADOS 資格の要求を満たしうる。この誤差を許容誤差と呼ぶことにする。合計得点項目についての許容誤差は小計項目の許容誤差の合計とする。Communication (total)、Interaction (total)、Total の許容誤差はそれぞれ 2.0、4.0、および 6.0 となる。

許容誤差が 0.5 の RMSE (平均二乗誤差の平方根)は、0.66 (STER)、0.74 (CONV)、0.48 (DGES)、0.87 (EGES)、0.62 (EXPO)、0.62 (EMO)、0.83 (RESP)、0.53 (QSOV)、0.41 (QSR)および 0.81 (ARSC)であった。許容誤差を下回っているのは DGES、QSRであった。許容誤差が 1.0 の EYE の RMSE は 0.68 であった。これは許容誤差を下回っている。実際の ADOS を行う専門家が出す値に近い値が出せることがわかった。合計得点項目について RMSE は 1.56 (Communication (total))、2.40 (Interaction (total)) および 3.53 (Total) であった。合計得点項目についてのシステム予測誤差はすべて許容誤差を下回っている。2017 年度 AIP チャレンジのシステム性能よりも低い誤差で予測することができた。

実際の臨床現場で ADOS を行う臨床心理士は、ADOS 検査の全体を通して ADOS 得点を割り当てる必要がある。しかし私のコーパスには ADOS の一部分しか入っていないにも関わらず許容誤差を下回る得点項目があった。この結果は、ADOS 検査の一部分のみであっても得点を予測できることを示唆している。

## ② ADOS 得点と発話特徴量の相関関係

全 ADOS 得点 14 種類と機械学習に使用した全特徴量の値との相関係数を算出した。モジュール 4 を対象とした。正の相関が見られた場合は特徴量の値が大きければ大きいほど ADOS 得点が高い (重症度が高い) と言え、負の相関が見られた場合は特徴量の値が小さければ小さいほど ADOS 得点が高い (重症度が低い) と言える。際立っていた 3 つの特徴量について言及する。

まず「指示語語彙数」である。負の相関に多く見られた。被験者が自身の状況や場所を正確に捉え、伝えたい事物を検査者に指示語を適切に用いて伝えることができるが、頻繁に使用しない (出現合計数ではないため) 場合、重症度は低くなることを意味している。次に「笑い」である。負の相関に多く見られた。笑いの数が多いほど、ADOS 得点は低くなる傾向があることがわかった。ADOS は本来笑いを測定することは想定されていないため、これは新しい発見である。最後に「不明瞭語」である。正の相関に多く見られた。これは、聞き手が認識できない語が多ければ多いほど重症度が高いことを意味する。

## ③ ADOS パート別予測結果の比較

本章では、コーパスのどの ADOS のパートが ADOS 得点 (重症度) 予測に最も大きな影響を与えるかを調べる。「おもちゃのパズル組立て+テキストの無い絵本のストーリー

の説明」パート（パートA）と「絵の叙述」パート（パートB）に分け、それぞれ ADOS 得点予測し、結果を比較する。重症度の予測には、①と同じ SVR 手法を使用し、パラメータチューニングと特徴量選択を行う。

ADOS 合計スコアを除いた 11 種類の得点項目のうち 7 種類の得点項目でパート B よりパート A で得点の予測をした方が RMSE 小さくなった。また パート A の 3 つすべての合計得点項目の RMSE はパート B よりも小さくなった。これを踏まえると私のシステムはパート B よりパート A のほうが ADOS スコアを予測できるといえる。

3 つの実験から ASD 重症度予測システムの性能の測定で ADOS 専門家に近い性能であることを示した。また ASD の方の重症度と関連がある発話特徴を調べることができた。

### 3. 今後の展開

実社会への重症度予測システム適用を目指すにあたり、ADOS の検査時の臨床心理士による評価補助や精神科医の診断補助に役立つことが考えられる。しかしながら実際の診断やスクリーニングでは早期療育を行なっていけるように低年齢で症状に気づくことが重要であり、これにはアイコンタクトや指さしなどの非言語コミュニケーションが大きく寄与する。本研究は発話から重症度を予測することを目標としているので、真に役立つと考えられるのは、0~5 歳程度の発育段階ではなく、ある程度のコミュニケーションが取れるようになってからの発育段階であると考えている。この発育段階の言語訓練で、効果が見られるのかなど、ASD の症状が良くなっているのか数値として観察できるので、訓練の回数や内容の見直しなど最適化の補助を行うことができる。また、本研究の実験で機械学習に使用した特徴量の中でも、重症度と相関が高かった特徴量（指示語語彙、笑い、不明瞭語）について重点的に観察し、負の相関の場合には促進、または正の相関の場合には抑制するようなトレーニングを行うことで症状改善につながる可能性もある。

以下 4 点は現時点で研究目標を達成するために行う課題である。

#### (1) SVR で使用した特徴量のより詳細な検討

特に指示語語彙と笑いは多くの ADOS スコアと負の相関があり、不明瞭語は、多くの ADOS スコアと正の相関関係があることを示した。コーパス中でのこれらの特徴量の数、タイミング、およびそれらが使用されている状況を調べることが必要である。

#### (2) 新たな SVR 特徴量の追加

ASD 者の既に知られている発話特徴がいくつかある。例えば、「エコラリア」や「言葉の繰り返し」である。この二つの特徴はコーパス内でもみられた特徴である。このような特徴を可能な限り自動で計算し、システムに組み込むことができれば、現在許容誤差を下回っていない ADOS 得点項目の自動予測に有効にはたらく可能性がある。

#### (3) コーパス作成の効率化

ADOS コーパスを人手で書き起こしており非常に時間がかかる。そこで必要となるのは音声自動認識システムを取り入れることであると考えている。また、笑いなど相関性の高い特徴も自動計算できるように、アノテーションを自動出力できることも今後の課題の一つである。

#### (4) 子供の発話データの追加

コーパス内の言語訓練が行われる年齢の子供のデータの割合は小さい。今後はさらにモジュール 3 以下の子供の ADOS データを追加し分析していく必要がある。成人に比べ、

子供たちは言葉の強弱など、現在の重症度予測システムとは異なる特徴量が必要になる可能性がある。

#### 4. 自己評価

##### ・研究目的の達成状況

ASD 児を含めてコーパスを構築し、重症度診断システムを作成することができた。診断システムは専門家に近い値が出ているものの、達成できていない ADOS 得点項目もあるので精度を上げる必要がある。さらにコーパスの構築効率はまだ人手に依存しているため低く、音声認識での自動書き起こしを取り入れる必要がある。

##### ・研究の進め方

労力が足りないところは適宜外部へ発注し計画的に研究を進められた。

##### ・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

本研究が進み、将来的に発話から自動で ASD の重症度を数値化できるので、診断の補助や言語訓練の自動最適化に貢献できると考えている。

##### ・研究課題の独創性・挑戦性

作成した ASD 発話者コーパスは最大規模のものである。重症度予測システムを作成した先行研究もなく、独創性・挑戦性は高いと言える。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Sakishita, M., Ogawa, C., Tsuchiya, K. J., Iwabuchi, T., Kishimoto, T., Kano, Y. Autism Spectrum Disorder's Severity Prediction Model Using Utterance Features for Automatic Diagnosis Support. Proceedings of AAAI-19 Joint Workshop on Health Intelligence, W3PHIAI' 19. 2019

2. 崎下 雅仁, 小川 ちひろ, 土屋 賢治, 岩淵 俊樹, 岸本 泰士郎, 狩野 芳伸. 自閉スペクトラム症の発話者コーパス作成と自動診断支援システム構築. 言語処理学会第 26 回年次大会 名古屋大学. 2019/3/13

##### (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)

なし

# 研究報告書

## 「マーカレス3次元関節位置情報に基づく心拍推定に関する研究」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：宍戸 英彦

### 1. 研究のねらい

本研究では、スポーツトレーニング支援のための、マーカレス3次元関節位置情報に基づく心拍推定アルゴリズムを考案する。平成29年度AIPチャレンジでは、スポーツ競技のトレーニング支援として、疎に配置した多視点カメラを活用したスポーツ競技映像における選手の3次元関節位置検出アルゴリズムを考案した。本研究では、これまでの成果を用いて計測した3次元関節位置情報と心拍情報の関連性を深層学習することによって、スポーツ競技映像からの心拍推定を実現し、研究成果の実利用化の加速を目的とする。

近年、ディープラーニングを利用した研究は、画像認識に留まらず様々な分野へ応用されている。画像認識の分野では、画像情報を学習することで、画像の状況理解や対象物体の認識が盛んである。これらはいずれも2次元の学習と推定である。心拍データを利用する場合は多くのノイズを含む情報が出力され、正確な心拍情報を取得することは困難である。同様に、3次元関節位置を取得する上でもキャリブレーション誤差や、関節位置の推定誤差が含まれる。このように、心拍・3次元関節位置情報には、多くのノイズが含まれ、学習モデルから推定される心拍情報にも多くノイズが影響される。

本研究では、3次元関節位置から各部位の速度情報を算出することで、選手の運動量を数値化し、関節部位の動作情報と心拍の学習を試みる。生成された学習モデルが心拍推定にどのような影響があるかを調査する。このように、心拍推定を実現するために、競技特有の動作を明確にし、競技特性に適合する心拍推定手法を研究する。

心拍情報は、競技選手に心拍計測器を装着し計測する。3次元関節位置情報は、これまでに研究開発したマーカレス3次元関節位置推定アルゴリズムによって取得する。これら2つの情報に深層学習を適用し、両データの関連性を表現可能な学習モデルを生成する。推定した3次元関節位置情報の学習データから心拍を推定するアルゴリズムを実現することで、心拍計測器を装着せずに心拍を推定することが可能となり、試合などの心拍計測器の装着が困難な状況への適用が期待される。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

これまでの研究成果として、疎に配置した多視点カメラを活用したスポーツ競技映像における選手の3次元関節位置検出アルゴリズムを考案した（**主な研究成果リスト 原著論文1**）。

被写体の3次元位置を推定するためには、3次元空間と2次元空間の射影関係が必要である。大規模空間に3次元位置が既知なランドマークを設置し、その観測位置との対応関係から射影変換行列を推定する強校正では、ランドマークの設置作業の手間が問題

となる。一方、ランドマークを必要としない方法として弱校正があるが、体育館などの大規模空間では、密にカメラを配置することが難しい場合が多く、疎に配置したカメラを高精度でキャリブレーションする手法の実現が望まれている。そこで、モバイルカメラで移動しながら撮影した映像と疎に配置したカメラの画像を統合することにより（図1左）、密な多視点画像群を構築し弱校正の推定精度向上を実現し、スポーツ選手の3次元関節位置の推定を可能とした（図1右）。

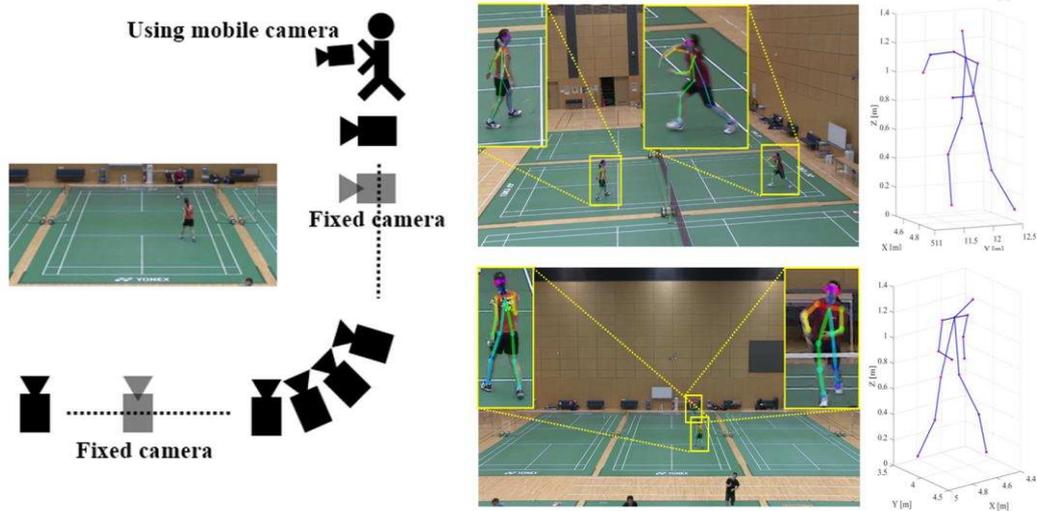


図1. 左：提案手法による撮影方式，右：撮影画像に Convolutional Pose Machines [1] を適用して検出した2次元関節情報とそれに基づいて推定された3次元関節位置

[1] Shih-En Wei, Varun Ramakrishna, Takeo Kanade and Yaser Sheikh, "Convolutional Pose Machines," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2016.

## (2) 概要

本研究では、多視点映像から心拍計測器を装着していない選手の心拍値を推定するアルゴリズムの考案を目標とする。

図2左（学習フェーズ）に示すように、学習データセットを作成するために、はじめに心拍計測器を装着した選手を2台のカメラで撮影する。次に、撮影画像に従来手法（**主な研究成果リスト 原著論文1**）を適用することで、3次元関節位置情報を取得する。取得した3次元関節位置と心拍情報の学習データセットを生成し、深層学習を実施する。図2右（推定フェーズ）に示すように、評価データセットを作成するために、心拍計測器を装着していない選手を2台のカメラで撮影し、撮影画像に従来手法を適用することで3次元関節位置情報を取得する。評価データセットと学習モデルを用いて3次元関節位置情報から心拍情報を推定する。

以上のように、多視点映像から心拍計測器を装着していない選手の心拍値を推定し、提案手法の有効性を確認した。

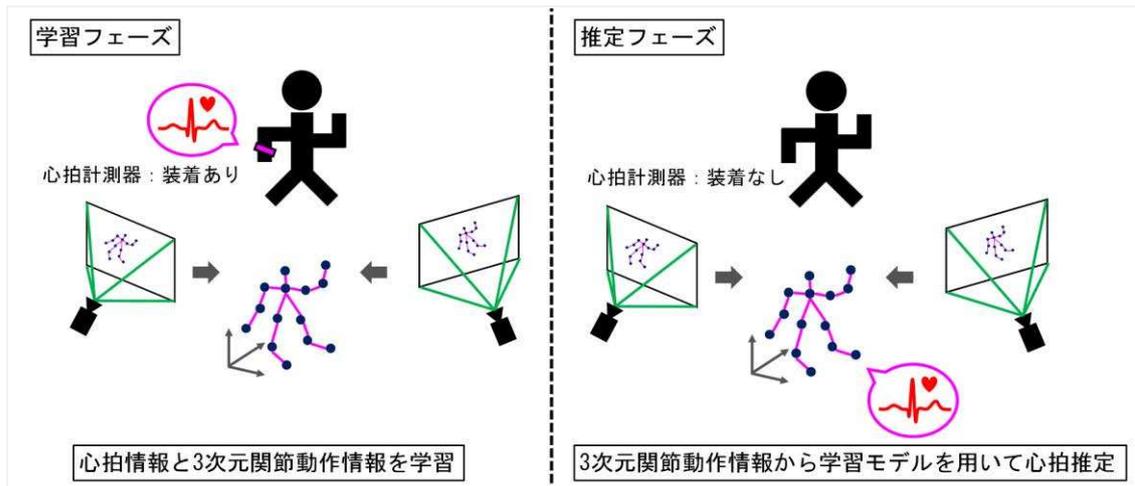


図 2. 提案手法のワークフロー（学習フェーズと推定フェーズ）

### (3) 詳細

学習・評価データセットを生成した：詳細は非公開

心拍推定アルゴリズムを確立した：詳細は非公開

提案手法の有効性の検証した：詳細は非公開

### 3. 今後の展開

本研究テーマは、スポーツ科学分野への応用が期待できる。これまでに心拍情報を活用した研究は、心拍計測機器を装着して取得された情報を基に研究が行われている。その研究成果は、スポーツ選手の技術力向上に寄与されている。本研究では、画像から心拍情報を取得することに成功している。今後は、心拍計測機器を装着できない状況（試合など）においても心拍情報を取得可能とし、日本のスポーツ選手の技術力向上のために活用できる心拍情報を提供する。

### 4. 自己評価

本研究では、多視点映像から心拍計測器を装着していない選手の心拍値を推定するアルゴリズムの考案を目標とした。画像から心拍を計測する最も挑戦的な問題を解決した。加えて多視点映像の基本技術における成果を得られ、査読付国際会議論文として発表を行った。膨大な研究データを整理する上で、各1名の研究補助者及び学生の研究実施体制を構成した。また、多視点映像システムの構築費、撮影実験における設備費などの物品に研究費を執行したことによって本研究を実現した。本研究の実現によって、スポーツ選手の技術力向上のために活用できる心拍情報を、モーションキャプチャマーカや心拍計測装置を装着せずに取得できることから、スポーツ科学分野への応用が期待できる。従って、全体としての目標の達成度は高い。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, "Calibration Method for Sparse Multi-view Cameras by Bridging with a Mobile Camera," 2017 Seventh International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA2017), 6 pages, (2017/11).
2. 永井 隆昌, 宍戸 英彦, 亀田 能成, 北原 格, "運動学習のための映像情報を用いたオンサイト視覚フィードバック方式", 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 8 pages, 2019年3月.
3. 【投稿中】Hidehiko Shishido, Aoi Harazaki, Yoshinari Kameda, Itaru Kitahara, "Smooth Switching Method for Asynchronous Multiple Viewpoint Videos Using Frame Interpolation," Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 23 pages.

### (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)

JST CREST 第2回 AIP チャレンジプログラム AIP ネットワークラボ長賞 受賞  
2018年4月

# 研究報告書

## 「精密医療実現のための先端データサイエンス手法の開発」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：菅澤 翔之助

### 1. 研究のねらい

個人の特性に合わせた最適な医療を行う精密医療(個別化医療)に対する期待は年々高まっている。特に、高齢化により医療費が増加の一途を辿る日本において、患者に応じた効果的な医療行為を選択できることは、患者個人の便益につながるだけでなく、無駄な治療を減らすことで医療費の削減につながるという観点でも極めて重要な課題である。精密医療を考える上で重要な考えは「治療効果は患者ごとに大きく異なる可能性がある」というものである。実際に、これまでの研究において、抗がん剤などのいくつかの薬剤で治療効果や副作用が患者ごとに大きく異なるケースが報告されている。このような異質的な治療効果を患者の生体情報から正確に予測する分子診断法の実現が実現すれば、個別化医療の実現に向けて大きな前進となる。

このような課題に対して、医療ビッグデータの解析は中心的な役割を担っている。一方で、患者の膨大な生体情報と患者特有の治療効果の関連性を検出することは極めて困難であり、有効なデータサイエンス手法の開発が望まれているのが現状である。そこで本研究では、最新の機械学習の方法論と古典的な統計学の方法論を効果的に組み合わせることで、膨大な生体情報の中から治療効果の予測に有用な生体情報(予測マーカー)を効果的にスクリーニングする方法論を展開する。さらに、開発したスクリーニング法をアルゴリズムとして実装し、有効な分子診断法の実現を補助するデータサイエンスのツールとして公開することにより、個別化医療の発展に貢献することを目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

膨大な生体情報から効果的に治療効果を予測する手法として、これまでに様々な方法論が展開されているが、既存研究の多くはデータに対して制約的な構造を仮定しており、個別治療効果を正確に予測できるとは限らないという問題点があった。このような現状を打破するために、前年のAIPチャレンジでは、機械学習の分野で広く利用されている勾配ブースティング木と呼ばれるアンサンブル学習を適用し、治療効果を柔軟にかつ効果的に予測することが可能な手法を開発した。一方で、提案手法の予測プロセスが複雑であり、ブラックボックス化している点が欠点として挙げられる。これは、生体情報と治療効果の関連性を把握することが困難であることを示唆しており、臨床家が解析結果を解釈する上で大きな妨げになることが懸念される。より実用的には、治療効果に関連している具体的な生体情報(予測マーカー)を正確に検出する方法が望まれる。

## (2) 概要

個別治療効果に関連する予測マーカーを検出することは、治療効果が大きい患者集団のサブグループの特定につながる可能性があり、実用上非常に有益である。このような試みの既存研究はいつか存在するが、偽陽性(実際には関連していないマーカーを誤って抽出してしまうこと)のリスクが大きい手法や、膨大なサンプルサイズを必要とする手法など、現実問題における実用性が乏しい。このような現状を打破するために、本研究では最新の機械学習の方法論と古典的な統計学の方法論を効果的に組み合わせ、革新的なデータサイエンス手法を開発した。具体的には、個別治療効果を推定するための最新の機械学習の方法論として Chen et al. (Biometrics 73, 1199–1209, 2017)で提案された重み付き損失関数を用いた手法を採用し、偽陽性を適切にコントロールするための古典的な統計学の方法論として Optimal Discovery Procedure (ODP) 法を採用した。両者を組み合わせた方法の開発は自明ではなく、前者の機械学習の方法論を古典的な統計学の枠組みで捉えることで、両者の効果的な融合が可能になり、その点が本研究のアイデアの根幹である。代表的な既存手法と提案手法を数値実験によって比較したところ、提案手法によって既存手法よりも数倍の数の予測マーカーを検出できることが明らかになった。さらに、乳がんの臨床試験のデータに対して提案手法を適用したところ、既存研究ではほとんど有意な予測マーカーを検出することができなかつた一方で、提案手法は多くのマーカーを検出することができた。

以上の成果は国際会議にて報告(主な研究成果1)を行い、学術論文(主な研究成果3)として査読付き国際学術誌への投稿準備を進めている。また、フリーの統計解析ソフト R にて提案手法を実行するアルゴリズムを実装しており、オープンソースとして公開するための整備を進めている。

## (3) 詳細

### 重み付き損失関数を用いた治療効果スコアの推定

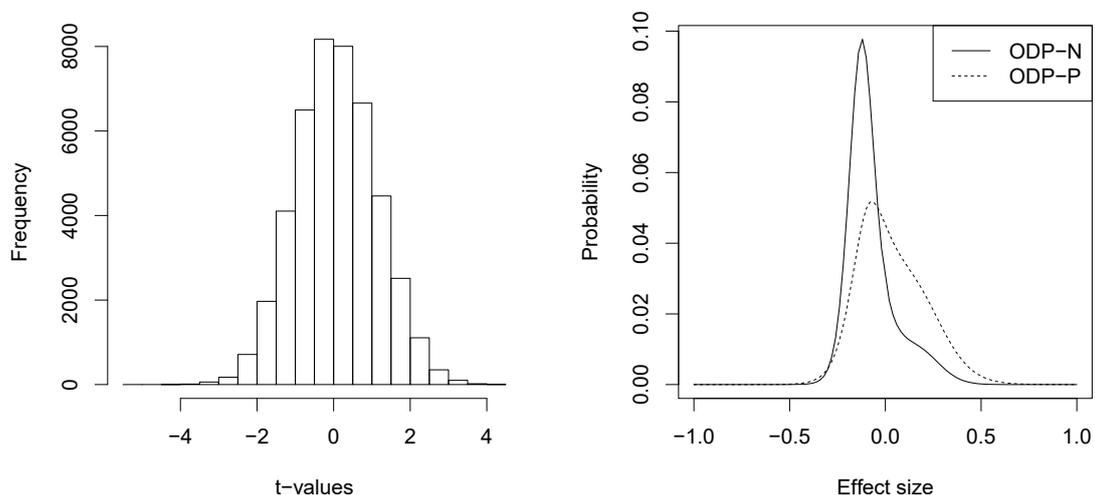
患者ごとの治療効果と予測マーカーの関係性を推定するためには、複雑な統計モデルを推定する必要があるが、予測マーカーとして遺伝情報を用いるケースでは情報量(次元)が膨大なため、非常に深刻な問題となる。本研究では、重み付き損失関数(Chen et al. Biometrics 73, 1199–1209, 2017)を用いた最新の機械学習の方法論を用いることで、パラメータを節約して治療効果と予測マーカーの関係性を推定する枠組みを利用した。

### Optimal discovery procedure (ODP) 法を用いたスクリーニング法の開発

前述の損失関数をもとに、候補となる予測マーカー(遺伝子発現量など)の効果サイズ(個別治療効果にどの程度影響を与えるかを表す量)に関する尤度関数(効果サイズ値に対して尤もらしさを与える関数)を数学的に定式化した。この枠組みのもとで、あるマーカーが個別治療効果と関係性がないことは、対応する真の効果サイズが0であることに対応する。さらに背景にある真の効果サイズの分布に対して柔軟な確率構造を導入し、構成した尤度関数と組み合わせることで、予測マーカーと個別治療効果の関係性を特定する新しい統計モデルを提案した。この統計モデルの枠組みで、偽陽性をコントロールする ODP 法を導入し、関連する予測マーカーを効率的にスクリーニングする方法を開発した。

### 乳がんの臨床試験データへの適用

乳がんの無再発時間に対するタモキシフェン投与の有効性を検証した臨床研究に対して提案手法を適用した。候補となる遺伝子発現は約 5 万個あり、各遺伝子発現の個別治療効果に対する効果サイズの標準化推定値は(左図)のようになる。この推定値は多くのノイズを含んでいるため直接的な解釈はできないが、本研究で提案した 2 種類の統計モデルにより真の効果サイズの分布を推定すると(右図)のような結果が得られた。この結果から、効果サイズが 0 でない遺伝子発現がある程度存在していることがわかる。次に、偽陽性を 5%でコントロールした上で既存手法を適用すると、特定された関連遺伝子発現が 1 個以下であるのに対し、提案手法による方法では 13 個もの関連遺伝子発現を特定することに成功した。これはタモキシフェンの効果を左右する遺伝子発現が複数個存在する可能性があることを示唆しており、タモキシフェン投与が効果的な患者のサブグループを特定できる可能性があることを示唆している。



参考図: 効果サイズの標準化推定値(左図)と 2 種類の提案手法によって推定された真の効果サイズの分布(右図)。

### 3. 今後の展開

個別治療効果に強く関連する予測マーカーの検出により、劇的な治療効果が見込まれる患者集団のサブグループを特定できる可能性があり、この知見を利用した診断パッケージの開発が期待される。さらに、個別治療効果に強く関連する予測マーカーは、疾患の機序にも強く関わる要因である可能性があり、その知見は、画期的な新薬の開発につながる可能性がある。このように、今後は実際に臨床データを扱っている研究者との交流(共同研究)を通して、本研究の実用上の価値を示していくことを考えている。

### 4. 自己評価

#### 研究目的の達成状況

本研究の目的は「個別治療効果に関連する予測マーカーを正確に検出することが可能なデータサイエンス手法の開発」であったので、この目的は十分に達成していると考えられる。

#### 研究の進め方

主に、数値実験・大規模データ解析に必要な不可欠な計算資源の確保、海外研究者とのディスカッション、国際会議での発表のために研究費を使用した。

#### 研究成果の波及効果

個別治療効果に関連したデータサイエンス手法の開発は、医学統計の分野だけでなく、多くの研究コミュニティ・分野で議論されているトピックである。本研究での成果は関連する分野に大きなインパクトを与えることが期待される。さらに、オープンソースとして公開したアルゴリズムが様々なデータに対して適用されることにより、従来と比較して飛躍的に予測マーカーの検出が効率化され、様々な薬剤における個別治療効果に関する知見が加速的に発見されていくことが期待される。

#### 研究課題の独創性・挑戦性

個別治療効果予測に関連する予測マーカーを抽出する場合、治療効果と関連しないマーカーを誤って抽出してしまうリスク(偽陽性のリスク)が想定される。特に、遺伝情報のように次元が大きいケースでは、候補となる情報が膨大なため、偽陽性のリスクも自然と大きくなり、抽出された情報に対する精度保証を与えるのが一般的に困難である。本研究では、そのような偽陽性のリスクを確率的に制御する統計学の方法論と最新の機械学習の方法論を効果的に組み合わせることでこの問題を解決した。

#### 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

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. (学会発表) Screening biomarkers associated with individual treatment effect. *11<sup>th</sup> international conference on computational and methodological statistics (CMStatistics 2018)*.
2. (著作物) Sugasawa, S. and Noma, H. (2018). Estimating individual treatment effects via gradient boosting tree. (査読付き国際学術誌へ投稿中)
3. (著作物) Sugasawa, S. and Noma, H. (2018). Optimal discovery procedure for screening biomarkers associated with individual treatment effects. (査読付き国際学術誌への投稿準備中)

# 研究報告書

## 「社会相互作用の自動計測・発達支援システム」

研究期間： 2018年8月～2019年3月

研究者： 関根 悟

### 1. 研究のねらい

自閉症児は社会的相互作用に困難があり、運動の不器用さを示すことが多い。運動の不器用さによって他児とともにかかわる機会が減少し、その機会が減少することによって社会スキルズが改善されにくい。そこで Sekine & Yamamoto (2017) は「運動・社会性支援プログラム (MoIT)」を開発した。MoIT は、心理学の一領域である応用行動分析学に基づき、自閉症児に対して他者を追いかける行動 (追従行動) を教えることで、アイコンタクトや接触行動、相手を見て笑うなどの社会スキルズを改善することに成功した。

本研究では、2017年度 AIP チャレンジで開発した「運動・社会性支援プログラム」をより効果の高い発達支援法にするため、センシング・デバイスを開発し、ビデオ・コーディングと比較して時間分解能の高いリアルタイム・データを基に支援を進めるプロトコルを開発する。特に、2者間の社会的相互作用 (アイコンタクト・接近・追従) の自動計測およびフィードバックを実施する。

第一に、追従行動が生じた時に、追いかけている相手が着ているビブスが光るデバイスを開発し、そのフィードバックによって追従行動が獲得されるかを検討する。第二に、自閉症児にアイトラッカーを装着させ、距離計測の手法を開発する。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

自閉スペクトラム症 (以下、自閉症) 児は、同年代の子どもと遊ぶことが難しく、社会的相互作用に困難を示す。社会的相互作用支援に効果の高い早期発達支援の開発が喫緊の課題である。これまでの早期発達支援の多くは机上など狭い空間での遊びを想定して開発されてきた。一方、幼児が同年代の子どもと遊ぶ空間の多くは園庭や公園などの広空間であり、広空間を想定した運動中の社会スキルズの発達支援はほとんどない。

そこで 2017年度 AIP チャレンジでは、3～6歳の自閉症児を対象とした早期発達支援である「運動・社会性支援プログラム (MoIT)」を開発した (Sekine & Yamamoto, 2017)。「MoIT」では、従来用いられてきた指標であるアイコンタクトや笑顔などをビデオで計測するとともに、広空間での指標となる接近行動や追従行動をモーションキャプチャーで自動計測した。結果、両方の社会スキルズ指標が上昇し、「MoIT」の効果と、接近行動および追従行動の計測モデルの妥当性を示した。

#### (2) 概要

他者を追いかける行動を獲得することで、子どもの社会スキルズが改善する。同じく児童の他者を追いかけて接近することで、支援者たちが提供するものより、より生活環

境に近く洗練された社会スキルの学習機会を提供することができる。Sekine & Yamamoto (2017) は、3名の自閉症児相手に追従行動を教えることで、アイコンタクトや接触行動などの社会スキルが増加することを明らかにした。

しかし、これらの分析は追いかけてこ最中に追いかけている行動の生起頻度のデータを得ることができず、データ・ベースドな介入を実施するためには1日10分程度しか介入できず、追従行動の獲得には時間がかかっていた。Tsuji, Sekine, Enomoto, Matsuda, Yamamoto, & Suzuki (2017) は、追従行動の計測モデルを作成した。これによって、より早いデータ分析が可能となった。本モデルを使用した、フィードバック装置を開発して、自閉症児に対して追従行動の生起をフィードバックすることで、他者を追いかける行動をより生起させた(研究テーマA)。

また、Sekine & Yamamoto (2017) では、モーションキャプチャーのある5m×6.5mのプレイルームでのみプログラムの効果を検討してきた。しかし、児童の遊ぶ空間は園庭などのより広い空間も含まれ、そのような生態学的環境では、モーションキャプチャーの設置は困難であり、装着型で距離を計測する必要がある。そこで児童に直接装着できるアイトラッカーを用いて、ヒト間の距離計測のための手法を開発した。アイトラッカーから撮影した一人称映像のうち、人物が占める面積割合を算出し、その面積から距離を推測した(研究テーマB)。

### (3) 詳細

#### 研究テーマA「追従行動のリアルタイムフィードバック」

本テーマではこの計測モデルを使用して児童へリアルタイムにフィードバックすること、リアルタイムフィードバックによって追従行動の生起頻度が変化するかを検討することを目的としていた。

本研究ではTsuji et al. (2017)の追従行動モデルを用いてリアルタイム識別を行った。図1に概要を示した。 $C_t$ は時刻 $t$ における追従するASD児を、 $T_t$ は時刻 $t$ における逃げるセラピストを表す。 $C_{t+\Delta t}$ は微小時間 $\Delta t$ 経過後のASD児位置を、 $T_{t+\Delta t}$ は同じくセラピスト位置を表す。 $T$ を中心とする半径 $r$ の範囲に $C_{t+\Delta t}$ が入る状態が $n$ 秒続いた時、これを追従行動とみなした。

フィードバック装置に図2のようなビブスデバイスを用いた。ビブスのえり周りにLEDを有した光提示機構を配置した。モーションキャプチャーで得られた位置情報を追従行動モデルに照らし合わせ、追従行動の有無を判別し、ビブスを光らせた。ビブスの光には赤と緑の2色があった。

本実験には2名のASD児が参加した。実験はフィードバック

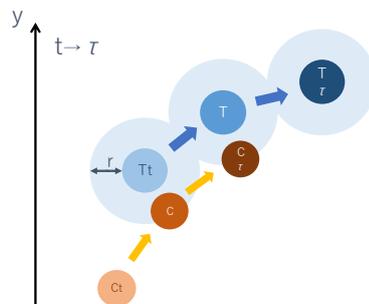


図1 追従行動計測モデル



図2 開発したビブスデバイス

条件とヨークト条件の2条件で構成した。それぞれの条件でビブス周りのLEDの色は実験参加者ごとにカウンターバランスをとった。フィードバック条件では実験参加児の実際の動きに応じてLEDを光らせた。追従行動が生じた場合にはLEDが点灯し、生じなかった場合には消灯した。ヨークト条件では、直前に実施したフィードバック条件と同じタイミングでLEDを光らせた。子どもが追従するしないにはフィードバックを与えず、以前の条件と同じタイミング同じ長さの光を提示した。

結果を表1に示す。実験参加児Aの追従条件1、実験参加児Bの追従条件1、2においてヨークト条件よりも高い追従行動生起率が認められた。したがって、本研究のフィードバック手法によって追従行動の頻度が増加する傾向が見られた。また実験参加児2名からはデバイスの光について、観察者として参加していたセラピスト1名から光り方が異なることについて言及があり、本デバイスが効果的であった可能性が高い。

表1 フィードバック条件およびヨークト条件の追従行動生起率

実験参加児	フィードバック条件1	ヨークト条件1	フィードバック条件2	ヨークト条件2
A	36.67	22.22	24.44	25.00
B	37.22	36.11	33.89	27.22

(%)

本研究によって、今後 Sekine, Yamamoto (2017) が開発した「運動・社会性支援プログラム」の普及の可能性が示された。第一に、子どもへのフィードバックがより容易になる点が挙げられる。Sekine, Yamamoto (2017) の手続きに加えて、本ビブスデバイスを装着することにより、追従行動の学習がより早く進むと考えられる。第二に、セラピストに対して「運動・社会性支援プログラム」の手続きを教えるために利用できる。「運動・社会性支援プログラム」では、ASD児が追従行動を生じたタイミングでセラピストはその行動を強化する必要がある。本ビブスを装着することで、セラピストは強化のタイミングがより正確にわかるようになる。

本実験は2018年9月に実施したヒューマンインターフェースシンポジウム2018で発表した。

### 研究テーマB「自動計測デバイスを用いたMoIT実証実験」

本研究では、眼鏡型の一人称視点カメラを用いて対人距離を計測する手法を開発した。特に一人称視点カメラの映像のうち人物が占める割合を測定することで実世界での対人距離を計測する。

### 研究B1 大人の視点からの面積取得予備実験

ASD児1名が実験に参加した。実験者はTobiiグラスを一人称視点カメラとして装着した。実験中、実験者はMoITの手続きに則ってASD児とかわった。5分間のセッション

を分析した。ビデオからは Mask-RCNN の手法を用いて人物面積を取得した。結果、画像ごとに処理が可能となり、人物面積の取得が可能となった。本研究の成果をもとに、研究 C2 を実施した。

本研究は、2018 年 12 月に実施した HCG シンポジウムで発表した。

### 研究 B2 自閉症児の視点からの面積取得実験

子どもの社会スキルズはビデオ・コーディングによって計測されてきた。本研究では、自閉症児にアイトラッカーを装着してアイコンタクトを、モーションキャプチャーのマーカーを装着して追従行動を計測し、MoIT の効果を検討した。

本実験には 1 名の ASD 児が参加した。ASD 児は Tobii グラスを一人称視点カメラとして装着した。実験中、実験者は MoIT の手続きに則って ASD 児とかわかった。

実験中の人物面積を図 3 に示す。自閉症児においても、研究 C1 と同様人物面積の取得が可能であったことが明らかになった。

今後、人物の面積取得の値と、モーションキャプチャーによる距離の値を比較してアイトラッカーのみで距離を計測する必要がある。

本研究は、2019 年 1 月に実施した Autism Conference で発表した。

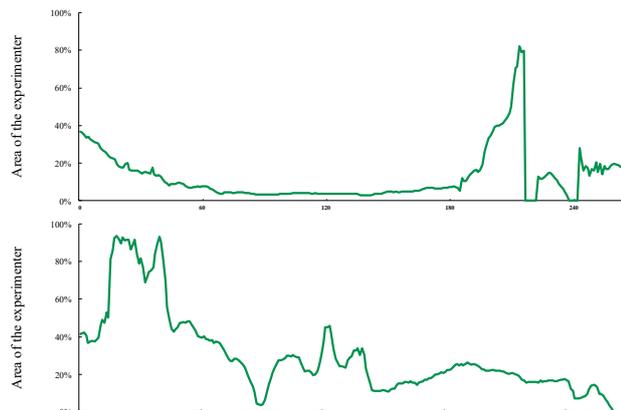


図 3 自閉症児に装着したカメラ映像における実験者が映っていた面積

### 3. 今後の展開

本研究成果によって、追従行動のリアルタイム・フィードバックシステムの構築及びアイトラッカーによる距離感計測の可能性を示した。学術的には、自閉症児に対して追従行動を教えることが実験的に、定量データをもって示すことができた。今後は、複数名以上の自閉症児を対象に MoIT を実施し、ビデオ・コーディングのみでは解析が難しかった多人数の接近・追従行動を計測する。

社会に対しては、MoIT の普及が可能となった。まず、リアルタイム・フィードバックシステムを用いることでセラピストに対して MoIT の手続きを教えるのに有用である。また、アイトラッカーによる距離計測の手法を用いることで、プレイルーム以外の環境でも MoIT を実施し定量評価をすることが可能となった。今後は、慶應義塾大学を普及の拠点として、1 週間のサマーキャンプを開き普及を行うことが可能となる。

### 4. 自己評価

リアルタイム・フィードバックシステムの構築が完了し、一人称視点カメラによる距離計測の可能性を示すことができたため、計画通り研究課題を達成できたといえる。研究期間が開始された直後にはフィードバック提示デバイスであるビブスを開発し、デー

タの収集を始めることができた。研究費執行は、10月の段階で計画通りに執行率80%を超え、当初の予定と同じように進めることができた。本研究によって、追従行動を教えることによって社会スキルズが獲得されることを定量的に示すことができた。この点は本研究の科学への波及効果及び独創性として高く評価できる。

## 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

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)

**Sekine, S.**, Tsuji, A., Suzuki, K., Yamamoto, J. (Jan, 2019). Evaluating Eye Contact Using Wearable Eye Tracker Technology in the Naturalistic Social Interaction for Children with Autism Spectrum Disorder: The effect of Movement-interaction Teaching (MoIT). The 13th annual autism conference, San Francisco, CA.

辻愛里・**関根悟**・松田壮一郎・山本淳一・鈴木健嗣「自閉症スペクトラム障害児を対象とする追従行動のリアルタイムフィードバック手法の検討」『ヒューマンインターフェースシンポジウム2018』, 筑波, 2018年9月

辻愛里・**関根悟**・松田壮一郎・山本淳一・鈴木健嗣「対人距離計測のためのウェアラブルカメラ導入に関する検討」『電子情報通信学会 HCG シンポジウム2018』, 伊勢, 2018年12月

## 研究報告書

### 「ヒトの社会経済状況に関係し、 精神状態や行動を導く脳内動的ネットワーク変化の解析」

研究期間： 2018 年 8 月～2019 年 3 月

研究者： 田中 敏子

#### 1. 研究のねらい

近年、安静時脳内のネットワーク構造と性格の個人差や精神疾患との関係が示されるようになってきた。しかし、実際の生活の中で問題となるのは、あるイベントが生じた際に起こると想定されるネットワークの変化であり、その変化の仕方が個人のパーソナリティに結びつくと考えられる。近年行われているネットワーク解析ではある一定時間、状態を保っている際の脳内ネットワーク構造を解析しており、イベントに起因する変化を対象にしているものはほとんど無い。本研究では、あるイベントが生じた際に起こるネットワークの変化を個人ごとに解析する手法を検討する。さらに個人ごとに異なるイベント起因性のネットワーク構造変化と性格の関係を調べる手法を構築することを目指す。外界入力に対するネットワーク構造の変化やハブ領域の遷移が明らかになれば、将来的には、ある特定の条件での発作が障害となるような PTSD 等の効率的な介入治療、ストレス起因性精神疾患予防に利用することが可能になると期待する。

#### 2. 研究成果

##### (1) 研究の背景

2017 年度 AIP チャレンジでは、情報学と脳科学の手法を用いて揺らぎの大きい個人の精神状態の傾向や変化を推定する情報処理技術の開発を行うことを目標としていた。具体的には、主観的な自己のステータスの認識および、その自己認識の下において経済的不平等をこうむった際の脳活動の関連性から、その時点での精神状態や変化を推定する新たな研究手法を提案することを目指した。その成果として、1) 自身の主観的社会評価が健常者においてもうつ傾向と関係があることを確認した。2) また不平等起因性の扁桃体や線条体の活動の強さが主観的な社会的地位に関係していることも示唆した。3) さらに社会的地位と脳内ネットワークの基盤となる神経繊維束、(特に扁桃体線条体、海馬と前頭前野を結ぶ線維束)の構造に相関関係があることを見出した。

##### (2) 概要

上記の結果から、扁桃体、海馬、線条体などの個々の領域の活動パターンに加え、領域を結ぶネットワークが、個人の社会的地位や性格、外部刺激に対する判断に重要であることが示唆された。これを踏まえて、AIP チャレンジ加速支援では、外部刺激に対する変化を個々の部位の活動の変化としてではなく、ネットワーク全体の変化として捉え、その変化を解析する手法を開発することを目指した。既存のタスク依存的なネットワーク構造の研究では課題遂行

中の脳活動 tsfMRI(task state fMRI)を1つの状態として解析に用いているため、課題時と安静時(rsfMRI; resting state fMRI)の比較しかできない。本研究では課題中の活動をイベントごとに分割し、刺激にตอบสนองして起こるネットワークの経時変化を解析することを試みた。イベント起因性のネットワークの変化、特に既存のネットワーク構造がイベント応答時にどのような振る舞いを見せるか、刺激にตอบสนองして強弱が変化するのはどの構造なのかを解析することは、非常に困難を伴うが、動的なネットワーク変化を知る上では重要な試みでトライする価値がある。本研究では、不平等条件を含む金銭分配についての判断を被験者に課した。不平等感度が異なると考えられる2つの被験者群について、課題中の脳活動を fMRI(3 テスラ)で撮像し、トライアルごとに分割した全脳領域間相関マップを個人ごとに作成した。全脳領域の分割に際しては既存の分割法を使用した。このトライアルごとの全脳領域間相関マップを用い、1) トライアルごとの活動パターンを教師なし分類によって分類することで、タスクに依存してネットワーク構造が変化することを確認した。また2) 個人内での課題中判断を、その全脳マップから decoding することがある程度可能であることが示された。ただしこれらの結果には個人差が大きく、他者との金銭分配課題において、特に大きなネットワーク変化が見られない性質を持つ被験者の存在も確認され、このような性質を持つ被験者は不平等感度が低い群に属することがわかった。

### (3) 詳細

研究テーマ「イベント起因性のネットワーク構造変化と性格特性の関係を調べる手法の構築」  
動画をただ見るといった受け身の課題ではなく、被験者自身の判断を要求する課題においては、与えられた外部刺激によって脳内のネットワークが動的に変化すると考えられる。本研究テーマでは、自分と他人の間の金銭分配の好ましさを判断する課題を用いた。タスク中の脳活動を fMRI で撮像し、その信号をトライアルごとに分割して、短時間の動的なネットワーク変化の検出にチャレンジした。既存の(安静時 fMRI から得られている)脳部位の分割を用い、全脳を 268 個の部位(ROI)に分け、特異値分解を用いた次元縮減法により、脳全体の反応(fMRI 信号)のタイムシリーズを情報のロスを抑えつつ縮減した。さらに主成分分析を用いて、各個人約 80 の成分のタイムシリーズを得た。この成分について、1トライアル約 20 秒という短いウィンドウ内でのトライアルごとの相関マップを作成した。各トライアルの全脳相関マップを k-means 法を用いてクラスタリングし、外部から与えた条件によって、ネットワーク構造変化が見られるかどうかを検討した。その結果、トライアルの進行に伴って、相関マップの構成が変化することが確認され、20 秒という短いウィンドウでも、動的に変化するネットワーク構造変化を検出できる可能性を示した。従来のネットワーク解析は数分から数十分という単位での時間スケールで行われてきたため、20 秒の変遷を追うことができる可能性を示したことは大きな成果である。

今回の課題ではネットワークの変化が検出されない被験者も見られた。これらの被験者においては行動履歴から自分の報酬額に応じて機械的に判断を行っているために全体のネットワーク変化を要しない可能性が濃厚である。この結果は、外部刺激によって起こるネットワーク構造変化が、個人の性格特性によって異なることを示唆すると考えられる。ただし、これらの被験者でネットワーク構造の変化が起きていないのかどうかは注意深く検討する必要がある。

る。

上記の解析に用いた 20 秒のウィンドウには刺激提示から、判断のボタン押し、フィードバック、すべてのイベントが含まれる。将来的にはアクションを起こす前のネットワーク構造パターンから、行動予測を行いたい。そこで、実際に行動を起こす前のタイミングの 10 秒間のウィンドウで、同様にトライアルごとの相関マップを作成して、クラスタリングを行ったが、課題構造に起因するような分類結果は得られなかった。この 10 秒間に意味のあるネットワーク変化があるかどうかを検討するため、被験者の判断結果をラベルとし、多クラス分類ロジスティック回帰によって、個人内の判断が分類できるか否かを調べた。その結果、約 1/3 の被験者において分類が可能であった。また分類が可能であった被験者はすべて、向社会的性質を持つ被験者(被験者の割合:向社会的:個人主義的=1:1)であった。この結果から、特に向社会的な被験者群では、今回の課題において刺激定時後 10 秒までの短時間の全脳の相関マップを使って行動の予測が可能であることが示唆された。

### 3. 今後の展開

イベントに起因して、ネットワークの状態が変化すること、そして、その変化が1トライアル 20 秒の長さでも確認できる可能性が示されたことから、次はトライアル内でも一つのイベントによって引き起こされるネットワークの変化を追いたいと考えている。具体的にはより短い時間スケールのネットワーク変化の検出を試みる。そのためには撮像方法の改善及び、課題の変更が必要であると考えている。個々の外界入力に対するネットワーク構造の変化やハブ領域の遷移を調べ、これが明らかになれば、将来的には、ある特定の条件での発作が障害となるような PTSD 等の効率的な介入治療、ストレス起因性精神疾患予防など医療、福祉への波及が考えられる。

### 4. 自己評価

今回行った、短時間内での外部刺激に起因するネットワークの変遷を捉える方法の検討は、非常に難しい挑戦であった。しかし、ノイズ除去などを丁寧に行うことで、トライアルごとのネットワーク変遷を調べる手法を見出した。今回の研究機関では、ネットワークの変遷が 20 秒の短いウィンドウで見られるかどうかを確認しただけで、その中にどういった情報が含まれるのかの検証については不十分である。目的の性質を分類する手法についてこの先検討する必要がある。またトライアルをさらにイベントに分割するためにはさらなる改良が必要である。実験補助者の人員確保など、若干思い通りにいかないところもあったが、研究体制については概ね良好であった。まだ先にはなるが、この研究成果は、医療や福祉の役に立つ日が来ると考える。

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 論文(原著論文)発表

1. Toshiko Tanaka, Fumichika Nishimura, Chihiro Kakiuchi, Kiyoto Kasai, Minoru Kimura, Masahiko Haruno. Interactive effects of OXTR and GAD1 on envy-associated behaviors and neural responses. PLOS ONE 2019 14(1):e0210493.

(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)

第41回神経科学大会ポスター発表



## (2) 概要

人間と共存し様々な環境で動作するロボットは、適応的に場所に関する概念や語彙を学習するだけでなく、学習した知識を様々なタスクに活用することが求められる。SpCoSLAM では、環境や語彙に関する事前知識なしに地図と場所概念および語彙を獲得することが可能である。しかし、獲得した場所概念の行動決定や意思決定への活用に関する理論的な方法についてはこれまで議論されていなかった。そこで本研究では、SpCoSLAM の確率的生成モデルの上でのロボットの行動決定問題に着目する。

一般的に、ロボットにおける行動決定には強化学習が用いられることが多い。強化学習では、マルコフ決定過程 (MDP: Markov Decision Process) に基づき試行錯誤的に行動の最適化を行う。一般的な強化学習の枠組みでは、累積報酬和の最大化問題を解くが、この枠組みには確率的生成モデルとの理論的な隔たりがあった。しかし近年、強化学習を始めとする行動決定問題を確率的生成モデル上の確率推論として捉える枠組みが注目されてきている [Levine 2018]。本研究では、行動決定問題を確率的生成モデル上の確率推論として定式化することによって、教師なし学習における推論と同じ枠組みでパスプランニングやナビゲーションを実現するものである。本研究の概要図を図 2 に示す。

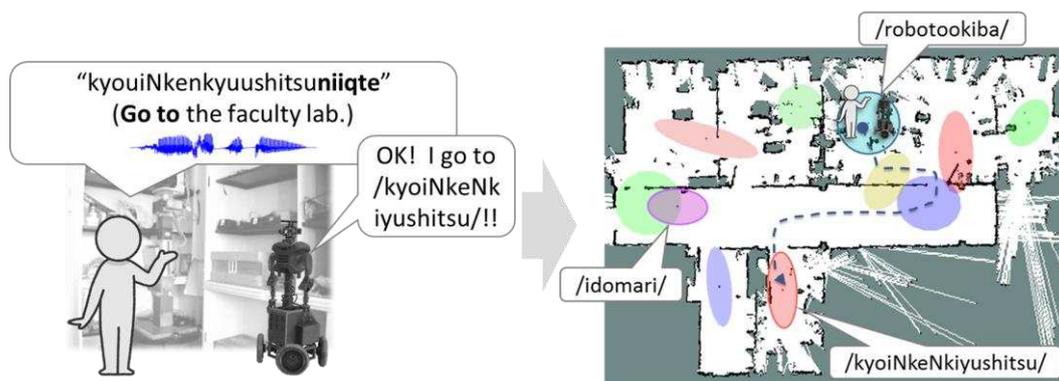


図 2 場所概念を用いた音声命令からのパスプランニングの概要図

## (3) 詳細

### ① 手法の構築

SpCoSLAM の確率的生成モデル上で行動決定に関する確率推論の手法を構築した。提案手法は動作軌道の確率分布の推定問題として定式化した。確率推論を行うにあたって、音声認識や自己位置推定など様々な不確実性への対処は重要である。本研究では、ロボットに確定的な目標地点を明示的に与えるのではなく、ロボットが人の音声命令から自らの内部知識を用いて行動目標を決定することができる。また、全体が統合されたモデルに基づく推論であるため、確率変数の不確実性を考慮したマルチモーダル情報の相互補完的な推論が可能になる。これにより、モデル上で全体最適なパスプランニングを行うことを可能とした。

### ② 手法の実装

実機ロボットから取得されたデータにより学習されたパラメータを使用できるように、提案手法を実装した。実装の一部にはロボット用ミドルウェア Robot Operating System を使用した。

### ③ 実験・評価

「教員研究室に行って」などの人の音声命令より推定された場所概念の目標状態へのパスプランニングを行った。実際に獲得された場所概念を用いたヒューマンロボットインタラクションによるナビゲーション実験を行い、パスプランニングが可能であることを確認した(図3)。

### ④ 論文執筆・発表

本研究において得られた成果は国内会議にて発表する。国際会議への投稿も予定している。また、実装したプログラムや実験のために取得したデータセットなどをオープンリポジトリ上で公開する準備を進めている。

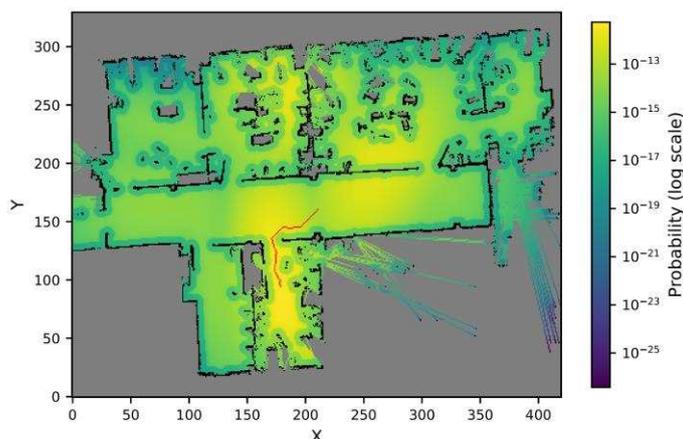


図3: “教員研究室に行って”と発話したときの出力確率と推定された軌道(赤色)

### ○参考文献

1. [Akira Taniguchi](#), Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi, and Tetsunari Inamura, “Online Spatial Concept and Lexical Acquisition with Simultaneous Localization and Mapping”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017.
2. [Akira Taniguchi](#), Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi, and Tetsunari Inamura, “Improved and Scalable Online Learning of Spatial Concepts and Language Models with Mapping”, arXiv preprint arXiv: 1803.03481, 2018.
3. Sergey Levine, “Reinforcement Learning and Control as Probabilistic Inference: Tutorial and Review”, arXiv preprint arXiv: 1805.00909, 2018.

### 3. 今後の展開

今後の展開として、定量的な比較評価を行い提案手法の有効性を検証する。主に、(i) ヒューリスティックな手法や従来手法では対処不可能であった誤推定の問題を改善することが可能であるか、(ii) 発話認識における不確実性において、複数の認識候補からパスプランニングが可能な認識結果を選択することが可能であるか、について検証する。

実装に関しては、特定の実験機器等に依存せず、汎用的に使用可能なシステムの構築を目指す。実装したプログラムや実験のために取得したデータセットなどをオープンリポジトリ上で公

開し、使用可能とする。

#### 4. 自己評価

- 研究目的の達成状況

パスプランニングのための確率推論の定式化およびアルゴリズムの導出を行った。  
また、実環境データによる実験において、パスプランニングが可能であることを確認した。  
そのため、達成状況はおおむね良好であると言える。

- 研究の進め方

研究実施体制に関しては、同じ研究室に所属する教授や講師らと共に、日々、研究に関する議論・情報共有を行うことで、円滑に研究を進めることができた。研究費執行状況に関しては、本研究の手法の構築や実験、当該研究に関連する研究発表の聴講や研究を進める上で有用な議論・情報共有を行うために有効活用することができた。

- 研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

本提案のアプローチをサービスロボット等に導入した場合、自律的に場所の概念や語彙を獲得するだけでなく、音声インタラクションから案内誘導などのナビゲーションタスクを行うことができるようになる。これは、学習の際もタスク実行時においても、事前のラベル付けやゴール座標の指定が必要ないことを意味する。つまり、コンピュータやロボット技術に不慣れなユーザでも利用できるようになることが期待される。

- 研究課題の独創性・挑戦性

本研究は、制御情報(動作情報)の推定問題のみならず、不確実な観測情報に基づくロボットの自己位置推定問題も含むため、MDP ではなく部分観測マルコフ決定過程 (POMDP: Partially Observable Markov Decision Process)の問題設定となる。POMDP は通常の MDP と比べて問題設定が厳しいものとなる。SpCoSLAM はベイズフィルタベースの SLAM にマルチモーダルカテゴリゼーションを統合したモデルであるため、本研究課題は多くの不確実性を伴ったより複雑な POMDP である。このモデルにおいて行動決定の確率推論を行うところに本研究の挑戦性がある。

#### 5. 主な研究成果リスト

- (1)論文(原著論文)発表

なし

- (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)

主要な学会発表

1. 谷口彰, 萩原良信, 谷口忠大, 稲邑哲也. マルチモーダルカテゴリ形成と SLAM の統合モデルによるオンライン学習と経路計画. 第 21 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS) ディスカッショントラック. 2018.

2. 谷口彰, 萩原良信, 谷口忠大, 稲邑哲也. 場所概念に基づく確率推論による音声命令からのパスプランニング. 人工知能学会全国大会 (JSAI). 2019. (発表予定)

## 研究報告書

### 「VR 没入体験を用いたワークショップの対面行動の評価」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：西田 智裕

#### 1. 研究のねらい

近年、共創的な合意形成の場として、まちづくりワークショップの有用性が明らかにされている[錦澤 2000]。ワークショップにおいて、街並みなど共創する対象が非常に大きいものである場合、それを想像しながら議論をすることは難しい。そこで2016年度において、VR 没入体験により共創する対象を疑似体験することで、議論を支援する研究を行った[西田 2016]。この研究により、VR 没入体験はワークショップの参加者に空間的な発想を与えるため、議論において絵や画像を用いた視覚的な意見の割合を多くする効果があると明らかになった。また、ヘッドマウントディスプレイ(図1)によるVR 没入体験は、マルチディスプレイ(図2)に比べて1人でアイデアを考えやすいことがわかった。



図1 ヘッドマウントディスプレイ



図2 マルチディスプレイ

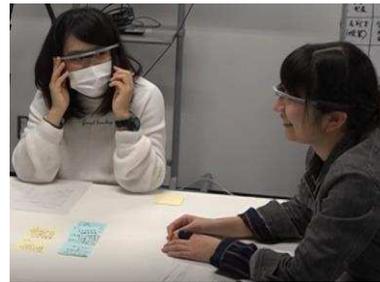


図3 対面行動



図4 ウェアラブルデバイス

しかし、ヘッドマウントディスプレイは、議論し難いという課題があった。これは、ヘッドマウントディスプレイが現実視野を断つことにより、対面行動(図3)が阻害されるためと考えられる。対面行動とは、二者間で物理的に顔と顔を向かい合わせる最も基礎的なコミュニケーションの1つであり、様々な場面で見られる。近年は、対面行動のリアルタイム計測が可能となるウェアラブルデバイス(図4)が開発されている[蜂須 2017]。

そこで、2018年度加速フェーズでは、VR 没入体験を用いたワークショップにおいて、ウェアラブルデバイスにより対面行動を計測し、議論におけるアイデアとの関係について明らかにすることを目的とする。これにより、VR 没入体験を用いたまちづくりワークショップ設計への活用を目指す。

VR 没入体験を合意形成の場を用いた研究として、福田らの研究がある[福田 2011]。この研究では、分散同期型として共創する対象のCGを各参加者のPC上で共有し、書き込みを行うことで議論を支援している。また、実空間における合意形成の場でVR 没入体験を用いた三宅らの研究がある[三宅 2007]。この研究では、模型とそのアイレベルの撮影を用いて、VR 没入体験を実現し議論を支援している。これらの研究では、VR 没入体験を合意形成の場を用いる点で本研

究と同様であるが、対面行動には着目しておらず、それを計測する本研究とは異なるといえる。

以上より、本研究は VR 没入体験を合意形成の場であるワークショップに用いて、対面行動とアイデアの関係について検証するという点で意義があるといえる。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

ワークショップの「1人でアイデアを考える」において、参加者は何度か VR 没入体験を利用した[西田 2016]。VR 没入体験は光による視覚の刺激である。これらより、VR 没入体験は心理的・生理的な影響を与える可能性がある。また、一般に男女で空間を認識する能力が異なると言われている。そこで 2017 年 AIP チャレンジにおいて VR 没入体験を利用しながら「1人でアイデアを考える」実験を行い、その



図 5 VR 没入体験を使用しながらアイデアを考える様子

心理的・生理的な影響について検証した(図 5)。その結果、男性によるヘッドマウントディスプレイでは「連続した」映像であるが「開放感」を感じない傾向があり、「1人でアイデアを考える」において興奮させると明らかになった。また女性によるヘッドマウントディスプレイでは「はっきりした」と感じ「陰気な」「不安な」と感じないため「アイデアを考え易い」と感じさせると明らかになった。課題として複数人が参加したワークショップにおける検証がある。

### (2) 概要

本研究では、ワークショップにおける対面行動と心理的・生理的な影響について明らかにする。ワークショップにおける対面行動の計測には、赤外線通信により計測するウェアラブルデバイスを用いる[蜂須 2017]。心理的な影響は、ワークショップにおいて記述されたアイデアについて、アンケート調査により評価する。生理的な影響は、脈拍計により興奮の程度、フリッカー計測器により視覚疲労度を評価する。ワークショップは 3 人で実施する。これらを踏まえた検証の手順は、以下の通りである。

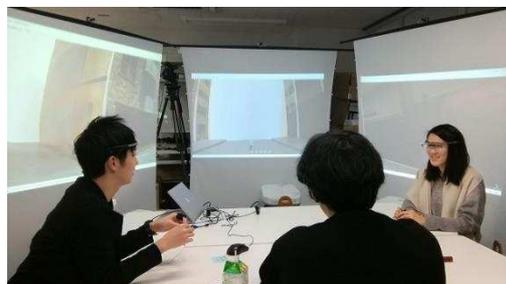


図 6 プロジェクターによるマルチディスプレイ

- a-1. 開始前のフリッカー値を計測
- a-2. ウェアラブルデバイスと脈拍計を装着
- b-1. 1人でアイデアを考える
- b-2. アイデアを説明
- b-3. 合意案を作成
- c-1. 終了後のフリッカー値を計測
- c-2. アンケートによりアイデアを評価

VR 没入体験の表示方法としてヘッドマウントディスプレイと、プロジェクターによる3面マルチディスプレイ(図 6)を用意した。また、模型をアイレベルで撮影した歩行速度のスピードである映像を用いた。手順3. ~5. の間は、参加者が任意で体験を利用できるようにした。検証の結果、以下のことが明らかとなった。

1. 「b-2. アイデアを説明」の際に、マルチディスプレイにより VR 没入体験を利用できるようにすると、対面行動の回数が少なくなることがあるとわかった。また、「b-2. アイデアを説明」に、ヘッドマウントディスプレイにより VR 没入体験を利用されないことがわかった。
2. 「b-2. アイデアを説明」における対面行動の回数と、そのアイデアの平均評価値より、参加者間の対面行動が多く発生するほど、アイデアを高く評価すると明らかになった。また、ヘッドマウントディスプレイは、「b-2. アイデアを説明」において利用されないため、よりその傾向が強まるとわかった。
3. 「b-2. アイデアを説明」における対面行動の回数と、脈拍値の変化率より、脈拍値は説明序盤の緊張している状態から、次第に慣れてリラックスしていく状態を示すことが明らかになった。また、対面行動と脈拍数の間では、相関関係がないとわかった。
4. 「a-1. 開始前、c-1. 終了後のフリッカー値を計測」の変化率より、今回のワークショップ手順は、VR 没入体験の表示方法に関わらず参加者の視覚を活性化させるとわかった。

### (3) 詳細

#### 研究項目1:まちづくりワークショップの実施と対面行動の計測

ワークショップにおける対面行動と心理的・生理的な影響について明らかにするために、ブレインストーミング形式のワークショップを実施した。ワークショップの対象は、まちの活性化について 2011 年より議論されている名古屋市中区の長者町繊維街とした。議論テーマは、まちの活性化を目的とした「T-1.

表 1 ワークショップの組み合わせ

ID	W-1	W-2	W-3	W-4
テーマ	T-1	T-2	T-1	T-2
VR	D-1	D-2	D-2	D-1
男	2	1	1	1
女	1	2	2	2

観光客を呼び込むストリートファニチャーの設置」「T-2. 地元の人を呼び込む週末イベントの実施」のいずれかとした。また、VR 没入体験の表示方法には「D-1. ヘッドマウントディスプレイ」と、プロジェクターによる「D-2. マルチディスプレイ」のいずれかを用いた。VR 没入体験の映像は、模型を 360 度カメラによりアイレベルで撮影した。また、2分10秒間で模型内を歩行速度で往復する映像とした。VR 没入体験は b-1.~b-3.の間は、参加者が任意で利用できるようにした。ワークショップは、表 1 に示す組み合わせにより、20 代の学生 3 人を参加者として 4 回実施した。

「a-1. 開始前のフリッカー値を計測」では、フリッカー値計測器により、フリッカー値を計測した。

「a-2. ウェアラブルデバイスと脈拍計を装着」では、ウェアラブルデバイスを図 3 のように頭

部へ装着し、利き手でない手首に脈拍計を装着した。

「b-1. 1人でアイデアを考える」では、参加者がVR没入体験を利用しながら、5分間で4つのアイデアを考え、それらを1枚ずつ76×76mmの付箋紙へ記述し、参加者全員で12枚のアイデア付箋紙が作成された。



図7 アイデアを説明の様子

「b-2. アイデアを説明」(図7)では、1人の参加者が20秒間アイデアについて説明し、インターバル10秒間を取ることを12回繰り返した。時間は3秒前からカウントダウンされるアプリを用いて管理した。説明の順序は、1人が2回続かないランダムとした。参加者は1枚のアイデア付箋紙を見せながら説明した。この際、参加者全員の対面行動の回数と、脈拍値を計測した。

「b-3. 合意案を作成」では、アイデア付箋紙12枚に基づき、参加者同士で議論しながら、A3用紙2枚に付箋紙と、新たな記述を交えて5分程度で合意案を作成した。

「c-1. 終了後のフリッカー値を計測」では、フリッカー値計測器により、フリッカー値を計測した。

「c-2. アンケートによりアイデアを評価」では、「b-2. アイデアを説明」で説明されたアイデア付箋紙について、参加者が「6点:非常に満足」～「1点:非常に不満」まで6段階評定尺度で評価した。

## 研究項目2:ビデオ観察を用いた心理的・生理的な影響と対面行動の比較

「b-2. アイデアを説明」の20秒間における対面行動の回数と、アイデアの平均評価値を表2に示す。

表2 対面行動の回数とアイデアの平均評価値と脈拍値変化率

ID	W-1			W-2			W-3			W-4		
	対面回数	平均評価値	脈拍値変化率									
1	5	4.3	0.09	2	4.7	0.06	5	4.7	0.04	13	6.0	0.05
2	5	4.3	0.10	5	4.7	0.08	5	5.0	0.05	8	5.3	0.09
3	1	5.0	-0.05	4	5.7	-0.01	6	5.7	0.02	5	5.7	0.02
4	4	3.7	-0.14	6	5.7	0.04	7	5.7	0.05	9	5.7	-0.01
5	1	3.3	0.06	13	6.0	0.00	10	6.0	-0.06	9	4.3	0.00
6	2	3.0	0.04	5	4.7	-0.04	3	5.3	-0.05	9	5.3	-0.15
7	1	5.7	-0.09	3	5.3	0.04	2	5.0	-0.02	9	5.3	-0.10
8	3	4.3	0.09	3	5.0	-0.01	6	5.3	-0.03	6	5.3	-0.14
9	0	4.7	0.13	10	6.0	-0.01	8	5.7	-0.03	2	5.3	-0.07
10	1	3.7	0.07	2	5.3	-0.01	3	5.0	-0.05	5	4.7	-0.08
11	3	5.3	0.06	6	5.3	-0.14	10	5.3	0.03	5	4.7	-0.16
12	4	4.3	0.04	3	4.3	-0.07	9	5.3	-0.05	2	4.7	-0.04
平均	2.5	4.3	0.03	5.2	5.2	-0.01	6.2	5.3	-0.01	6.8	5.2	-0.05

表2より、1つの「b-2. アイデアを説明」における対面行動の平均回数は、[W-1]で2.5と最も少ないとわかる。[W-1]のビデオ映像では、説明の際にマルチディスプレイにより数多くVR没入体験を利用していた。しかし[W-4]では、ほとんど利用していなく、[W-2][W-3]では、全く利用していなかった。これらより、説明の際に、マルチディスプレイによりVR没入体験を利用できるようにすると、対面行動の回数が少なくなることがあるとわかった。また、説明の際に、ヘッドマウントディスプレイによりVR没入体験を利用されないことがわかった。

「b-2. アイデアを説明」の20秒間における対面行動の回数と、そのアイデアの平均評価値の相関係数を算出すると、1%水準で有意な0.56の相関係数が得られた。また、ヘッドマウントディスプレイでは、1%水準で有意な0.65の相関係数、マルチディスプレイでは、5%水準で有意な0.48の相関係数が得られた。これらより、「b-2. アイデアを説明」において、参加者間の対

面行動が多く発生するほど、アイデアを高く評価すると明らかになった。また、ヘッドマウントディスプレイは、「b-2. アイデアを説明」に利用されないため、よりその傾向が強まるとわかった。

「b-2. アイデアを説明」の20秒間における対面行動の回数と、脈拍値の変化率を表2に示す。変化率とは、人間工学の分野で用いられる被験者による個人差を加味して評価する指標である。実験の開始前などの計測値を基準値として、その変化率を計算する。今回は「b-1. 1人でアイデアを考える」における脈拍値の平均を基準値とした。説明順と脈拍数の間に、1%水準で有意な-0.38の相関係数が得られた。また、対面行動との間では、有意な相関係数が得られなかった。これらより、脈拍値は説明序盤の緊張している状態から、次第に慣れてリラックスしていく状態を示すことが明らかになった。また、対面行動と脈拍数の間では、相関関係がないとわかった。

「a-1. 開始前のフリッカー値を計測」と「c-1. 終了後のフリッカー値を計測」では、ワークショップ終了後の方が開始前より変化率が有意に0.04高い。また、2つの表示方法に有意な差はなかった。これらより、今回のワークショップ方法は、VR没入体験の表示方法に関わらず参加者の視覚を活性化させるとわかった。

### 3. 今後の展開

対面行動の計測と、アイデアのアクティブな電子データ化により、合意案の作成に向けて評価の高いアイデアを自動的に表示する議論の支援が考えられる。また、対面行動を計測するウェアラブルデバイスのニーズを喚起できる期待がある。さらに、アイデアを説明において、身振り手振りや、身を乗り出す行為が見られたため、それらの行為とアイデアの評価について検証することがあげられる。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

今まで直感的に感じていた議論における対面行動が、参加者によるアイデアの評価と関係があることを定量的に示すことができた。従って、今回の研究目標は達成できたといえる。

#### ・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究実施体制として、学生と共に研究機器の組み立て、操作を行った。予備実験、実験計画、本実験、実験結果の分析・考察は、筆者自身がおこなった。研究費の執行は、研究目標を達成するために物品費を中心として、適切に執行することができた。

#### ・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

今回の研究成果による波及効果は、遠隔会議システムの分野において、対面行動をいかに再現するかという視点を与えることが期待される。さらに、対面行動以外の振る舞いについても、アイデアの評価について関係を検証する研究を生み出す効果が期待される。

#### ・研究課題の独創性・挑戦性

今回の研究課題のキーワードである VR 没入体験は、ヘッドマウントディスプレイや 360度カメラの普及により身近となりつつある。また、まちづくりワークショップは、その学術的効果について多数研究されている。しかし、対面行動は、その計測に以前はビデオコーディン

グを要した。そのため、機械的な計測が可能になったこれからの研究が期待される分野である。以上より、対面行動、VR 没入体験、ワークショップ結び付けた研究課題は、独創性があるといえる。また対面行動とワークショップにおけるアイデアの評価の関係について、どのように定量的な検証を実現するかという挑戦性があった。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

1. Tomohiro Nishida, Takanori Ito, Takayuki Ito. Verification of Effects Using Consensus-Building Support System in Continuous Workshops for City Development. Journal of the Science of Design. 2019 in press

### (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)

西田智裕, 伊藤孝紀, 伊藤孝行: 合意形成の支援に向けたVR視覚シミュレーションの検証, 日本デザイン学会 2018 年度第 3 支部研究発表会, 2018.3

名古屋市平成 30 年度第 1 回オープンサロン, クリエイティブサロン「クリぱこ」 & Web 会議, 参加者 30 人, 2018/7/26-8/9

## 研究報告書

### 「身体接触行動がもつ社会的機能の異文化多様性の理解」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：蜂須 拓

#### 1. 研究のねらい

本研究では、握手やハイタッチ等の人と人が皮膚を触れ合わせて行う身体接触コミュニケーション(以下、身体接触)のもつ社会的機能の文化差を理解することを目的とする。このために、我が国と比較して積極的な身体接触文化のある米国において身体接触計量および実時間感覚刺激提示による促進方法の要請を調査し、フィールド実験を行える実験基盤を構築することを目的とする。将来的には、身体接触を促進する仕組みを構築し、身体接触のもつ潜在的かつ肯定的な機能を鼓舞することで対人交流の円滑化を試みる。

研究者はこれまでに身体接触を客観的に計量可能なブレスレット型デバイスを開発した。本デバイスを装着した二名の手が接触すると装着者の手を伝送路としてデバイス間で微弱な電流を流し通信(人体通信)する。これにより、いつ、誰と接触したかを計量することが可能である。また本デバイスにはフルカラーLEDが内蔵されており、計量結果を実時間で装着者にフィードバックすることが可能である。さらに研究者は2017年度までのAIPチャレンジにおいては身体接触を促進する仕組みを構築することを目的に、新しい振動フィードバック提示手法に関する研究を行い、光フィードバックと合わせて身体接触にエンタテインメント化することを試みた。

身体接触計量による社会的機能の検証、および実時間フィードバックによる促進効果の検証にあたり、現実の生活場面に近い環境での実験(フィールド実験)を実施する必要がある。これまでに、研究者は我が国の特別支援学校において、一般的に対人交流を不得手とする自閉症スペクトラム障害児(ASD児)を対象にしたフィールド実験を実施してきた。しかし、検証結果の一般性を示すためには多様な環境において大量のデータを収集する必要がある。特に身体接触の捉え方は文化に影響を受けるところが多く、我が国の身体接触文化は比較的消極的であるということも知られている。

本研究では、米国においてフィールド実験を行える実験環境を構築することを目的とする。米国を選択した理由として、一般的に身体接触に積極的であること、ASD児等に対する社会性形成支援研究が盛んであり、身体接触の社会的機能を理解するための実験フィールドが充実していることが挙げられる。以上から、2つの研究テーマ:(A)米国自閉症研究施設訪問による身体接触計量手法に関する要請調査;(B)要請に基づく身体接触様相計量・提示手法の設計、を設定した。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

これまでに、研究者はブレスレット型デバイスによる身体接触計量結果を実時間で振動刺激によりフィードバックするという系において、身体接触にエンタテインメント性を付加し身体接触を促進することを試みてきた。2017年度 AIP チャレンジでは、振動提示の質の制御により人の選択行動(嗜好)に影響を与える可能性を実験室実験より見出した。この知見をフィールド実験に活かし、ASD 児の身体接触を促進しようと考えた。これまでも、我が国の児童を対象にしたフィールド実験を行ってきた。しかし、身体接触の捉え方は文化による影響が大きいことが知られている。促進効果の一般性の検証、ひいては身体接触の社会的機能の文化差を検証するために、我が国とは異なる身体接触文化をもつ国において身体接触研究に取り組む必要性があると考えた。

### (2) 概要

本研究では、身体接触のもつ社会的機能の文化差を理解することを目的とする。このために、米国において身体接触計量および実時間感覚刺激提示による促進方法の設計要請を調査し、フィールド実験を行える実験基盤を構築することを目的とする。米国を選択した理由として、我が国と比較して一般的に身体接触に対して積極的な文化を有すること、ASD 児等に対する社会性形成支援研究が盛んであり、身体接触の社会的機能を観察するための実験フィールドが充実していることが挙げられる。以上から、以下2つの研究テーマを設定し、研究を行った。

#### (A) 米国自閉症研究施設訪問による身体接触計量手法に関する要請調査

米国ペンシルバニア州の Children's Hospital of Philadelphia の Center for Autism Research (CAR) を訪問し、ブレスレット型デバイスのデモンストレーションを行った。また CAR の主催する ASD 児向けのサマーキャンプにおいて児童にデバイスを装着してもらい予備実験的な観察を行った。これを基に 2019 年度のサマーキャンプにおけるデバイスを使用したフィールド実験の内容について議論を行い、デバイスの設計について確認した。また、米国カリフォルニア州の University of California, Santa Barbara を訪問し、同大学の Koegel Autism Center においても同様の実験実施を計画した。

設計要請調査の結果: 1) 身体接触計量に関して、「どのように触れた」かを計量できる技術、身体接触の様相計量技術の必要性; 2) 感覚刺激提示に関して、刺激の鮮明化の必要性; 3) デバイスの装着性に関して、特に皮膚に接触させる電極部分の親和性をより高くする必要性; 4) デバイス操作に関して、タブレット端末等から簡易に計量結果を閲覧したり感覚刺激の制御をしたりすることが可能なインターフェースの必要性、が明らかとなった。

#### (B) 要請に基づく身体接触様相計量・提示手法の設計

- 1) 身体接触の様相計量 身体接触の方向(どちらから触れたか)および接触のジェスチャ(例: 指先同士, 握手)の計量する手法を確立した。
- 4) デバイスに Bluetooth Low Energy モジュールを搭載することでタブレット端末等の外部機器との通信機能を実装した。

### (3) 詳細

## 研究テーマ A「米国自閉症研究施設訪問による身体接触計量手法に関する設計要請調査」

米国ペンシルバニア州の Children's Hospital of Philadelphia の Center for Autism Research (CAR) の Research Assistant Prof. Julia Harish-Morris (University of Pennsylvania) および Assistant Prof. Joseph P. McCleery (Saint Joseph's University) を訪問し、デバイスのデモンストレーションを行った。また CAR 主催のサマーキャンプに参加し、児童数名にデバイスを装着してもらい、行動を観察する予備実験を行った(図 1)。



図 1 CAR サマーキャンプにおけるプレストレス型デバイスの予備的使用

これを基に、2019 年度のサマーキャンプで身体接触と発話等の社会的行動の関係を検証するための実験について議論した。また、米国カリフォルニア州の University of California, Santa Barbara の Koegel Autism Center においても同様のフィールド実験を計画中である。以上より、次の 4 つの設計要請を見出した。

### 1) 接触様相計量技術の確立

これまでのデバイスから得られる計量結果はいつ、誰と触れたかであった。これに加えてどちらから触れたのか、どれくらいの面積で触れたのか、また温かい／冷たい接触であったのか、といった身体接触の詳細な状態(様相)をどれくらい詳細に記述可能であるか、という議論があった。これらの様相がどのように対人交流に影響を及ぼすか明らかにした文献はない(そもそも計量する手段がない)が、例えば、どちらから触れたかは交流のイニシアティブを観るためにも重要であると考えられる。以上から、接触様相計量技術が要請された。

### 2) 振動刺激の鮮明化

計量結果の実時間フィードバックにおける感覚刺激の必要条件として、刺激を接触相手と共有可能であることが挙げられる。これまでの光フィードバックはこの条件を満たす(身体接触している二人で見ることが可能である)が、図 1 に示す屋外では太陽光の影響で光を視認し難いことが明らかとなった。一方で振動フィードバックにおいては振動が手の皮膚を伝搬することから、自身のデバイスの振動のみならず相手のデバイスの振動も知覚可能である。皮膚の振動伝搬特性を明らかにすることで、振動フィードバックをより鮮明にすることが要請された。

### 3) 電極形状設計による装着性の改善

現在のデバイスで採用している人体通信技術は電極を装着者の皮膚に接触させる必要がある。堅牢な計量を行うためには十分に電極を皮膚に押し当てる必要があるが、これが装着性を損なう要因となっている。特に ASD 児は知覚過敏を有することが多く、電極形状の見直しによる装着性の改善が必須である。

### 4) インタフェースの改善

本デバイスは身体接触を計量したい対象者全員にデバイスを装着させる必要があるため、実験中に使用するデバイスは複数台である。実験中にデータを閲覧したり、感覚刺激フィードバックのパラメータを調整したりすることを考えると、タブレット端末等の 1 台の情報端末より無線通信を通じて全てのデバイスを制御できることが望ましい。

## 研究テーマ B「要請に基づく身体接触様相計量・提示手法の設計」

上記要請のうち、1) 接触様相計量技術の確立と 4) インタフェースの改善に取り組んだ。

### 1) 接触方向と接触ジェスチャ同定

本年度は新たな身体接触の様相として、接触方向(どちらから触れたか)と接触ジェスチャ(指先で触れ合う、握手する等)を同定する手法を確立し、デバイスに実装し、さらに精度評価を行った(図 2)[1]。前者は接触直前のデバイスの加速度値の大小を比較することで実現した。後者は、接触面積が大きいほど、手指に流れる電流量が大きくなることを利用して実現した。精度評価検証実験の結果、接触方向同定は 95%、4 種の接触ジェスチャ同定は 85%の精度が得られた。

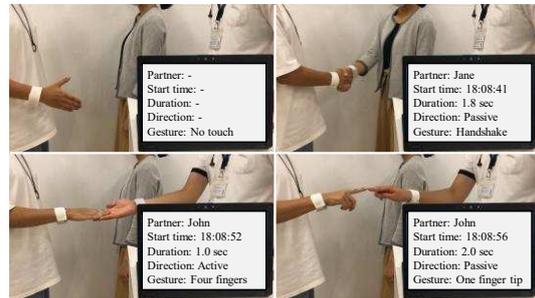


図 2 接触方向と接触ジェスチャ同定

### 4) インタフェースの改善

複数のデバイスの計量結果の閲覧、感覚刺激フィードバックのパラメータ調整を一台のタブレット端末から行えるシステムを開発した。デバイスは搭載された Bluetooth Low Energy (BLE) モジュールよりタブレット端末と通信する。BLE の仕様上、同時接続可能台数はほぼ無制限であるが、OS もしくは端末の仕様によって同時接続可能台数が異なり、場合によっては 2, 3 台のみの同時接続しかできない。様々な OS、タブ

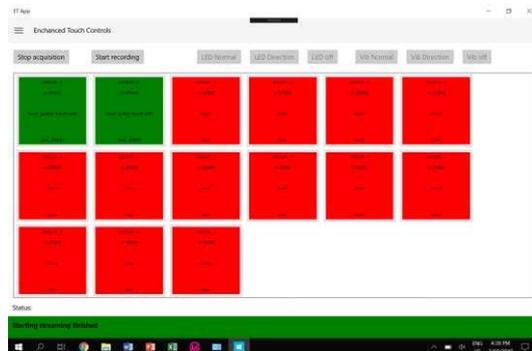


図 3 タブレット端末による 15 台のデバイスの計量結果閲覧

レット端末で実装、比較した結果、Windows10 を搭載した Microsoft Surface において 15 台同時接続を実現した。図 3 はタブレット端末による 15 台の計量結果の実時間閲覧を示す。緑は身体接触をしている、赤は身体接触をしていない状態を示す。図中では ID001 と ID002 の装着者が身体接触していることを示す。計量結果はタイムスタンプとともに端末に記録される。

### 2) 手指皮膚の機械振動伝搬特性

手指の振動の伝搬特性を定量的に検証するための実験を行った。本実験ではデバイスを装着した二名が握手している場面を想定した。ドップラレーザ振動計を用いて本デバイスが現在使用している振動刺激における振動の時空間特性を計測した。その結果、20 dB 程の減衰は観られたが、人の閾値以上の振動が伝搬していく様を観察できた。(IEEE Transactions on Haptics に投稿中)

### 3) 電極の特性解析

身体接触計量に人体通信技術を利用している本デバイスは電極の皮膚への接触が必要である。そのため通信品質を求めると接触を確保するためにサイズの大きい電極が好ましいが、装着性を考慮すると電極は極力小さい方が望まれる。そこで複数の電極レイアウトにおける人体通信の S/N 比を計測した。本結果を用いて、通信品質を担保しつつ、電極サイズを極力小さくする電

極設計ガイドラインを作成した。(MDPI Sensors に投稿予定)

### 3. 今後の展開

今後は上記の要請に基づいてデバイスの再設計を行う。そして、複数台のデバイスおよびタブレット端末を用いて、米国の ASD 児に対するソーシャル・スキル・トレーニングにおいて、身体接触計量および身体接触促進の効果を検証するためのフィールド実験を行う。感覚刺激フィードバックの有無による身体接触の変化に合わせて発話の変化を観察することで、身体接触が対人交流におよぼす効果を検証する。我が国における同様のフィールド実験の実施は既に実績があり、日米の結果を比較することで身体接触がもつ社会的機能の文化差を観察する。

また、フィールド実験後に実験者に対してデバイスおよびタブレット端末のユーザビリティ調査を行う。最終的には、開発者(つまり本研究)が現場におらず、情報端末に対する基本的な知識を有する実験者であれば実験を行える環境の構築を目指す。これにより、様々な場面での身体接触計量データを多量に取得することを目指す。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

本研究の目的は身体接触のもつ社会的機能の文化差を理解することである。今年度はそのために(A) 米国自閉症研究施設訪問による身体接触計量手法に関する要請調査;(B) 要請に基づく身体接触様相計量・提示手法の設計、を設定した。前者において、米国の ASD 児研究施設を訪問し、実際にデバイスを実演しながら今後のフィールド実験について議論できた点において、研究は順調に進められたといえる。後者において、今年度は設計要請に対して工学的にどの程度実現可能であるかを検証した。実際に全ての要請をデバイスに実装できてはいないが、設計指針としてどの程度要請に応えられるかを検討できた点で、研究は順調に進められたといえる。総じて、今年度の設定目標は概ね達成できたといえる。

#### ・研究の進め方

当初の計画通り、米国の ASD 児研究設備のある機関を訪問し、現地の研究者と対話しながら次年度以降のフィールド実験に関して議論できた点で計画通りの研究実施体制で研究を行えた。今年度は主に米国を訪問するための旅費、およびデバイス開発用の機材およびタブレット端末等の実験環境構築に必要な物品の費用に研究費を使用した。

#### ・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

本研究のように国際的に工学と心理学分野が手を組み、新しい科学的な知見、新しい実験手順が確立できれば、文理融合の新しい学術分野を確立したといえる。これまでの身体接触研究において、主に本研究が目的としている身体接触の社会的機能の理解は心理学分野で研究されてきおり、工学分野において身体接触を取り扱ったものは少ない。そのため、本デバイスのように装着するだけで身体接触を計量できるといった簡易な工学的な計量方法がなかった。一方で、工学者のみで本研究目的を達成しようとした場合、実験フィールドの確保が難しい。また、身体接触に対して消極的である我が国のみでの実証実験にも結果の一般性を示す点において限界がある。本研究で得られる知見は、ASD 児の社会性形成支援に貢献するだけでなく、我が国の

身体接触文化に影響を与える可能性を秘めている。身体接触を促進する仕組み(スマートフォンアプリと連動したソーシャルゲーム等)により、対人交流を鼓舞するコンテンツが産業界から生まれることを期待する。

・研究課題の独創性・挑戦性

これまでも工学的に身体接触を計量しようという試みはいくつかあったが、有線接続を必要としたり、カメラ撮影が必要であったりと、実験環境が限定されてしまうものばかりであった。本デバイスのように完全無線の装着型デバイスであり、様々な環境での使用が可能であるデバイスは他にないといっても過言ではない。本デバイスのインタフェースを改善することで、いつでも、誰でも、どこでも身体接触研究をすることが可能にできれば、多量の身体接触計量データを収集することが可能になる。本データを用いることで身体接触の社会的機能の統計的な解析が可能になると考えられる。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

なし

(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)

1. Taku Hachisu, Baptiste Bourreau, Kenji Suzuki. EnhancedTouchX: Smart Bracelets for Augmenting Interpersonal Touch Interactions, in Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2019, Glasgow, UK, May 4–9, 2019. [accepted]

# 研究報告書

## 「区間値による欠損値補完」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：花田博幸

### 1. 研究のねらい

データ科学の分野では、機械学習など多くの手法において、データ中の値はすべて揃っていることを想定している。一方で現実のデータにおいてはデータ中の値の一部が不明である（欠損）場合も多く、これらの手法を適用するうえでの障壁となる。そのため、欠損した値のそれぞれに対して、欠損していない値やその他の知識をもとに適切と思われる値を当てはめる方法（補完）が古くから検討されてきている。

これまでの欠損値を補完する方法の多くは、欠損値が取る分布の推測を立て、それに基づいて乱数を発生させ、その値を補完するというものである。これは分布が正しく推測できているとすれば一見適切な手法にも見えるが、例えばその補完した結果のデータを用いて機械学習の学習結果を得たとき、欠損値の分布が学習結果の分布としてどう反映されるかまでは明らかにならない。乱数による補完の試行を多数回行い、それらのそれぞれについて学習結果を得ることで学習結果の分布を近似すること（multiple imputation）も可能ではあるものの、学習計算の回数が増えるために計算コストが大きいこと、また確率的な評価であることを脱せてはいないことが問題として挙げられる。

本研究では、欠損値を補完する値が確率的に分布しているのではなく、ある区間に存在すると考えることで、これらの問題に対処する。例えばある人の年齢が不明であるときに、それを「0歳以上100歳以下」のような「ありえそうな区間」で置き換えることが一つの方法である。これにより、学習結果についても「係数が0.4以上0.8以下」のような区間が得られる。

データ中の値の一部に区間が入っていて、そこから機械学習等の計算をする場合、通常であれば区間に対して加減乗除やその他の数学関数を適用する必要がある（interval analysis）。しかしこのような計算は、最終的に得られる学習結果の幅をかなり大きくすることが実験的にも明らかになっている。本研究では、機械学習手法の一つである正則化付き経験損失最小化を対象とし、interval analysisの計算を回避して学習結果の幅をより狭く得ることができる方法を取り扱っている。これをもとに、実際に欠損値を区間で補完した際に、学習結果の幅が実用上十分小さくなる条件を考察した。

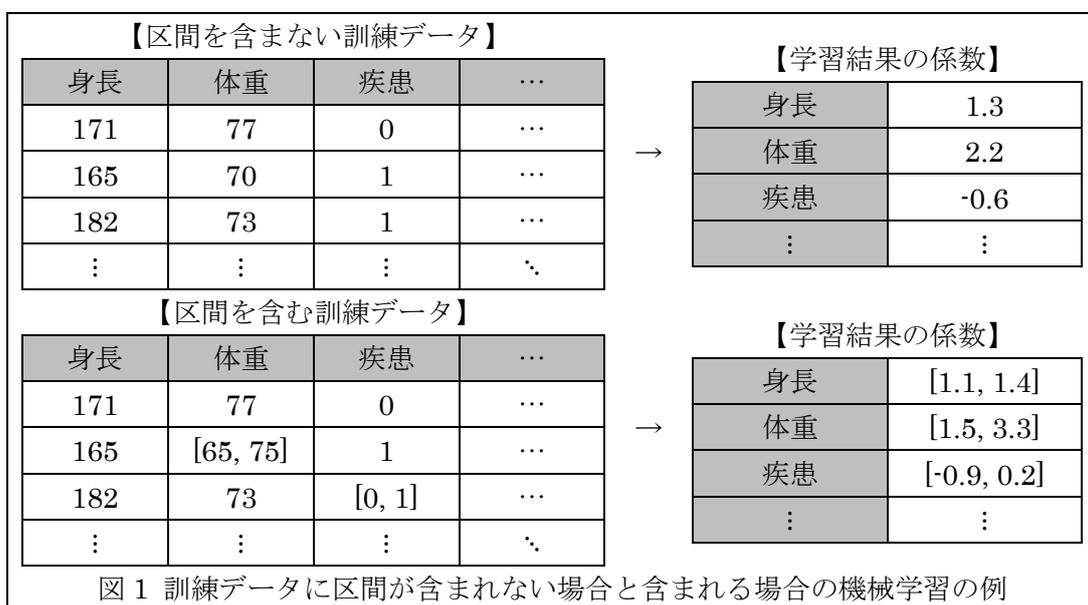
### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

前年度の AIP チャレンジと今年度の AIP チャレンジ PRISM 加速支援で共通して扱

っている手法は、データに区間が含まれる場合の機械学習である（図 1）。しかし前年度については、データに区間を含めるという操作がプライバシー保護を目的としており、プライバシーを数学的に定義することなどを主に検討していた。ここでプライバシー保護とは例えば、データ中のある人が「30 代であることは知られてもよいものの、それ以上詳しく知られたくない」という場合は、学習の計算前にその人の年齢の値を[30, 39]という区間で置き換える。そうしてから機械学習等を行えば、学習結果を公開してもその人の年齢についてプライバシーが保護されるというものである。

これに対し本研究では、欠損値補完の結果としてデータに区間が存在していることを考え、それらの応用において必要性が高いと考えられる、学習結果の幅が十分小さくなるための条件の検討や、計算方法の改善について取り組んだ。



## (2) 概要

まず本研究の基本的な考え方を説明する。多くの機械学習の設定においては、訓練データ  $X$ （行列を想定することが多い）が与えられたとき、それに対応した学習結果がパラメータ（ベクトル） $w$  として得られる。このとき  $X$  や  $w$  の個々の要素はスカラーである。これに対し本手法では訓練データ  $Z$  として、一部の要素が（欠損した値を埋めた結果として）区間となっている場合を考える。その結果、学習結果  $W$  もベクトルの領域（集合）として得られる。

本課題において取り組んだこととしては、以下のものが挙げられる。

- A) 一つは、欠損値を置き換える区間の大きさの、学習結果の可用性への影響を理論的・実験的に示したことである。欠損値を置き換える区間が大きくなると、それにより学習結果の領域  $W$  が大きくなり、その結果として予測値の幅も大きくなり可用性が下がる。これらの関係を明らかにすることで、応用上予測値の幅を十分小さくするための条件を明らかにした。

なお提案書においてはこのことを、欠損値を置き換える区間に対する仮定を見直すことで対処することを想定していたものの、実際に取り組むと困難であったことから方針を見直した。

- B) もう一つについては、学習結果の幅を計算する過程を見直すことで、得られる学習結果の領域  $W$  を小さくすることである。これについては具体的な改善を達成することはできなかったものの、問題の困難さを明らかにした。

### (3) 詳細

まず本研究が前提とする手法について説明する。 $d$ 次元ベクトル  $x$  を入力してスカラー値  $y$  を予測する問題を考え、その際に線形な予測関数を想定する。すなわち  $d$ 次元ベクトル  $w$  が存在して  $y = x \cdot w$  (内積) という関係が近似的に成り立つことを仮定する。ここで機械学習の問題としては、訓練データとして  $n$  事例が存在する、すなわち入力として  $n \times d$  の行列  $X$  ( $d$ 次元ベクトルを  $n$ 個並べた)、出力として  $n$ 次元ベクトル  $Y$  ( $n$ 個の出力を並べた) が与えられ、それに最も合う  $d$ 次元ベクトル  $w$  を求める。

ここで、もし  $X$  に区間が含まれていれば、得られる  $w$  もそれに応じて領域  $W$  となるべきである。提案者らはすでに、正則化付き経験損失最小化という機械学習手法のクラスについて、これを比較的小さい計算コストで計算する方法を示している。

Hiroyuki Hanada, Toshiyuki Takada, Jun Sakuma, Ichiro Takeuchi, “Interval-based Prediction Uncertainty Bound Computation in Learning with Missing Values”. <https://arxiv.org/abs/1803.00218>

上記の手法においては、学習結果のベクトルの領域  $W$  が超球の形で求められる、すなわちある  $d$ 次元ベクトル  $v$  と正の実数  $r$  について  $W = \{w \mid |w - v| \leq r\}$  という形でかける。ただし  $|w - v|$  はベクトルの  $L2$  ノルムである (以下同様)。このとき、テスト事例 (実際に予測を行いたい事例)  $x$  に対する予測値  $x \cdot W$  も区間として計算され、以下の式で表される。

$$x \cdot W := \{x \cdot w \mid w \in W\} = [x \cdot v - r|x|, x \cdot v + r|x|]$$

すなわち超球の半径  $r$  は、予測結果の曖昧さにも直接影響する。特に二値分類の場合、 $x \cdot W$  の符号を分類結果とするため、

- $x \cdot v \geq r|x|$  ならば、 $W$  のどの点が取られたとしても符号 (分類結果) は正
- $x \cdot v \leq -r|x|$  ならば、 $W$  のどの点が取られたとしても符号 (分類結果) は負
- $-r|x| < x \cdot v < r|x|$  ならば、符号は確定できない

と判断できる。よって、もし最後の状況が発生することが稀にしか起こらないのであれば可用性は高く、逆に最後の状況が頻繁に発生するのであれば可用性は低いといえる。特に  $r > |v|$  である場合は最後の状況しか発生せず、ゆえに二値分類の結果を一切確定できない最も可用性が低い状況となる。

研究テーマ(A)「データに与える区間の大きさと、予測値の幅の関係の評価」

以下の二段階に分けて理論的検討を行うことで、区間の幅が予測の可用性に与える影響を評価した。ここで予測の可用性は、二値分類の結果を確定できることとしている。

1. 区間の幅の増加が、超球の半径  $r$  をどう増加させるかを評価した。まず理論的な評価として、 $r$  は最悪ケースで区間の幅に比例し、また欠損値の数の平方根に比例することを示した。さらに実験的には、どちらについても平方根に比例するよりもやや小さい程度であることを確認した。
2. 超球の半径  $r$  が、二値分類の結果を確定できる確率をどう変化させるかを評価した (図 2)。特に  $x$  が標準正規分布に従うならば、二値分類が確定する確率は  $\Pr\{(1 - R^2)\Psi_1 > R^2\Psi_{d-1}\}$  とかけることを示した。ただし  $R = r/|v|$  であり、また  $\Psi_1$  と  $\Psi_{d-1}$  は独立にそれぞれ自由度  $1 \cdot$  自由度  $d-1$  のカイ二乗分布に従うとする。これらにより、区間の幅を応用上わかりやすい指標である「二値分類の結果を確定できる確率」と結び付けることができた。

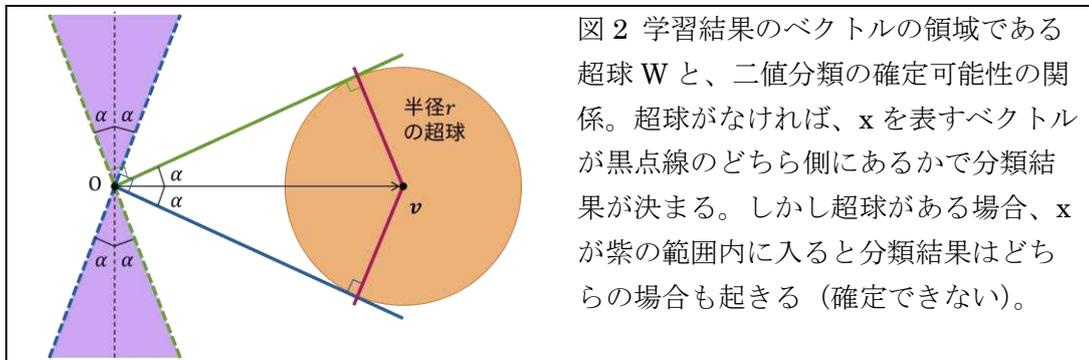


図 2 学習結果のベクトルの領域である超球  $W$  と、二値分類の確定可能性の関係。超球がなければ、 $x$  を表すベクトルが黒点線のどちら側にあるかで分類結果が決まる。しかし超球がある場合、 $x$  が紫の範囲内に入ると分類結果はどちらの場合も起きる (確定できない)。

### 研究テーマ(B)「推定値の幅の計算方法の見直し」

上記の(A)において、半径  $r$  の計算においては指数的な計算時間を避けるため、理論的な可能な半径  $r$  よりも大きいものを取っている。具体的には、半径を本来であれば二つの凸関数  $g, h$  について (イ)  $r^2 = \max_F [\Sigma g(F) + \Sigma h(F)]$  という形で計算すべきものを、代わりに (ロ)  $r^2 = \max_F \Sigma g(F) + \max_F \Sigma h(F)$  と計算している。ただし  $F$  は「欠損値のそれぞれについて、区間の上端を取るか下端を取るかを定めること」を意味する。現状は(イ)の計算が困難であることから、(ロ)で求めた  $r^2$  (前者以上となることは明らかである)、すなわち可用性の低い  $r$  を用いざるを得なくなっている。この問題を解決できれば、より小さい  $r$  が得られる可能性がある。

そもそも凸関数の最小化は容易である一方、最大化は一般に難しい。しかしそれでも(ロ)の計算が容易なのは、式の変形により「定義域が有界である、1変数凸関数の最大化」とすることができたためである (このような関数は、定義域=欠損値に与えた区間の両端のどちらかで最大化されるのは明らかである)。このことを踏まえたとき、(イ)については1変数凸関数への変形は困難であり、欠損値に与えた区間の両端を取ることを全組み合わせ試す必要があり、少なくとも単純な手法では指数時間を必要とすることが確認された。(イ)について、完全な最適でこそないものの準最適な解を得ることも検

討したものの、具体的な方法を得るには至っておらず、更なる検討が必要である。

### 3. 今後の展開

本報告書での進捗により、欠損値を置き換えるのに用いる幅の大きさや欠損値自体の個数が、得られる学習結果や予測値の可用性に与える影響を定量化することができた。しかしながら可用性を十分高めるという点では、第 2 節(3)(B)で示したように解決できていない点も多い。そのためこの問題を解決するという方向性のほか、そもそも領域  $W$  を求める方法として別の方法を検討するという方向性も含め今後は考えたい。またより一般的な議論として、データの値の変動に対する感度分析、すなわち学習結果の安定性（変動の小ささ）についても子細な議論をしていくことも、本研究の成果をより改善すると見込んでいる。

### 4. 自己評価

- 研究目的の達成状況

そもそも成果を挙げられるか難しい問題ではあったものの、本報告書第 2 節(3)(A)については当初の想定と手法を変更しながらも成果を得られた。本報告書第 2 節(3)(B)については目立った成果を挙げるには至らなかったものの、この先の指針を考えるうえでの基礎を形作ることにはできたと考えている。

- 研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

研究実施体制としては、提案書で中心的に取り組むものとして示したもののほか、前年度 AIP チャレンジまでの成果や関連する成果を含めた論文執筆などにも取り組んでいたこともあり、それらを合わせて相当の時間を本研究ならびに関連研究に割いていた。

研究費としては、予算として大きな額の申請をしたものとして計算機の購入があった。これにより大きなデータ（大きいもので約 1000 万事例）での計算機実験が容易となり、本研究を進める上で大いに役立った。また旅費についても研究に関連した発表・情報収集の上で役立てられた。

- 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。）

本報告書第 3 節で示した通り、機械学習を含むデータ分析での欠損値は遍在する問題であり、今後この手法が実用に適用できるようになれば、よりわかりやすい分析結果を得ることになると考えている。本研究課題により、前年の AIP チャレンジで検討していた問題をこのような重要な応用も見越して検討を進められたことは有益であったと考えている。学習結果の領域  $W$  を狭く得ることについて、多くの知見も得られたものの実用にはまだ課題も多く、引き続き手法の検討・開発を重ねたい。

- 研究課題の独創性・挑戦性

本研究では、機械学習の手法のうち、訓練データが区間を含んでいるときに学習結果

の領域  $W$  を求められるような問題のクラスを明らかにするとともに、それを適当な時間で計算できる手法を示していることが大きな特徴であると考えている。手法そのものは数理最適化の分野で発展してきた手法ではあるものの、これをデータ分析の観点から見直したことが新たな取り組みである。またそのことにより、実社会にも有用であろう、本課題での欠損値処理や前年度の課題であるプライバシー保護といった応用を考え、それらに必要な事項を検討していることも新たな取り組みである。

## 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

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)

#### [査読付き会議発表]

発表はありません(投稿中のものはあります)

#### [査読なし会議発表]

加藤宏樹, 花田博幸, 竹内一郎, “セーフスクリーニングによる最適ルールフィットモデルの学習”. 電子情報通信学会 第 21 回情報論的学習理論ワークショップ, 2018.

#### [技術報告]

Hiroki Kato, Hiroyuki Hanada, Ichiro Takeuchi, “Learning sparse optimal rule fit by safe screening”. arXiv:1810.01683, 2018.

# 研究報告書

## 「コンテキスト依存意思決定を支援するインタラクションフレームワーク」

研究期間： 2018 年 8 月～2019 年 3 月

研究者： 樋口 啓太

### 1. 研究のねらい

本研究では、インタラクティブシステムを利用する際にユーザが頻繁に直面する、コンテキスト依存の意思決定を支援するフレームワークを提案し有効性を検証する。コンテキスト依存の意思決定は、取るべき行動の候補の中から最適な行動を選択する認知的プロセスであり、それはその人の嗜好やその時のコンテキストに依存している。インタラクティブシステムにおいても意思決定が行われており、画像共有サービスにおける適切な画像フィルターの選択や、ナビゲーションサービス利用時の道程選択など、様々な場面に遍在する。一方で、連続的もしくは長時間にわたるコンテキスト依存意思決定はユーザにとって負担となる場合や間違った選択を引き起こす場合がある。また、視覚障害者向けのナビゲーションシステムにおいては、ユーザ単独で判断をすることが難しいという場合も想定される。本研究では、与えられたコンテキスト情報に基づき、ユーザにとって適切な選択を予測し、選択の際に予測結果を提示することにより、ユーザの意思決定を助け負担を低減させるインタラクティブシステムのための支援フレームワークを実現する。ユーザの嗜好や現在の利用環境に応じた支援をするために、ユーザの選択履歴を利用するオンライン機械学習の問題として定式化する。本研究では提案フレームワークを、画像共有サービスに投稿する際の画像フィルターの選択支援に適用して有用性を検証する。また、挑戦的な応用を見据え、視覚障害者向けのナビゲーションシステムの開発も行う。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

H28 年度 H29 年度の AIP チャレンジに渡り、佐藤 CREST が研究を進めてきた集合視技術を活用したユーザインタフェースの研究を遂行してきた。集合視技術は、コンピュータビジョン技術を基盤とした人間の行動解析技術である。H28 年度の AIP チャレンジでは、長時間録画された一人称視点映像を効率的に閲覧するために、行動解析によるイベント検出を利用した適応的早回しのためのユーザインタフェースを開発した。H29 年度では、発達障害児童への介入支援における注意行動のビデオ評価を効率化するために、二人称視線推定技術による視線方向推定結果を可視化し、探索対象の注意行動の発見を補助するユーザインタフェースを開発した。それぞれの AIP チャレンジでの研究成果は、CHI2017 と IUI2018 というヒューマンコンピュータインタラクション分野のトップ会議にフルペーパーとして採録されている。

#### (2) 概要

これまでの AIP チャレンジでの研究では、長時間撮影された動画の活用という文脈においてコンピュータビジョン技術とユーザの入力を組み合わせることで、ユーザの興味・探索対象の発見を支援することができることが明らかになった。一方で、現状では事前に解析した結果のみ

を利用しているため、ユーザが入力し活用できる候補が限られており、ユーザの意図や好みなどを反映させた解析結果の提示をすることが難しいという課題も明らかになった。そこで本AIPチャレンジPRISM加速支援においては、ユーザインタフェースなどのインタラクティブシステムにおいて、ユーザの入力や利用履歴などから目的や嗜好を学習し、ユーザに適した支援を行うインタラクティブシステム・ユーザインタフェースのためのフレームワークを研究する。本提案では特に、ユーザの嗜好や現在の状況で最適な選択が変わる、コンテキスト依存意思決定を支援するためのインタラクションフレームワークを提案し有効性を検証する。具体的には、他ユーザや多様な環境でシステムを利用したそれぞれのログデータから、その意思決定の振る舞いを模倣するポリシーを教師あり機械学習により複数生成する。利用時には、最も現在のユーザの意思決定を正しく予測できるポリシーを特定することにより、逐次的に学習を進める。本フレームワークの有効性検証のために、画像共有サービスへの投稿のための画像フィルターの選択支援を対象としてアプリケーションの開発と評価用データセットの構築を行った。また、予測結果の提示を行うことで意思決定が支援されるかをユーザ実験により検証した。さらに、挑戦的なシナリオへの応用を見据え、視覚障害者向けのナビゲーションシステムの開発した。具体的には、多様な環境下での利用を想定した、混雑した公共空間において、視覚障害者と他の歩行者の衝突を回避するための支援をするためのシステムである。本システムは、コンピュータビジョンにより視覚障害者を視認していない歩行者などとの衝突が予測された場合に警告音を発することによって注意を促す。本研究においては、システムの開発及び有効性検証を行った。

### (3) 詳細

#### 研究テーマ A「コンテキスト依存ユーザ選択予測のための基盤技術の確立[2]」

本研究ではコンテキスト依存のユーザ選択を予測し支援する知的なインタラクティブシステムを構築するためのフレームワークを実現した。本研究は過去に蓄積したデータに基づく予測と、現在のユーザから得た少数の選択履歴から、オンライン機械学習によりユーザ個人に特化した予測モデルを構築する。本フレームワークでは事前に、多様なユーザや環境から取得した、コンテキスト情報と選択結果の組から形成されるシステム利用データから、教師あり学習によりユーザ・環境毎に適した選択を予測するポリシー群を生成する。システム利用時には、現在のユーザの選択結果と各ポリシーの予測結果を照合することで、選択を最も高精度で予測可能な最適なポリシーを逐次的に特定する。本フレームワークを画像共有サービスに投稿するのに適した画像フィルター選択を支援するアプリケーションへ応用した(図1)。また、提案手法の性能評価のために、画像フィルター選択のデータセットを構築した。本手法の評価実験から、1)本手法がすべてのデータを統合する教師あり学習手法やバンディットアルゴリズムよりも高精度で選択を予測可能であること、2)システムが持つポリシーの増加に伴い本手法の予測精度が向上することを明らかにした。また、ユーザ実験を通して予測結果を提示されながら画像フィルター選択することで、ユーザの選択行動が効率化されることが示唆された。

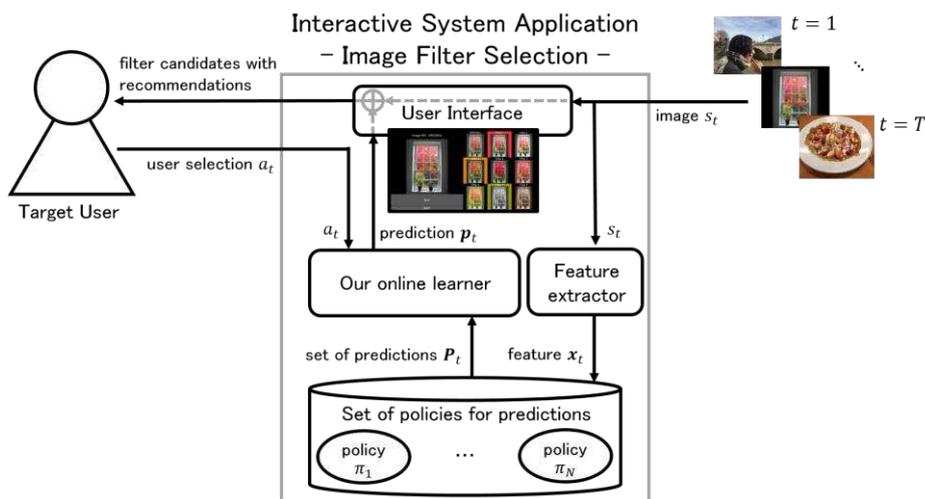


図1 提案フレームワークと画像フィルター選択支援アプリケーションへの応用

研究テーマ B「混雑環境での視覚障害者の移動支援システムの開発[1,3]」

本研究では混雑した環境における視覚障害者と歩行者の衝突を回避するためのスーツケース型システムを提案する。本システムは周囲の歩行者の検出及び将来位置の予測結果から歩行者がユーザ(視覚障害者)と衝突する危険性を予測し、衝突する危険性を持った歩行者に対して警告音を鳴らす。警告音を聞いた歩行者がユーザの存在を認識しユーザに道を譲ることで、ユーザに対して歩行者と衝突しない安全な進路を提供することが可能になる(図 2)。本研究では警告音の種類や鳴らすタイミングの違いによる歩行者の反応の違いを調査し、警告音を鳴らすタイミングが歩行者の経路に大きく影響することを確認した。さらに、本結果をもとに本システムが用いる警告ポリシーをデザインした。さらにそのポリシーを利用して、国際空港内にて視覚障害者による評価実験を行ったところ。本システムを用いることで歩行者と衝突する回数が大幅に低減されたことを確認した。

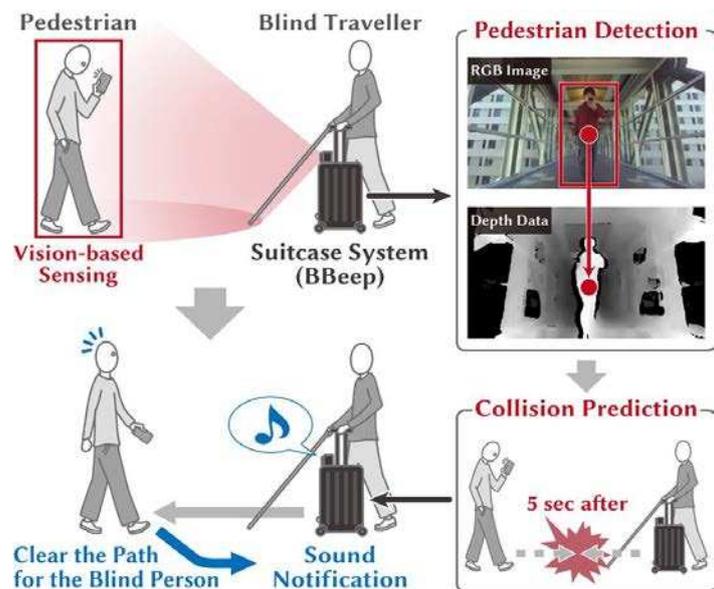


図1 提案システムの概要

### 3. 今後の展開

研究テーマAで開発したコンテキスト依存意思決定を予測し支援するインタラクティブシステムのフレームワークは、画像フィルターの選択支援に留まらず、幅広いアプリケーションに応用可能である。特に本研究では、研究テーマBにて視覚障害者向けに衝突回避支援を行うナビゲーションシステムを開発した。今後は、開発したナビゲーションシステムを多様なユーザや環境で動作可能とするために、研究テーマAで開発したフレームワークを導入することを検討している。具体的には、現在のシステムは音を鳴らすポリシーを混雑した公共空間のためにデザインした一種類のみであるが、今後は様々な環境に適したポリシーを複数デザインして、ユーザの嗜好に応じて切り替えることを可能とする。このような拡張は、開発したシステムを実際に運用するにあたり重要であるため、視覚障害者の歩行支援という文脈において大きなインパクトを持つと予想される。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

研究テーマA及びB両方において目標を達成できたと考える。特に研究テーマBにおいては開発したシステムを、実際の国際空港の環境でのユーザ実験により有効性を確認できたことから想定を上回る成果となったと考える。

#### ・研究の進め方

研究テーマAにおいては、研究代表者を中心として研究を進めた。研究テーマBでは、早稲田大学、米国カーネギーメロン大学(CMU)とIBM研究所という、国際的なチームにて研究を進めることができた。予算執行の観点では、システム構築のための計算機やカメラシステムの購入など適切に執行することができたと考える。

#### ・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

研究テーマAとBはともに学術的および社会的に十分なインパクトがあると考えられる。研究テーマAに関しては選択予測のフレームワークを構築し実際に画像フィルター選択というアプリケーションで有効性を確認できた。今後は、さらに実践的・挑戦的なアプリケーションへの適用が期待される。研究テーマBの衝突回避支援システムは、公共空間における視覚障害者の歩行支援という社会的要求の大きい課題に取り組んだ。

#### ・研究課題の独創性・挑戦性

両テーマ共に独創性・挑戦性の観点から見ても十分なインパクトだと考える。特に衝突回避支援システムはヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)領域のトップ会議であるCHI2019にフルペーパーが採択されている。

### 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

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)

国際会議プロシーディング(査読有)

- [1] Seita Kayukawa, Keita Higuchi, João Guerreiro, Shigeo Morishima, Yoichi Sato, Kris Kitani, and Chieko Asakawa. 2019. BBeep: A Sonic Collision Avoidance System for Blind Travellers and Nearby Pedestrians. ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'19). **[HCI 領域におけるトップ会議、採択率 23.8%]**

国内会議発表

- [2] 土田容生, 樋口啓太, Ohn-Bar Eshed, Kitani Kris, 佐藤 洋一. オンライン機械学習による画像カテゴリに応じたユーザの画像選択の予測. 第181回 ヒューマンコンピュータインタラクション研究会
- [3] 粥川青汰, 樋口啓太, João Guerreiro, 森島繁生, 佐藤洋一, 森島繁生, Kris Kitani, 浅川智恵子. BBeep:歩行者との衝突予測に基づく警告音を用いた視覚障害者のための衝突回避支援システム. インタラクション, 2019.3

# 研究報告書

## 「非平衡物理学を用いた変分上限による近似手法の開発」

研究期間： 2018 年 8 月～2019 年 3 月

研究者： 二見 太

### 1. 研究のねらい

機械学習アルゴリズムを現実の問題に適用する際に、テストデータに対する振る舞いについて、予期しないような挙動が発生したときに、それが異常な振る舞いであるとすぐに判別できることは非常に重要である。例えば通常、機械学習アルゴリズムでは訓練データ、テストデータが同じ分布に従うと仮定するがこの仮定が成立しない場合も多々ある。そうした際に仮定が成り立っていると想定し、予測を行うとアルゴリズムが思いもよらない異常な挙動を示してしまう場合がある。もし異常な振る舞いであると気づかなかつた場合、これらは非常に重大な事故などにつながる可能性がある。

こうしたことを防ぐためには機械学習アルゴリズムをどのようなデータに対しては適用を行っても問題ないのか、明確にする必要がある。しかし予めテストデータは与えられていないのでこうした検証を事前に網羅的に行うことは難しい。そこで機械学習アルゴリズムが自身の出力をどれくらい確からしい(不確実なのか)と判断しているのかを、予測と同時に得ることができれば、例えば不確実性の高い予測については機械学習アルゴリズムの使用者がアルゴリズムの出力を採用しないなどすることで、問題を解決することができると思われる。

よって機械学習アルゴリズムを実世界のデータに適用した際に、アルゴリズムの出力に含まれる不確実性を適切に評価することは重要である。様々な学習方法の中でも、ベイズ推論は不確実性の評価として自然な枠組みを与えてくれる観点から重要であると考えられる。しかしベイズ推論は計算量の観点から厳密に行うことが難しい場合が多く、実用の際には何らかの近似手法がとられることがほとんどである。例えば Markov chain Monte Carlo (MCMC) は理論的な保証がある近似手法であるが、高次元の問題に対しては計算量的に適用が難しい。一方で変分推論は高次元の問題にも適用が可能であるが、理論的な保証がなく、本当の不確実性からどの程度近似が離れているのか知ることは容易ではない。

そこで本研究は MCMC のように真の事後分布との差が理論的に保障されている一方で変分推論のように高次元の問題に対しても適用が可能な新しいベイズの事後分布の近似手法の開発を行ったものである。これにより近似された分布の不確実性が真の分布の不確実性とどの程度異なっているのか、その差を理論的に保証・評価できる枠組みを与えるということの解明を目指した。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

2017 年度では我々は観測データに外れ値がある際に、そうした外れ値に対する頑強性を持った推論手法の開発に取り組んだ。伝統的なベイズ統計学では事後分布を厳密に求めることを前提とした問題設定で頑強性のための学習方法が考えられており、近年機械学習で使わ

れるような、近似手法を使う複雑なモデリングにはその理論を適用できないという事実を踏まえ、我々は、近年広く使われている近似手法である変分推論を用いる際に、モデルそのものを修正することなくニューラルネットのような複雑なモデルにも適用可能な、訓練データ中の外れ値に対して頑強性を得るアルゴリズムを開発し、通常的手法よりも高い精度を出すことを理論解析、及び数値実験で確認した。成果は AISTATS2018 に、Variational Inference based on Robust divergences という名前の論文で採択された。

## (2) 概要

現在ベイズの推論に広く使われている近似手法として、MCMC と変分推論が存在する。大まかな2つの近似手法の性質として MCMC は真の事後分布からランダムにサンプルし、有限個のサンプルを使い真の分布を近似する。そのため正確であるが高次元の事後分布に対してはサンプルを行うために莫大な計算量が必要である。一方の変分推論は、真の事後分布を何らかの Parametric な分布で近似する。そのため分布の推定問題をパラメータの推定という最適化問題に置きなおしているため高次元でも問題は発生しない。しかし近似分布を仮定するため真の分布から Biased になり理論保証がされない。

こうした手法の性質を踏まえ近年、MCMC のように有限個の点から経験分布を構成する手法が着目されている。MCMC との違いは、MCMC のようにランダムに有限個の点を構成するのではなく、何らかの最適化問題を解くことで有限個の点を得るという点である。こうした手法は点を Particle と呼んで Particle を使った近似手法と呼ばれるが、既存の手法では、理論保証がされない、高次元に対しては適用が難しいなどの欠点を持っている。

以上を踏まえて我々は Particle を使った近似手法であり、計算量に優れ、高次元で適用でき、そして Particle の数を増やしていくときに真の事後分布へ近づいていくことが理論的に保証されている手法の開発を行った。

今回、我々は上記を達成するために Particle の重ね合わせと目的の真の事後分布の間の距離を Maximum Mean Discrepancy (MMD) という距離尺度を目的関数に取ることを考えた。我々の今回の研究の貢献としては、①Particle の重ね合わせを使い真の事後分布を近似する方法を再生核ヒルベルト空間上の凸最適化の問題として定式化し、凸最適化に際して有用な Frank Wolfe Algorithm を使い最適化したこと、②アルゴリズムは、当初の目的通り計算量に優れ、勾配情報を有効に使うことで高次元にも適用ができ、真の事後分布に収束することが理論に保証されたアルゴリズムであり、③実データに対して数値実験を行うことで実用的にも既存の Particle を使った手法に対して有用であることを示したことである。

## (3) 詳細

### (背景)

研究計画段階では、既存の事後分布の手法として実用面で広く使われる変分推論の抱える問題点として不確実性が過小評価、過大評価される場合があることを指摘した。具体的には、変分推論では真の事後分布を、パラメータで表現される取り扱いやすい分布(例えば指数分布族)で近似する手法であり、真の分布と近似分布の何らかの距離尺度を最小化することでパラメータを推定する。通常は Kullback Leibler (KL) 距離が距離尺度として使われ、その

場合には KL 距離の最小化は周辺尤度の下界の最大化と等価な問題になる。その際にどの程度下界を真の対数周辺尤度に近づけられるかは近似事後分布の選択に依存している。また、より下界が真の対数周辺尤度近いほど不確実性の評価は正しく行われる。計画段階では通常の変分推論とは異なる導出により、より真の対数周辺尤度値に近い下界(上界)を導出し、その最適化を行うことで通常の変分原理より、より真の不確実性に近くなるような近似手法を開発するというのを計画していた。

しかし、そもそも取り扱いやすい簡単な分布で真の事後分布を近似するということが、変分推論において不確実性を適切に評価できなくする要因であるということ踏まえ、下界(上界)の導出を変分推論の枠組みの中で工夫するのではなく、不確実性等について適切に近似できる新たな近似方法はないかということを検討するに至った。

そこで我々は MCMC と変分推論という最も広く使われている 2 つの近似手法それぞれの利点と欠点に着目した。具体的には、MCMC は真の分布からサンプリングするため、理論保証はあるがサンプリングに頼るため高次元では膨大な計算量が必要になるという弱点を持つということ、一方で変分推論では理論保証はないものの勾配情報等を適切に使うことで実用的には高次元でも動くというそれぞれの手法の性質に着目した。こうしたそれぞれの近似の性質を踏まえて MCMC のように理論保証があり、かつ変分推論のように高次元でも動く手法を提案することを目指すこととした。

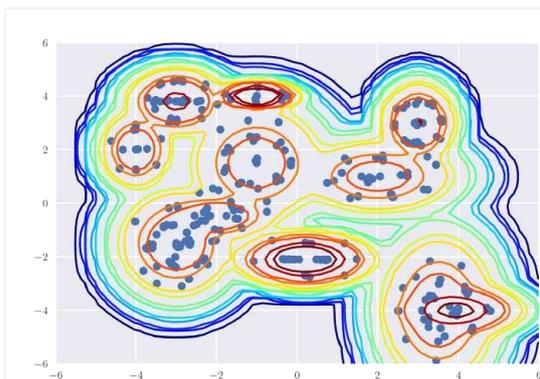
(関連研究)

そこで近年注目を浴びている Particle をもとにした近似手法に着目した。Particle をもとにした近似手法では、MCMC のように目的の分布を有限個のサンプル(Particle)の足し合わせで表現するが、MCMC とは違い Particle の位置を何らかの最適化問題を解いて求めるという手法である。(MCMC では Particle はランダムに目的の分布からサンプリングする。)既存の 2 つの有名な手法があり、Stein Variational Gradient Descent(SVGD)[1] および Stein Points(SP)[2]と呼ばれる。SVGD は目的の分布に KL 距離の意味で近くなるように、すべての Particle をまとめて動的に動かす手法である。この手法は勾配の情報を使い高次元の問題にも適用できるが、理論保証をつけることは非常に難しい。一方の SP では Kernelized Stein 距離と呼ばれる距離を小さくするように、徐々に Particle の数を増やしていく Greedy な手法である。しかし SP は理論保証がされているものの勾配情報を計算量の観点から使うことが難しく、高次元の問題には有効ではない。

(提案手法)

そこで我々の提案法では既存手法の利点を組み合わせるということ考えた。つまり勾配情報を使うことで高次元でも十分な精度を示すことができ、かつ理論保証を付けることができるような Greedy な手法をとることを考えた。具体的には我々は Maximum Mean Discrepancy (MMD)と呼ばれる距離尺度を勾配情報を使い最小化することを提案した。さらに MMD 距離最小化の問題を再生核ヒルベルト空間(RKHS)上の制約付き凸最適化問題とみなすことで、より少ない Particle で目的の距離を縮められるように、Frank Wolfe アルゴリズム[3]を RKHS 上で構成するというを行った。

例えば以下のグラフは人工的な分布の近似を有限個の Particle の組み合わせで行っている。



左図では目的の分布が2次元のガウス分布の組み合わせで表現されている。色が赤色の箇所がガウス分布の峰に該当している。青色の点が Particle の数に対応している。我々の手法では、この Particle の数を増やしていくとそれらの Particle の組み合わせと目的の分布の距離が指数関数的に縮まるということを保証している。

上の図は2次元の人工的なデータであるが、我々は論文中でこのほかに860次元程度の問題での我々の手法の有効性を確認している。今回の研究の成果は「5. 主な研究成果リスト」に記載のとおり AAAI2019 に採択、同会議にて発表を行っている。

[1] Qiang Liu and Dilin Wang. Stein variational gradient descent: A general purpose Bayesian inference algorithm. In NIPS, 2016.

[2] Wilson Ye Chen, Lester Mackey, Jackson Gorham, François-Xavier Briol, and Chris J Oates. In ICML, 2018.

[3] Martin Jaggi. Revisiting frank-wolfe: Projection-free sparse convex optimization. In ICML 2013.

### 3. 今後の展開

今後の展開として、本研究のもともとの動機であった不確実性の評価に関し、提案手法の実験面での検証と更なる拡張が必要である。具体的には、計算量、精度の観点からの数値計算による評価は十分に行われているものの、不確実性の評価については不十分であるため更なる数値実験、またリアルデータによる検証が必要である。また拡張に関しては、今回の研究により開発された手法は、真の不確実性と近似アルゴリズムの不確実性の差がどれくらいであるかの理論保証を与えることが可能であるが、その理論保証値の推定が困難なパラメータが含まれてしまっているため直接応用のために活用することが難しい。そこで今後の研究ではどの程度真の不確実性からずれてしまっている可能性があるのか具体的に評価ができるようにアルゴリズム・理論の再構成を行うことが必要である。

### 4. 自己評価

本研究では、機械学習アルゴリズムを現実の問題に適用した際に、その出力結果を信頼してよいかの判断基準の一つになる、不確実性を適切に評価するための基礎的な新しい手法の開発を行った。達成状況としては基礎的なアルゴリズムおよびその理論解析ができた段階であるが、更なる数値計算や実データによる評価が必要であると考えられる。成果の波及効果についても、不確実性の評価という機械学習の応用上非常に重要なテーマにおいて基礎的アルゴリズムを新たに確立できたという点で大きいと考えられるが、「今後の展開」で述べたような研究の進展を継続して行うことがさらに本研究成果の応用上重要であると考えられる。研究の独創性については既存の近似手法とは異なる新しい理論に立脚した近似手法を提案できたという点で大きいと考えられる。研究の進め方としては、今回の研究は基礎・理論的な研究であったため基本的に研究責任者が主にアイデアの発案、理論解析、実験等を行った。研究費について研究の進捗のための計算機の購入や国際会議への参加費など適切かつ有効に執行できたと考える。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Futoshi Futami, Zhenghang Cui, Issei Sato, Masashi Sugiyama. Bayesian Posterior approximation via greedy particle optimization. In Proceedings of the Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI2019), pp.xxxx-xxxx, Honolulu, Hawaii, USA, Jan. 27-Feb. 1, 2019.

### (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)

なし

# 研究報告書

## 「装着型装置を用いた顔入力インタフェースの発展」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：正井 克俊

### 1. 研究のねらい

本研究では装着型装置を用いて、顔に関連した動きによって入力を可能にする手法を提案する。近年、ヴァーチャル・リアリティ、拡張現実感、Internet of Thingsなどの技術が発展し、世界には多くの情報が溢れている。これらの情報を効率よく処理し制御するためには、情報機器と情報をやり取りするユーザインタフェースの利便性の向上が重要な課題となる。

透過型頭部搭載ディスプレイなどのウェアラブルコンピューティングの技術は、情報提示の手法として主に開発され、小型化が進んだ。その一方で、これらの情報機器への入力手法はその小型化された形状のため、外部機器を用いた操作や空中でジェスチャを行う手法など限られた手段しかなかった。頭部搭載型ディスプレイなど多様な情報を扱う操作が可能になった情報機器に対する適切な入力手法は、その入力の文脈によって異なると考えられる。そこで、体の一部を入力サーフェスとする手法が提案されているものの、多様な文脈の中で有効な入力手法を一つの装着型装置によって実現したものは存在しない。本研究の狙いは、ヴァーチャル・リアリティ、拡張現実感で使用が見込まれている眼鏡型装置で使用可能な入力手法のなかでも顔に関連した動きに注目し、その動きを用いた入力手法を実現することである。顔は意図的に動かせる部位が多くハンズフリーでの入力が可能である点、頬などへの接触操作は外体性感覚以外のフィードバックが得られ、十分な入力スペースが確保できる点が優れている。鏡型装置には16個の光センサと9軸センサを搭載することで、非侵襲かつ低コストでのジェスチャ認識が可能である。本研究では、多様で連続的な入力を可能とする手法を装着型装置を用いて考慮する。具体的には、部位に応じた入力手法として、頭部の動き、表情や眼の動きによる入力、更に手から顔への入力手法としてフリック動作やスライド動作を検討する。

本手法は、成長市場である頭部積載型ディスプレイに組み込められる可能性があり、社会的インパクトをもつ技術であると考えられる。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

近年、透過型ディスプレイや頭部積載型ディスプレイなどのウェアラブルコンピューティングの分野が発展している。これに伴いデバイスが小型化しており、入力が可能な空間が限られてくる。そのため、音声インタフェースや空間ジェスチャなどによる操作がされるが、これらの手法は公共空間には適さない。そこで、2017年度は光センサ群が埋め込まれた装着型装置を用いることで、手で顔をこする動作による入力を可能とする手法を検証した。装着型装置は眼鏡型であり反射型光センサ群が埋め込まれており、手で顔をふれる動作によって生じる皮膚変形を計測することができる。中でも、顔を手で触れる動作による手法は、ピーク検出アルゴリ

ズムと機械学習手法によって検出・識別を行い、10箇所的位置への動作を 91.7%の精度、5箇所にした場合、95.6%の精度で識別することが出来た [Augmented Human 2018]。しかしこの手法は直感性と操作の多様性に課題があった。

## (2) 概要

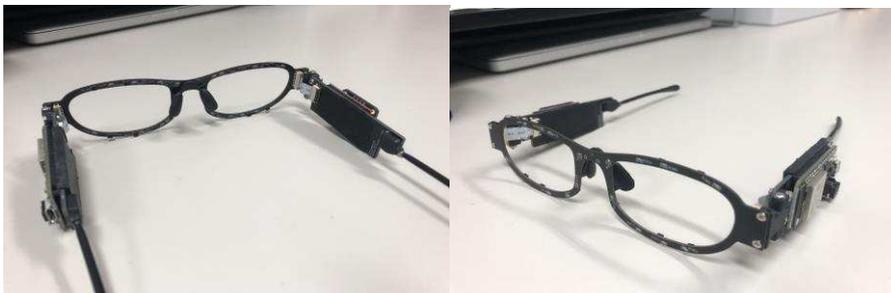
2017 年度に提案した手法は、スイッチの ON/OFF のような状態操作は可能である一方で、音楽の音量を制御するようなスライダー的な動作や特定の場所を指し示すポインタのような動作は困難であった。これらの動作は入力効率を上げる有用なインタフェースである。また、行う操作と対応する動作は場所によって決定するため、直感的ではなかった。そこで、装着型装置を用いた顔に関連した動きをインタフェースとする手法を検討した。本研究では顔に関する入力手法を顔入カインタフェースと総称し、関連研究やユーザへのアンケートを通じて、ジェスチャを規定した。ジェスチャには頭部の動き、表情の動き、眼の動き、手から顔への動きが含まれる。特に、手から顔への動きに対してはスライダーやフリック、ピンチなど多様な動きを考慮した。人間には、自らの身体の動きを視覚によらずとも感覚的に把握できる特性があるため、顔表面のどの位置を手で触れるのかをほぼ正確に制御することができる利点がある。

それらのジェスチャが識別可能かの検証を行った。より多様な動作を取り入れ、スライダーのような空間的連続性をもった入力を可能とすることを目標とした。

既存手法では、特定部位の動きまたは手から特定部位への複数ジェスチャを検出・識別する手法はあるものの、空間的自由度を考慮した入力手法は確立されていない。その理由として、ハードウェアとソフトウェア両面からのアプローチが求められていることが考えられる。そこで、独自の装着型装置を新たに再設計し、2種類の光センサと9軸センサを搭載した。光センサはジェスチャによる皮膚変形や環境光の変化を計測することができる。更に、光センサは高解像度かつ処理コストが低いためウェアラブルコンピューティングに適している。また、ソフト面では時系列や空間的関連性を考慮したニューラルネットワーク手法を用いた。これらによって、一つの装置で頭部の動き、表情の動き、眼の動き、手から顔への動きが識別可能かを検証した。

## (3) 詳細

### ■ 顔入カインタフェースの計測基盤となる装着型装置の再設計



装着型装置を再設計した。反射型光センサは、赤外光を照射し、近接物体から反射光の強度を測定することで距離計測が可能であるが、その計測範囲が異なる2種類のセンサを用いる

ことで、顔形状に合わせたセンサ配置を検討した。2種類の反射型光センサを用いることでより安定した計測が可能になった。光センサでは、表情や眼の動き、手から顔への接触による皮膚変形を計測することで、ジェスチャを識別する。

Bluetooth 通信規格を用いることで 100Hz での計測が可能になった。

9軸センサを追加することで頭部の動きを計測可能になった。

#### ■装着型装置による顔入力インタフェースに用いる入力種類の規定

[1]によると、手から顔への動作は、ナビゲーションタスクにおいて効率的であるという結果であった。顔への動作の中でも頬に対するフリック動作、スライド動作が最も好まれるということであったことからこれらの動作の検出を試みた。また、電話をかける、写真を撮る、などのアクション操作については顔入力インタフェースを用いた動作で行う場合、どのような動作が好まれるかのアンケート調査を行なった。その結果、頭部の動きや表情の動き、眼の動きによる動作がそれぞれ使用される可能性があることがわかった。

[1] Marcos Serrano, Barrett M. Ens, and Pourang P. Irani. 2014. Exploring the use of hand-to-face input for interacting with head-worn displays. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, New York, NY, USA, 3181–3190

#### ■装着型装置による顔入力手法の検証

上によって規定した動作に加えて、頬に対するフリック動作、スライディング動作、鼻や眉を含めた部位へのタッチ動作のデータを収集した。1秒の間に各ジェスチャ動作を行い、その間のセンサデータに識別ラベルを付与したのによってデータセットを構築した。

収集したデータ毎に、移動平均によって前処理し、ウィンドウごとのデータをz正規化した後に畳み込みニューラルネットワークによって学習したところ、平均90%以上の精度で識別できることがわかった。

スライディング動作によって、得られるセンサの時系列の挙動には一定の共通傾向があることを確認した。

### 3. 今後の展開

より実環境に近い環境での使用が可能であることを実証するための実験およびアルゴリズムの実装を試みる。スライド動作と入力を紐付ける回帰のアルゴリズムを検討する。そして、入力手法のユーザビリティの評価をする。これらの結果をまとめ、学術論文として公表する。

### 4. 自己評価

#### 研究目的の達成状況

論文成果を公表できなかったが、研究の達成状況は概ね順調であった。新たに実験機器を作り直し、その実験機器を用いて多様なジェスチャのデータを収集した。それらのデータに対する解析も行いジェスチャが識別できることは確認した。実世界環境に近い実験環境でのジェスチャ識別については達成できなかったため、今後も研究を続ける。そして、最終的にはこれらの結果を学術論文としてまとめ成果として公表する。

#### *研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)*

研究資金が潤沢にあったため実験機器の再設計から検討することができた。修士学生を研究補助員として雇用することで、機器の開発は順調に進んだ。研究費については、研究のさらなる進展を狙った実験器具の購入や海外(サセックス大学)との共同研究基盤を形成するための出張に行くことができたなど効果的に執行できた。

#### *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*

今後、実環境でのジェスチャ識別の有効性の検証を終えたら、成果発表を行い、産学共同での研究、製品への組み込みを狙い、研究成果の社会還元を目指す。

#### *研究課題の独創性・挑戦性*

光センサによる皮膚変形計測に基づくジェスチャ識別は非侵襲かつ低コストで装着型装置に実装可能である点で独創的である。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1)論文(原著論文)発表

なし

##### (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)

なし

# 研究報告書

「(研究課題名)」機械学習を用いた卵巣がんの網羅的クロマチン構造解析

研究期間: 2018年8月～2019年3月

研究者: 町野 英徳

## 1. 研究のねらい

卵巣がんは婦人科がんの中で死亡率、死亡者数ともに最も高いがん種である。特に、我々が研究対象とする高異型度卵巣漿液性がんは、卵巣がんの中で最も罹患率が高く、多くの症例で化学療法が必要となり、さらに第一選択であるプラチナ製剤を用いた化学療法に対してしばしば治療抵抗性を示すため、患者の生活の質や医療経済に与える影響は甚大である。

世界的ながんゲノム解析プロジェクトである TCGA(The Cancer Genome Atlas Research Network)は高異型度卵巣漿液性がんを最も優先的な解析対象として大規模な遺伝子変異解析を実施し(TCGA, Nature 2012)、その研究成果として、高異型度卵巣漿液性がんには他のがん種と比較して遺伝子変異の保有頻度が少ない一方、遺伝子の発現量の異常が頻繁に認められることを提示した(Bowtell et al. Nat Rev Cancer 2015)。このことは、当該がん種の発がん機序を解明するためには、遺伝子発現を制御する複雑な細胞ネットワークの解析、特に近年まで網羅的解析が困難であった転写因子ネットワークの解明が重要であることを示唆している。

転写因子は、ゲノム上の特異的な DNA 配列(モチーフ)に結合し遺伝子の発現調節を行う蛋白質の総称であり、モチーフが十分に解明されているものだけでも 500 種類以上の転写因子が存在する。ゲノムシーケンシングを活用した網羅的クロマチン構造解析と転写因子のモチーフ解析を組み合わせる転写因子のゲノム結合部位予測は、近年非常に重要性を増してきた研究分野であり、約 30 億個のヒト塩基配列と 500 種類以上の転写因子モチーフという研究対象の本質的なビッグデータ性から機械学習の応用が期待されている。

以上の研究背景から、研究者は、臨床検体を由来にした高異型度卵巣漿液性がんの段階的な発がんモデル細胞を独自に作成し、このサンプルに網羅的クロマチン構造解析の手法である Assay for transposase-accessible chromatin using sequencing: ATAC-seq を実施した。得られたシーケンスデータに対して機械学習を応用したゲノムワイドのクロマチンクラスタリング、転写因子の結合プロファイリングを行い、従来は網羅的研究が困難であった転写因子を対象とした大規模なスクリーニング研究を実施する。この過程で抽出された発がんに関連の深い転写因子に関してクロマチン免疫沈降シーケンス(ChIP-seq)や分子生物学的な実験による検証を行い、最終的に臨床応用可能な高異型度卵巣漿液性がんの新規治療薬を探索することが本研究の目標である。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

2013 年に報告された ATAC-seq は、少量のサンプルから高品質なオープンクロマチン領域のシーケンスデータを取得できるため、細胞量が少ない臨床検体の網羅的クロマチン構造解析を可能にする点で画期的であった。研究者は、①臨床検体由来である②コントロール細胞

胞が存在する③純度の高いがん細胞である、という条件を満たす理想的な ATAC-seq データを取得するために、高異型度卵巣漿液性がんの正常由来細胞である卵管分泌上皮細胞を単離培養し、これに複数のがん関連遺伝子を段階的に導入して、正常細胞から不死化細胞、がん細胞へと至る発がんモデル細胞群を作成した。このサンプルに ATAC-seq を実施したところ、初回のデータには多くのノイズが検出され、サンプル調整法の最適化が必要であることが判明した。ノイズは生細胞の細胞膜に付着した死細胞由来の遊離 DNA の混入が原因であると考え、これを除去するために DNase 処理の工程を追加した結果、高品質な ATAC-seq データを得ることに成功した。

## (2) 概要

ゲノムワイドのオープンクロマチン解析は、単回のシーケンスで数百の転写因子の結合プロファイリングが可能であるため、エピゲノム研究の強力な手法として注目を集めている。この技術のがん研究へ応用すれば、がん特異的な転写因子の結合異常を標的とした新規治療法の発見につながる可能性があるが、患者由来のがん臨床検体、特に固形がんの臨床検体に対しては、以下に挙げる問題のために機械学習に適した高品質なデータを得ることが困難であった。

- ①貴重な臨床検体からは十分量の細胞数を確保できない。
- ②コントロールとなる正常細胞の純度の高いデータが存在しない。
- ③臨床検体には細胞の不均一性(heterogeneity)があるため、がん細胞以外の間質細胞や免疫細胞が混入し、がん細胞特異的なクロマチン構造を同定できない。

特に、本研究の主題である、「機械学習を用いた転写因子の結合プロファイリング」を成功させるためには、転写因子の結合によりゲノム上に残されたまさに足跡である genome footprint を検出する十分にクリーンなデータを取得する必要があった。そこで研究者は、上記の3つの問題点に対する解決策としてそれぞれ以下の方法を採用することにした。

- ①ごく少量の細胞数からオープンクロマチン領域を同定できる ATAC-seq を導入する。
- ②高異型度卵巣漿液性がんの正常由来細胞として知られる卵管分泌上皮細胞を臨床検体から単離培養し、ATAC-seq を実施する。
- ③上の工程で得られた卵管分泌上皮細胞に卵巣がんに関連する重要ながん関連遺伝子を段階的に導入し、細胞の純度の高さを保持したまま、様々なプロファイルを有する不死化細胞とがん細胞を作成し、ATAC-seq を実施する。

今年度の成果は、第一には、上記のサンプルに対する ATAC-seq プロトコルの最適化が完了し、全サンプルの高品質な ATAC-seq データを取得しえたことである。第二には、取得した RNA-seq/ATAC-seq データに対して各種のクラスタリングを行い、それぞれのサンプルが段階的な発がんモデルとして合理的なプロファイルを保有していることを実証できたことである。そして第三には、機械学習を用いたクロマチンクラスタリングと転写因子の結合プロファイリングを導入し、発がん過程の各段階において構造変化が起こりうるゲノム領域を同定し、発がんに関与すると仮定される転写因子のグループを抽出するに至ったことである。

次項では、高異型度卵巣漿液性がんのクロマチン構造解析から新規治療標的を探索する研究テーマに関連して、機械学習を応用した ATAC-seq 解析の詳細を説明する。

### (3) 詳細

#### 研究テーマ「高異型度卵巣漿液性がんの段階的発がんモデル細胞群のクロマチン解析」

研究者は、高異型度卵巣漿液性がんの正常由来細胞である卵管分泌上皮細胞を単離培養し、これに段階的ながん関連遺伝子を導入することで、病理学的に高異型度卵巣漿液性がんを呈する細胞サンプルを作成した。これを用いて正常由来細胞からがん細胞への移行過程におけるクロマチンの構造変化を解明し、転写因子を標的にした新規治療法を発見することが本研究主題である。サンプルは計 6 種類あり、それぞれ以下の番号と名称で表記する。

- ①HFTSEC:ヒト卵管分泌上皮細胞(臨床検体由来の初代培養細胞)
- ②HF1:①に TERT, CCND1, CDK4(R24C)を導入した不死化細胞
- ③HF1TP53:②に TP53(C234)を導入した不死化細胞
- ④HF1TP53KRAS:③に KRAS(V12)を導入した不死化細胞
- ⑤HF1TP53KRASAKT:④に Myr-AKT1 を導入したがん細胞(ヌードマウスに腫瘍形成可能)
- ⑥HF1TP53KRASMYC:④に c-MYC を導入したがん細胞(ヌードマウスに腫瘍形成可能)

これらに対して、最初に RNA-seq 解析(3 replicates)を実施した。定量化した遺伝子発現量をもとに PCA と階層的クラスタリングを行いサンプルごとの特徴分布を可視化した図を示す(Fig1,2)。

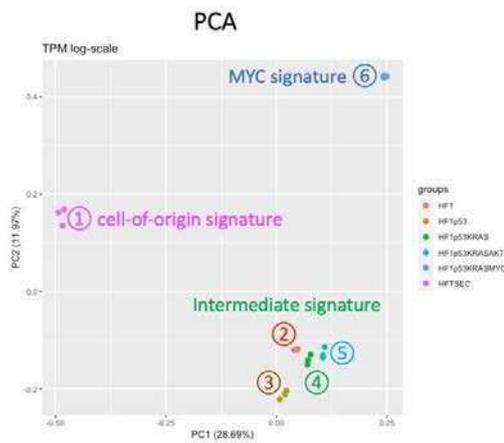


Fig1. Principal component analysis  
全てのサンプルでtriplicatesが良好な再現性を示している  
①、⑥、それ以外(②③④⑤)の3つのsignatureが想定される

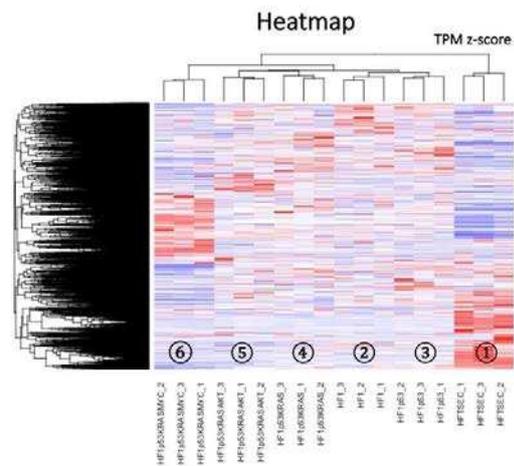


Fig2. Heatmap (hierarchical clustering)  
概ね理論通りの順序で階層的クラスタリングが形成されている  
サンプル特異的な発現変動遺伝子のクラスターの存在が確認できる

RNA-seq の結果はそれぞれのサンプルが独自の生物学的特性を有しており、遺伝子導入の過程とトランスクリプトームプロファイルの変遷に概ねリーズナブルな相関があることを示している。これは卵巣がんの段階的発がんモデル細胞群を作成するという研究者の意図と合致する結果であるため、このサンプルを用いて ATAC-seq 解析に進行することを決定した。前年度の AIP チャレンジの成果である DNase 処理を追加したサンプル調整法を用いた結果、下図に示すヌクレオソーム単位の断片化 DNA が確認できる高品質な ATAC-seq データを取得することに成功した(Fig3)。さらに、発がん過程に重要な特定の遺伝子座を探索的に精査したところ、がん遺伝子導入の過程が進むに伴って段階的に変動する peak(オープンクロマチン領域)が確認でき、がんの分子生物学的にも合理的な現象を表現している研究的意義の高い ATAC-seq データが取得できていると考えられた(Fig4)。

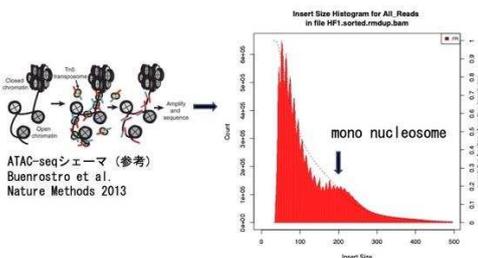


Fig3. Fragment length analysis  
代表的なATAC-seq fragment length distribution  
200base付近にヌクレオソーム単位のpeakが確認できる

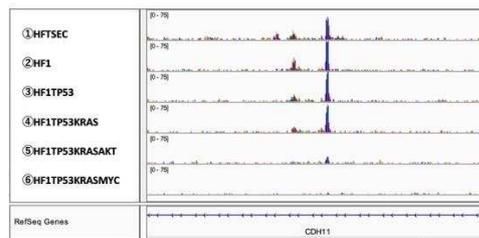


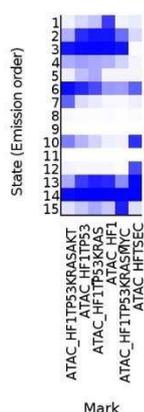
Fig4. IGV viewer image  
腫瘍抑制遺伝子として知られるCDH11lociのATAC-seq peaks  
サンプルの段階が進むにつれて消失するpeakが認められる

次に、取得された高品質な ATAC-seq データを用いて、発がん過程におけるクロマチン構造変化の精密解析に移行した。この解析の第一段階は、サンプル特異的な chromatin state を有するゲノム領域を同定することであった。今回扱うデータの前提として、ヒトゲノムは約 30 億個の塩基配列から構成されており、ヒトゲノム上のオープンクロマチン領域を示す ATAC-seq peak は一般的な peak caller である macs2 を用いた解析で 462,785 peaks (6 サンプルの合計) 確認された。peak caller で検出できない潜在的な peak も多数存在すると想定すべきであるため、すなわち 50 万個以上存在するであろうオープンクロマチン領域を含む約 30 億塩基長の配列に対し、6 サンプル間の read 数の定量比較に基づく chromatin state のクラスタリングを行うことになる。

この解析には Hidden Markov Model に基づく機械学習アルゴリズムである ChromHMM を使用した。このモデルは、解析者が chromatin state を任意の n 個のクラス (Hidden state) に分類するよう設定し、ヒトゲノムを 200 塩基ごとの bin に分割した後、ATAC-seq データの分布を学習して、全ての bin に対してそれぞれのクラスに分類される確率を予測するものである。試験的に 4 から 16 までのクラスに振り分けてヒトゲノムを分類したところ、15 クラスに分類した際に、①⑤⑥といった重要なサンプルにおいて特異的にクロマチンの構造変化が起きるゲノム領域を最も明瞭に同定することができた (Fig5)。

以上の解析で同定されたサンプル特異的なゲノム領域に、いずれの転写因子が結合するかを予測するために、関心領域における転写因子モチーフのエンリッチメントを算出するツールである Homer を用いて数々の転写因子を抽出した (Fig6)。また、転写因子モチーフと genome footprint の組合せ学習を行う PIQ や CENTIPEDE といった新規性の高い機械学習アルゴリズムを導入し、441 種類の転写因子の結合部位を予測することにも成功している (Fig7)。現在、この転写因子結合プロファイリングの解析結果に関して、機械学習手法と従来手法である Homer との性能比較を行っており、今後は、治療標的と定めた転写因子に対して ChIP-seq による生物学的検証を行ってゆく予定である。

Emission Parameters

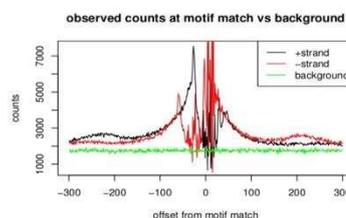


Rank	Motif	Name	P-value	log P-value	q-value	# Target Sequences with Motif	% of Targets with Motif	# Background Sequences with Motif	% of Background Sequences with Motif
1		Frk1(ZFP1875)-Frk1-CMP; SeqGSE16169Homer	1e-3439	8.844e+03	0.0000	80410	42.84%	25128	7.54%
2		Frk1(ZFP1875)-Frk1-CMP; SeqGSE16169Homer	1e-3257	8.652e+03	0.0000	86610	46.27%	28482	9.28%
3		BATF1(ZFP171)-BATF1-CMP; SeqGSE97569Homer	1e-3268	8.255e+03	0.0000	44070	41.90%	27914	9.10%
4		Frk1(ZFP1875)-Frk1-CMP; SeqGSE16169Homer	1e-3190	8.196e+03	0.0000	72480	38.67%	19562	6.38%
5		hucB(ZFP1875)-hucB-CMP; SeqGSE36099Homer	1e-3126	8.126e+03	0.0000	77960	41.48%	23521	7.67%

Fig5. ChromHMM (左)  
ATAC-seqの分布に基づきゲノムを15のクラスに分類した

Fig6. Homer (右上)  
代表的な転写因子エンリッチメントリスト

Fig7. genome footprint (右下)  
代表的な転写因子であるCTCFのモチーフを中心に明瞭なfootprintが確認できる



### 3. 今後の展開

本年度の AIP チャレンジ PRISM 加速支援では、機械学習を応用した ATAC-seq 解析により、高異型度卵巣漿液性がんの発がん過程における網羅的な転写因子の結合プロファイリングに成功することができた。本技術は世界的に新規性・発展性が非常に高く評価されており、特にがん研究の分野では、転写因子ネットワークを網羅的にスクリーニングし、転写因子を標的とした新規治療標的を同定しうる強力な手法として大きな注目を集めている。実際に、がんを対象にした ATAC-seq 研究は Nature, Cell, Science といった一流誌に次々に掲載されていることを鑑みても、転写因子を標的とした新規治療薬の開発に世界的な期待が込められていることが伺える (Phillip et al. Nature 2017, Roe et al. Cell 2017, Corces et al. Science 2018)。

このような背景の中で、研究者が問題意識を感じていたことは、固形がんの ATAC-seq 研究において、がんの正常由来細胞の高品質な ATAC-seq データが存在しないことであった。この点、皮膚 T 細胞性リンパ腫の ATAC-seq 研究の既報では、正常由来細胞である T 細胞が血球細胞であるため、細胞表面マーカーを用いて正常細胞を単離することが可能であり、正常細胞とがん細胞との ATAC-seq 比較解析によって臨床予後に影響を与える転写因子の一群を同定することに成功している (Qu et al. Cancer Cell 2017)。しかし、卵巣がんのように、卵巣や卵管を起源として発生する固形がんにおいては、正常由来細胞自体が間質細胞や免疫細胞と共存する不均一性の中に存在しているため、純度の高い正常由来細胞の ATAC-seq データを取得することが困難であった。このため、固形がんの ATAC-seq 研究では、正常由来細胞とがん細胞を比較した研究は少なく、原発巣と転移巣との比較 (Denny et al. Cell 2016) や、がんの異なる組織型間での比較 (Corces et al. Science 2018) 等が主流である。

しかし、固形がんの ATAC-seq 研究においても正常由来細胞をコントロールサンプルとして比較解析することが重要であることは間違いのないことである。研究者は、AIP チャレンジ PRISM 加速支援の研究でこの問題を解決するため、高異型度卵巣漿液性がんの正常由来細胞である卵管分泌上皮細胞を単離培養し、高品質な ATAC-seq データを取得することに世界で初めて成功した。本研究の特に独創的な価値の一つは、この正常由来細胞の貴重な ATAC-seq データを取得できたことであり、このことは、今後、高異型度卵巣漿液性がんのクロマチン構造を研究する全ての研究者が、本研究の成果を通じて正常細胞のコントロールデータにアクセスできるようになったことを意味している。

さらに本研究では、この正常由来細胞とがん細胞の ATAC-seq データに機械学習を導入し、実際にごん特異的な転写因子のサブグループを同定することに成功した。これは本研究で取得したコントロールサンプルの有用性を実証するものであり、機械学習に適用可能なパブリックデータとして活用される価値があることを示している。今後は本研究で抽出された転写因子のサブグループ解析をさらに深め、機械学習手法と従来手法との比較検討や、機械学習アルゴリズム間での性能比較を行いたい。その検討に基づき、候補に定めた転写因子の機能と治療標的としての有用性を ChIP-seq を含めた分子生物学的実験で実証する。最終的には、世界に先駆けて転写因子を標的とした新規治療薬の開発と臨床応用を目指してゆきたい。

### 4. 自己評価

・研究目的の達成状況： 本年度の AIP チャレンジ PRISM 加速支援では、段階的発がんモデル細胞群の高品質な ATAC-seq データの取得から、機械学習を応用したクロマチンクラスタリ

ングと転写因子の結合プロファイリングに至るまで、当初に計画していた目標を達成することができた。特に、がん研究に機械学習を適用するためには、学習に使用するデータ自体のクリーンな品質と生物学的意義が重要であることから、研究の前半はデータの取得と品質の検証という点に特に重点を置いた。研究の後半において、本研究の真骨頂である転写因子の網羅的結合プロファイリングを行い、実際に多くの興味深い解析結果が取得された。しかし、解析対象がヒトゲノムというビッグデータであるため、それぞれの機械学習アルゴリズムごとに、重要なゲノム領域も、候補となる転写因子も膨大な量が抽出されている。今後は解析手法ごとの比較検討、解析結果の curation を丁寧に行ってゆくことで、真に重要な転写因子を特定できると考えており、精力的に取り組んでゆきたい。

・研究の進め方： 研究デザインの作成・ATAC-seq データ取得までの段階では分子生物学的知識が必要であり、データ処理・機械学習の導入の段階では情報工学的知識が必要であるため、自分なりに広く知識の習得に努め、必要に応じてそれぞれの分野の専門家にコンサルトできる体制を整えることに注力した。データ取得に必要な試薬の購入や、次世代シーケンス解析と機械学習を実行できる解析環境を整えることに主に研究費を費やした。

・研究成果の波及効果、研究課題の独創性・挑戦性： 今後の展望の記載とも重複するが、高異型度卵巣漿液性がんの正常由来細胞の ATAC-seq データは、本研究において世界で初めて取得されたものであり、機械学習にも活用できることが実証された高品質なコントロールデータという意味で非常に研究価値の高いパブリックデータになる。また、このようなオリジナリティの高いデータに対して機械学習を行い、卵巣がんの発がん過程における転写因子の結合プロファイリングを行う研究も、世界で初の試みであり、非常に先進性・挑戦性が高いと考える。今後、高異型度卵巣漿液性がんの発がん過程に寄与する転写因子を同定し、新規治療薬の開発に繋げて、最終的には臨床応用を目指した医療に大きな影響を及ぼす研究にしてゆきたいと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

なし

### (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)

第 77 回日本癌学会学術総会 口演

“Investigation of epigenetic regulation in the high-grade serous ovarian carcinogenesis”

# 研究報告書

## 「深層学習を用いた感動の脳活動をもたらす音楽の予測」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：森 数馬

### 1. 研究のねらい

人の生活は、感情なくしては成り立たない。感情研究の多くは、喜び、悲しみ、怒りなどの基本感情を検討の対象としてきた。しかし、感動という高次の感情状態についての研究は未だ手つかずの部分が多い。感動は、多くの人々が求めて止まない至福の体験であり、古くから芸術作品に欠かせない要素と考えられてきた。芸術作品のもたらす感動の程度がその作品の評価基準になることも多く、音楽・映画・演劇などにより感動できるか否かという側面が、それらの産業における重要な関心事となっている。従来の感動研究では鳥肌感(鳥肌が立つ、背筋がぞくぞくする感覚)のみが検討対象となってきたが(Salimpoor et al., 2011, *Nat. Neuro.*)、申請者は、初期の研究(Sloboda, 1991, *Psychol. Music.*)から涙感(涙ぐむ、胸が締め付けられる感覚)が別種の感動状態に捉えられるという着想を得て、音楽聴取実験による鳥肌感と涙感の比較を行った。結果から、鳥肌感と涙感の両方が強い快の感情を喚起するものの、鳥肌感が生理覚醒をもたらすのに対して涙感が生理鎮静をもたらし、対称的な自律神経活動の変化が生じることが示された(Mori & Iwanaga, 2017, *Sci. Rep.*)。

申請者は、これらの研究結果から、感動の鳥肌感と涙感は、異なるタイプの快感情の神経活動として表象されるという仮説および鳥肌感と涙感が別々の音響特徴量に影響されるという仮説を持った。本研究では、後者の仮説について深層学習を含めた機械学習の手法を用いた検討を行うことで、音楽および音響特徴量に基づいた感動をもたらしやすい音楽を予測することができる学習器の作成を試みた。本研究が完成すれば、感動する音楽作品を選出する新たな音楽サービスの開発や、より強い感動をもたらす楽曲を作曲する手法の開発に貢献すると期待される。また、感動する音楽を実験刺激として選出できるようになり、個々人の好む音楽を刺激とした従来研究において問題であった、音楽に対する記憶や様々なバイアスの影響を取り除いた検討が可能になる。そのような手法を用いて、音楽のどのような特徴が感動の脳活動と結びつくかを明らかにすることは、感情および音楽の認知神経科学の進展に大きく貢献するだろう。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

2017年度AIPチャレンジでは、感動による鳥肌と涙の反応を神経活動レベルで検証することを目標として、fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging、機能的磁気共鳴画像法)による脳機能計測実験を行なった。8名の参加者にfMRIスキャナ内で個々人の好きな音楽を聴取させて鳥肌感と涙感を喚起させ、生起時の脳活動を検討した。その結果、鳥肌感が快感情と比べてより強く尾状核を賦活させ、涙感が快感情と比べてより強く側坐核を賦活させた。鳥肌感と涙感の賦活には差が認められなかったが、機械学習による鳥肌感と涙感の分類・予測を行な

った結果、尾状核および側坐核の情報を用いて 70%程度が識別可能であった。尾状核と側坐核は脳深部にある線条体の一部であり、先行研究において金銭や食事などの報酬に関わることが繰り返し示されてきた(Sescousse et al., 2013, *Neurosci. Biobehav. Rev.*)。本研究の成果として、鳥肌感と涙感という2種類の感動が、異なる種類の脳への報酬であるという示唆が得られた。

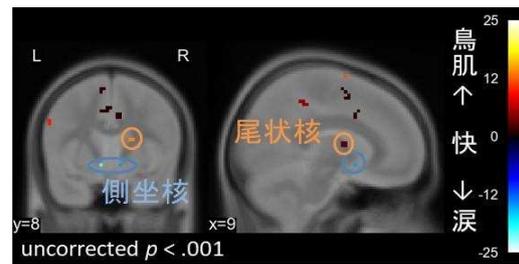


図1 鳥肌感と涙感の報酬脳活動

## (2) 概要

研究のねらいである二つの仮説について、前年度に感動の鳥肌感と涙感に特異的な脳活動を示したことから、2018年度のAIPチャレンジでは、もう一つの仮説である鳥肌感や涙感に異なる音響特徴量が影響するという仮説の検討を行った。

この際、影響を及ぼす特徴量が異なっていればパターンの認識が可能であるという仮定に基づき、深層学習を含めた機械学習を用いて鳥肌や涙を喚起させる音楽を予測する手法を確立することを目標とした。実験から得られた感動ラベル(鳥肌、涙、中性)を47種類の音楽特徴量に基づいてランダムフォレストによる機械学習で予測した結果、鳥肌や涙の報告された3秒前から7秒後の区間の平均値によってチャンスレベル(33%)を超える予測精度(46%)が示されたことで目標が一部達成された(図2)。深層学習を用いた解析では、これ以上の予測精度を得ることはできなかった(図3)。今後の検討において、音楽の一定区間ではなく鳥肌感や涙感を喚起する楽曲そのものを選出する機械学習器の構築が望まれる(研究テーマA「深層学習を用いた感動する音楽の予測技術の確立」)。

さらに、学習器の予測から得られた楽曲を実験刺激として、参加者にとって未知の音楽に対する感動の脳活動を計測することを目標としていたが、期間内に目標を達成することができなかった(研究テーマB「機械学習器が選択した音楽の喚起する感動の脳活動の解明」)。

## (3) 詳細

### 研究テーマ A「深層学習を用いた感動する音楽の予測技術の確立」

本研究では、機械学習の手法を用いて鳥肌が立つ音楽、涙ぐむ音楽、どちらの反応ももたらさない音楽の分類および予測を試みた。

まず、感動の心理ラベルを得るため、実験参加者54名に個々人の好む3~6曲を聴取させて鳥肌感や涙感が生じたとき報告させた。得られた鳥肌と涙の時点、合計429回をそれぞれのラベルとした。加えて、215回ランダムサンプリングした時点が中性ラベルとした。

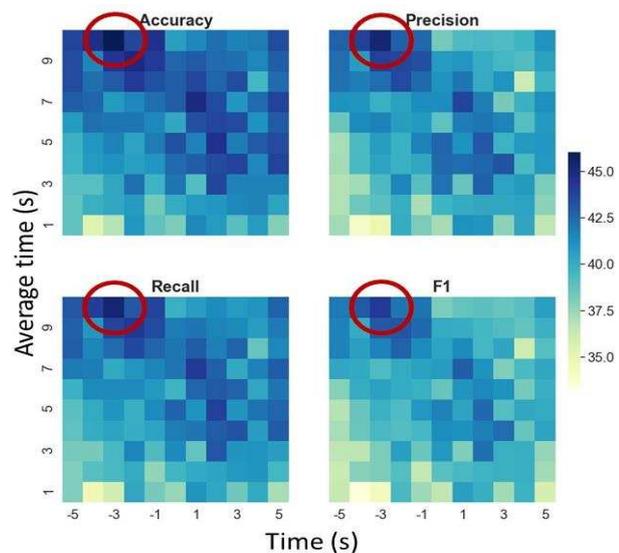


図2 ランダムフォレストによる感動ラベル予測



ルの予測を行う点について達成することができた。その他については達成不可能であったが、期間内に予算を適切に使用して感動に関する大規模データ収集を行うことができたのは、今後の検討のために大きく役立つだろう。しかし、研究の進め方については、予算が交付されてからもっと迅速に実施すべきであったと考えている。また、研究実施は個人研究として行ったが、補助者を雇用してデータのアノテーションといった時間のかかる処理を分業することが、期間内に成果を出すためには重要であったと痛感している。

本研究の成果は、今までその対象の複雑さのため定量的な研究が避けられてきた人の感動というテーマについて、情報科学的なアプローチを用いることで得られたものである。感動は多くの人にとって重要な体験であり、それがどのようなものであり、何に影響されるのかを明らかにすることは、心理学および神経科学にとっての学術的な価値が大きい。どのように感動体験を提供するかは産業にとっても重要な問題であると考えられるため、そのメカニズムを知る価値は大きいだろう。文化的により価値の高い芸術作品を生み出すためには、感動について知見を深めることが多いに役立つと考えられる。感動を経験する機会を増やすことができれば、精神的により健康な社会を形成することも言えるだろう。加えて、この研究課題は国際的に見ても検討しているグループは稀であり、音楽情報処理の手法を取り入れた研究は皆無と断言している。そのため、独創性や挑戦性は非常に高いと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

なし

### (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)

1. 森数馬 (2018) 感動の心理・生理・情報学的研究, 第 32 回 CAPS(関西学院大学応用心理科学研究センター)研究会講演, 関西学院大学
2. 森数馬 (2018) 音楽(第 2 部 感覚刺激の作成と較正), 基礎心理学会(監修), 基礎心理学実験法ハンドブック, 朝倉書店

## 研究報告書

### 「大規模合意形成のための Argument Mining の構造化技術とその応用」

研究期間： 2018 年 8 月～2019 年 3 月

研究者： 森尾 学

#### 1. 研究のねらい

近年、ソーシャルメディアにおいて人々がどのように議論しあい、相手に影響を与えているか、を調べることによる合意形成支援が期待されている。特に大規模な合意形成を目的とする Web 議論において、この予測技術を確立するため議論構造を適切に構築することが求められている。

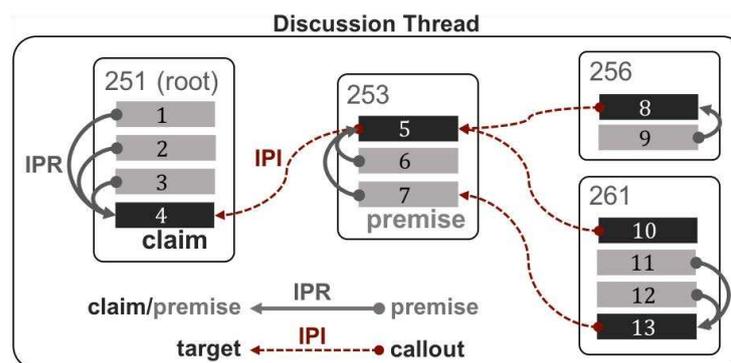
本研究ではまず、オンライン市民議論に焦点を当て、その構造化技術の確立を図った。日本語におけるオンライン市民議論のデータに対してアノテーションを行い、効果的な議論構造の構築技術について一定の成果を上げた(業績参照)。

#### 2. 研究成果

##### (1) 研究の背景

現在 Argument Mining という、自然言語処理を用いて新聞やエッセイなどの議論的文書を自動的に構造化する研究が着目されている。2017 年度の AIP チャレンジでは、Argument Mining を用いた議論スレッドの自動構造化の技術を開発した。

まずはじめに日本語の大規模オンライン市民議論を対象としたデータセットの作成を行った。我々は、「投稿内」と「投稿間」の 2 つのスキームモデルを組み合わせた。次に、我々のスキームを用いて議論スレッドを表現した例を示す：



続いて、議論スレッド全体を 1 つの入力として、End-to-End の新たな深層学習の手法を提案した。Pointer Networks を応用した「並列制約付きポインタ機構」による深層学習モデルを提案したことで、議論スレッドそのものを入力として、主張、前提、IPR、IPI を一度に (End-to-End

に)識別することが可能になった。

## (2) 概要

サブ研究テーマ A: 本加速フェーズでは、はじめに 2017 年度の AIP チャレンジの成果を更に解析し、学術的成果として国際会議等で発表した。具体的には 2 件の査読付国際会議発表、2 件の国内発表を行った。また、並列制約付きポインタ機構を応用し、市民から理由を引き出す試みとして新たなフォーラムを開発した。この成果はトップカンファレンスである The Web Conference (旧 WWW) 2019 のデモンストレーション部門に採択されている。

サブ研究テーマ B: 続いて、Argument Mining の基礎タスクにおけるグラフ畳み込みを応用した研究を行った。この研究は係り受け解析のツリー上でグラフ畳み込みを行う機構を双方向 LSTM-CRF に組み込み、「議論要素の特定」と「議論要素の分類」の 2 つのタスクに対して適用する研究である。本成果は 2 件の査読付き国際会議において発表を行った。

以上の 2 つのサブ研究テーマは、構造化技術の有用性を実際の議論掲示板に適用した点で新しく、さらに Fine-grained な解析と構造化技術のための基礎技術の研究を行ったことにより、各種のタスクの精度を向上させた。将来的には、大規模市民議論を支援するために応用を行う予定である。

## (3) 詳細

### ・サブ研究テーマ A「議論の構造化技術とその応用」

本サブ研究テーマにおいては、2017 年度の AIP チャレンジの成果をさらに詳細に解析し、それらの応用となる研究を進めた。まず、開発した並列制約付きポインタ機構の詳細な解析を行い、スレッド構造における有用性に関するデータを得た。それらのデータを纏め、自然言語処理の難関国際会議 EMNLP2018 の併設ワークショップ「Argument Mining」で発表を行った [5]。さらに、2017 年度の AIP チャレンジにおいてアノテーションしたオンライン市民議論データを解析し、日本語データセットにおける市民議論の Argument に関する性質を明らかにした。例えば、Argument Mining においてベンチマークとしてよく利用されるエッセイのデータセットでは前提(理由)の数が主張の数に比べて多い、という性質があるが、市民議論においては前提の数が比較的少ないことがわかった(図 1)。

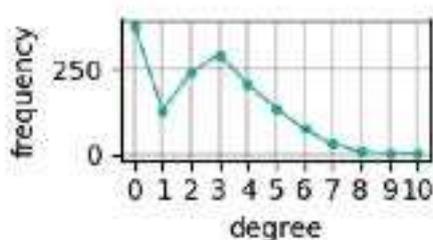


図 1. 主張に対する前提の数の頻度分布 [4]

この結果は、市民議論においてより前提の量や質を高めることの重要性を示しているといえ

る。これらの成果は Web 応用に関する国際会議「IEEE/WIC/ACM Web Intelligence 2018」で発表した [4].

さらに、開発した並列制約付きポインタ機構を実際の議論支援や合意形成に導く試みとして、自動議論誘発フォーラムの開発を行った(図 2).

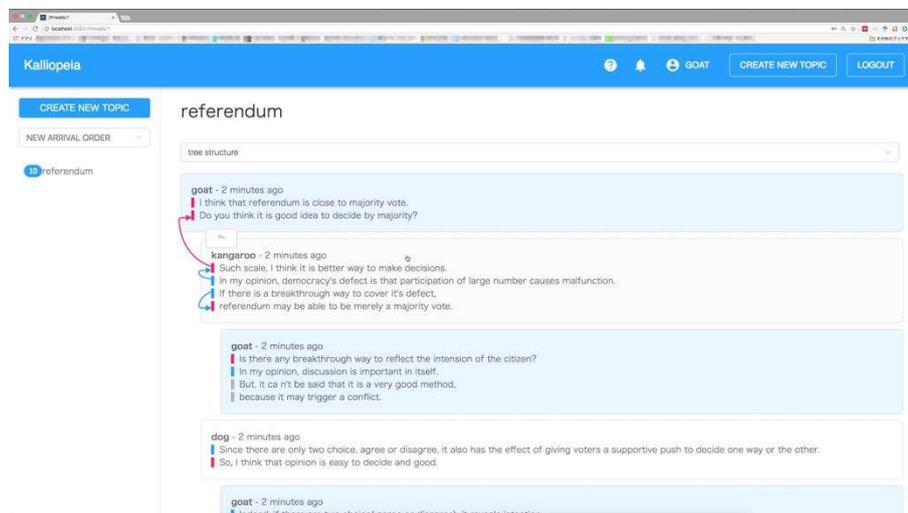


図 2. 開発した議論誘発フォーラム [1]

このフォーラムは、前述の市民の前提の量が少ないことを背景として、「ユーザから不足している前提を引き出す」ことを志向する議論プラットフォーム(議論掲示板)の開発を行ったものである。例えば、あるユーザが「たかゆき市長は地下鉄を 24 時間営業にするように働きかけるべきだ。」と掲示板で発言したとする。このコメントは意見のみを含んでおり、背後にある前提が抜けているため、深い議論へと到達しにくいと考えられる。そこで我々の議論プラットフォームは AIAD (Argument-Inducing Agent for online Discussion)と呼ばれるファシリテーションシステムにより、「たかゆきさんコメントありがとうございます！ <たかゆき君のコメント> とありますが、理由はありますか？」といったように呼びかける。AIAD を組み込んだ議論プラットフォームを用いて実際に議論実験を行い、効果を確認した。それらの結果を踏まえて執筆した論文は、WWW に関する難関国際会議である The Web Conference (旧 WWW) 2019 においてデモンストレーション部門に採択されている [1].

#### ・サブ研究テーマ B「議論の構造化技術とその応用」

我々の並列制約付きポインタ機構は、「議論要素」と呼ばれる主張や前提の範囲を既知のものとして学習を行う(1つの文章を1つの議論要素候補とみなす)機構であるが、実際には1つの文章に複数の議論要素が混在していることも珍しくない。このようなケースの例として、推論ステップがある。例えば「私は<命題 1> なので <命題 2>である。」といったように1つの文章の中で前提と主張の関係に分類されるケースである。すなわち、議論要素を厳密に抽出するのであれば、文章レベルというよりは単語レベルで識別を行う必要がある。

単語レベルによる、議論要素の識別には2つのタスクがあることが知られている。1つ目は

「議論要素の特定」であり、これは文書の  $i$  単語目から  $j$  単語目が議論要素である、といったように議論の範囲を識別するタスクである。2 つ目は「議論要素の分類」と呼ばれ議論要素の種類(主張や前提など)を識別するタスクである。我々はこれらの基礎タスクがより厳密な議論の構造化に必須であると考え、既存手法の精度向上を試みた。

我々の提案手法は、既存の双方向 LSTM を用いたモデルに対して、係り受け解析の結果に対するグラフ畳み込みネットワークと統語的なゲーティング機能を導入したモデルである。我々はこのモデルを BiLSTM-CRF-GCN と呼んでいる(図 3)。

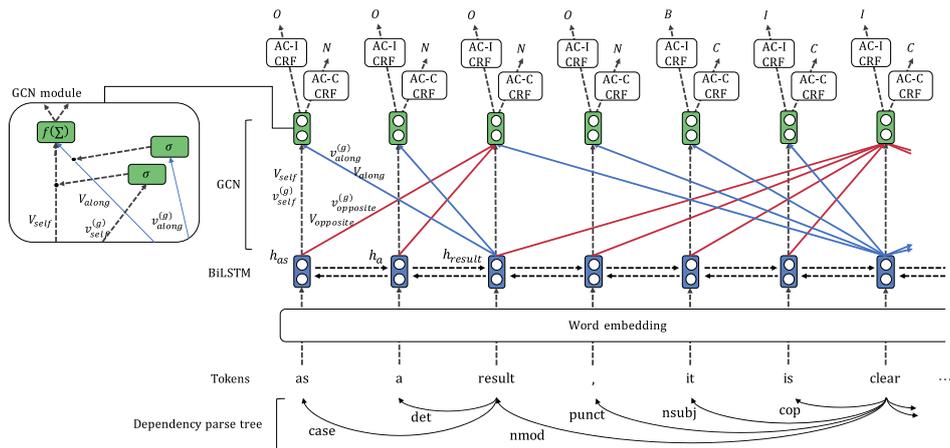


図 3. グラフ畳み込みを導入した BiLSTM-CRF-GCN モデル

この図からわかるように、提案手法は順方向と逆方向に畳み込みを行うことで、情報の伝播の損失を防いでいる。さらに、それぞれの係り受け解析上で畳み込みを行う際に、ラベル「case」や「amod」などを区別した重みを学習対象のパラメータとしている。さらに各ラベル畳み込みごとにゲーティング機能を導入することで、係り受け解析パーサのエラーに対処した。

3 つの Argument Mining に関するデータセットで実験を行ったところ、2 つのデータセットにおいて提案手法の有用性が認められた。しかし、もう 1 つのデータセットにおいては過学習が発生したことによる精度の低下が見られた(dropout は 0.5 に設定)。我々はこの原因としてこのデータセットがスパース(文書中に含まれる議論要素が比較的少ない)であることに起因すると考えている。よって、データセット依存であるものの、我々の提案手法に一定の有用性が確認された。以上の成果は、人工知能に関する難関国際会議「AAAI 2019」の学生アブストラクトとして採択され、ポスター発表を行った [3]。また、セマンティクスに関する国際会議「IEEE-ICSC 2019」でオーラル発表を行った [2]。

#### ・研究目的の達成状況

現在、大規模合意形成に向けた基礎技術として議論要素の特定タスクの精度向上や、アンテーションによる市民議論の解析、議論の自動構造化機構の開発を完了することができた。また、応用として自動議論誘発フォーラムの開発を行い、議論構造化機構を応用した議論掲示板による実証実験を行った。よって、所定の目的に対する基礎的な研究を満たすことが出

来たと考えている。しかしながら、当初予定していたユーザの専門性推定モデルなどの応用は達成できていない他、実際の大規模な議論への応用による実証が課題である。

### 3. 今後の展開

開発した並列制約付きポインタ機構は Argument Mining 以外の分野でも応用が可能な深層学習モデルであるので、将来的に様々な応用や実証していく予定である。例えば、エッセイなどもある程度の構造があるため、我々の手法を適用することが出来る可能性がある。また、議論誘発フォーラムを用いた実際の市民議論への活用や、教育目的への活用などといった応用先を検討している。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

現在、大規模合意形成に向けた基礎技術として議論要素の特定タスクの精度向上や、アノテーションによる市民議論の解析、議論の自動構造化機構の開発を完了することができた。また、応用として自動議論誘発フォーラムの開発を行い、議論構造化機構を応用した議論掲示板による実証実験を行った。よって、所定の目的に対する基礎的な研究を満たすことが出来たと考えている。しかしながら、当初予定していたユーザの専門性推定モデルなどの応用は達成できていない他、実際の大規模な議論への応用による実証が課題である。

#### ・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

大部分の費用をアノテーションに当てたことで、質、量ともに世界最先端の基礎的なコーパスを作成することが出来たため、データセットの作成に対して予算を執行したことは一定の成果につながったと言える。実施体制については他学生と共同で議論誘発フォーラムの研究を進め、議論実験や学習モデルの検証などの役割分担が出来た。また、研究補助者として学生を一人雇用し、アノテーションツールを整備させた。これにより、研究実施者が研究へと集中する環境を作る事ができ、効率が向上したと考えている。

#### ・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

開発した並列制約付きポインタ機構は Argument Mining 以外の分野でも応用が可能な深層学習モデルであるので、将来的に様々な応用や実証が可能である。さらに議論要素の特定タスクは Argument Mining における基礎タスクであるので、Argument Mining の研究者に対して有益となりうる。議論誘発フォーラムは、市民議論だけでなく、「適切な前提を記述する」という教育目的や文書の自動評価に応用できる可能性がある。また、アノテーションしたデータは公開予定であり、多くの研究者が用いるデータとなる可能性がある。

#### ・研究課題の独創性・挑戦性

Argument Mining は従来、法的文書やエッセイなどといった文書にフォーカスした研究が中心であったが、我々はオンライン議論に着目し、代表的なスレッド構造を考慮したモデルを考案、アノテーションを行った点が独創的であるといえる。また、綿密かつ大規模なアノテーションは費用と時間がかかるため、あまり多くの研究者が行わないものであるが、我々は PRISM 加速支援を通

じてこれを実行・挑戦することが出来た。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Makiko Ida, Gaku Morio, Kosui Iwasa, Ryo Egawa, Tomoyuki Tatsumi, Takaki Yasui and Katsuhide Fujita. Can You Give Me a Reason?: Argument-inducing Online Forum by Argument Mining. In Companion Proceedings of the The Web Conference 2019 (WWW '19), 2019, demo track, (to appear).
2. Gaku Morio and Katsuhide Fujita. Syntactic Graph Convolution in Multi-task Learning for Identifying and Classifying the Argument Component. In Proceedings of the 2019 IEEE 13th International Conference on Semantic Computing (ICSC), 2019, (to appear).
3. Gaku Morio and Katsuhide Fujita. On the Role of Syntactic Graph Convolutions for Identifying and Classifying Argument Components. In Proceedings of the Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2019), 2019, (to appear).
4. Gaku Morio and Katsuhide Fujita. Annotating Online Civic Discussion Threads for Argument Mining. In Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence 2018 (WI'18), 2018, pp. 546-553.
5. Gaku Morio and Katsuhide Fujita. End-to-End Argument Mining for Discussion Threads Based on Parallel Constrained Pointer Architecture. In Proceedings of the 5th Workshop on Argument Mining at EMNLP 2018, 2018, pages 11-21.

### (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)

1. Gaku Morio, Ryo Egawa and Katsuhide Fujita. Annotating Inner- and Inter- Post Argumentation in ChangeMyView. Informal Workshop on Argumentation/Argument Mining, National Institute of Informatics, Room No.1901-1903, November 14, 2018.
2. 森尾学, 藤田桂英. 並列制約付きポインタネットワークによる議論スレッドの自動構造化. Parallel Constrained Pointer Network for Automatic Structurization of Discussion Threads. 第17回情報科学技術フォーラム (FIT2018), 2018.
3. 森尾学, 藤田桂英. Argument MiningのためのWeb市民議論データのアノテーション. 第12回 ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会 (ARG SIG-WI2), 2018.
4. 森尾学, 藤田桂英. FIT 奨励賞 (FIT Encouragement Award). 第17回情報科学技術フォーラム (FIT2018), 2018.
5. 森尾学, 藤田桂英. 萌芽研究賞 (Exploratory Research Award). 第12回 ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会 (ARG SIG-WI2), 2018.

# 研究報告書

## 「実世界言語現象に基づく含意関係コーパスの研究」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：谷中 瞳

### 1. 研究のねらい

含意関係認識とは、前提文が仮説文の意味を含むか否かを自動判定する基盤技術であり、コンピュータによる自然言語理解の実現に向けて、きわめて重要な技術である。文間の含意関係を正しく判定するためには、語彙的な意味と論理的な意味という2種類の文の意味を計算する必要がある。例えば、前提文 *I didn't find anyone* は仮説文 *I saw no one* を含意するが、この含意関係を判定するには、*see* が *find* の類義語であるという語彙的な意味と、*no one* は *not anyone* と同義であるという論理的な意味をどのようにして計算するかが問題となる。

近年、自然言語処理においては、ニューラルネットワークを用いてデータセットから文の意味を学習し、高精度で含意関係認識を解く手法が盛んに研究されている。含意関係認識モデルの学習・評価には、SNLI や MultiNLI といった、大規模な含意関係認識データセットが用いられている。しかし、これらのデータセットには、量化や否定、比較表現、条件文といった、論理的な意味計算を要する言語現象が含まれていないことが指摘されている。そのため、ニューラルモデルがデータセットから文の論理的な意味を学習できているのかは自明ではない。

一方で、形式意味論においては、上記の現象も含め幅広い言語現象を扱う含意関係認識データセットが構築されている。しかし、このデータセットは語彙知識が推論に最低限必要な知識に制限されている。また、データ数は数百件と小規模であり、ニューラルモデルの学習データとして用いることは想定されていない。実世界のテキストは多様な語彙知識や統語構造から構成されている。ニューラルモデルの学習に量・質ともに十分な言語現象データセットを実テキストから構築できれば、ニューラルモデルが文の論理的な意味を学習するためには何が必要なのかという根源的な問いに対して、一つの解を提示することが期待できる。しかし、そのようなデータセットの構築には高度な言語学・論理学の知識が必要であり、言語学者が大量の実テキストを一件ずつ分析し構築することは現実的ではない。そこで本研究では、形式意味論において重要な言語現象として分析されている *monotonicity* (単調推論) に着目して、実テキストから含意関係認識データセットを大量に構築する手法を検討する。また、構築したデータセットを最高精度のニューラル含意関係認識モデルの学習データに追加すると、*monotonicity* に関する含意関係認識の正答率が向上するかについて分析を行う。

## 2. 研究成果

### (1) 研究の背景

含意関係認識において、自然言語処理では、文字や単語を単位としたベクトルを入力として、文の語彙的な意味を学習する手法が活発に研究されている。一方で、形式意味論では、文の意味をベクトルよりも表現力の高い論理式で表し、文の論理的な意味を分析する研究が展開されている。そこで2017年度AIPチャレンジでは、自然言語処理と形式意味論の融合的アプローチによる文の語彙的・論理的な意味の統合的な計算手法として、文の意味を論理式で表し、論理推論の実行過程から文間の含意関係を学習する手法を提案した。具体的には、文間の双方向の含意関係について自然演繹による推論を試み、推論の実行過程を特徴量として、ランダムフォレストモデルで文間の含意関係を学習する。含意関係認識データセットを用いた評価実験の結果、提案手法は正答率 87.7%と世界最高精度を達成し、また、推論の実行過程が特徴量として有用であることを定量的に示した。

### (2) 概要

近年、ニューラルネットワークを用いて文の意味を学習し、高精度で含意関係認識を解く手法が数多く提案されている。しかし、前述の通り、ニューラル含意関係認識モデルの学習・評価に用いるために量・質ともに十分な言語現象のデータセットがこれまでに存在しなかったため、ニューラル含意関係認識モデルがデータから論理語の意味を学習できるのかは自明ではない。そこで本研究課題では、2017年度AIPチャレンジの融合的アプローチとは趣を変えた自然言語処理と形式意味論との融合的アプローチとして、形式意味論の知見に基づいて実テキストから言語現象のデータセットを大量に構築し、構築したデータセットを通してニューラル含意関係認識モデルが論理語の意味を学習可能かについて、分析を行った。本研究では、語彙知識と統語構造の統合的な理解が必要となる基本的かつ重要な言語現象の一つである monotonicity に着目して、含意関係認識データセットの構築とニューラル含意関係認識モデルの分析を行った。具体的には、①語彙的・構文的に多様な前提文の選定、② monotonicity の性質を用いた仮説文の自動構築、③クラウドソーシングによる仮説文の構築、④最高精度のニューラル含意関係認識モデルを用いた分析の4項目について研究を進めた。なお、②③で構築したデータセットは研究利用が可能な形式で公開する予定である。

①では、実テキストから monotonicity の推論に関わる表現を含む前提文を効率的に選定するための手法として、文の統語・意味解析情報付き多言語コーパス Parallel Meaning Bank (PMB)を用いて前提文を選定する手法を提案した〔論文1〕。

②では、学習用データセットの大量構築を実現するための手法として、monotonicity に関する形式意味論の知見と PMB に付与された統語・意味解析情報を用いて自動で仮説文を構築する手法を提案した〔論文2,3〕。

③では、②よりも語彙的・構文的に多種多様な評価用データセットを効率的に構築するための手法として、クラウドソーシングを用いて仮説文を構築する手法を提案した〔論文4〕。

④では、②で構築したデータセットを最高精度のニューラル含意関係認識モデルで学習し③で構築したデータセットで評価すると、monotonicity の推論に関する含意関係認識の正答率が向上するかについて評価実験を行った。構築したデータセットを学習データに追加した結

果、正答率が上がり、言語現象ごとに学習データを追加していくことで含意関係認識の正答率が向上する可能性が示唆された。

### (3) 詳細

#### ① 語彙的・構文的に多様な前提文の選定

monotonicity は語の入れ替えに基づく推論であり、否定や一般化量化子などの表現を持つ monotonicity の性質に基づいて文中の語を意味的に上位もしくは下位の表現に入れ替えた文と、元の文との含意関係が成り立つという推論である。たとえば前提文 Tom eat any food は仮説文 Tom eat any fish quickly を含意するが、これは any が項にとる名詞句・動詞句に対して downward monotone であるため、eat、food を下位語に置き換える、修飾語を追加するといった操作によって下位の表現に置き換えても含意関係が成り立つと説明できる。このように、入れ替え対象の語と上位・下位のどちらに入れ換え可能かは、文の統語構造から特定する必要がある。そこで、本研究では文の統語・意味解析情報付き多言語コーパス Parallel Meaning Bank (PMB) から前提文を選定する方法を提案した [論文 1]。PMB には monotonicity と関連の深い文法体系である Combinatory Categorical Grammar (CCG) に基づく統語解析結果と意味現象タグが付与されているため、統語構造に基づく分析を容易にする。さらに、PMB は新聞、小説など多様なジャンルの文が含まれているため、語彙的・構文的に多様なデータセットの構築に適している。本研究では、PMB にある文から意味現象タグを用いて monotonicity の推論に関わる量化表現または等位接続表現を含む文合計約 2 万 4 千件を前提文として選定した。

#### ② monotonicity の性質を用いた仮説文の自動構築

PMB には各語に対して語義タグが付与されているため、monotonicity に基づく上位・下位の表現への自然な置き換えを可能にする。そこで、①で選定した前提文中の名詞句・動詞句を、PMB に付与されている語義タグと外部辞書を用いて上位・下位の表現に置き換え、元の文と含意関係が成り立つ仮説文を自動構築する手法を提案した。これにより、合計約 3 万 6 千件の含意関係認識データセットを構築した [論文 2,3]。

#### ③ クラウドソーシングによる仮説文の構築

②のデータセット構築手法では、拡張できる語彙知識が外部辞書上の語彙に限られてしまう、修飾語の追加はできない、といった問題があった。そこで語彙知識・統語構造のバリエーションを増やすため、クラウドソーシングを用いて効率的に仮説文を構築する手法を検討した。先行研究のクラウドソーシングで構築されたデータセットでは、ワーカーが前提文と含意・矛盾・中立の関係になる仮説文を作成する際に、否定表現を入れて矛盾となる仮説文を作成するといった無意識の作業バイアスによって、仮説文だけで含意関係が判定できてしまう不適切な文ペアが作成されるという問題が指摘されていた。そこで提案手法ではワーカーの作業バイアスを軽減させるため、文中のある語を詳細な語に置き換えるタスクと、できた文ペアの含意関係を判定するタスクという 2 つのクラウドソーシングタスクを設計した。最終的に、合計約 3 千件の含意関係認識評価用データセットを構築した [論文 4]。

#### ④ 最高精度のニューラル含意関係認識モデルを用いた分析

最高精度のニューラル含意関係認識モデルを用いて、学習データによって含意関係認識の精度が変わるのかについて、monotonicity の推論を扱う4種類の評価用データセットで評価を行った。構築したデータセットを学習データに追加することで、いずれの評価用データセットにおいても正答率が向上した。また、学習データに追加しても解けなかった問題604件についてエラー分析を行った結果、PMBに存在しない量化表現を含む問題で誤答していた。このことから、ニューラルモデルが学習データを通してデータ中の個々の言語現象を学習できる可能性が示唆された。一方で、ニューラルモデルには論理語の意味における汎化性能はなく、論理語の意味を学習させるためには、言語現象ごとに学習データを構築し学習させるか、アーキテクチャを改良する必要があることが示唆された。

### 3. 今後の展開

自然言語処理の各タスクにおいて高精度を達成しつつあるニューラルモデルの大きな課題の一つとして、記号的・論理的な意味をどのようにして学習するかという課題がある。本研究で構築したデータセットは、その課題解決の第一歩として、コンピュータによる自然言語理解の実現に貢献する。また、今回研究対象とした含意関係認識は機械翻訳、質問応答、文書要約、学習支援といった応用アプリケーションの基盤を築く技術である。実際に、質問応答のデータセットに加えて含意関係認識データセットで質問応答のモデルをマルチタスク学習させることにより、質問応答の予測精度が向上したという研究報告もあり、本研究で構築した含意関係認識データセットもこれらの応用アプリケーションのマルチタスク学習への応用が期待できる。本研究成果の今後の可能性として、①扱う言語現象の拡張と②多言語への拡張の二つが挙げられる。①については、比較表現、条件文、テンスといった他の言語現象のデータセットを構築することが考えられる。これらの言語現象は monotonicity と同様に、従来の自然言語処理では詳細な扱いが困難であり、避けてきた現象である。しかし、本研究のような自然言語処理と形式意味論の融合的アプローチによって、このボトルネックの解消が期待できる。②については、本研究で前提文の選定に用いた PMB は多言語コーパスであるため、構築した含意関係認識データセットの多言語化もまた容易である。さらに、①と②の融合によって、たとえば否定のありなしなどの深い意味の違いを考慮した機械翻訳に応用できる可能性がある。学術的な観点では、同じ自然言語を研究対象とする自然言語処理と形式意味論の研究者との協働を続けていくことで、応用技術への適用と言語理論への反映という好循環を生み出していきたい。この循環は、ニューラルモデルの登場によって精度による評価では頭打ちとなりつつある自然言語処理の研究において、ブレイクスルーをもたらすはずである。

### 4. 自己評価

本研究課題は、自然言語処理と言語学の双方の専門知識と技術が必要とされる、きわめてチャレンジングなものであった。しかし、非常に短期間ながらも、言語学・論理学・自然言語処理の国際ワークショップでの Best Paper Award を受賞という優れた学術成果をあげている。さらに、自然言語処理と形式意味論との融合的な研究の第一人者である Groningen 大学の Johan Bos 教授との共同研究を実現し、自然言語処理のトップカンファレンスに論文を投稿するまでに至り、当初の計画以上の成果が得られたと評価できる。研究費は、主に共同研究・学会発表のための旅費、大規模データセット構築のためのクラウドソーシング利用、評価実験のための機器購入、

言語学の専門知識を収集するための書籍購入に用いた。クラウドソーシングは語彙的・構文的に多種多様な評価用データセットの構築に利用し、人手を要するデータセット構築の効率的な推進に大きく寄与した。本研究の成果はニューラルモデルの課題の一つである論理語の意味理解に向けての確実な一歩として貢献できたと考えている。また、今後の展開でも述べたように、含意関係認識は機械翻訳、質問応答、文書要約、学習支援と様々な応用アプリケーションの根幹をなす技術であるため、将来的な波及効果は大きい。今後、積極的な産官学連携を通して適切な応用アプリケーションを設定し、研究成果の社会実装を進めていきたい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Hitomi Yanaka, Koji Mineshima, Pascual Martinez-Gomez, and Daisuke Bekki, *Towards Understanding Bilingual Textual Entailment and Similarity*, The ESSLLI 2018 Workshop on NLP in the Era of Big Data, Deep Learning, and Post Truth, 2018.
2. 谷中瞳, 峯島宏次, 戸次大介, 関根聡, 乾健太郎, Lasha Abzianidze, Johan Bos, ニューラル自然言語推論に向けた Monotonicity に基づく含意関係認識データセット自動構築, 言語処理学会年次大会, 名古屋, 2019.
3. Hitomi Yanaka, Koji Mineshima, Daisuke Bekki, Satoshi Sekine, Kentaro Inui, Lasha Abzianidze, Johan Bos, HELP: A Dataset for Identifying Shortcomings of ¥¥ Neural Models in Logical Reasoning, 17th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT2019), 2019.(投稿中)※非公開を希望
4. 谷中瞳, 峯島宏次, 戸次大介, 関根聡, 乾健太郎, クラウドソーシングによる単調推論データセットの構築, 第33回人工知能学会全国大会, 新潟, 2019.

### (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)

#### (受賞)

1. The ESSLLI 2018 Workshop on NLP in the Era of Big Data, Deep Learning, and Post Truth Best Award, (2018.8).

#### (講演)

2. 谷中瞳, 自然言語処理と形式意味論の融合による、含意関係と意味的類似度の計算, TokyoCL 勉強会@NII, (2018.9).
3. 谷中瞳, Towards understanding textual entailment and similarity, 東北大学, (2018.10).
4. 谷中瞳, Towards understanding textual entailment and similarity, University of Groningen, (2018.12).

# 研究報告書

## 「物体認識における確率的な正則化の検証」

研究期間： 2018年8月～2019年3月

研究者： 山田 良博

### 1. 研究のねらい

画像から「飛行機」「鳥」「猫」といった多様な物体を認識する一般物体認識の研究は、名だたるIT企業や著名な研究機関が性能を競い合う「激戦区」となっている。図1は、とあるデータセットの認識率の推移を示したものであり、主なものだけで1年間に7回も記録が更新されてきたことがわかる。提案者は、この厳しい競争に勝ち抜き、独力で世界一の認識精度を達成し、更にその後には二度目の世界一の認識精度を達成した。しかしながら、この二度の世界一をもたらした手法は、従来の常識を覆すものであり、謎が多い。

本チャレンジではこの手法について実験的に解析を進め、認識精度を改善するメカニズムを分析し、この現象の理論的解釈を促進することを目指す。また、更なる精度の改善に繋る要素について検討を行い、車載カメラや監視カメラ等の画像を用いた実世界の既存サービスの高度化・効率化に貢献する基礎技術として確立を目指す。

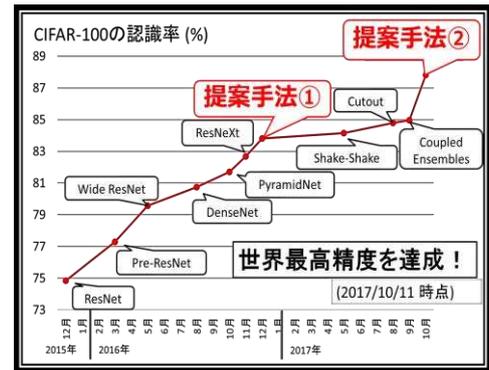


図1 一般物体認識の認識率の推移

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

一般物体認識では物体の特徴をよく表す特徴空間に画像を射影した上で、「猫」「犬」などのカテゴリを上手く分離する境界を学習する。H29年度AIPチャレンジ提案研究である上記の図1の提案手法②(以下、提案手法)は、従来の常識とは異なる学習方法によって優れた境界の学習を実現し、更なる改善を実現、世界一の認識精度を達成した。以下に提案手法の詳細な発表経緯を示す。

- 2017年10月に電子情報通信学会パターン認識・メディア(PRMU)理解研究会で、新たな手法を発表。前年度に引き続き研究奨励賞(当該年度に35歳以下の若手研究者によりなされた優れた発表3件程度に贈られる)に選ばれた。
- 2018年4月の国際会議International Conference on Learning Representations (ICLR)で前述の日本語発表の発展版を発表した。
- 本研究の成果によって大阪府立大学からプレスリリースが発表。
- AIPチャレンジラボ長賞(当該年度にAIPチャレンジとして採択された研究で最も優れた発表5件に贈られる)に選ばれた。

## (2) 概要

ニューラルネットの学習は図 2 のように、画像  $(x)$  からその画像のクラスを推定する「①前向き計算」と、推定したクラス  $(F(x))$  が正解のクラス  $(y)$  に近づくように前向き計算の重みを更新する「②後ろ向き計算」から成り、これを何度も繰り返す。通常は、前向き計算と後ろ向き計算で重みを正しく更新する。提案手法は  $F(x)$  に対して前向き計算と後ろ向き計算で異なるノイズをかけることで、「正しくない重みの更新」を行う。これは学習が上手く進まなく

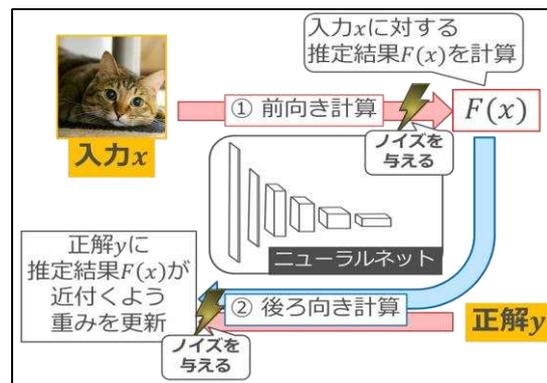


図2 ニューラルネットの学習

なると考えられてきた手法だが、驚くべきことに「正しい重みの更新」と「正しくない重みの更新」を確率的に制御する機構によって、学習が上手く進み精度を向上させる効果が認められている。しかし、重みの更新とその制御は理論的な背景が乏しく、何故うまくいくのかさえ分かっていない。そこで申請者は 2 つの異なる角度からの実験を通して、手法の理解を進めた。

### 1. 中間入力と特徴の相関の分析

ニューラルネットでは、残差構造(図 3)が広く用いられる。これは中間入力  $x$  に対する重要な特徴  $F(x)$  から、より重要な特徴を含む出力  $y=x+F(x)$  を得る構造である。一般に残差構造は複数回繰り返され、徐々に重要な特徴を抽出する。

ここで、 $x$  と  $F(x)$  の相関について考える。 $x$  と  $F(x)$  の相関は、その残差構造における特徴  $F(x)$  がもたらす変化量を表す。 $x$  と  $F(x)$  に強い相関がある場合、その残差構造は認識精度に影響しない、無意味な部分となる。残差構造は複数回の繰り返して徐々に相関が高くなる傾向が報告されており、終盤の残差構造の多くは無意味な部分となっている。

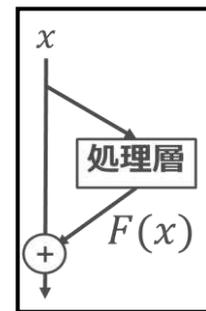


図3 残差構造の模式図

提案手法は残差構造の繰り返して徐々に「正しくない重みの更新」の確率を向上させる。「正しくない重みの更新」は相関を弱めると知られており、提案手法は相関を弱め、終盤の無意味な残差構造を減らし、精度を高めていると考えられる。この相関と提案手法の関係性は未だ詳しく検証されていない。そこで相関を実際に計測し理論的な裏付けを得る。また相関の分析を基に、更なる手法を検討する。

### 2. 長期学習の短縮

ニューラルネットでは、学習回数を増やすほど精度が向上することが報告されている。特に提案手法は、学習に費やす計算回数を通常の 6 倍に増やすと、従来の手法に比べて精度が大幅に向上することが確認されている。しかしこれは学習に 6 倍の時間がかかることになる。そこで長時間の学習と同様の効果を得る方法を検討した。

### (3) 詳細

#### 研究テーマ 1「中間入力と特徴の相関の分析」

最初に、ニューラルネットが含む残差構造(図 3)の中間入力  $x$  と特徴  $F(x)$  の相関係数について、提案手法によってどのような変化が発生するか比較分析を行った。

実際の相関係数の平均値を図 4 に示す。ここでは、あるニューラルネット構造に対して提案手法とベースラインで学習を行い、最終的に得られた学習結果を用いてそれぞれ相関係数の平均値を算出している。縦軸は相

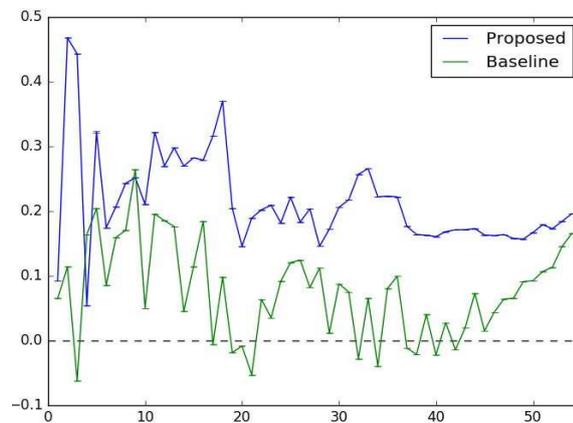


図 4 残差構造における相関係数の推移

関係数であり、横軸はニューラルネットの入力から何回目の残差構造かを示している。対象としたニューラルネットには合計 54 回の残差構造が含まれており、図 4 には全ての残差構造における相関係数の平均値が示されている。エラーバーは標準誤差である。なお、提案手法とベースラインに残差構造の学習法以外の違いはない。

提案手法(青線)はベースライン(緑線)に比べ、ほぼ全ての残差構造で高い相関係数を示していた。他の条件の実験においても同様に提案手法による相関係数の向上が確認された。この結果から、**提案手法は予想とは逆に相関を強める効果があることが確認された**。また、相関を強める効果が認識精度の向上に寄与する可能性が示された。そこで、2つのアプローチからより深くテーマを進めた。

#### I. 提案手法の拡張および実証

提案手法は特定の構造の残差構造でなければ効果が発揮できなかった。そこで上記の分析を基に、適用可能でなかった構造について検討を行った。その結果、相関を強める効果をもつ方法が発見できたことで、**提案手法を更に汎用的な手法へと拡張することに成功した**。

更に、実環境での応用を視野に、従来の実験の数十倍の規模のデータを用いた、より実環境に近い条件の大規模実験を行った。その結果、**より実環境に近い条件においても有効性が示された**。一連の結果はプレプリントサーバ arXiv 上に公開しており、発表に向け査読付き国際学会への投稿を行っている。

#### II. 相関係数自体を学習対象とする手法の検討

相関を強める効果が認識精度の向上に寄与しているのであれば、相関が強くなるように学習することで認識精度の向上を果たすことが出来ると考えられる。そこで、相関係数を学習対象に含めた手法について検討を行った。その結果、**相関を重視しすぎると学習が進まず、相関を軽視しすぎると精度向上の効果がなくなる**ことが判明した。適切な相関の学習法については現在検証中である。

## 研究テーマ 2「長期学習の短縮」

BC Learning を用いて長期学習の短縮を実現した。BC Learning は学習に用いるデータ数を擬似的に増加させることで、通常の学習時に認識精度を向上させる手法として知られている手法である。BC Learning による長期学習の短縮効果は、研究者の知る限り初めての報告である。

この効果は BC Learning を用いた際と用いなかった場合について、提案手法に対する認識精度を確認する中で発見した。長期学習時には BC Learning による認識精度の向上を確認できなかった。一方、通常の学習時には長期学習時の精度には及ばないものの BC Learning による認識精度の向上を確認した。このことから **BC Learning にはある程度の長期学習と同様の効果が見込めると考えられる**。ただし、長期学習に伴う実験の困難さから、十分な検証が行えていない。このため、更なる検証が必要である。

### 3. 今後の展開

提案手法に理論的解釈が与えられ、弱点が克服され、より実環境に近い条件のもとで効果が実証された。「世界一の認識精度」を達成した提案手法の信頼性が一層深まったことで、今後、**一般物体認識を用いた様々な応用技術における提案手法の更なる活用**が予想される。

また、提案手法の分析を通して、残差構造における相関の有効性や BC Learning の新たな可能性が示唆された。このことは提案手法の要である「正しくない重みの更新」の分析やその発展に留まらず、今後ニューラルネットを用いた研究全体へと波及していくと考えられる。

### 4. 自己評価

二つの研究テーマの同時進行によって、提案手法に対する多角的な視点がもたらされ、提案手法の理論的解釈、提案手法の弱点であった残差構造への制限の克服、長期学習の短縮といった提案手法の多岐に渡る進展に繋がった。このことは、**当初の目標である理論的解釈の促進と基礎技術への確立に対する非常に優れた成果**であると考えている。更に、短い期間ながらも予想を超え、相関の分析を通じた新たな手法の示唆や、より実環境に近い条件での認識精度向上の確認に繋がった。これらは物体認識に対して理論/実践の両面から更なる研究や応用を促進するものであり、**当初の目標を上回る成果**を挙げることが出来たと考えている。

また、本研究は「正しくない重みの更新」というニューラルネットにおける従来の常識に反する独創的な発想に基づくものであったが、その詳細な分析や検討を通してニューラルネットに対する様々な可能性が示唆された。本研究は一般物体認識分野のみに留まらないニューラルネットを用いた**全ての手法に対する新たな可能性の一翼を担う成果**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

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)

- 2017年10月に電子情報通信学会パターン認識・メディア(PRMU)理解研究会で、新たな

手法を発表。前年度に引き続き研究奨励賞(当該年度に35歳以下の若手研究者によりなされた優れた発表3件程度に贈られる)に選ばれた。

- 2018年4月の国際会議 International Conference on Learning Representations (ICLR) で前述の日本語発表の発展版を発表した。
- 本研究の成果によって大阪府立大学からプレスリリースが発表。
- AIP チャレンジラボ長賞(当該年度にAIPチャレンジとして採択された研究で最も優れた発表5件に贈られる)に選ばれた。
- 2018年8月に画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)で口頭発表として採択され発表。MIRU 学生優秀賞(当該年度に学生によりなされた優れた発表1件に贈られる)に選ばれた。

# 研究報告書

## 「縮退グラフからの列挙技法開発のさらなる深化」

研究期間：2018年8月～2019年3月

研究者：和佐 州洋

### 1. 研究のねらい

本研究領域で着目されているビッグデータは、単なる文字列では表現が難しいグラフと呼ばれる複雑な離散構造を大量に含んだデータである。例えば、SNSなどに代表される人間関係や、道路交通網、無線ネットワーク、商取引データ、などの多岐にわたる。近年の計算機性能やセンサーの発達により、このようなデータを私たちは比較的容易に収集できるようになった。一方でその利活用は、その膨大さから困難を極める。喫緊の課題は、大量に保存されたこれら複雑なデータを死蔵させるのではなく、新たな知識を獲得することである。

本研究では、知識獲得技術であるデータマイニングや人工知能の基盤技術の一つ、列挙に着目する。本研究における列挙とは、与えられた条件を満たす部分構造を入力グラフから漏れなく重複なく出力する問題のことを言い、列挙アルゴリズムはそのような問題を解く手法のことを言う。所属しているCRESTプロジェクトの目的達成においても、列挙技術の開発は理論・応用の両面から必要不可欠である。しかし、列挙問題の中には、総当りを用いた自明な手法以外の効率良いアルゴリズムが知られていないものが数多く存在するなど、技術として十分に研究し尽くされていない。また、メタアルゴリズムの研究に関してはまだ進んでいるとは言いがたく、各個撃破的なアプローチで問題を解いているのが現状である。そこで、本研究では、これまで総当たりの自明な手法しか知られていなかった問題を効率よく解くアルゴリズムの開発、および、メタアルゴリズムの開発を目標とする。

### 2. 研究成果

#### (1) 研究の背景

2017年度AIPチャレンジにおいて、申請者は「グラフの縮退性に着目した列挙アルゴリズムの開発」のテーマのもとで研究を行なった。2017年度において、申請者は特にグラフの縮退数が小さい時に高速に動作するアルゴリズムの構築技法について、理論的な側面に着目し研究を行った。主な成果としては、縮退列と呼ばれる頂点の列に着目することで、二部部分グラフ、支配集合、内周の大きな部分グラフといったグラフの基本的な部分構造を効率よく列挙するアルゴリズムを開発し、国際会議および論文誌に採択された。また、研究を進めていく上で、重要な未解決問題も多数発見した。これら未解決問題を解くことが本研究の目的である。

#### (2) 概要

本研究の目的は、(1) パリティ付きパスの列挙アルゴリズム、(2) 極大な弦部分グラフの列挙アルゴリズム、並びに、(3) 縮退グラフに対するメタ列挙アルゴリズムを提案することである。代表者はH29年度AIPチャレンジにおいて、縮退数と呼ばれるグラフの疎密度を表す指標に基づいてアルゴリズム開発を行った。グラフの縮退性とは、グラフの疎密度を表すパラメータ

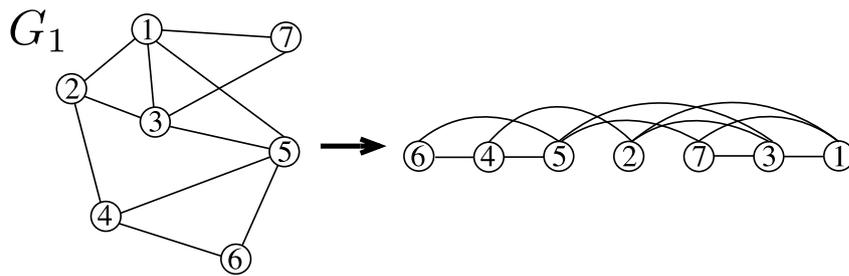


図 2. 左は 2-縮退グラフの例. 右はその頂点を縮退列の順で並べた例. 任意の  $k$ -縮退グラフに対して, 全ての頂点が自身よりも右側にある隣接頂点は高々  $k$  個しかないように並べることができる. このような列を縮退列と呼ぶ.

の一つであり, 次のように定義される: あるグラフ  $G$  の縮退数が  $k$  であるとは,  $G$  中の任意の部分グラフが次数  $k$  以下の頂点を持つときをいう. 木や平面グラフのように縮退数が定数となるグラフクラスがいくつか知られている. 木は非巡回な構造は生命科学やデータベース分野, また, 平面グラフは道路ネットワークなど, 実データにおいてよく見られる構造である. また, 縮退数が  $k$  の時, 頂点数  $n$  に対して, 辺数は  $O(nk)$  である. つまり,  $k$  の値が小さいとき, グラフは辺の少ない疎なグラフになる. 実世界におけるグラフは疎であることが知られており, このことから, グラフの縮退性に着目してアルゴリズムを開発することは重要である. 一方で, 列挙問題全てを解く万能なアルゴリズムは存在しない, つまり, 各個撃破的なアプローチはある程度必要であるとされている. 一方で, 代表者はこれまでの研究において, 縮退性, 特に縮退列(図 2)に着目することで効率良い列挙アルゴリズムの構築に成功した. 本研究では, これまで得られた縮退性に関する知見を利用し, これまで未解決であった上記 3 つの問題に対する効率良いアルゴリズムを提案することを目標とした.

### (3) 詳細

#### 1. パリティ付きパスの列挙

これまで様々な部分構造の列挙が行われてきたが, パリティ制約を与えた列挙問題については, ほとんど知られていない. 一方で, 列挙の基本的な問題の一つとして  $st$  パス列挙が挙げられる. これは, グラフ中の与えられた 2 頂点  $s$  と  $t$  を結ぶパスを列挙する問題である. この問題は, 1960 年代から研究されており, 最近でも 2012 年に Birmele らによってアルゴリズムが与えられるなど, 盛んに研究されている問題である. そこで, 本課題では, パス長に偶奇の制約, つまり, 与えられた 2 頂点間を結ぶ偶数長, あるいは, 奇数長のみを列挙するアルゴリズムを与え, これを基にパリティ制約付きの部分構造列挙に対する知見を深めることを目標とした. 本テーマの研究結果と研究目的の達成状況であるが, 2019 年 1 月後半に大きな進捗を得ることができた. 現在は, 国際会議への投稿準備中である.

#### 2. 極大な部分弦グラフの効率良い列挙

あるグラフ  $G$  が,  $G$  中の長さ 4 以上の全てのサイクルが弦, つまり, そのサイクル上で隣り合わない頂点間に辺を持つとき,  $G$  は弦グラフであるという. 弦グラフは応用・理論

的な興味から、列挙に関して研究が行われてきた。例えば、入力グラフを弦グラフに制限したり、また、解として弦グラフを列挙したりするものである。一方で、極大な弦グラフを列挙するアルゴリズムはほとんど知られてこなかった。これは、現実問題に対して弦グラフの列挙を利用する際に、極大なものだけに着目すれば良い場合に、非極大なものも出力するアルゴリズムを利用すると、非常に効率が悪いことを意味する。極端な例でいうと、入力が木である場合、極大な弦部分グラフただ一つであるが、全ての誘導部分も弦グラフである。このようなときに、極大な解一つを出力するために、指数個の解を出力する必要があり、効率が悪い。そこで本提案では、出力すべき解の個数と入力サイズに対して多項式で抑えられる時間計算量で動作する極大な弦グラフの列挙アルゴリズムの開発を目標としていた。本テーマの研究成果と研究目的の達成状況であるが、他のテーマに取り組んでいる最中、他の研究者が本テーマを解決したとの情報を得た。ただし、未刊行の論文であるため、内容の精査が難しく、研究を一旦中止としている。

### 3. 縮退性に着目した列挙に関するメタアルゴリズムの開発

列挙問題に対しては、これまで、分割法や Avis と Fukuda による逆探索法など、列挙アルゴリズムを構築するためのいくつかのフレームワークや、Uno による Pushout 法と呼ばれる時間計算量解析技術が開発されてきた。しかし、列挙問題に対する一般的な技法に関する研究は、その重要性にもかかわらず、ほとんど進んでいないのが現状である。本課題では、この現状を改善するために、 $k$ -縮退グラフからの列挙に関するメタアルゴリズムの開発を目標とした。本テーマの研究成果と研究目的の達成状況であるが、どのような条件を満たせば解を列挙できるか、その条件についての整理がついた。その条件について、現在論文投稿準備中である。

### 3. 今後の展開

本研究成果は、理論研究の側面が大きな割合を占める。しかし、現実世界は縮退数の小さなグラフが多く存在していることから、本研究で得られた知見、特に縮退性に着目したメタアルゴリズムは、内容に関する更なる精緻な確認が必要ではあるものの、学術や IT 技術の開発に資する重要な成果であると考えている。今後は、より実用に適したアルゴリズムの構築のために必要なことを、実データを基にして検討していく。

### 4. 自己評価

研究開始直後は進捗がなかなか出なかったが、2019 年に入りいくつかの成果を得ることができ、結果として 2 を除いた研究課題に関して、当初の目標通りの進捗を出すことができた。一方で、研究課題 2 については、他の研究者に一步遅れてしまう、成果に関する論文の採択にまでは至らなかったなど、反省すべき点も多い。また、期間全体を通して、他大学の研究者との交流や国際会議への聴講参加を通じての進捗が多かった。計算機実験を行わない予定だったため、研究費の大半をこれらの旅費のために利用させていただいた。従って、本研究成果は、AIP-PRISM の支援なしには実現し得なかったと思われる。

列挙分野において、これまで各個撃破的にアルゴリズムを開発していたが実際には共通する暗黙の技術が存在していた。研究課題 3 のメタアルゴリズム開発はその暗黙の技術を明示することを目的とし、それを達成することができた。全ての暗黙の技術が明確化されたわけで

はないが、今後はよりそのような研究成果が増えていくであろうことが予想される。また、研究課題 1 に関して、これまであまり研究が行われてこなかった、部分グラフと最適化の制約を同時に満たしたものの列挙に関するも推し進めることができたので、今後もこのような研究がより増えていくことが予想される。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Kunihiro Wasa, Katsuhisa Yamanaka, and Hiroki Arimura, "The Complexity of Induced Tree Reconfiguration Problems," IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, in press.
2. Kunihiro Wasa and Takeaki Uno, "An Efficient Algorithm for Enumerating Induced Subgraphs with Bounded Degeneracy," In Proc. 12th Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications (COCOA 2018), Lecture Notes in Computer Science, Vol 11346, December 15--17, 2018, Atlanta, Georgia, USA.
3. Kazuhiro Kurita, Kunihiro Wasa, Hiroki Arimura and Takeaki Uno, "Efficient Enumeration of Dominating Sets for Sparse Graphs," In Proc. 29th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2018), December 16--19, 2018, Jiaoxi, Yilan County, Taiwan.
4. Kazuhiro Kurita, Kunihiro Wasa, Takeaki Uno, and Hiroki Arimura, "An Efficient Algorithm for Enumerating Chordal Bipartite Induced Subgraphs in Graphs," 第 171 回アルゴリズム研究会, 大阪府立大学 I-site なんば, 大阪府, 2019 年 1 月 30 日.
5. 伝住周平, 堀山貴史, 栗田和宏, 中畑 裕, 鈴木浩史, 和佐州洋, 山崎一明, "非同型な 2 端子直並列グラフの列挙とランダムサンプリング," 信学技報, vol. 118, no. 216, COMP2018-17, pp. 55-62, 2018 年 9 月.

### (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. 栗田 和宏, 和佐 州洋, 宇野 毅明, 有村 博紀, "固定クリーク数グラフに対する誘導木のならし定数時間列挙," 冬の LA シンポジウム, 京都大学, 京都, 2019 年 02 年 05 日.
2. 和佐州洋, "簡単に列挙できる部分構造について," 基盤(S) 離散構造処理系プロジェクト「2018 年度 秋のワークショップ」, 登別市, 北海道, 2018 年 11 年 25 日.