

**「知の創生と情報社会」研究領域 領域活動・評価報告書**  
**－平成25年度終了研究課題－**

研究総括 中島 秀之

## 1. 研究領域の概要

本研究領域は、多様もしくは大規模なデータから、有用な情報である「知識」を生産し、社会で活用するための基盤的技術となる研究を対象としている。

具体的には、大規模データを処理するための革新的な技術、統計数理科学を応用した分析・モデル化技術、あるいは実社会から得られる多様なデータを構造化・分析して知識を抽出する技術、センサによる情報取得やシミュレーション結果等の複数のリソースから新たな知識を創出する技術などの基盤技術に加えて、獲得した知識を実社会に適用するために必要とされる、シミュレーション、データの可視化、新しい情報社会の仕組みを支える応用技術などに関する研究が含まれる。

## 2. 事後評価対象の研究課題・研究者名

件数：9件

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

## 3. 事前評価の選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

- 1) 選考は、「知の創生と情報社会」領域に設けた選考委員9名の協力を得て、研究総括が行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。
- 3) 選考に当たっては、さきがけ共通の選考基準(URL：<http://www.jst.go.jp/pr/info/info666/shiryoku4.html>)を重視した。

## 4. 事前評価の選考の経緯

選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。

- 書類選考において1提案につき3名の選考委員が査読評価を行なう。
- 選考委員の所属機関と応募者の所属機関が異なるよう配慮し、書類選考は利害関係者を査読対象とせず、面接選考において利害関係者は席を外して実施する。
- 査読結果に基づき、3年型と5年型に分けて、事前に総括と事務局とで順位付けを施す。
- 面接選考では可能な限り多くの研究提案を直接聴取し、質疑応答する。特に5年型については、初年度の5年型に相応しい提案か否か(研究構想が本領域の趣旨に合っているだけでなく、研究期間の後半あるいは期間終了後において、実社会での応用がしっかりと考えられているかどうか)について質疑する。

選考	書類選考	面接選考	採択数		
			8件	内訳	3年型
対象数	78件	24件			

( )内は大挑戦型としての採択数。

※本領域においては、5年型、大挑戦型を公募しなかった。

## 備考:

- 1)平成22年度採択課題のうち、以下は今年度事後評価対象としない。

・大武 美保子研究者

研究期間が5年で、今年度終了しないため。今年度は中間評価を実施する(中間評価結果：<http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/evaluation/mid-term/index.html>.)

2) 加えて、以下を今年度の事後評価対象とする。

- ・大羽 成征研究者（平成20年度採択）  
研究期間が5年で、今年度終了するため。
- ・島野 美保子研究者（平成20年度採択）  
ライフイベントによって研究を一時中断したため。

## 5. 研究実施期間

平成22年10月～平成25年3月（3年型）

平成20年10月～平成25年3月（5年型）

## 6. 領域の活動状況

- 領域会議
  - － 7回実施(第三期生の場合)。
- 研究成果報告会(JST 東京本部 サイエンスプラザ)実施(平成25年12月13日)
  - － 「しみわたる情報技術・にじみ出す知 ― いま、収穫の時！」をテーマに実施。
- 研究総括の研究実施場所訪問、他
  - － 研究総括は、公立はこだて未来大学内(函館)、技術参事および事務参事は平成20年6月始～平成23年11月末まで科学技術振興機構三番町ビル内、平成23年11月末以降は科学技術振興機構東京本部別館内にて、バーチャル領域事務所態勢で業務を実施。
  - － 研究場所訪問は、「サイトビジット」とも呼び、研究環境が十分であるかどうかの確認と、総括が上司の方にご挨拶することが目的。第三期生について、平成22年10月から12月にかけて、東京、柏、大阪、仙台、筑波、高知に8名の研究者および上司の方と面談、研究者転勤に伴い、平成24年4月に長野、平成24年5月に千葉に、それぞれ1名の研究者および上司の方と面談。また、この他、学外研究場所実施場所を持つ1名については、平成23年3月に、東日本大震災で研究実施場所が被災し、仮の研究実施場所に移動した1名については平成23年4月に、技術参事が研究場所の訪問を実施。
  - － 当領域では、研究者間のコラボレーションを重視しており、その一環として、サイトビジットの他、研究者の希望や状況把握のため、領域事務所単独での研究者訪問(レクチャービジット)を実施、また、平成22年6月以降、研究者が自発的に「オフ会」という交流会を開催し、積極的なコラボレーションを図っている。
- 他研究領域とのコラボレーション
  - － CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域、さきがけ「情報環境と人」研究領域と合同で、シンポジウム「情報学による未来社会のデザイン～健全でスマートな社会システムに向けて～」を企画、第一回「大量データにもとづく未来社会のデザイン」を平成24年11月8日に、第二回「情報学が拓くヘルス&ウェルネス」を平成25年10月15日に開催、本領域から、数人の研究者が研究発表を行っている。

## 7. 事後評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、評価会(研究報告会、領域会議等)での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

(事後評価の流れ)

平成25年12月	評価会(成果報告会)開催
平成26年2月	研究総括による事後評価
平成26年3月	被評価者への結果通知

## 8. 事後評価項目

- (1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況
- (2) 得られた研究成果の科学技術および社会への貢献

## 9. 評価結果

第三期生9名のうち1名は5年型であり、今回は中間評価である。3年型第三期生8名、5年型第三期生1

名とライフイベントによる休職からの復帰者1名の総勢9名が今回の評価対象である。

基礎研究分野では、河原吉伸研究者、鹿島久嗣研究者、要素技術分野では大羽成征研究者(5年型一期生)、山際伸一研究者、山崎公俊研究者が見るべき成果を挙げている。特に、山際伸一研究者は、第二期生の坂本比呂志研究者との共同研究で自己の研究課題をさらに実り多いものとしている。その他の研究者も、ほぼ当初研究計画を達成している。今期は成功であったと考える。

#### 1. 大羽 成征 研究者「仮説世界と物理世界の相互浸透モデリングによる知の創生」(5年型)

仮説世界と物理世界の相互浸透モデリングというユニークな視点に立ち、個別仮説ベースの仮説検定とベイズ的な事前知識(物理モデル)を融合させようという課題である。5年間で医療分野等の実際のフィールドで使われる伝統的な検定論と、発見的なベイズ的アプローチの間を埋める実際的かつ統一的な理論が得られることを期待していた。

理論的成果として、相互浸透型の構造を与えることで、その外側で行う多重検定の検出力を改善することができることを示した。また、実問題応用として、遺伝子発現量に基づく癌悪性度関連遺伝子の検出力の大幅改善、ベイズ的階層モデルに基づく検定統計量のデザインにより、遺伝子ノックアウトの有無に基づく相違の検出力向上等、医療分野での検出力向上に大きく寄与している。

当初、さきがけ期間中に取り掛かりたいとしていた複雑な構造をもつ物理世界を背景として持つ、ヒトの身体運動や脳機能等のモデリング研究については、手がつかなかったとのことであるが、相互浸透型モデリングの原型モデルの姿を明確にし、多くの実世界問題への応用例を示したことを高く評価したい。

#### 2. 島野 美保子 研究者「大規模画像データの潜在情報抽出に基づく画像生成」

大規模画像データを使った物理・統計的画像モデリングと個別の静止画像から得られる情報とを組み合わせ、「反射モデル技術を用いた画像認識」という独自の技術に基づき、少数の画像から任意の状況下での画像合成技術を提案していた。

物理モデルと非制御下の画像・映像データの統計的学習の融合により、高時間分解能映像の生成、高画質化の統合と学習辞書の強化、高画質化によって得られる情報の映像圧縮への利用の面で、画質を向上させた画像・映像の生成を実現している。

さきがけ期間を通じ、映像において露光時間を分割するようにフレーム画像を分解するという独自の技術を磨き上げ、コンピュータビジョン分野の最新技術を集約した書籍への記事掲載、国際会議での採択等に至ったことは評価できる。

#### 3. 梅谷 俊治 研究者「問題構造の解析に基づく組合せ最適化アルゴリズムの自動構成」

問題データからアルゴリズムを組み立てる手法の研究である。ジェネリックプログラミングの視点から組合せ最適化アルゴリズムを使った問題定式化をサポートするというアイデアである。

当初の目標通り、個別の入力データからアルゴリズムの性能向上に役立つ情報を発見し、アルゴリズムの設定や構成を自動的に決定する枠組みに基づいて高性能な局所探索法を実現している。現状で最も高性能な混合整数計画ソルバーを上回る性能を持つ組合せ最適化アルゴリズムを実装しており、公開予定である。この分野に大きなインパクトを与える成果であり、高く評価できる。

#### 4. 鹿島 久嗣 研究者「高精度でスケーラブルな多項関係予測の実現」

高精度でスケーラブルな高次関係予測手法の開発と応用の研究である。

さきがけ期間を通じ、「関係データ」に焦点を当て、主にテンソル分解と呼ばれる関係のモデリング技術に着目することで、大規模な関係データに対して高速かつ高精度で予測を行うことのできる手法を開発している。

当初目標のうち、要素技術の統合によるツール化、実応用において大きなインパクトをもたらすまでには至っていないが、疎なデータから多数のオブジェクト間関係を高精度・高速に予測するという要素技術的な課題についてはほぼ解決でき、国際会議における採択や受賞という形で高い学術的評価を得ている。この点については、評価できる。

#### 5. 河原 吉伸 研究者「組合せ的計算に基づく超高次元データからの知識発見」

劣モジュラ性を利用して大域的な最適性を持った組合せ(厳密な最適解)を見つける効率的なアルゴリズムを構築するという研究である。

効率的に解ける問題に対する高速アルゴリズムの構築では、劣モジュラ性を用いた構造正則化学習にお

ける高速アルゴリズムを開発している。これは、遺伝子データ解析や脳画像データ解析など、多くの応用への展開へとつながっている。また、劣モジュラ性に基づく近似的解法を株式ポートフォリオ選択に適用し、ポートフォリオに含まれる銘柄数が従来よりも小さいにもかかわらず、同等の性能を実現するポートフォリオの構成が可能であることを確認している。計算困難な問題において大域的な解を探索する方法に関しては、大域最適化のアルゴリズムに加え、多項式時間内に大域解の一部の情報を計算可能なアルゴリズムなど、理論的にも実用的にも有用な方法論がいくつか得られている。特にこれに関しては、国際的にも高い評価を受けており、高く評価したい。

#### 6. Alastair Butler 研究者「自然言語テキストの高精度で頑強な意味解析とその応用」

構文解析と直結したスコープ制御理論に基づく意味解析を行い、記述論理に基づく知識表現につなげようという研究である。日常生活で使われている無制約の自然言語処理テキストから、高精度の意味表示を自動的に得るための頑強な方法を開発することが目的である。

研究期間中、自然言語の文の意味解析を行うための形式言語理論のスコープ制御理論(Scope Control Theory)を実装した意味評価システムに対して、英語や日本語の統辞解析器による表層統語解析結果を入力することによって、正確で深く、カバー率も高い意味表示の出力を可能にした。また、日本語テキストに統辞および意味解析情報を付加したツリーバンクを完成させる予定であり、生の日本語テキストから意味表示までに至るまでの「パイプライン」を構築できたことになる。これらは公開予定であり、主要目的を達成していると考えられる。

#### 7. 浜中 雅俊 研究者「計算論的メディア操作の形式化」

音楽を題材に、メディアデザインの操作を束演算の組み合わせで表現して専門家の操作事例の蓄積・再利用を可能にするシステムを構築するという研究である。

音楽については、音楽理論 GTTM のポリフォニーへの拡張を果たし、構造木からなるモデルの領域上で類似した楽曲が、人間にも類似した楽曲に感じられることを確認し、音楽構造解析データと解析データを作成するための分析ツールを公開するに至っている。また、音楽以外への適用拡大として、映画とディスカッションにメディアデザインの操作を適用し、映画については意味木を用いた操作に適したメディアであることを確認できたが、ディスカッションについては期間内に成果は得られていない。全体として、課題は達成していると考えられる。

#### 8. 山際 伸一 研究者「高性能ストリームコンピューティング環境の構築」

ストリーム・コンピューティングのパラダイムを採用し、大量のデータフローを効果的に扱うための高性能でコンパクトなハードウェアシステムを構成できる、ハードウェア化まで一貫している基盤技術を開発するという研究である。

研究期間を通じ、アクセラレータプログラム向けの高生産性プログラミング環境の構築、パイプライン実行の実行順序付けと並列性抽出による高速実行手法、コンパクトなパイプラインハードウェアを出力するコンパイラの開発を行っている。これらによって、大量のデータストリームを扱うシステムをアクセラレータを使って高速にシミュレーションし、ハードウェアを合成するコンパイラを介して、ハードウェアを合成でき、さらに、その合成されたハードウェア間で移動するデータストリームを高速伝送することが可能になっており、目標を達成している。また、二期生の坂本比呂志研究者のデータ圧縮技術を取り入れ、当初予定外のストリームデータ圧縮ハードウェアも開発しており、製品化に向けた取り組みを行っており、評価する。

#### 9. 山崎 公俊 研究者「能動センシングによる日用柔軟物の情報知識化とその応用」

日用柔軟物の扱いを可能にするための知能システムを確立するという研究である。従来困難だったロボットによる柔軟物の取り扱いに挑戦している。

多種多様な布製品に関するセンサデータから特徴量記述を行い、シワや布地など、布製品ならではの性質に着目することで、処理速度や識別率などの点で従来手法よりも高性能な手法を開発している。また、ロボティクス応用についても、生活環境下で布製品を拾い集める、両手で布製品を畳む、座位にある人にズボンをはかせる等の作業において実現可能性を示した。日常生活でよく見られる「無造作に置かれた状態」の布製品を対象とした認識手法について、大きく進歩させた点を高く評価する。

#### 10. 評価者

研究総括 中島 秀之 大学 公立はこだて未来大学・学長

領域アドバイザー(五十音順。所属、役職は平成 25 年 3 月末現在)

麻生 英樹 産業技術総合研究所 知能システム研究部門・主任研究員  
有村 博紀 北海道大学 大学院情報科学研究科・教授  
高野 明彦 国立情報学研究所 連想情報学研究開発センター・センター長/教授  
林 晋 京都大学大学院 文学研究科・教授  
林 幸雄 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科・准教授  
樋口 知之 統計数理研究所・所長  
堀 浩一 東京大学 大学院工学系研究科・教授  
安田 雪 関西大学 社会学部・教授  
鷲尾 隆 大阪大学 産業科学研究所・教授

(参考)

件数はいずれも、平成 26 年 3 月末現在。

(1) 外部発表件数

	国内	国際	計
論文	7	37	44
口頭	73	62	135
その他	4	3	7
合計	84	102	186

(2) 特許出願件数

国内	国際	計
6	1	7

(3) 受賞等

- ・鹿島 久嗣  
情報処理学会 平成 23 年度山下記念研究賞(H24.3)  
マイクロソフトリサーチ マイクロソフトリサーチ日本情報学研究賞(H24.6)  
船井情報科学振興財団 船井学術賞(H25.4)
- ・河原 吉伸  
計測自動制御学会 優秀講演賞(H23.7)  
人工知能学会 2011 年度人工知能学会論文賞(H24.4)
- ・Alastair Butler  
Emerald Emerald Literati Network Award 2011 Awards for Excellence (H23.4)
- ・山崎 公俊  
計測自動制御学会 優秀講演賞 (H23.8)  
計測自動制御学会 SI 部門若手奨励賞(H24.12)

(4) 招待講演

国際 12 件  
国内 11 件

別紙

「知の創生と情報社会」領域 事後評価実施 研究課題名および研究者氏名

(3年型)

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(平成26年3月末現在) (応募時所属)	研究費 (百万円)
島野 美保子 (専任)	大規模画像データの潜在情報抽出に基づく画像生成 (東京大学生産技術研究所)	東京大学生産技術研究所 研究員 (同上)	34
梅谷 俊治 (兼任)	問題構造の解析に基づく組合せ最適化アルゴリズムの自動構成 (大阪大学大学院情報科学研究科)	大阪大学大学院情報科学研究科 准教授 (同上)	38
鹿島 久嗣 (兼任)	高精度でスケーラブルな多項関係予測の実現 (東京大学大学院情報理工学系研究科)	東京大学大学院情報理工学系研究科 准教授 (同上)	24
河原 吉伸 (兼任)	組合せ論的計算に基づく超高次元データからの知識発見 (大阪大学産業科学研究所)	大阪大学産業科学研究所 准教授 (同助教)	37
Alastair Butler (専任)	自然言語テキストの高精度で頑強な意味解析とその応用 (東北大学高等教育開発推進センター)	東北大学高等教育開発推進センター 研究員 (同上)	30
浜中 雅俊 (兼任)	計算論的メディア操作の形式化 (筑波大学大学院システム情報工学研究科)	筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師 (同上)	32
山際 伸一 (兼任)	高性能ストリーム・コンピューティング環境の構築 (筑波大学システム情報系)	筑波大学システム情報系 准教授 (高知工科大学情報学群 准教授)	40
山崎 公俊 (兼任)	能動センシングによる日用柔軟物の情報知識化とその応用 (信州大学工学部)	信州大学工学部 助教 (東京大学 IRT 研究機構 研究員)	40

(5年型)

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(平成26年3月末現在) (応募時所属)	研究費 (百万円)
大羽 成征 (兼任)	仮説世界と物理世界の相互浸透モデリングによる知の創生 (京都大学大学院情報科学研究科)	京都大学大学院情報科学研究科 講師 (同上)	58

# 研究報告書

## 「仮説世界と物理世界の相互浸透モデリングによる知の創生」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 20 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 大羽 成征

### 1. 研究のねらい

本研究課題の対象は、観測データに基づいて世界を理解するために行われる統計的モデリングの方法論全般である。個々具体的な問題をワークベンチとしながら、抽象的なフレームワークとしての新機軸を打ち出すことをねらう。

観測に基づいてモデルを現実の物理世界に近付けることを目的とするとき、その評価は近未来予測値の誤差で行われる。例えば、データ同化と呼ばれる確率的モデリングの方法論がその典型例であり、密度・精度の限られた観測のもとで気象予測成果を上げるなどの効果が知られている。一方で、モデリングの主要目的が、科学的インパクトの大きな「発見」を行うことである場合(典型的にはシステム生物学・医学の分野におけるモデリング)には、その評価基準は統計的仮説の検定精度(第一種・第二種過誤)である。主要目的が異なればそれに応じてモデリング方法論も異なってしかるべきである。

そこで、本研究課題では、科学的インパクトのある発見と統計的検定精度を目的とする場合の物理世界モデリングの方法論を考える。まず複雑な構造を持った仮説がある場合の構造利用の方法をさぐる。これを「仮説世界ベースモデリング」と呼ぶ。次に物理世界モデルからのフィードバックによって仮説の構造が変化する場合を想定した方法を探る。これを「相互浸透モデリング」と呼ぶ。

またチャレンジングな実問題におけるモデリング研究のケーススタディを行うなかで本コンセプトの有効性を実証し、仮説世界と物理世界との間の相互浸透の様々な様式を見だし、さらには科学的な「知」の創出過程に関する新しい知見に至ることをねらう。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

理論的成果の第一は、多重検定におけるオンデマンド統計量の構成方法[1]の提案である。多重検定とは、多数の帰無仮説のもとで統計的仮説検定を同時に行う問題のことであり、仮説世界ベースモデリングの理論的基盤である。複数検定の根拠となる観測データが共通の物理世界を対象にしているとき、これを利用した検出力向上の余地がある。物理世界の確率的観測モデルの十分統計量を用いて検定統計量デザインすることで、検出力が最大化できることを示した。

多重検定問題では、検定対象となる複数仮説が、背景に同一の物理モデルを共有している場合が多い。そこで、物理モデルに含まれる未知モデルパラメタの推定結果を、仮説検定の問題設定にフィードバックさせることが合理的である。物理世界を構成する、未知変数と未知パラメタと、仮説世界を構成する隠れ変数とを同時にベイズ推定する相互浸透型の構造を与えることで、その外側で行う多重検定の検出力を改善することができることを示した。

実問題応用として、以下のような成果を得た。

遺伝子発現量に基づく癌悪性度関連遺伝子の検出力を大幅に改善できることを示した[2]。これは多次元のオンデマンド特徴量を用いることで、癌に関係ない遺伝子発現変動の情報を活用できるようになったことによる。

マウス胚の体節形成システムを調べる共同研究において、ベイズ的階層モデルに基づく検定統計量をデザインし、遺伝子ノックアウトの有無に基づく相違の検出力向上に貢献した[3]。

血中に溶け出したがん細胞由来 DNA を次世代シーケンサによって測定することによる新しい侵襲性の低い肺癌診断法を開発する共同研究において、検出精度を高めた[4]。

神経細胞のカルシウムイメージング時系列データから、ベイズ的系列モデルに基づくオンデマンド統計量によって、蛍光量時系列に見られる神経スパイクの検出精度を改善した。また、こうして得られた複数神経細胞のスパイクデータから、細胞間の機能的結合(グレンジャー因果)を検出した。このさい、オンデマンド統計量に基づく経験ベイズ検定を使用することで、FDR(false discovery rate)を制御しつつ検出力を改善できることを示した[投稿中]。

## (2) 詳細

研究テーマ A「仮説世界ベースモデリングおよび相互浸透モデリングの理論的基盤の確立」

仮説世界ベースモデリングの理論的基盤として、多重検定の性能を最適化するオンデマンド統計量の構成方法[1]を提案した。多重検定とは、多数の統計的仮説検定を同時に行う問題の総称である。統計的仮説検定の目的の第一は、帰無仮説が成立しているにもかかわらず、対立仮説を誤って採択してしまう「第一種過誤」の確率を、予め定めた値(有意水準)未満に抑えること。目的の第二は、第一の目的が果たされている保証のもとで、なお帰無仮説を棄却してインパクトのある発見を主張できる確率「検出力」を高めることである。多重検定でもこれらの目的に違いは無いが、(a) 第一種過誤を定義するさいに多重検定特有の補正を必要とすることと、(b) 検出力を高めるために、検定で用いる情報に共通部分があることを利用した工夫の余地がある。(a)を満たしつつ(b)を実現するための方法として、最適統計量の理論(Storey ら, 2006)が知られていたが、真の物理世界モデルに対応する尤度関数のパラメタが完全に既知であるとする実用上非現実的な仮定が必要とされており、近似の精度は悪かった。オンデマンド特徴量の理論[1]は、尤度関数の十分統計量を検定統計量として使い、経験ベイズ検定を併用することで、共通情報を最大限に用いて検出力を最大化できることを示した。

相互浸透型モデリング構想の射程は広いので、まずは簡単な原型モデルを提案した。多重検定問題では、検定対象となる複数の仮説が、背景に同一の物理モデルを共有している場合が多い。そこで、物理モデルに含まれる未知モデルパラメタの推定結果を、仮説検定の問題設定にフィードバックさせることが合理的である。これを、図 1 のような隠れ変数モデルで表現し、相互浸透型モデル原型と呼ぶことにした。物理世界を構成する、未知変数  $X$  と未知パラメタ  $\theta$ 、仮説世界を構成する隠れ変数  $B$  とを同時にベイズ推定することで、その外側で行う多重検定  $h$  の検出力を改善できることを示した。



$$Y_{ij} = U_i \hat{B}_j + E_{ij}$$

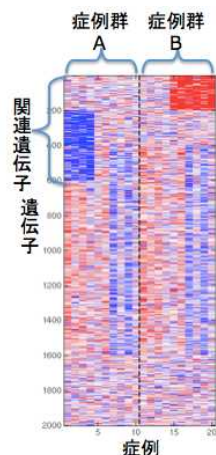
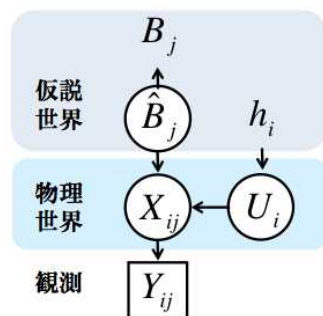


図 1: 相互浸透型の単純な原型(左)とこれが想定している多重検定問題(右)

研究テーマ B「仮説世界ベースモデリングと相互浸透モデリングの実世界問題への応用」

[2] 因子統計量に基づく 2 標本平均差検定の検出力改善

マイクロアレイなどの方法による遺伝子発現量の網羅的測定に基づいて癌悪性度関連遺伝子を見つけたい。このとき、悪性症例と良性症例の間で各遺伝子の発現量の平均値が異なることを、それぞれの遺伝子で検定する多重検定を適用するのが標準的な方法である。しかし、厳密な統制に基づく 2 標本検定と違い、臨床症例群間の比較では、癌悪性度以外の様々な特徴量を背景に含むため、比較対照群毎の平均値で説明できない様々な背景変動因子の影響を含んでおり、これに基づく強い検定間相関が想定される。図 1(右)はその典型を示した人工データである。

本研究では、こうした背景変動因子を陽に取り入れた多次元の因子統計量を検定統計量として用い、経験ベイズ検定法を適用した。これを用いた検定により、背景変動因子を顕著に含むデータにおける関連遺伝子検出力が顕著に改善された(図 2)。これは成果[1]のオンデマンド統計量デザインポリシーに従った応用の成果である。

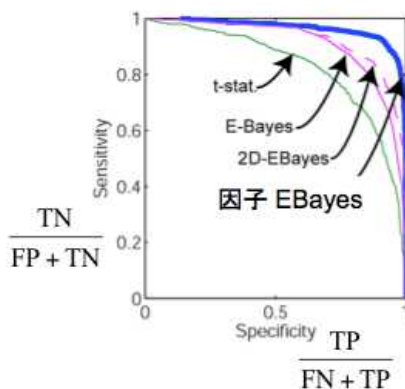


図 2 背景変動因子が存在するとき、オンデマンド統計量に基づく経験ベイズ法(因子 EBayes)による関連遺伝子検出力は、他の方法による検定によるものよりも顕著に高い。

### [3] マウス胚の体節形成システムにおける遺伝子ノックアウトの有無に基づく相違の検出力向上

マウスの胚は、その発生時に生化学反応システムが規則正しいリズムを刻むことによって、規則正しい体節構造を作っていると考えられており、そのシステムにおいて *Nrarp* 遺伝子が大事な役割を果たしていると考えられている。これを検証するために、*Nrarp* 遺伝子をノックアウトしたマウスとそうでないマウスの間で、特定タイミングにおける体節数の平均に有意な差があることを示した。このさい、ベイズ的階層モデルに従う特別な統計的検定法をデザインして用いた。

マウス胚の体節数データは、複数母胎それぞれ複数の胎児について計測したものである。受精後の時間経過を揃えたとしても、マウスの胚の成長度は個体間である程度ばらつく。また個体間のばらつきは、母胎にも依存する。そこで、母胎を同じくする胎児の中で *Nrarp* 遺伝子ノックアウトの有無による体節数の差を比較するべく、ベイズ的階層モデルを立て、これに基づく検定統計量をデザインすることで検出力を高めた。なお、あえてこうした構造を無視した単純な 2 標本検定を同データに適用した場合には、有意差は無かった。

### [5] 次世代 DNA シーケンサによる低浸襲肺癌診断法開発と、そのための相互浸透型モデリング

分子標的薬イレッサは EGFR 遺伝子に変異のある肺がん患者に選択的に投与されることで初めて治療効果が期待できる抗がん剤であるが、がん組織採取による遺伝子変異の検査は患者の負担が大きい。そこで血液検査など低浸襲検査による代替が可能であれば、医療に対する貢献は大きい。本研究では、次世代 DNA シーケンサによる DNA カウントを用いた血液中残渣 DNA に含まれる、ごく微量の腫瘍由来 DNA から EGFR 変異の検出法を開発した。

大羽は、次世代シーケンサ特有のノイズ要因に基づく帰無仮説モデリングを行い、保守的な検出基準をデザインする箇所で本研究に貢献した。

## 3. 今後の展開

オンデマンド統計量および相互浸透型モデルに基づく多重検定は、多くの要因が複雑に絡み合う現実世界の観測から知識創生してゆくための基盤技術になる。相互浸透型モデルについては、原型を発展させ、より複雑な基礎方程式を含むような物理世界モデルとドッキングした場合の挙動を調べてゆきたい。

## 4. 評価

### (1) 自己評価

仮説世界ベースモデリングの構想についてはオンデマンド統計量のアイデアを与え、相互浸透型モデリングの構想については原型モデルの姿を明確にするところまでを、さきがけ研究期間に達成し、また多くの実世界問題への応用例を示せたことに満足している。

一方で、複雑な構造をもつ物理世界を背景として持つ問題(ヒト身体運動や、ヒト脳機能)におけるモデリング研究については、まだ形になっていない。当初構想の中にある新しい世界観に、社会的インパクトを伴わせるためには、こうした難しい問題をスッキリと解くデモンストレーションを重ねてゆくことが必要である。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

仮説世界と物理世界の相互浸透モデリングというユニークな視点に立ち、個別仮説ベースの仮説検定とベイズ的な事前知識(物理モデル)を融合させようという課題である。5年間で医療分野等の実際のフィールドで使われる伝統的な検定論と、発見的なベイズ的アプローチの間を埋める実際的かつ統一的な理論が得られることを期待していた。

理論的成果として、相互浸透型の構造を与えることで、その外側で行う多重検定の検出力を改善することができることを示した。また、実問題応用として、遺伝子発現量に基づく癌悪性度関連遺伝子の検出力の大幅改善、ベイズ的階層モデルに基づく検定統計量のデザインにより、遺伝子ノックアウトの有無に基づく相違の検出力向上等、医療分野での検出力向上に大きく寄与している。

当初、さきがけ期間中に取り掛かりたいとしていた複雑な構造をもつ物理世界を背景として持つ、ヒトの身体運動や脳機能等のモデリング研究については、手がつかなかったとのことであるが、相互浸透型モデリングの原型モデルの姿を明確にし、多くの実世界問題への応用例を示したことを高く評価したい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. Oba, S. and Ishii, S. Optimal Sufficient Statistics for Parametric and Non-Parametric Multiple Simultaneous Hypothesis Testing. The International Journal of Biostatistics. (2009), 5, 1, Article 20.   |
| 2. Oba, S. and Ishii, S. Differential gene detection incorporating common expression pattern. Journal of Physics, Conference Series. (2010), 197(012007).  |
| 3. Kim, W., Matsui, T., Yamao, M., Ishibashi, M., Tamada, K., Takumi, T., Kohno, K., Oba, S., Ishii, S., Sakumura, Y., and Bessho, Y. The period of the somite segmentation clock is sensitive to Notch activity. Molecular Biology of Cell. (2011), 22(18), 3541-3549.                              |
| 4. Takahashi, N., Oba, S., Yukinawa, N., Ujita, S., Mizunuma, M., Matsuki, N., Ishii, S., and Ikegaya, Y. High-speed multineuron calcium imaging using Nipkow-type confocal microscopy. Current Protocols in Neuroscience, (2011) 2:Unit2.14.  |
| 5. Kukita, Y., Uchida, J., Oba, S., Nishino, K., Kumagai, T., Taniguchi, K., Okuyama, T., Imamura, F., and Kato K. Quantitative identification of mutant alleles derived from lung cancer in plasma cell-free DNA via anomaly detection using deep sequencing data. PLoS ONE. (2013), 8(11): e81468. |

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:0件

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Kouno, M., Nakae, K., Oba, S., and Ishii, S. (2012) Microscopic image restoration based on

tensor factorization of rotated patches. International Symposium on Artificial Life and Robotics, 902–905.

2. Aki, S., Oba, S., Nakae, K., and Ishii, S. (2012) A sparse random method to estimate neuronal structure from spike sequence. International Symposium on Artificial Life and Robotics, 718–721.

# 研究報告書

## 「大規模画像データの潜在情報抽出に基づく画像生成」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 20 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 島野 美保子

### 1. 研究のねらい

人間の目に直接は見えないものを見る技術が実現するならば、我々は何を見たいと思うか。見るターゲットは、自ずと、個人で容易に詳細を観察できる物ではなく、関心のある物や遠く離れたあんな場所のこんな状況等になるだろう。ただし、「もっと明るい画を見たい」、「もっとぶれの少ない画を見たい」、「もっと詳細に見たい」等、ユーザの所望する様々な撮影条件における物体の見えを、個人が容易に観測することは難しい。そこで、ユーザ本人による撮影条件の制御はできないけれども、web 上にあるような多様で大量の画像や映像データを利用することにより、大規模標本から情報を抽出し、対象画像の不定性や欠落情報を補完する技術が有効であると考え。これらは、従来のように特殊な撮影システムを使用して撮影条件を制御することなく、新たな情報・知識の創出を実現する有用な技術である。本研究では、上記のような非制御下の画像・映像データを利用し、ユーザの所望する元画像・映像の画質を向上させた画像・映像を生成する技術の確立を目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

物理モデルと非制御下の画像・映像データの統計的学習の融合により、画質を向上させた画像・映像の生成を実現した。本研究の主な成果は、大きく下記3つに分けられる。

- 1) 高時間分解能化映像の生成
  - 2) 高画質化の統合、および学習辞書の強化
  - 3) 高画質化によって得られる情報の映像圧縮への利用
- 以下にそれぞれの詳細について述べる。

#### (2) 詳細

##### 研究テーマ A「高時間分解能化映像の生成」

web 上での映像ストリームの増加、個人撮影も簡便になった昨今の状況を鑑み、映像をターゲットにした「映像の高画質化」に着目した。映像の高画質化としては2つの捉え方ができる。即ち、画質を向上させたフレーム画像の連続とみなし、フレーム単位で静止画像ベースに考える方法と、映像固有の画質改善をする方法である。今回はこの映像固有の画質改善を試み、「動きぶれを含む映像から、動きぶれを低減した高時間分解能映像の生成」に取り組んだ。

高フレームレート化には、フレーム補間と高時間分解能化の2種類がある(図1)。フレーム補間は、1フレーム時間よりも短い露光時間で撮影した短露光映像に対し、補間フレームを生

成する従来手法である。十分な光量がある晴れた日等は、このような短露光で動きぶれを少なく撮影することが可能である。一方、曇りや屋内、夜間のシーンでは、光量が少なく、露光時間を長くとした連続露光で撮影するため、どうしても動きぶれを含む映像になる場合が多い。こうした連続露光映像を高フレームレート化するには、1つのフレームを分解して高時間分解能化をする必要がある。従来のフレーム補間方式では実現できない、露光時間を分割するようにフレームを分解することにより、低時間分解能映像から動きぶれを低減した高時間分解能映像を生成するアルゴリズムを提案した。

低時間分解能フレームから高時間分解能フレームへの分解の仕方には、無数の解が存在する。本研究では「高時間分解能映像の動きぶれは、低時間分解能映像の動きぶれと自己相似の関係にある」という点に着目し、この高時間分解能化におけるフレーム分割の不定性を、自己相似性を利用することにより解決することを目指した。まず、異なる時間分解能映像間における自己相似な事例データに基づく事前確率を導入し、且つ、生成した映像と入力映像との整合性がとれるよう、各フレームの露光時間は連続的であるという映像復元条件を課すこととした。このもとに、最大事後確率推定によって高時間分解能映像の復元を実現した。実映像を用いた実験により、提案手法で、元の低時間分解能映像との整合性を崩さずに、動きぶれを低減した高時間分解能映像を復元できること、また従来のフレーム補間手法に比較して精度良く復元することに成功した(図2)。

#### 研究テーマB「高画質化の統合、および学習辞書の強化」

時間方向に加え、同時に空間方向の超解像化をも行う高解像度化を実現した。更に、上記の新しい高時間分解能化および空間高解像度化アルゴリズムに加えて、複数枚の候補パッチを利用した古典的な高解像度化との組み合わせも試行した。これは、自己相似性を利用した高解像度化と古典的な高解像度化の二段階の高解像度化処理を行うことによって、高解像度化の拡大率を数倍向上させることを目的として実装したが、処理時間の増加に比較して格段の精度向上には至らなかった。また、高階調化への拡張も行い、且つ高時間分解能化、空間高解像度化、高階調化という複数の高画質化を同時に行える統合化を実現した。

また、大量の画像や映像を事例データとして利用する場合、データベース量が多くなればなるほど精度の向上も期待できるが処理時間も増加する。上記高画質化アルゴリズムにおいて

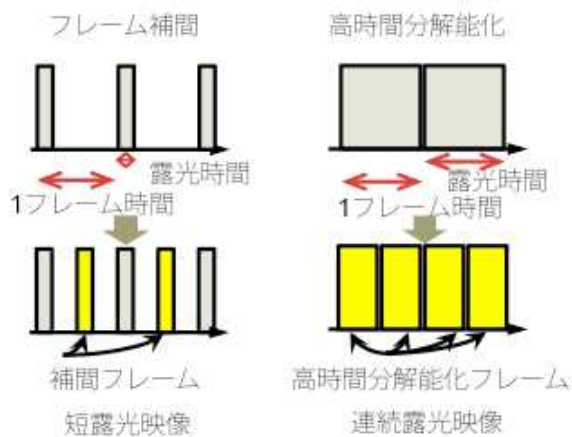


図 1

PSNR (Peak signal-to-noise ratio)の比較

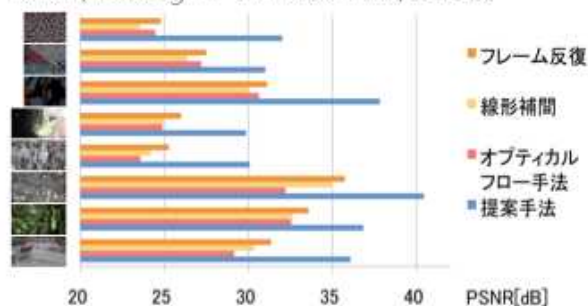


図 2

も、自己相似事例データベースに基づく事前確率を求める際のk最近傍探索として、高速化した近似最近傍探索アルゴリズムを使用する等の工夫を行っている。今回は更に、以下の2項目についてアルゴリズムの改良を行った。1つは、画像の濃淡パターンそのものではなく、特徴量を抽出し利用する処理を、2つめは、学習アルゴリズムとして、基底の疎な線形結合によって表現できるスパースコーディングの導入を行った。これによって、より大量の画像や映像をデータベースとして利用することが可能になり、且つ推定処理において高速化を計ることが可能になった。

#### 研究テーマ C「高画質化によって得られる情報の映像圧縮への利用」

昨今、ユーザがサーバーからビデオストリーミングを受け取り、再生するというネットワークストリーミングが、著しく広がりつつある。このような状況で高時間分解能化を実現する場合、このネットワークストリーミングを担う映像符号化技術の利用は不可欠である。そこで、研究開始当初は考えられていなかった、高時間分解能映像における映像符号化技術の開発も研究課題に追加した。

従来の映像符号化は、元映像と同画質の映像を再生できるよう、画質劣化無く高効率に伝送することを目的とする。本研究提案は、これに対し、元映像が動きぶれを含むような低画質の映像であっても、ユーザ側には元映像よりも高画質の映像を提供するというものであり、初の試みである。伝送量には制限があるため、画質を改善しつつ高効率に伝送できるよう、トレードオフの関係にある符号量と画質を最適化する圧縮方法を提案した。

本研究では、フレーム毎に時間分解能と量子化パラメタ(QP)の最適な組み合わせを最短経路探索問題として求めるという方法を発案した。研究テーマ A で開発した異なる時間分解能映像間の特性である自己相似性を利用した高時間分解能化の技術と映像符号化技術を融合することにより、高い圧縮効率を実現した。更に、時間分解能とQPのコスト単調性に基づいた高速な探索を可能にした。実映像を用いた評価実験により、提案手法がPSNRで、その他の非適応的手法に比べて最大1.3dB上回ることを確認した。

### 3. 今後の展開

高画質化を行う学習アルゴリズムについては、検討の余地が残っている。具体的には、学習を行う際のより高画質化に有効で且つ効率的な特徴抽出方法、学習辞書の拡充方法、オンラインにおける辞書登録方法等があり、今後はこれらによる画質改善技術の性能向上に取り組む予定である。

高時間分解能映像における映像符号化についても、時間分解能によって最適化することの効果を確認できたため、今後はより個別の映像に合わせ、フレーム画像内のブロック単位で符号量と画質特性を最適化する方法について検討していく。また、時空間方向についても適応的に符号量と画質特性を最適化する方向性も有効と考える。今回は高時間分解能映像における映像符号化を提案したが、本研究を映像の画質改善に留まらず、より一般の画像処理や付随情報を利用する方法へと拡張することで、適用範囲が広がると考える。

実社会において、本研究の高画質化映像の生成、および高画質化映像の映像符号化について、例えば、skype等のインターネットテレビ電話、映像配信(災害時など低容量しか送れな

い状況等)、スマートフォン、監視カメラ、衛星映像等のような応用例が挙げられる。時々刻々と大量のデータのやりとりが行われている現在、本研究は、このような情報の大規模化と限られたハードやネットワーク容量とのせめぎ合いを解決する有効な手段になり得る。更に、上記の技術等によりデータ容量を節約することは、エネルギー資源の節約を考える上でも非常に重要であり、この点においても人類社会の役に立つ有意義な技術になると考える。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

映像の高時間分解能化を実現する物理モデルと非制御下の画像・映像データの統計的学習を融合した核となるアルゴリズムを提案できたことから、当初目的を達成したと考える。また、高時間分解能化を発展させ、空間高解像度化、高階調化、およびそれらを組み合わせた高画質化の統合へと拡げることができた。従来考えられていなかった、映像において露光時間を分割するようにフレーム画像を分解するという新しい問題に取り組んだ本研究が評価され、コンピュータビジョン分野の最新技術を集約した本”Advanced Topics in Computer Vision”(Springer)に掲載されるに至った。

アドバイザーの先生や領域メンバーとの交流を通じ、専門分野外にまで視野を広げられたことで、当初目標にとどまらず、画質改善映像の符号化という発展形へと進めることができた。本研究の映像符号化分野における新しい着想も認められ、主要国際会議での採択に至った。

高時間分解能映像の生成、及びそれらの映像符号化のどちらも、提案技術のみでなく、新たなパラダイムを創出したという着眼点も評価された点は満足している。今後も本研究によって得られた問題点を解決すべく、他研究分野との交流の継続により様々な観点から考えつつ、研究を続けていく所存である。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

大規模画像データを使った物理・統計的画像モデリングと個別の静止画像から得られる情報とを組み合わせ、「反射モデル技術を用いた画像認識」という独自の技術に基づき、少数の画像から任意の状況下での画像合成技術を提案していた。

物理モデルと非制御下の画像・映像データの統計的学習の融合により、高時間分解能化映像の生成、高画質化の統合と学習辞書の強化、高画質化によって得られる情報の映像圧縮への利用の面で、画質を向上させた画像・映像の生成を実現している。

さきがけ期間を通じ、映像において露光時間を分割するようにフレーム画像を分解するという独自の技術を磨き上げ、コンピュータビジョン分野の最新技術を集約した書籍への記事掲載、国際会議での採択等に至ったことは評価できる。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Mihoko Shimano, Takahiro Okabe, Imari Sato, and Yoichi Sato, “Video temporal



super-resolution based on self-similarity”, Proc. ACCV 2010 (LNCS 6492), pp.93-106, 2010.
2. 島野美保子, 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, “自己相似性に基づく高時間分解能映像の生成”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J94-D, No.8, pp.1376-1386, 2011.
3. Mihoko Shimano, Gene Cheung, and Imari Sato, “Adaptive Frame and QP Selection for Temporally Super-Resolved Full-Exposure-Time Video”, Proc. ICIP 2011, pp.2253-2256, 2011.
4. 島野美保子, 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, “自己相似性に基づく高時間分解能映像の生成”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2010) 論文集, pp.699-706, 2010.
5. Mihoko Shimano, Gene Cheung, and Imari Sato, “Compression using Self-similaritybased Temporal Super-resolution for Full-exposure-time Video”, Proc. ICASSP 2011, pp.1053-1056, 2011.

(2)特許出願

研究期間累積件数: 1件

1.

発明者: 島野美保子、佐藤洋一、岡部孝弘、佐藤いまり

発明の名称: 高時間分解能映像の生成方法及び装置

出願人: 東京大学、国立情報学研究所

出願日: 2010/11/5

出願番号: P2010-248157

(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)

著書

1. Mihoko Shimano, Takahiro Okabe, Imari Sato, and Yoichi Sato, “Video temporal super-resolution based on self-similarity”, invited book chapter in Advanced Topics in Computer Vision, Springer, 2013.
---

その他の学会発表

2. 島野美保子, チョンジーン, 佐藤いまり, “自己相似性を用いた適応的な時間分解能選択に基づく映像符号化”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011) 論文集, pp.1629-1636, 2011.
3. 島野美保子、岡部孝弘、佐藤いまり、佐藤洋一、“事例に基づく高時間分解能映像の生成”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009) 論文集, pp. 1103-1109, July 2009.

# 研究報告書

## 「問題構造の解析に基づく組合せ最適化アルゴリズムの自動構成」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成26年3月

研究者: 梅谷 俊治

### 1. 研究のねらい

組合せ最適化の専門知識を持たない利用者が、産業や学術の幅広い分野において日々新たに生じる現実問題を短期間で解決するには、これらの問題を整数計画問題や制約充足問題などの汎用的な組合せ最適化問題に定式化し、その問題に対する高性能なアルゴリズムを適用することが望ましい。しかし、問題の汎用性が高まればアルゴリズムの性能向上に利用できる特徴的な構造が失われるため、汎用的な組合せ最適化問題に対して高性能なアルゴリズムを開発することは困難である。

産業や学術の幅広い分野に現れる現実問題は多種多様であり、これらの問題に共通して現れる特徴的な構造は存在しない。一方で、現実問題を定式化して得られる個別の入力データは無秩序で全く構造を持たないわけではなく、実際にはグラフ、論理、順序、割当などの典型的な離散構造で記述される特徴的な部分から構成される場合が多い。また、あらかじめアルゴリズムの仕様を全て決定する必要はなく、実行時にアルゴリズムの一部の仕様を変更すれば、個別の入力データから特徴的な構造を発見し、アルゴリズムの性能向上に利用することは可能である。

本研究では、整数計画問題などの汎用的な組合せ最適化問題に対して、実行時に個別の入力データからアルゴリズムの性能向上に役立つ特徴的な構造を発見し、その構造に合わせてアルゴリズムの設定や構成を自動的に決定する手法を提案し、大規模かつ多様な現実問題に対応できる汎用的かつ高性能な組合せ最適化アルゴリズムを実現する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、実世界から収集された大規模データに基づく大規模かつ多様な 0-1 整数計画問題に対して、局所探索法を雛形とするメタヒューリスティクスを開発した。局所探索法は、現在の解に対してごく少数の変数の値に変更を加えて(近傍操作)得られる解集合(近傍)の中に改善解があれば、その解に移動する手続きを繰り返すメタヒューリスティクスの基本戦略である。その設計における自由度は大きく、個々の問題に含まれる特徴的な構造を把握した上で、探索空間、解の評価、近傍の定義、移動戦略などの各要素を注意深く設計することで高性能な局所探索法を実現できる。そこで、(A)各要素の設定と構成を自在に変更できる自由度を維持しつつ、大規模な整数計画問題に対応できる高速な局所探索法を基準として、(B)大規模な入力データから局所探索法の性能向上に役立つ特徴的な構造を短時間で発見し、(C)その構造に合わせて局所探索法の各要素の設定と構成を自動的に決定する手法を開発することで、大規模かつ多様な 0-1 整数計画問題に対応できる汎用的かつ高性能なメタヒューリスティクスを開発した。また、(D)0-1 整数計画問題のベンチマーク問題例に対する数値実験を通じて提案手法の有効性を確認した。

## (2) 詳細

### 研究テーマ(A)「大規模な 0-1 整数計画問題に対する効率的な局所探索法の開発」

局所探索法の各要素の設定と構成を自在に変更できる自由度を維持しつつ、大規模な 0-1 整数計画問題に対応できる効率的な局所探索法を開発した。

局所探索法において、近傍内の改善解を発見するための探索は近傍探索と呼ばれる。局所探索法では計算時間の大部分が近傍探索に費やされるため、近傍探索の効率化はアルゴリズム全体の高速化に直結する。本研究では、0-1 整数計画問題に対して、現在の解に対して高々1つおよび2つの変数の値を反転させて得られる解の集合を反転させて得られる解の集合を近傍とする1反転近傍および2反転近傍における解の評価値を高速に計算する手法を開発した。

0-1 整数計画問題では、制約条件を満たす実行可能解を発見すること自体が困難であるため、目的関数に各制約条件の違反度を表すペナルティを加えた評価関数を用いる。解の評価値を計算するために目的関数と全ての制約条件を走査する必要がある。これが局所探索法の計算時間の大部分を占めている。しかし、局所探索法では近傍操作によってごく少数の変数のみ値が変化するため、現在の解と近傍解の間で値が変化した変数に関わる部分のみ再計算すれば、評価関数値の変化量を高速に計算できる。

本研究では、近傍内の解の評価に必要な情報を補助記憶に持ち、現在の解が移動する際に補助記憶を更新する方法を提案し、1反転近傍および2反転近傍の各近傍解の高速な評価を実現した。近傍内の解を評価する回数に比べて、現在の解が移動する回数ははるかに少ないため、補助記憶の更新に多少時間がかかるものの、アルゴリズム全体でも大幅な高速化を実現した。

### 研究テーマ(B)「局所探索法の性能向上に役立つ特徴的な構造の発見」

大規模な入力データから局所探索法の性能向上に役立つ特徴的な構造を高速に発見する手法を開発した。

0-1 整数計画問題に対して精度の良い近似解を求めるためには、複数の変数の値を同時に変更するより大きい近傍を持つ局所探索法を開発する必要がある。しかし、大規模な 0-1 整数計画問題では2反転近傍であっても近傍内の候補解の数が非常に多くなるため、大きな近傍を探索する際には改善する見込みの高い候補解にのみ絞り込む必要がある。

2反転近傍では、同じ制約条件に同時に現れる頻度の高い変数の組を同時に反転させると改善解が得られ易い傾向があることが分かる。そこで、各変数に対して、同じ制約条件に現れる変数のうち頻度の高い上位 1%を図1(左)に示すリストに格納し、局所探索法では2反転近傍の候補解をこのリストに含まれる変数に絞り込むことで探索の効率化を実現した。また、このリストをグラフの隣接リストと見なせば、図1(右)に示す変数間の関係を表すネットワークが得られる。大規模な整数計画問題では、リストの生成に多くの計算時間を要するため、実際には、リストの全ての行を前処理で生成するのではなく、空の状態から始めて、各変数に対して2反転近傍を適用する際に、その変数に対応するリストの行を遅延生成することで、探索に必要な部分における特徴的な構造を高速に発見した。

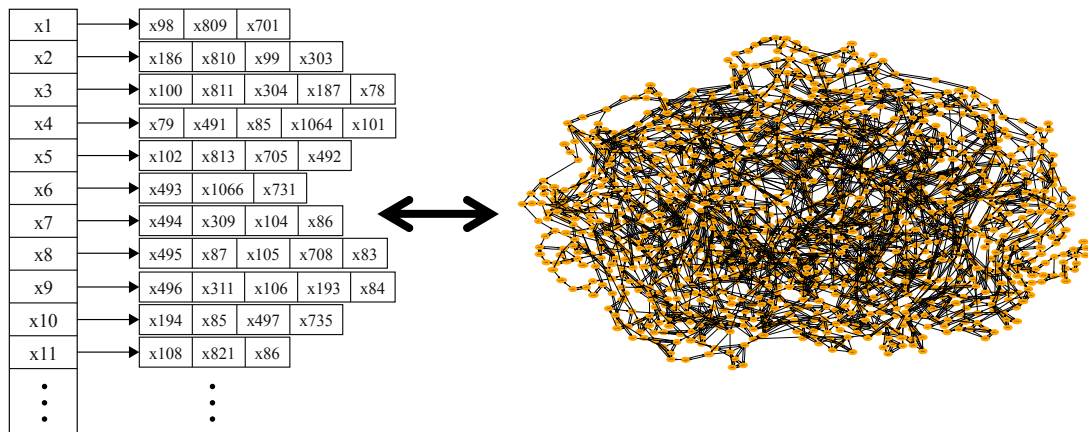


図1: 同じ制約条件に同時に現れる頻度の高い変数の組を格納したリスト(左)と変数間の関係を表すネットワーク(右)

**研究テーマ(C)「特徴的な構造に基づく大規模な近傍探索の実現」**

変数間の関係ネットワークの下で複数の変数の値を同時に変更する大規模近傍を持つ局所探索法を開発し、個々の組合せ最適化問題に対する専用解法と同程度の性能を実現した。

これまで多くの組合せ最適化問題では、その特徴的な構造を利用した大規模近傍に基づく効率的な局所探索法が開発されてきた。例えば、割当問題において割当先を交換する近傍操作、巡回セールスマン問題において2つの辺を入れ替える近傍操作は、0-1 整数計画問題では 4 つの変数を同時に反転する近傍操作に対応している。しかし、0-1 整数計画問題において、4反転近傍に含まれる全ての解を走査すれば精度の良い近似解が得られるわけではなく、それぞれ割当問題、巡回セールスマン問題と同様の特徴的な構造を持つ部分を発見できなければ効率的な局所探索法は実現できない。

本研究では、変数間の関係を表すネットワークから2反転近傍では改善しなかったものの有望な変数の組を記憶しておき、これらを組み合わせて4反転近傍を実現した。具体的には、変数間の関係を表すネットワークで評価関数値の変化量が小さい2反転近傍操作に対応する辺のみをたどって生成されるパスもしくはサイクルに対応する4反転近傍の解のみを走査することで、特徴的な離散構造に対応する部分を集中的に探索する局所探索法を実現した。

**研究テーマ(D)「0-1 整数計画問題のベンチマーク問題例に対する数値実験」**

混合整数計画問題のベンチマーク問題集に含まれる 0-1 整数計画問題の問題例に対して、現時点で最も高性能な混合整数計画ソルバーの1つである CPLEX12.5.1 と提案手法を適用した結果を比較した。提案手法では、2反転近傍の候補解となる変数の組を1%に絞り込んでいる上に、ds-big(制約:1042, 変数:174,997)や ivu06-big(制約:1177, 変数:2,277,736)などの大規模な問題例では、生成されたリストの行数の割合がそれぞれ 5.92%, 0.21%と非常に低いことから、2反転近傍のごくわずかな候補解を探索するだけで混合整数計画ソルバーでは実現できない高精度の近似解が求められることを確認した。

### 3. 今後の展開

実世界から収集された大規模データに基づく組合せ最適化問題は十分に整理されていない場合が多く、近年の情報爆発による問題の大規模・多様化も相まって、組合せ最適化の専門家であってもアルゴリズムの性能向上に役立つ構造を発見することが困難な問題が急増している。本研究により組合せ最適化の専門家ですら発見が困難な隠れた構造を自動的に発見できるようになれば、より高性能な組合せ最適化アルゴリズムの実現が期待できる。この点において、提案手法は計算困難な組合せ最適化問題に対する従来手法の限界を乗り越える新たな枠組みとしての発展が期待できる。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

本研究の当初の目標通り、個別の入力データからアルゴリズムの性能向上に役立つ情報を発見し、アルゴリズムの設定や構成を自動的に決定する枠組みに基づいて、大規模な 0-1 整数計画問題に対する高性能な局所探索法を実現できた。実際に、従来の数理計画法に基づくアプローチに全く頼ることなく、現時点で最も高性能な混合整数計画ソルバーを上回る性能を持つ組合せ最適化アルゴリズムを実装したことは、当該分野に大きなインパクトを与える研究成果である。また、多くのさきがけ研究者との交流を通じて、本研究の課題を新たなパラダイムとして展開するに足る多くのアイデアを得ることができた。一方で、局所探索法の基本部分の実装に多くの時間を取られたため、研究期間内に、新たなアイデアをほとんど実装できなかった点と、研究成果を国際会議や論文などにほとんど発表できなかった点が悔やまれる。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

問題データからアルゴリズムを組み立てる手法の研究である。ジェネリックプログラミングの視点から組合せ最適化アルゴリズムを使った問題定式化をサポートするというアイデアである。

当初の目標通り、個別の入力データからアルゴリズムの性能向上に役立つ情報を発見し、アルゴリズムの設定や構成を自動的に決定する枠組みに基づいて高性能な局所探索法を実現している。現状で最も高性能な混合整数計画ソルバーを上回る性能を持つ組合せ最適化アルゴリズムを実装しており、公開予定である。この分野に大きなインパクトを与える成果であり、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

1. S.Umetani, M.Arakawa and M.Yagiura, A heuristic algorithm for the set multicover problem with generalized upper bounds, Lecture Notes in Computer Science, 2013, 7997, 75-80.
2. 梅谷俊治, 問題構造の解析に基づく組合せ最適化アルゴリズムの自動構成, オペレーションズ・リサーチ, 2014, 59, 掲載予定.


(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 梅谷俊治, 問題構造の解析に基づく組合せ最適化アルゴリズムの自動構成, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 アブストラクト集, 252-253, 2011.
- 梅谷俊治, 荒川正尚, 柳浦睦憲, 一般化上界制約付き集合多重被覆問題に対する発見的解法, 平成24年度 文部科学省 数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ「離散構造と最適化:展開と連携」, 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所, 2012.
- S.Umetani, M.Arakawa and M.Yagiura: A heuristic algorithm for the set multicover problem with generalized upper bound constraints, Learning and Intelligent Optimization Conference (LION7), 2013.
- 梅谷俊治, 大規模な集合分割問題に対する局所探索法, 京都大学数理解析研究所研究集会「最適化の基礎理論と応用」, 2013.
- S.Umetani, A local search algorithm for large-scale set partitioning problems, The 13th Statistical Machine Learning Seminar, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 2013.

# 研究報告書

## 「高精度でスケーラブルな多項関係予測の実現」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 鹿島 久嗣

### 1. 研究のねらい

データに潜む規則性を発見し、これを新たな知見の創出や意思決定に役立てるためのデータ解析技術は今後の情報処理技術の要であり、その研究は様々な研究分野において精力的に進められてきた。そのなかでも「これから何が起こるのか」を予測する予測的なデータ解析はより直接的に競争力のある意思決定に結び付くため、とりわけその重要性は高い。従来、予測的なデータ解析は個々のデータを対象とした予測をその主な対象としてきたが、近年ではより高度な予測を目指したデータ間の高次関係の予測の重要性が認識され始めてきている。しかしながら、これを高精度かつ効率良く実現するデータ解析が実現しているとは言い難いのが現状である。そこで本研究では、汎用、高精度かつスケーラブルなデータ間の高次関係予測機構の実現を目指す。また開発した技術を様々な実問題に応用することで実社会へのインパクトを目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

多項関係の解析手法として広く用いられている多次元配列のテンソル分解に着目し、テンソル分解を用いた高精度でスケーラブルな多項関係の予測を実現するための3つの課題、すなわち、予測性能の悪化等を引き起こすデータの疎性の課題と定式化の準最適性の課題ならびに予測時の非効率性という課題を解決するための様々な技術を開発し、学術的にも高い評価を受けた。また、企業の販路開拓や連携をサポートするための企業間の取引ネットワークを対象とした関係予測や、実際のデータに合わせたモデル探索を実現するためのデータ解析コンペティションの開催といった試みを行い、実世界応用への手ごたえを得た。

#### (2) 詳細

##### 研究テーマ A 「データ間の高次関係予測のための基礎技術の開発」

多項関係の解析手法として広く用いられている多次元配列のテンソル分解に着目し、テンソル分解を用いた高精度でスケーラブルな多項関係の予測を実現するための3つの課題である (i) データの疎性: 疎データに対する予測性能の悪化、(ii) 準最適性: 解の最適性の欠如による予測性能の悪化、(iii) スケーラビリティ: 予測時の非効率性の問題 を解決するための技術を開発した。

##### (i) データの疎性を解決する情報統合予測技術

実世界の関係データは極めて疎であり、とくに3項以上の関係の場合には深刻な予測精度の低下を引き起こす。データ過疎による関係予測精度の低下に対処するため、関係データの他にデータ間の類似度などの利用可能な補助情報を用いて予測精度を補完するためのテン

ソル分解の新たな枠組みを開発した(文献 1)。この研究は機械学習・データマイニングの国際会議 ECML PKDD 2011 において(共著者が学生であったため)最優秀学生論文賞(Best Student Paper Award)を受賞し、トップ論文誌への掲載を推薦されるなどの高い評価を受けた。

(ii) 最適性を保証する定式化

多くのテンソル分解の定式化は最適性が保証されないものであり、多数存在する局所解に陥ることで予測精度が低下してしまうという問題がある。この問題に対処するためテンソル分解を最適解が保証される凸最適化問題として定式化するとともにその予測性能に関する理論的解析を行った(文献 2)。2項関係よりも高次の関係の予測における予測精度はこれまでほとんど何もわかっていない問題であり、この問題に対する理論的な見通しを与えた意義は大きい。さらに、高次関係を高精度で効率よく予測できる新しい方法として、低次元埋め込みを利用した方法を新たに開発した。この方法は固有値問題を繰り返し解くことによって(準)最適解を得る従来法とは異なり、固有値問題をただ一回解くだけで最適解が求めることのできる非常に効率的な方法である(文献 3)。

(iii) 関係予測時の高速化技術

高次関係のモデル化の効率化に加えて、高次関係予測のスケーラビリティに関する新たな課題として、テンソル分解に基づく予測時のスケーラビリティについての課題を提起した。データは疎であっても、予測時には補完された密な多次元配列から所望の要素を効率よく特定する必要があるが、素朴な探索では非常に膨大な時間を要してしまう。この問題意識は応用上きわめて重要でありながら、これまで気づかれていなかった課題であり、我々はオブジェクトのクラスタリングを利用してこれを極めて効率的に行う方法(現在投稿中)を提案した。この研究によって、テンソル分解に基づくモデル化から予測までの一連の流れの高精度高効率化が実現したことの意義は大きい。

(iv) その他(モデリング技術)

時間とともに構造が変化するネットワークにおける、時間をまたいだ関係の予測という、関係予測の新しい問題を提案し、これを効率的に解くことのできる解法を示した(文献 4)。他、様々なオブジェクトの参加する複数種類の関係を同時に予測する手法や、複数の人間によって作成された関係データセットから関係予測モデルを構築するための手法等、現実に表れる様々な問題設定に対応したモデリング手法を開発した。

## 研究テーマ B 「関係予測技術の実世界応用」

関係予測の技術を用いた先進的な実世界応用を行った。特に (i) 企業間の取引ネットワークを対象とした予測や、(ii) 関係予測問題自体をデータ解析コンペティションの枠組みを利用して解く試みを行った。

(i) 企業間ネットワーク解析による経営意思決定サポート

中小企業の販路開拓や企業間連携をサポートすることを目的とした「企業間つながり検索システム(SMEET)」を開発する東京大学 坂田一郎教授らのグループと協力し、関係予測の技術を利用することで企業間の「うまくいく」取引を予測することで取引先を推薦する試みを行った。ベンチマークデータを用いた実験では、関東甲信越における繊維、製材、出版など 14 業



種 3 万社、約 3.5 万の取引関係から約 8 割の予測正解率を実現した(文献 5)。

(ii) コンペティションを利用した関係予測モデリング

実際のデータ解析においては、しばしば結果を大きく左右するのはデータ固有の性質にあった手法の選択とデータの特徴をうまく捉えたヒューリスティクスであり、必ずしも洗練された手法が全ての場合でうまくいくことが保証されないため、データに合ったモデルを人手で広範囲に探索する必要がある。この「モデリングの労働集約性」を解決するための試みとしてクラウドソーシングを利用した関係予測の実験に取り組んだ。我々はデータ解析のクラウドソーシングの形式として現在のところ最有力であるデータ解析コンペティションに着目し、関係予測モデル構築を題材としたコンペティションを開催した。結果として得られたモデルの性能は我々の初期分析結果を大きく上回るものであり、また参加者から得られる複数の予測を機械学習によって上位統合することでさらなる予測精度向上が見込めるなどの数々の知見を得た。

### 3. 今後の展開

クラウドソーシングを利用して多くのデータサイエンティストを巻き込んだ関係データの解析は、本研究で開発した汎用的な方法論と実際のデータ解析をつなぐための枠組みとして有望視しており、その仕組みづくり等の研究を行っていく予定である。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

当初掲げていた研究のねらいのうち、疎なデータから多数のオブジェクト間関係を高精度・高速に予測するという要素技術的な課題については概ね解決できた。その成果は権威ある国際会議における採択やいくつかの受賞という形で高い学術的評価を得た。

一方で、開発した要素技術の統合によるツール化といったところまでには至らなかった。また応用面については様々な可能性を模索し、いくつかの実応用に取り組んだものの大きなインパクトをもたらすまでには至らなかった。しかしながら、応用への試行錯誤のなか、汎用的な方法論と個別の実世界データをつなぐための枠組みとして、多数のデータサイエンティストを構成要素とする新たなデータ解析の方法論の着想に到達した。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

高精度でスケーラブルな高次関係予測手法の開発と応用の研究である。

さきがけ期間を通じ、「関係データ」に焦点を当て、主にテンソル分解と呼ばれる関係のモデリング技術に着目することで、大規模な関係データに対して高速かつ高精度で予測を行うことのできる手法を開発している。

当初目標のうち、要素技術の統合によるツール化、実応用において大きなインパクトをもたらすまでには至っていないが、疎なデータから多数のオブジェクト間関係を高精度・高速に予測するという要素技術的な課題についてはほぼ解決でき、国際会議における採択や受賞という形で高い学術的評価を得ている。この点については、評価できる。

### 5. 主な研究成果リスト



(1)論文(原著論文)発表

1. Atsuhiko Narita, Kohei Hayashi, Ryota Tomioka, and Hisashi Kashima. Tensor Factorization Using Auxiliary Information. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012, Vol.25, No.2, pp.298-324.
2. Ryota Tomioka, Taiji Suzuki, Kohei Hayashi, and Hisashi Kashima. Statistical Performance of Convex Tensor Decomposition. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2011, pp.972-980..
3. Nozomi Nori, Danushka Bollegala, and Hisashi Kashima. Multinomial Relation Prediction in Social Data: A Dimension Reduction Approach. *Proceedings of the 26th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*. 2012, pp.115-121.
4. Satoshi Oyama, Kohei Hayashi, and Hisashi Kashima. Cross-temporal Link Prediction. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, 2011, pp.1188-1193.
5. Junichiro Mori, Yuya Kajikawa, Hisashi Kashima, and Ichiro Sakata. Machine Learning Approach for Finding Business Partners and Building Reciprocal Relationships. *Expert Systems with Applications*. 2012, Vol.39, No.12, pp.10402-10407

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 2011 情報処理学会 平成 23 年度 山下記念研究賞
- 2011 ECML PKDD Best Student Paper Award (指導および共著)
- 2012 マイクロソフトリサーチ日本情報学研究賞
- 2013 船井情報科学振興財団 船井学術賞
- 2013 PAKDD Best Student Paper Runner Up Award (指導および共著)
- 2013 第 5 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM2013)優秀論文賞
- 2013 人工知能学会論文賞

# 研究報告書

## 「組合せ的計算に基づく超高次元データからの知識発見」

研究タイプ：通常型

研究期間：平成22年10月～平成26年3月

研究者：河原吉伸

### 1. 研究のねらい

近年のデータ取得技術の向上や情報処理技術応用の多様化を背景に、ますます高次元化・大規模化するデータを扱う知的解析/情報処理において、組合せ的計算に伴う計算量の爆発は、多くの場面その計算的ボトルネックとなってしまう。本研究ではこのような問題において、組合せ的な構造(特に、集合関数における凸性である劣モジュラ性)を用いたアルゴリズムを開発・適用する事で計算効率の著しい向上を計り、従来は難しかったような知的解析・情報処理への新たな枠組みの確立を目指すものである。これにより、これまでの解析や情報処理では難しかったような、新たな科学的、または社会的知見の獲得へとつながるアルゴリズム体系の実現を目的とする。

(集合関数最適化などとして定式化される)組合せ的な計算は大きく、(1)効率的に解ける問題のクラス(劣モジュラ最小化などで定式化される問題)と、(2)NP困難問題など効率的に解く事が困難な問題のクラス(劣モジュラ最大化や制約付き劣モジュラ最小化などで定式化される問題)とに分類される。本研究では、前者(1)に対しては、劣モジュラ性を用いて計算効率を著しく向上させる事で、従来より更に大規模なサイズへ適用可能なアルゴリズムの構築を行う。これにより、従来のアプローチでは難しかったようなサイズを扱う事が可能となり、新たな応用的知見や有用性の創出へとつながる事が期待される。また後者(2)に対してはまず、(a)組合せ最適化分野で知られる数理的保証のある近似的解法を実際のデータ解析へ適用する事により、汎用性・実用性を両立する効率的なアプローチを実現する。またそれとは逆に、(b)大域的な解の探索を行うための方法について、問題(組合せを評価する関数)が持つ劣モジュラ性などの組合せ的構造を利用する効率的なアルゴリズムを開発する。特に(b)については、人工知能やその他周辺分野の未解決問題への統一的なアプローチへ向けた一つの試みであり、高い学術的意義を有する課題と考えられる。

### 2. 研究成果

#### (1)概要

本研究では、上述のねらいの下、理論的解析を含めたアルゴリズム構築から、種々の人工データ・実データを用いた実験的検証までを含めた研究を遂行してきた。まず効率的に解ける問題に対する高速アルゴリズムの構築に関連して、劣モジュラ性を用いた構造正則化学習における高速アルゴリズムを開発した。この方法は汎用性が高く、遺伝子データ解析や脳画像データ解析など、多くの応用への展開へとつながった。そして劣モジュラ性に基づく近似的解法の適用としては例えば、株式ポートフォリオ選択の劣モジュラ最大化としての定式化と貪欲法の適用を行った。この応用では、従来手法と比べて、ポートフォリオに含まれる銘柄数が小

さいにもかかわらず、同等の性能を実現するポートフォリオの構成が可能である事を確認した。さらに計算困難な問題において大域的な解を探索する方法に関しては、劣モジュラ性に基づく大域最適化のアルゴリズムに加えて、いわゆる多項式時間内に大域解の一部の情報を計算可能なアルゴリズムなど、理論的にも実用的にも有用な方法論がいくつか得られた。特にこれらに関しては、機械学習分野で最も主要な国際会議でも継続して複数論文が採録されるなど、国際的にも高い評価を受けている。

またその他の事項として、本課題に関連する基礎的事項は、他の国内研究者等への理解促進のため学術雑誌における解説記事などの情報発信の活動も行った。

## (2) 詳細

研究テーマ A 「劣モジュラ性を用いた知的情報処理のためのアルゴリズム開発」

(A-1) 劣モジュラ性を用いた高速な構造正則化学習アルゴリズム開発

データ解析や知的情報処理の場面では、往々にして用いるデータ中に利用可能な構造情報が存在する。例えば、ソーシャルネットワークのような 2 要素間の関係を持つデータを扱う場合や、変数の属性にグループ構造のようなものが存在する場合などである。構造正則化学習は、このようなデータ中の組合せ的構造を機械学習の各手法に取り組むための枠組みであるが、大規模なデータへの適用には十分な計算効率を実現するのが難しいという問題点があった。[論文 1]では、多くの構造正則化学習の問題が劣モジュラ性を用いて極めて効率的に計算可能である事を示し、これによる高速なアルゴリズムを導出した。ただし[論文 1]自体は、構造正則化中の計算よりもより広い範囲へ適用可能な最適化の枠組みを議論したものである。この枠組みは、後述のような応用においてもその有用性を確認しており、今後も様々な応用への適用展開を考えている。

(A-2) 計算困難問題における大域的解探索のための劣モジュラ性に基づくアルゴリズム開発  
応用的に重要となる組合せ的計算の多くは、上述の構造正則化のように効率的に解ける問題のクラスに入らない。このような問題に対しては一般に、多項式時間で計算可能な近似アルゴリズムを適用するなどして、近似解の探索を行う事が多い。機械学習分野などでは、連続最適化問題へと緩和して近似的な計算を行う事もしばしばである。しかし応用によっては、近似的な解ではなく、大域的な解の探索を行う事が本質的に重要なケースも多い。理論的にはNP困難な問題は、変数の数の増加と共に計算時間が指数関数的に増加する。しかし実用的には計算が可能な分枝限定法などのアルゴリズムが知られている。本研究では、一般の集合関数最適化を表現可能な離散DC計画問題に対して、劣モジュラ性に基づく分枝限定法を導出し、ある程度のサイズまで大域解の計算が可能である事を示した([論文4])。また問題に何らかのパラメータが存在する際に(制約付きの劣モジュラ最小化など)、そのパラメータを固定しなければ、いくつかのパラメータに対する大域解が多項式時間で計算可能なアルゴリズムに関しても導出し、実用的には極めて高速に、かつ多くのパラメータに対する解が得られる事を確認している。

研究テーマ B 「開発したアルゴリズムの応用への適用」

上述の研究テーマ A で開発したアルゴリズムの一部は、実用的な応用に対しても適用し、その有用性の検証を行った。多くは(A-1)で述べた構造正則化学習であるが、1.研究のねらいで

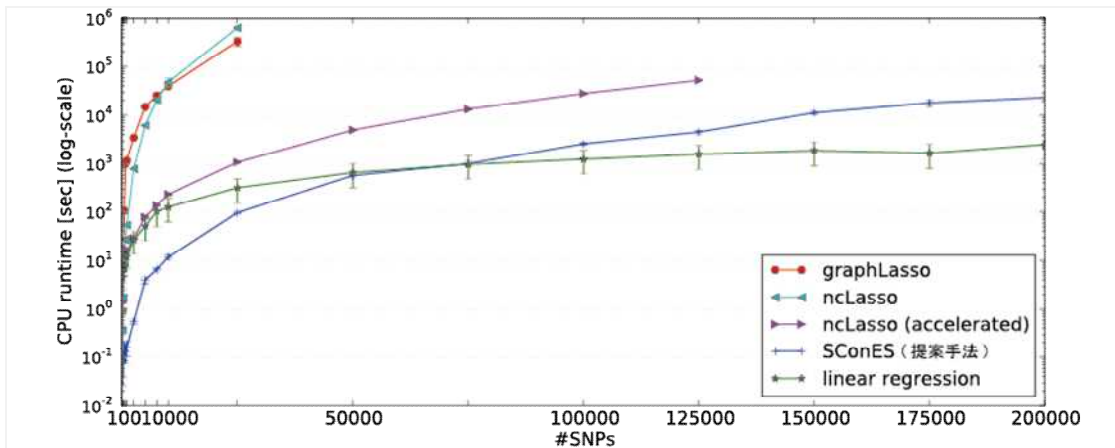


図 2 提案手法と従来手法の計算時間比較の例（青色の SConES が提案手法。緑色の線はベースラインの線形回帰によるもの）。

述べた 2(a)のような、組合せ最適化分野で知られる近似解法の適用についても、例えば株式ポートフォリオ選択などでその有用性を確認した。

まず[論文 2]では、遺伝子データ解析において重要な問題であるゲノムワイド相関解析で、遺伝子塩基間でのネットワーク上の構造(例えば塩基配列の順序や、遺伝子間相互作用)を構造正則化として用いる事で、極めて高速で性能の高い解析アルゴリズムが得られた。図 1 は計算時間を比較した例であり、数十万変数程度でも数分で計算が可能である。またその他には、MRI 画像を用いたアルツハイマー病の症状判定や、コンピュータ・ビジョンなどへ対しても、上記の計算を用いた構造正則化学習を適用しその有用性を確認している。また、株式ポートフォリオ選択を劣モジュラ最大化として定式化し、貪欲法を適用する事で、図 2 に示すように、少ない銘柄数により、他の手法と同等の性能を持つポートフォリオを実現できる事を確認した。

またその他にも、クラスタリングなどの基本的問題に対しても、劣モジュラ性などの組合せ的構造を用いる事で有用なアルゴリズムの構築が可能である事を確認している([論文 5]など)。

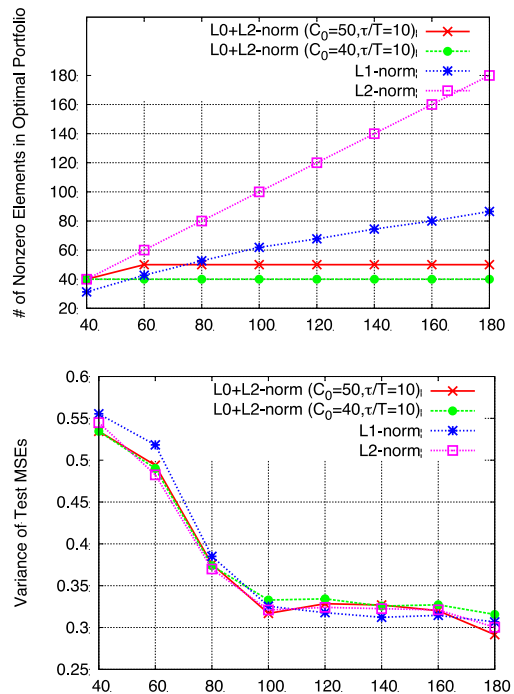


図 1 選択された銘柄数(上)と分散リスク(下)。各図とも横軸がベースの銘柄数。又赤色・緑色の線が提案法。

### 3. 今後の展開

本研究の成果は、上述の研究テーマ B のように応用性の高いものもあるが、アルゴリズム構築やその理論的解析といった基礎的成果が主である。今後はここで得られた理論的基盤をベースに、応用的に重要となる、または周辺情報分野の基礎問題などに必要となる理論的計

算基盤やアルゴリズム構築のための枠組み等の研究を進めると共に、更なる応用へも展開を進めていく予定である。特に本研究で議論した(A-2)の枠組みは、人工知能における論理推論や統計物理問題におけるスピングラス問題のように、情報分野で未解決な計算困難問題に対する一つのアプローチの基礎としても重要であると考えており、これらとの関係や、実用的な方法論の構築などに取り組む予定である。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

研究開始当初目標としていた内容は、上記の(A-2)とその応用が中心であった。研究が進むにあたり、その他のテーマへと研究が広がり、当初は想定していなかったような成果が得られるようになってきた。特に、当初は想定していなかった(A-1)における理論的成果とそれに伴う高速アルゴリズムが得られ、(B)に述べたような、様々な応用への展開へとつながった。当初から想定していた(A-2)に関しては、研究提案時に想定していたような実用性を持つレベルまでの高速なアルゴリズムの構築には至らなかったが、方法論としての枠組みとしてや、理論的にも将来の研究につながる成果が得られたと考えている。これらの成果をベースに、学術的のみならず、周辺の情報分野や種々の応用へとつながる構想もあり、また現時点の成果に対しても学術的に高い評価も得られ、今後につながる研究成果が得られたと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

劣モジュラ性を利用して大域的な最適性を持った組合せ(厳密な最適解)を見つける効率的なアルゴリズムを構築するという研究である。

効率的に解ける問題に対する高速アルゴリズムの構築では、劣モジュラ性を用いた構造正則化学習における高速アルゴリズムを開発している。これは、遺伝子データ解析や脳画像データ解析など、多くの応用への展開へとつながっている。また、劣モジュラ性に基づく近似的解法を株式ポートフォリオ選択に適用し、ポートフォリオに含まれる銘柄数が従来よりも小さいにもかかわらず、同等の性能を実現するポートフォリオの構成が可能であることを確認している。計算困難な問題において大域的な解を探索する方法に関しては、大域最適化のアルゴリズムに加え、多項式時間内に大域解の一部の情報を計算可能なアルゴリズムなど、理論的にも実用的にも有用な方法論がいくつか得られている。特にこれに関しては、国際的にも高い評価を受けており、高く評価したい。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. K Nagano and Y. Kawahara, "Structured convex optimization under submodular constraints," Proc. of the 29th Ann. Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI'13), 459-468, 2013
2. C. Azencott, D. Grimm, M. Sugiyama, Y. Kawahara and K. Borgwardt, "Efficient network-guided multi-locus association mapping with graph cuts," Bioinformatics, Vol.29, No.13, pp.i171-i179, 2013
3. A. Takeda, M. Niranjani, J. Goto and Y. Kawahara, "Simultaneous pursuit of out-of-sample

performance and sparsity in tracking portfolio,” Computational Management Science, Vol.10, No.1, 21-49, 2013.

4. Y. Kawahara and T. Washio, “Prismatic algorithm for discrete D.C. programming problem,” Advances in Neural Information Processing Systems, Vol.24, 2106-2114, 2011.
5. Y. Kawahara, K. Nagano and Y. Okamoto, “Submodular fractional programming for balanced clustering,” Pattern Recognition Letters, Vol.32, No.2, 235-243, 2011.

(2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 河原吉伸, “構造的な事前情報を用いた機械学習: 構造正則化と劣モジュラ性,” 情報処理, Vol.52, No.7, 734-740, 2013 (解説記事).
2. 河原吉伸, “機械学習における劣モジュラ性の利用と組合せ論的アルゴリズム,” オペレーションズ・リサーチ, Vol.58, No.5, 267-274, 2013 (解説記事).
3. 河原吉伸, 永野清仁, 鷺尾隆, “劣モジュラ性を用いた知能情報処理への新展開,” 人工知能学会誌, Vol.27, No.3, 252-260, 2012 (解説記事).

# 研究報告書

## 「自然言語テキストの高精度で頑強な意味解析とその応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: アラステア・バトラー

### 1. 研究のねらい

ヒトが日常的に使用している自然言語の意味や思考内容を表す手段として、述語論理が確立され、またその様々な拡張が提案されている。自然言語の文をコンピュータによって自動的に述語論理式へと変換する方法が開発されれば、そのことは文の意味の中核的部分をコンピュータに理解させたことを意味し、それによって得られる恩恵ははかり知れない。特に 1970 年代にモンタギューが文の統辞（構文）構造を用いて意味解釈を行う手法を確立して以来、生成文法や句構造文法にもとづく統辞解析を利用して文の意味表示を得ようとする研究が盛んになった。しかし、少数のサンプルを実験的環境で意味処理することには成功しても、現実に存在する大量の言語データを処理するレベルには至っていない。これは、統辞解析を行うための規則がぼう大な数にのぼり、それらの間のコントロールを行うことに失敗したことが主たる原因である。

私は、従来のように複雑な文の構文をすべて統辞論で行うのではなく、複雑な処理は意味解釈のレベルで行う独自の意味理論 Scope Control Theory (スコープ制御理論, SCT) を編み出し、英語や日本語の意味処理に応用しようとしてきた。本研究では、それまでの研究成果を大量の無制約日本語テキストの処理に応用する研究を行ってきた。SCT をインプリメントしたシステムへの入力とは単純な(表層的な)統辞解析を行ったもので十分であり、これは近い将来は自動的に行える可能性が強い。将来、日本語を含む自然言語の文の意味を自動的に抽出できるようになれば、その価値は計り知れない。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

日常生活で使われている無制約の自然言語処理テキストから高精度の意味表示を自動的に得るための頑強な方法を開発することを目的として研究を行った。得られた意味表示は、知識ベース構築等に利用するために、推論に適した述語論理にもとづいている。研究の基礎となったのは、動態意味論 (Dynamic Semantics) を拡張発展させて自然言語の文の意味解析を行うための形式言語理論であるスコープ制御理論 (Scope Control Theory; SCT) である。SCT を実装した意味評価システムに対して英語や日本語の統辞解析器による表層統辞解析結果を入力することによって、正確で深く、カバー率も高い意味表示の出力を可能にした。

本研究では、通常言語処理で行われている統辞解析結果にもとづいて英文および日本語文テキストから意味表示を得る研究を行ったが、その前提として必要な日本語統辞構造データ (ツリーバンク) の構築も行った。その結果として、研究終了までに、約 1 万 5 千文からなる日本語テキストに統辞および意味解析情報を付加したツリーバンクを完成させる予定である。



これによって、提案する方法により、生の日本語テキストから意味表示までに至るまでの「パイプライン」を構築できたことになる。

## (2) 詳細

### 1. 日本語ツリーバンクの構築

より正確でよりカバー率の高い意味表示を大量の自然言語テキストから得るためには、まず適切な文の統辞解析を得ることが不可欠である。本研究における最大の課題となったのは、いかにして大量の良質な文解析結果を得るかということであった。そのため、文に対して統辞解析結果をタグ付けしたコーパスであるツリーバンクの構築が重要になった。

日本語についてはすでに、ある種のツリーバンクと言える京都大学テキストコーパス (Kurohashi and Nagao 2003) が存在する。これは 1996 年から 2003 年までの毎日新聞の記事 4 万文にもとづいている。同コーパスは、日本語文解析研究の基礎資料として使われている。

しかし、上記のコーパスは、文の解析の基本を文節に置いているため、原理的な問題を抱えている。例えば、日本語には関係代名詞が無いので、意味表示という観点からは大きく異なる関係節と名詞節として埋め込まれた節とを区別する手掛りが存在しない。別の例として、条件表現を挙げることが出来る。条件表現は通常、後置詞ト、バ、ナラ等によって表示される。このうち、トによる条件節(例:トンネルを抜けると、一面の菜の花畑だった)は、同じトが導く引用節(例:明日は晴れると天気予報で言っていた)と形式が同じであり、自動的に区別をつけることは困難である。

この京都大学テキストコーパスの欠点を補うためにさまざまな試みが行われている。たとえば、NAIST Text Corpus (Iida et al. 2007) では京都大学テキストコーパスに対し、格および照応情報が付け加えられている。しかし、格情報は表層的なもので、しかも主格、直接目的格および間接目的格の3つに限定されているため、文法役割に関する情報を一般的に捉えることは出来ない。しかも、情報の付加に際してインデックスを使用しているため、元の文節データに変更を加えることが困難である。本研究では当初、意味表示構築のための入力として京都大学テキストコーパスに手を加えて利用する予定であったが、以上の理由からそれが不可能であると判断し、文節ではなく句構造 (phrase structure) にもとづくコーパスを初めから構築する必要があるとの認識に至った。

本研究で開発を行ってきたコーパスは、句構造にもとづいていることの他に、句に対して機能情報をタグ付けすることを最大の特色としている。このことによって、上記でトが導く節の解釈に関連して触れた、論理意味表示において、並列関係 (論理積) の一部として扱わねばならない内容 (テ節、副詞節、関係節等) と、埋め込みとして取り扱うべき内容 (不定詞、引用節、疑問節、名詞節) とを明確に区別することが可能になる。この区別は、単なる項と述語の関係を超えて文の意味理解を行うには必須のものである。また、句の種類にかかわらず類似した構造を持っているため、木の検索と加工が容易である。

平成 26 年 3 月末の研究終了時までに日本語ツリーバンク (櫻ツリーバンク) プロトタイプ 1 万 5 千文を完成させる予定である。本ツリーバンクは、様々な言語研究のためのリソ

ースとして永く利用することが出来る。試行錯誤を通じてアノテーション方式を整備し、様々な種類の言語学的情報をツリーバンクから簡単かつ正確に得ることが可能になっている。上記の例について言えば、関係節と名詞埋め込み節、また助詞トによって導かれる条件節と引用節との区別が当該ツリーバンクのアノテーションによって正確に行われ、また適切な意味表示がそれぞれ作られる。さらに、人手によって構築した本ツリーバンクにもとづいて、機械学習の方法を適用することにより、自動文解析プログラム(パーサー)を作成することも視野に入れることが出来、これが可能になればツリーバンクの構築は飛躍的に容易になる。

## 2. 意味表示の生成

インプリメントした意味解析システムは、統辞解析結果を SCT 形式に変換し、さらにその意味評価を行うことを通じて、述語論理にもとづく意味表示を出力する。SCT の利点は、入力とする統辞解析情報(句構造)の内部において、他の理論とは異なって同一指示の表現間でインデクス付けが不要なことである。SCT システムは入力の意味評価を通じて、様々な複雑な構文の解析を行うことが出来る。このことによって、ツリーバンク構築の際の手間が著しく軽減される。日本語のテキストの入力から意味表示の出力に至るまでのパイプラインを図 1 に示す。

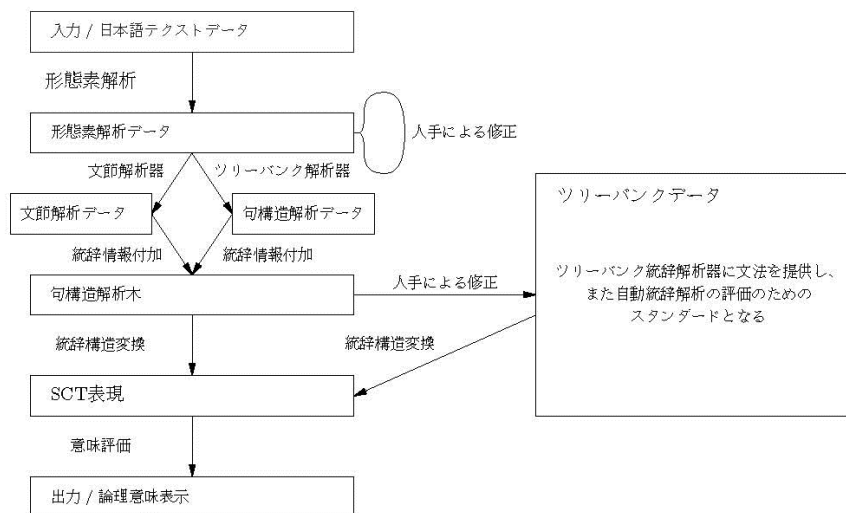


図 1: 意味表示出力までのパイプライン

SCT の理論面の研究は長期間にわたって行われたが、本研究期間では特に、高速で頑強なインプリメンテーションを可能にしたことが成果である。そのために、日本語に特有の事象について個別に対応することが必要であった。意味解析システムのドキュメンテーションとして、*Linguistic Expressions and Semantic Processing: A Practical Approach* を執筆した。

## 3 意味表示の使用

開発したシステムを用いて、統辞解析タグ付けを行ったすべての文から述語論理にもとづく

意味表示生成を行うことが出来た。今後の課題は、得られた意味表示をオントロジー的情報に変換して、データからの推論に利用することである。

研究成果の応用研究の 1 つとして、意味解析結果を視覚化して外国語教育に生かす方法の検討を行った。これは特に、日本語の助詞の機能についての日本語学習者の理解を助けるのに利用することが出来る。このために、Tcl/Tk を用いて、Graphical User Interface (GUI) を開発した。この GUI は同時に、アノテーションおよび意味表示の質や正確性のチェックに利用することが出来る。

GUI 環境のスクリーンショットを図 2 に示す。図で、左上は文とその統辞解析のカッコ表示、右上は統辞解析の木表示であり、右下はそれから自動生成された意味表示である。異なる種類の変項が色分けされ、さらにマウスにより矢印を当てることでハイライトされる。左下に、意味解析から生成されるデータベース関係の視覚化結果を示す。

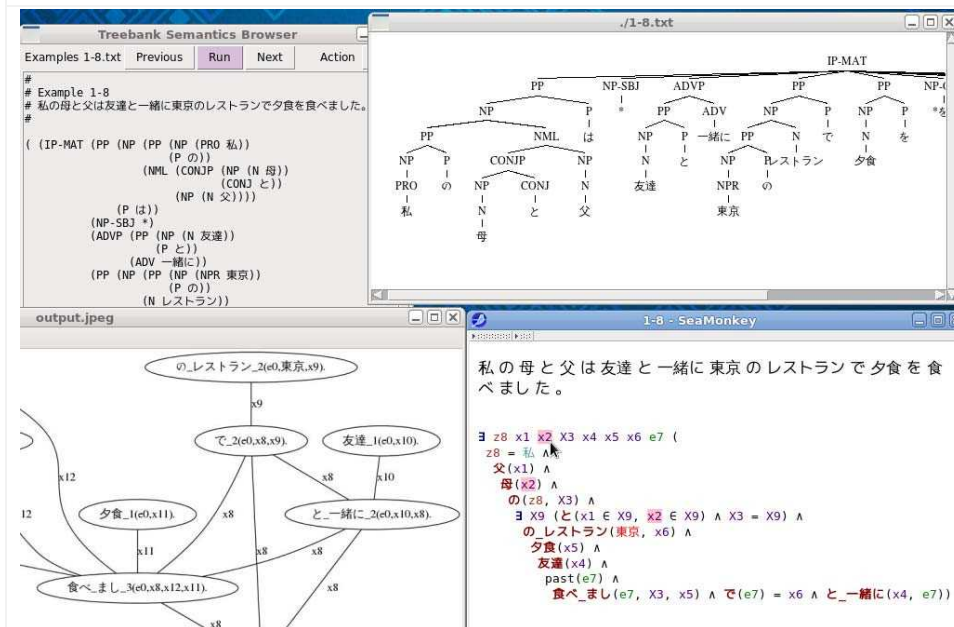


図 2: GUI のスクリーンショット

### 3. 今後の展開

アノテーションの方式は今や安定した段階を迎えている。過去 6 か月間で 2 倍のサイズとなり、構築にますます加速度のつく傾向が続くものと期待される。本研究で確立されたアノテーション体系を利用して、NTT コミュニケーション科学基礎研究所と 10 万文よりなる話し言葉データのツリーバンクを共同構築する協定を結んでいる。

研究を通じて確立された意味表示方式は、データベース・エンタリーを生成するための情報抽出への応用が可能である。現状の意味表示には、すでにソートされたオントロジーの情報 (“entity”, “group”, “attrib”, “degree”, “time”, “event”, “situation” 等) が含まれており、これを基礎として、一般的推論を可能とする情報の抽出につなげたい。

主として外国語教育の目的のために開発された GUI ソフトウェアは、文法語 (助詞、助動詞等) の働きを視覚化という形で具体的に示せるという点でユニークな意義を持つ。次の研究

段階では、実際に教室での外国語教育における教材として使用し、その効果を確認したい。

構築されたツリーバンクは、コーパス言語学で必要とされるスケールで、言語を深いレベルで検索したり比較することを可能にする。この特性を利用して、アジアの諸言語の特性・類型をツリーバンクを用いて研究する共同プロジェクトを国立国語研究所とともに近年中に開始する予定である。

研究のもう1つの重要な発展の方向として、「深い」変換をとまなう機械翻訳への応用が考えられる。このためには、意味表示から自然言語文への生成をいかに行うかが課題となる。しかし、本研究により自然言語文と論理意味表示との対（ペア）が大量にデータベース化されたことは今後の研究に対して基盤を与えることになるだろう。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

自然言語のテキストから質の高い意味表示を得るための完全なシステムを構築したという点で、本研究の主要目的は達することが出来た。本研究の成果は、より高度の文解析や機械翻訳の基礎を与えるという意義がある。また、深い意味情報を十分なスケールで提供できるという点で、コーパスによる言語研究の新時代を開くものである。

他方、意味解析実験への入力としての統辞解析データベースを自前で構築する必要のあることが途中で分かり、これに多大の労力を費やした結果、意味表示からオントロジー情報を抽出するというもう1つの課題については十分な検討を行うことが出来なかった。しかし、そのための道筋は付けることが出来たので、次の研究段階で行いたい。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

構文解析と直結したスコープ制御理論に基づく意味解析を行い、記述論理に基づく知識表現につなげようという研究である。日常生活で使われている無制約の自然言語処理テキストから、高精度の意味表示を自動的に得るための頑強な方法を開発することが目的である。

研究期間中、自然言語の文の意味解析を行うための形式言語理論のスコープ制御理論(Scope Control Theory)を実装した意味評価システムに対して、英語や日本語の統辞解析器による表層統語解析結果を入力することによって、正確で深く、カバー率も高い意味表示の出力を可能にした。また、日本語テキストに統辞および意味解析情報を付加したツリーバンクを完成させる予定であり、生の日本語テキストから意味表示までに至るまでの「パイプライン」を構築できたことになる。これらは公開予定であり、主要目的を達成していると考えられる。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Butler, Alastair, Ruriko Otomo, Zhen Zhou and Kei Yoshimoto. 2013. Treebank Annotation for Formal Semantics Research. In Motomura et al., eds., New Frontiers in Artificial Intelligence: JSAI-isAI 2012 Workshops, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7856,

pages 25–40, Berlin Heidelberg: Springer.
2. Butler, Alastair and Kei Yoshimoto. 2012. Banking Meaning Representations from Treebanks. <i>Linguistic Issues in Language Technology – LiLT</i> 7(6): 1–22.
3. Butler, Alastair and Kei Yoshimoto. 2012. Towards a Self-selective and Selfhealing Evaluation. In Okumura et al., eds., <i>New Frontiers in Artificial Intelligence: JSAI-isAI 2011 Workshops, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7258</i> , pages 96–109, Berlin Heidelberg: Springer.
4. Butler, Alastair and Kei Yoshimoto. 2011. Interpreting Japanese Dependency Structure. In Onada et al., eds., <i>New Frontiers in Artificial Intelligence: JSAIisAI 2010 Workshops, Lecture Notes in Computer Science, Volume 6797</i> , pp. 30–44, Berlin Heidelberg: Springer.
5. Yoshimoto, Kei, Zhen Zhou, Tomoya Kosuge, Ruriko Otomo and Alastair Butler. 2013. 「日本語ツリーバンクのアノテーション方針」. In 『言語処理学会第 19 回年次大会発表論文集』 <i>Proceedings of the Nineteenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing</i> , pages 924–927, The Association of Natural Language Processing.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・ Butler, Alastair. *Linguistic Expressions and Semantic Processing: A Practical Approach*. 200 pp.
- ・ Zhou, Zhen, Alastair Butler and Kei Yoshimoto. 2013. 「中国語統語解析木の形式変換及びその応用に関する研究—Penn Chinese Treebank (3.0) を対象として—」. 『言語処理学会第 19 回年次大会発表論文集』*Proceedings of the Nineteenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing*, pages 920–923, The Association of Natural Language Processing.
- ・ Butler, Alastair, Zhen Zhou and Kei Yoshimoto. 2012. Problems for successful bunsetsu based parsing and some solutions. 『言語処理学会第 18 回年次大会発表論文集』*Proceedings of the Eighteenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing*, pages 951–954, The Association of Natural Language Processing.
- ・ Zhou, Zhen, Alastair Butler and Kei Yoshimoto. 2012. Combining and splitting bunsetsu of the Kyoto Text Corpus. 『言語処理学会第 18 回年次大会発表論文集』*Proceedings of the Eighteenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing*, pages 381–384, The Association of Natural Language Processing.
- ・ Butler, Alastair, Zhen Zhou, Tomoko Hotta, Su Zhang and Kei Yoshimoto. 2011. Development of Corpora Tagged with High-Precision Semantic Information. 『言語処理学会第 17 回年次大会発表論文集』*Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing*, pages 713–716, The Association of Natural Language Processing.

- Miyao, Yusuke, Alastair Butler, Kei Yoshimoto and Jun'ichi Tsujii. 2010. A Modular Architecture for the Wide-Coverage Translation of Natural Language Texts into Predicate Logic Formulas. In Proceedings of PACLIC 24: the 24th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation, pages 481-488, Sendai, Japan.
- Butler, Alastair, Yusuke Miyao, Kei Yoshimoto and Jun'ichi Tsujii. 2010. A Constrained Semantics for Parsed English. 『言語処理学会第15回年次大会発表論文集』Proceedings of the Sixteenth Annual Meeting of the Association of Natural Language Processing, pages 836-839.

# 研究報告書

## 「計算論的メディア操作の形式化」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 浜中 雅俊

### 1. 研究のねらい

我々の周りには、音楽、CG、物語など様々なコンテンツが存在する。それらは、各分野の専門知識を持つデザイナーによって注意深くデザインされており、一般ユーザがデザインの一部に変更を加えたいと意図しても、その変更を実現する適切な操作を行うことは困難であった。

これまで我々は、音楽情報処理の研究分野において計算論的音楽理論の研究を行ってきた。計算論的音楽理論の研究とは、音楽理論に基づく楽曲の形式的表現法や代数的な楽曲操作系の研究のことで、これまで、楽曲の操作を束演算の組み合わせで表現し、音楽知識のない一般ユーザでもメロディという高次の音楽構造を適切に操作できる音楽システムの構築を行ってきた。具体的には、①楽曲構造束の構成、②束演算の組み合わせによるメロディ操作、の2つを実現した。

本研究では、コンテンツの構造解析により意味木を抽出し、メディアデザインの操作を意味木の束演算の組み合わせで表現することによって、専門家の操作の事例を蓄積し、それを再利用することを可能とするシステムを構築する。このような束演算による操作事例の蓄積および再利用は、一般のユーザによるコンテンツ制作を容易にし、制作の楽しみを味わうアミューズメント性をもつだけでなく、プロのデザイナーにとっても生産性をあげる技術の一つとして期待が持たれる。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、まず、我々の考えるメディアの操作体系すなわち意味木を代数的に操作することに妥当性があるかどうかの妥当性を検討した。具体的には、音楽構造木からなるモデルの領域上で類似した楽曲が、人間にも類似した楽曲に感じられることを被験者実験により確認した。音楽構造木は、音楽理論 GTTM に基づき分析することで獲得できる。次に、音楽構造木の再利用を可能とするため、音楽構造解析データを作成し公開した。同時に、解析データを作成するための分析ツールを構築し公開した。音楽理論 GTTM に関する分析ツールの公開や、分析データベースの公開は世界で初の例である。さらに、音楽理論 GTTM に基づく音楽構造解析は、これまで単旋律(フォモフォニ)に限定されていたが、それを複旋律(ポリフォニ)に拡張する試みを行った。音楽以外のメディアへの適用の試みとして、ディスカッションと映画という2つのメディアに対して構造分析を試みた。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 「意味木を代数的に操作することの妥当性の検討」

本研究では、メディアデザインの操作を意味木の束演算の組み合わせで表現することを目指す。我々はこれまで、音楽理論 GTTM に基づく楽曲構造分析を計算機上に実装し、楽曲全体を木構造で表現することを可能にした。木構造中の各音には重要度が付与されており、重要度を閾値として簡略な骨組を抽出したり、より原曲に近い細かいレベルの音まで含む構造を取り出したりするメロディの簡約が可能である。図 1 は、木構造を用いたメロディの簡約の例である。図のメロディ A の上にある木構造は、A を分析した結果得られたもので根元に近い枝にある音符ほど重要であることを示している。このとき、木構造のレベル B より下にある枝の音符を省略するとメロディ B のようになる。さらに、レベル C より下にある枝の音符を省略するとメロディ C のようになる。このとき、メロディ A, B, C の間には、上位、下位の半順序関係(包摂関係)が存在する。こうしてメロディ間に半順序関係を定義し導入することで、メロディを要素とする束(楽曲構造束)を構成できる。

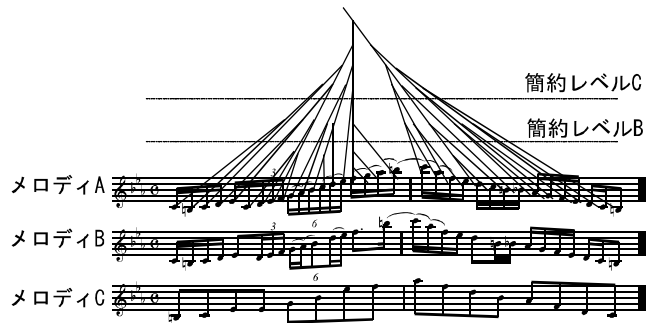


図 1: メロディの簡約

そして、楽曲構造束に対して演算や推論を行うことで、音楽の変形や変換、操作が行われることになる。このとき、意味木を代数的に操作することが妥当であるためには、構造が類似している楽曲が主観的にも類似していることが必要である。そこで、被験者実験を行い妥当性の検討を行った。

モーツァルトきらきら星変奏曲のテーマと変奏曲のうち 12 曲、合計 13 曲について一対比較法を用いて主観的な楽曲類似度を求めた。10 人の被験者の結果はほぼ一致し、その平均と、意味木の演算により求めた類似度を比較したところ、両者が良く一致していることが確認できた。

### 研究テーマ B 「音楽構造解析データの作成と公開」

音楽理論 GTTM に基づく音楽構造分析のためのツールを作成し公開した。分析ツールは、自動楽曲分析器と自動分析の結果を修正する手動エディタからなる。また、音楽家が作成した 300 曲の分析データについて、音楽理論 GTTM の専門家がクロスチェックしたデータを公開した。音楽理論 GTTM に関する分析ツールの公開や、分析データベースの公開は世界で初の例である。今後、構築した分析ツールを用いて、多くの分析データが蓄積されていき、ビックデータ解析等の手法を援用することで分析精度が向上していくことが期待される。

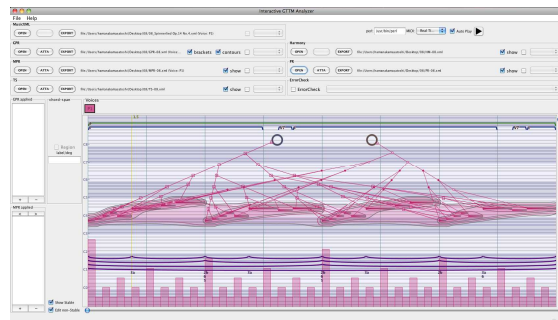


図 2: 音楽構造分析ツール



### 研究テーマC「音楽構造理論拡張の試み」

音楽理論 GTTM はフォモフォニ(和音を含む単旋律の楽曲)を対象としているため、本来ポリフォニの曲を分析することはできない。ポリフォニの曲の作曲・編曲作業の事例を束演算として抽出することを可能とするため、手作業によりポリフォニの分析を試みた。具体的には、まずアイマークカメラを用いて音楽家がポリフォニをフォモフォニへ編曲する過程を記録した。つぎに、編曲されたフォモフォニを音楽理論 GTTM に基づき分析し楽曲構造木を獲得した。最後に、音楽家の編曲過程を逆にたどることで、ポリフォニの楽曲構造木を手作業で獲得することに成功した。さらに、ポリフォニの楽曲構造木を半自動で獲得できる分析器を構築した。

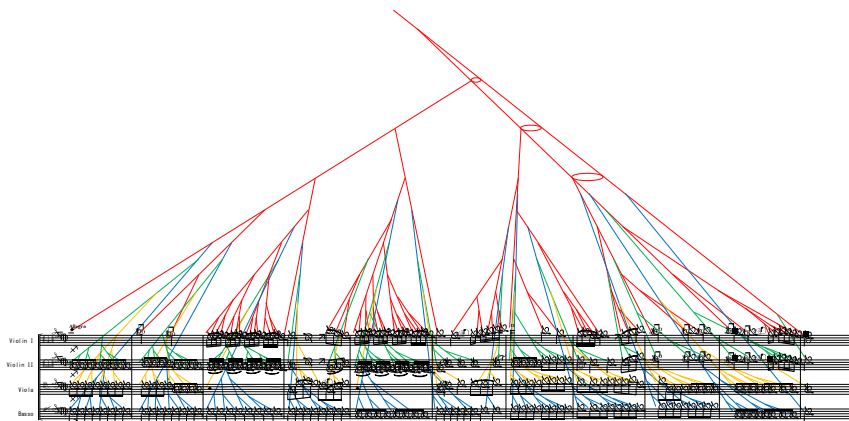


図3：ポリフォニの楽曲構木

### 研究テーマD「ディスカッションの構造分析」

音楽以外のメディアとして、名古屋大学 長尾確研究室で進めている、構造化された議事録の構造分析を試みた。人間が手作業により構造分析するためのツール(ディスカッションマイニングエディタ)を構築し、分析データの蓄積を進めている。また、分析を自動化するためのルール群の検討を進めている。

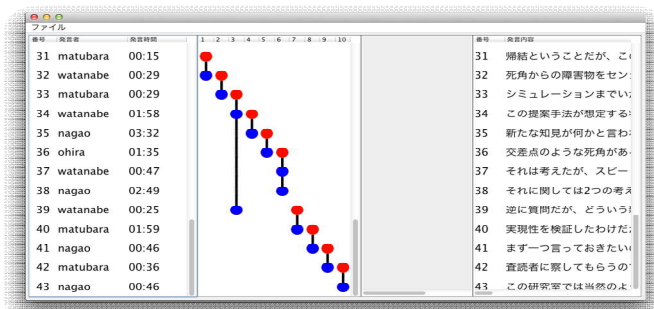


図4：ディスカッションマイニングエディタ

### 研究テーマE「映画の要約システム」

映画を手動で構造化するためのエディタを構築し、映画を短時間で視ることを可能とする要約システムを試作した。ストーリーの重要な部分をしっかり追いながら、視聴時間を短縮することが可能である。

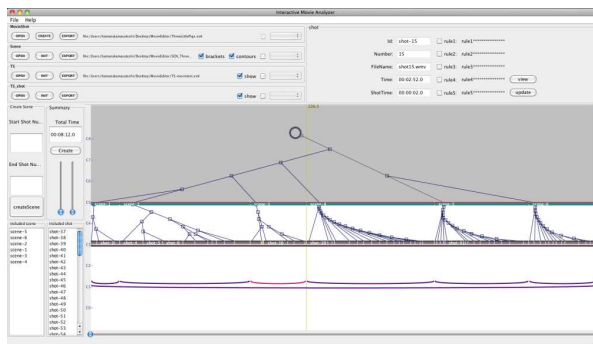


図5：映画構造化エディタ

### 3. 今後の展開

#### 展開 A 「音楽分析器の全自動化・高精度化」

本プロジェクトで構築した音楽分析器には複数の調節可能なパラメータがあり、正しい分析結果を得るためにはそれらを手動で適切に調節する必要がある。一方、本プロジェクトで300曲の楽曲分析データベースを構築したことで、統計的な手法に基づきパラメータ調節を不要とする音楽分析器の構築も可能となってきた。現在のところ、手動調節を必要とする分析器の結果と比べて精度はやや低いため、さらなる改良を行っていく。今後、パラメータ調整が不要で精度の高い分析器を実現し、楽曲の自動分析を可能とすることを目指す。

#### 展開 B 「作曲・編曲の操作履歴の蓄積と利用」

楽曲の自動分析器が可能となれば、ある編曲操作の前の楽曲と操作の後の楽曲の構造を自動分析することで、操作履歴を木構造の演算として蓄積していくことが可能となる。蓄積した操作履歴を、作曲・編曲作業に再利用することで、作曲家・編曲家の作業負荷の軽減や音楽初心者の音楽制作に役立てることを目指す。

#### 展開 C 「映画・ディスカッションの分析データの蓄積・構造解析の自動化」

本プロジェクトで構築したディスカッションマイニングエディタや映画構造化エディタを用いて手動で分析データを蓄積していく。また、分析の自動化を目指す。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

本研究では、音楽、ディスカッション、映画という3つのメディアを扱った。音楽においては、自動分析器や手動エディタの構築は予定通り進めることができた。一方で、楽曲構造木の利用については、メロディの要約やメロディモーフィングなど研究開始当初に想定していた範囲にとどまった。これは、楽曲構造分析を行うことのできる音楽家が日本国内に非常に少なく、楽曲構造データの蓄積に予想以上に時間がかかったことによる。今後、分析データの蓄積を続けることで、作曲・編曲などへの構造木の再利用を実現していきたい。

ディスカッションについては、研究に大きな時間を割き、手動分析エディタを構築したものの、自動分析についてはいまだ検討段階である。ディスカッションを行うごとに、手作業により分析するのは非常に負担が大きく非現実的なため、構造木を利用するアプリケーションの構築には至らなかった。

一方、映画については手動分析エディタを構築し、要約システムを試作した。映画の場合には、一度手動で構造解析を行えば、多くの人が要約などに利用できることから、意味木を用いた操作に適したメディアであったと考えている。

#### (2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

音楽を題材に、メディアデザインの操作を束演算の組み合わせで表現して専門家の操作事例の蓄積・再利用を可能にするシステムを構築するという研究である。

音楽については、音楽理論 GTTM のポリフォニーへの拡張を果たし、構造木からなるモデルの領域上で類似した楽曲が、人間にも類似した楽曲に感じられることを確認し、音楽構造解析データと解析データを作成するための分析ツールを公開するに至っている。また、音楽以外への適用拡大として、映画とディスカッションにメディアデザインの操作を適用し、映画については意味木を用いた操作に適したメディアであることを確認できたが、ディスカッションについては期間内に成果は得られていない。全体として、課題は達成していると考えられる。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Satoshi Tojo, Keiji Hirata, Masatoshi Hamanaka: Computational Reconstruction of Cognitive Music Theory, <i>New Generation Computing</i> , 31, pp.89-113, 2013.
2. Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, Satoshi Tojo: Time-Span Tree Analyzer for Polyphonic Music, 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR2013), October 2013.
3. Keiji Hirata, Satoshi Tojo, Masatoshi Hamanaka: Cognitive Similarity Grounded by Tree Distance from the Analysis of K.265/300e, 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR2013), October 2013.
4. Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, Satoshi Tojo: Toward Developing a Polyphonic Music Time-Span Tree Analyzer, <i>Mathematics and Computation in Music 2013(MCM2013)</i> , June 2013.
5. 浜中雅俊, 李昇姫: "コンサートスコープヘッドフォン", <i>日本バーチャルリアリティ学会論文誌</i> , Vol.18, No.3, pp.227-236, 2013.

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

### (2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

なし

# 研究報告書

## 「高性能ストリームコンピューティング環境の構築」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 山際 伸一

### 1. 研究のねらい

マイクロマシン技術の発展により、加速度センサや、地磁気センサ、高精細な映像を取り込むイメージセンサなど、ヒトの行動に周囲の環境の影響を加味した知識の創生が可能になっている。センサからのデータは、途切れることなく、決められた時間間隔で生成され続ける。このようなデータストリームを扱う際、現代の情報機器の基盤となるフォンノイマン型の計算手法ではメモリにそのデータを一時的に保存して、プロセッサがそのデータを読み書きすることで処理を進めるため破綻をもたらす。より高精細なセンサ性能開発が進む一方で、処理能力との”いたちごっこ”は顕著に表れることが予想され新しいデータ処理方式を考案することが望まれる。データストリームを滞りなく高速処理する方法として、データパイプラインを専用ハードウェアで構成することが考えられる。専用ハードウェアを設計する際に、パイプラインを構成する演算器のイネーブルを出すタイミングは設計者により緻密に計算され、パイプラインが滞ることなく処理が継続されるタイミングにアサートされる必要がある。ハードウェア記述言語での設計が近年の主流であるが、演算器のイネーブルタイミングを決定するにはハードウェアの規模や動作スピードとの組み合わせを設計者が考慮しなければならず、不具合の誘発をおこしやすく、ハードウェア規模と動作性能が良くバランスした回路を構成するのは難しい。このようなデータパイプライン設計上の困難を排除するための新しいハードウェア設計技法の開発が望まれる。本研究は上記の問題点を解決するために、データストリームを入力とし、その各要素に対する計算を定義するプログラムが、順次対応する結果を出力するストリームコンピューティングの概念を取り入れたプログラミング環境を開発する。特に最近の性能向上が顕著なアクセラレータでのプログラム実行が可能な環境の構築を主軸とする。さらに、ストリームコンピューティング環境で実行されるプログラムの単位をハードウェア記述言語に変換するためのコンパイラを開発する。以上から、現代のプロセッサでは処理できない程度の大量なデータストリームに対する処理装置開発のための基盤を開発することをねらいとする。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

本研究課題における成果として、(1)アクセラレータプログラム向けの高生産性プログラミング環境の構築、(2)パイプライン実行の実行順序付けと並列性抽出による高速実行手法、そして、(3)コンパクトなパイプラインハードウェアを出力するコンパイラの開発、(4)ストリームデータ圧縮ハードウェアの開発があげられる。これらの成果により、研究の狙いである知を創生する高性能ストリームコンピューティングシステムの設計・実装を支援する開発システムを実現できる基礎技術を確立できた。(1)(2)の成果に関しては、システムの動作を確認するシミュレーション部分として利用でき、近年、注目される GPU や超並列アクセラレータを使って、実現するシステムの動作の確認を短期に完了できる手法の基盤技術として利用できる。ストリームを扱うシステムに対し、ソフトウェアレベルでの動作の確認が実現できたところで、(3)の成果であるハードウェアコンパイラを用いて、パイプラインハードウェアの合成ができる基盤を構築できた。アクセラレータで実行されるプログラムはデータストリームを扱うように記述されるという特徴を利用し、演算コンポーネントを実行タイミングを調整しながら接続することでパイプラインハードウェアを合成するコンパイラを開発した。以上のハードウェア合成技術に加え、データストリームを高速伝送する技術として、(4)のデータ圧縮ハードウェアを開発した。この圧縮技術では、実装に必要となるハードウェアのリソース量と圧縮率をコントロールし、さらに、伝送路の限界を超えるスループットを実現するリアルタイム伝送を可能にした。以上の4つの成果から、大量のデータストリームを扱うシステムをアクセラレータを使って高速にシミュレーションし、ハードウェアを合成するコンパイラを介して、ハードウェアを合成でき、さらには、その合成されたハードウェア間で移動するデータストリームを高速伝送することが可能になった。

### (2) 詳細

本研究は以下の4つの大きなテーマでの成果を得られた。

#### 研究テーマ A 「アクセラレータプログラム向けの高生産性プログラミング環境の構築」

システムの設計者は、データストリームを扱う計算アルゴリズムを flow-model と呼ばれるモデルにパックし、そのモデルをつなぎ合わせパイプラインを構成する。このモデルは、上記アクセラレータ向けプログラムと、その入出力ストリーム定義を含む。各モデルはアクセラレータで実行される必要があるが、従来の方法では、そのホストプロセッサがモデルをアクセラレータにマップし、さらに、入出力データをアクセラレータ側と交換する手続きを明に記述していくため、2種類のプログラムを同時に書く必要があり、生産性が悪い。本研究テーマでは、アクセラレータのプログラムをコマンドラインから直接実行できるメカニズムを実現し、パイプライン処理を構成する、個々のモデルの実行順序と入出力関係を指示することで、自動的に実行できる仕組みを実現できた。この実行を可能とするシステムに CarSh と名付け、flow-model や、flow-model とその I/O の関係性を記述したバッチファイルをコマンドラインに与えると、CarSh が flow-model をアクセラレータに自動的にマップしながら、データストリームを伝搬させ、パイプライン処理を実行していく[発表論文4]。図1に上記をまとめた全体の図を示す。

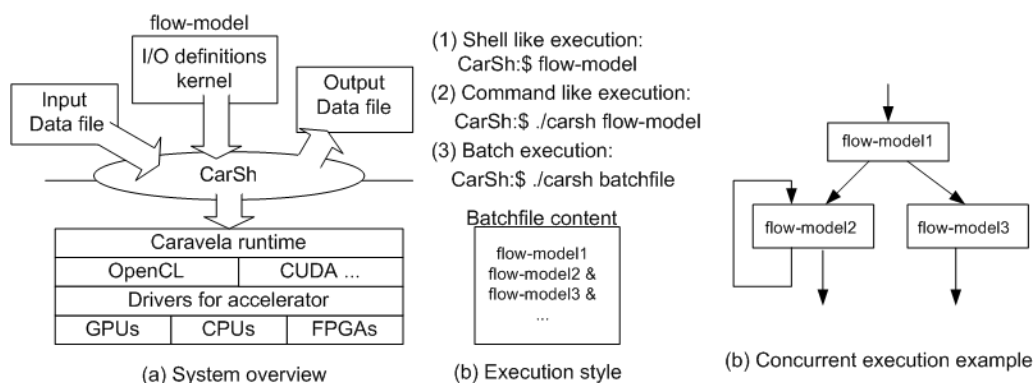


図1: CarSh によるプログラミング手法

研究テーマ B 「パイプライン実行の実行順序付けと並列性抽出による高速実行手法」  
 アクセラレータが複数存在する環境において、構成したパイプラインから実行順序を特定し、さらに、パイプラインとしての並列性を抽出する手法を開発した[発表論文2]。この手法では、上述の CarSh の実行対象となるパイプライン定義を使って、最初実行可能な flow-model をルートとする Spanning Tree を構成することで、唯一の実行順序を特定するとともに、自動的に並列性を抜き出し、パイプライン処理の並列化ができる。さらに、ホストプロセッサとアクセラレータ間のデータ移動がもたらすコピー操作のオーバヘッドにも着目し、Scenario-based Execution と呼ばれる新しいアクセラレータプログラム実行方式を確立した[発表論文3]。この実行方式の概略を図2に示す。

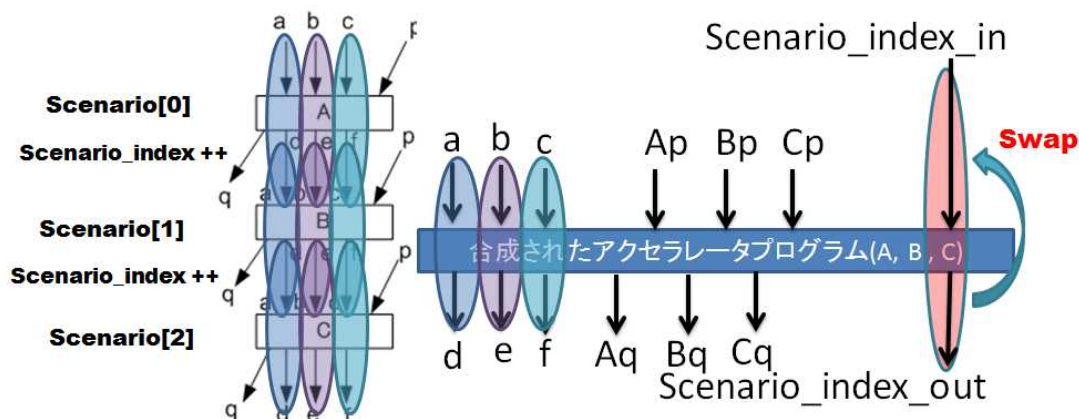


図2: Scenario-based Execution

研究テーマ C 「コンパクトなパイプラインハードウェアを出力するコンパイラの開発」  
 上記、研究テーマ A, B の成果で動作確認をしたパイプライン処理を構成する flow-model を直接コンパイルすることでハードウェアを出力するストリームパイプラインコンパイラを開発した[発表論文5]。対象言語は OpenCL とし、そのアクセラレータで実行されるプログラムを中間モデル (HAM) に変換する。このとき、利用可能なコンポーネントを集めることで、実装可能な演算を合成する。HAM をハードウェア記述言語 (VHDL) に出力することで、パイプラインハードウェアを実装する。この VHDL で記述された回路を FPGA 等の実装向け EDA ツールに入力することで、ハードウェア合成が可能になった。

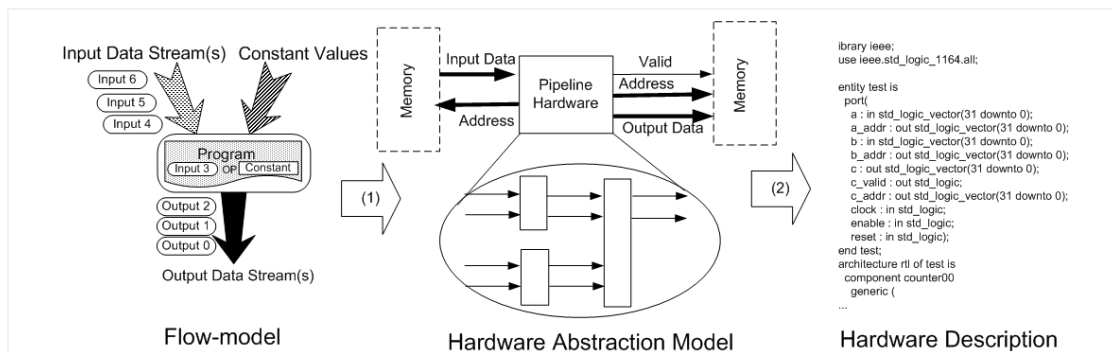


図3: ストリームパイプラインコンパイラ

### 研究テーマD 「ストリームデータ圧縮ハードウェアの開発」

データ伝送路のスピードは光速に近づきつつあり、このままだと実装技術の限界に達し、破綻してしまう恐れがある。そこで、データストリームの伝送路に対し、データの高度な圧縮が可能になれば、データ伝送路の実装限界の問題は緩和され、光の速度を超えるデータ伝送が期待できる。しかし、現代の圧縮回路は(1)圧縮のための処理時間が一定ではなく、(2)必要となるメモリサイズが予測できなく、さらに、(3)圧縮率とハードウェア量を制御できない。そこで、2期生の坂本比呂志氏とのコラボレーションにより、LCA-SLT と呼ばれる新たなストリーム圧縮手法を開発した[発表論文1]。この手法では、2シンボルから1シンボルに変換する機構をもち、テーブルを圧縮・解凍の双方で交換しなくてよい。さらに、複数の圧縮・解凍モジュールをスケラブルに接続でき、圧縮率とハードウェア量の調整が可能になっている。図4にこの手法の概要を示す。

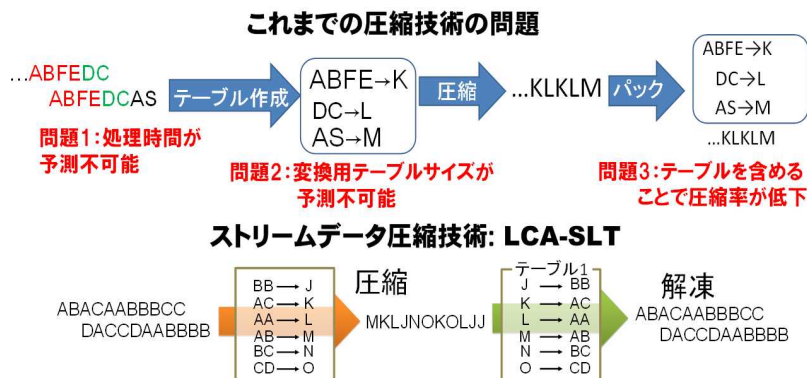


図4: ストリームデータ圧縮ハードウェア

### 3. 今後の展開

研究テーマから得られた成果を元に、ハードウェアを統合的に開発できる GUI 環境を構築し、実用化可能な段階へと進めることを目標とする。アクセラレータでのシミュレーション部分には、スーパーコンピュータを利用可能なインタフェースをターゲットとする。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

研究成果 A、B に関しては、研究のねらいの前半部分のハードウェアシミュレーションを高速に実施する点に一致し、研究成果 C が、研究の狙いのコンパイラ部分にあたる。これらの基本

理論は確立できたがデザインツールとして全体をまとめるまでは至らなかったが、研究の狙いの通り、研究は実施されたと評価する。また、データ伝送路のデータ圧縮技術に関しても、研究成果 D で、さきがけ研究者内において分野を超えた専門技術情報交換ができ、新たな技術開発、さらには、本研究課題の発展までに着手できたことは、驚きであり、高く自己評価する。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

ストリーム・コンピューティングのパラダイムを採用し、大量のデータフローを効果的に扱うための高性能でコンパクトなハードウェアシステムを構成できる、ハードウェア化まで一貫している基盤技術を開発するという研究である。

研究期間を通じ、アクセラレータプログラム向けの高生産性プログラミング環境の構築、パイプライン実行の実行順序付けと並列性抽出による高速実行手法、コンパクトなパイプラインハードウェアを出力するコンパイラの開発を行っている。これらによって、大量のデータストリームを扱うシステムをアクセラレータを使って高速にシミュレーションし、ハードウェアを合成するコンパイラを介して、ハードウェアを合成でき、さらに、その合成されたハードウェア間で移動するデータストリームを高速伝送することが可能になっており、目標を達成している。また、二期生の坂本比呂志研究者のデータ圧縮技術を取り入れ、当初予定外のストリームデータ圧縮ハードウェアも開発しており、製品化に向けた取り組みを行っており、評価する。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. Shinichi Yamagiwa and Hiroshi Sakamoto, A Reconfigurable Stream Compression Hardware based on Static Symbol-Lookup Table, Proceedings of IEEE BigData/BPOE 2013, pp. 86-93, IEEE, October 2013.   |
| 2. Shinichi Yamagiwa, Ryo Jozaki, Shixun Zhang, Ryo Zaizen and Dewen Xu, "Exploiting Execution Order and Parallelism from Processing Flow Applying Pipeline-based Programming Method on Manycore Accelerators", Proc. ICPP, 708-717, IEEE, 2013.     |
| 3. Shinichi Yamagiwa and Shixun Zhang, Scenario-based Execution Method for Massively Parallel Accelerators, The 11th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA-13), pp. 1039-1048, IEEE, July 2013 |
| 4. Shinichi Yamagiwa and Shixun Zhang, CarSh: "CarSh: A Commandline Execution Support for Stream-based Acceleration Environment", Procedia Computer Science 18:601-610, Elsevier, 2013.  |
| 5. Shinichi Yamagiwa, Ryoyu Watanabe and Koichi Wada, "Operation Synchronization Technique on Pipeline-based Hardware Synthesis Applying Stream-based Computing Framework", Proc. IEEE IPDPS/APDCM2013, 761-770, IEEE, 2013.                         |

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 4件



1.

発明者：山際伸一  
発明の名称：プログラム・及び情報処理装置  
出願人：筑波大学  
出願日：2013/7/10  
出願番号：特願 2013-144661

2.

発明者：山際伸一、坂本比呂志  
発明の名称：データ圧縮器及びデータ解凍器  
出願人：筑波大学、九州工業大学  
出願日：2013/6/4  
出願番号：特願 2013-118356

3.

発明者：山際伸一  
発明の名称：アクセラレータ処理実行装置、及びアクセラレータ処理実行プログラム  
出願人：筑波大学  
出願日：2013/5/28  
出願番号：特願 2013-109741

4.

発明者：山際伸一  
発明の名称：ハードウェア設計装置、及びハードウェア設計用プログラム  
出願人：筑波大学  
出願日：2013/5/17  
出願番号：特願 2013-105024

(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)

<招待講演>

(1) GPU パワーを利用するアカデミックチャレンジ ～津波予測からスポーツ科学まで～,  
NVIDIA GPU Technology Conference 2012, 2012 年 7 月 26 日.

(2) ストリームコンピューティング方式のプログラミングを利用したハードウェア合成”,  
IEICE ソサエティ大会, 2011 年 9 月

<報道>

(1) NIKKEI BP Tech-On! 「GPGPU は EDA をどう変えるか」、札幌で電子情報通信学会ソ  
サエティ大会の特別企画を聴講—その2, 2011 年 9 月 26 日

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20110926/198590/>

# 研究報告書

## 「能動センシングによる日用柔軟物の情報知識化とその応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 山崎 公俊

### 1. 研究のねらい

日常生活の営みには様々なものが関わっており、我々は日々それらを利用している。特に衣服や寝具などに代表される「布製品」は、生活を送る上で必須の存在である。もし、洗濯物を畳むなどの日常的な作業を自動化できれば、人の労力を軽減する効果が期待できる。本研究のねらいは、布製品の扱いを可能にするための知能システムを確立することで、大量の日常データを基に行動する自律ロボットの有用な行動例を示すことである。このため、柔軟物のセンシングとその知識化の方式を示し、実ロボットによる布製品の自動操作を実現する。

剛体に比べ、柔軟物に関わる物理支援作業は高度な判断能力を要することが多い。洗濯物の山からシャツを一枚取り出して畳む作業を例に取っても、シャツらしきものを探す、目的のシャツを取り出すにはどこを掴めば良いか決める、任意の状態へ畳むための手順を立てる、などにおいて、その物体が様々な形状を取りうるが故に問題が複雑になる。このような作業の自動化のためにまず必要なことは、様々な状態、様々な種類の布製品に適用できる「知識」を持つことである。本研究は、過去に蓄積したセンシング情報から種々のタスクに必要な「知識」を生成するための方法と、それを利用して有益な作業を行うロボットの実現に主眼を置いた。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、自律型ロボットが布製品を扱うために必要と考えられるいくつかの要素技術に着目し、提案と実証を進めてきた。そして、布製品を見つける、種類を知る、操作中の失敗を検知するなどといった、布が柔軟物であるが故に従来研究では実現が難しかった課題の解決策を示した。

上述の成果は、従来研究と異なる次のような方針に基づいて行われた。(I) 多種多様な布製品に関するセンサデータを事前に取得しておき、それらを統計処理した情報を認識等に利用する。(II) 作業目的に沿った布製品の知識化を行うために、センサデータから特徴量記述を行う方式に注力する。後者の特徴量記述においては、シワや布地など、布製品ならではの性質に着目した提案が行われ、処理速度・識別率などの点で従来手法よりも高性能な手法が提案・実証された。また、ロボティクス応用についてもいくつかの事例を示した。具体的には、生活環境下で布製品を拾い集める、両手で布製品を畳む、座位にある人にズボンをはかせる等の作業において実現可能性が示された。

## (2) 詳細

本研究の主たる成果は 4 項目にまとめられる: (A)生活環境下で布製品を見つける手法の提案と実証, (B)無造作に置かれた布製品の種別手法の提案と実証, (C)無造作に置かれた布製品に対する把持位置の決定, (D)人やロボットにより操作されている布製品の状態認識手法の提案と実証.

項目(A)では, 従来手法の発展として, 布の「しわ」にのみ反応する認識器を構築する方式を改良した. 図 1 に処理例を示す. ここでは, 特定の空間周波数の組み合わせを抽出するための画像処理手法を適用し, 画素の類似性に基づく領域分割手法, 機械学習手法などと組み合わせた. 認識器の生成のため, 生活環境下であらかじめ撮影しておいた多数の画像から, 布のシワが映り込んだ部分とそれ以外の部分を切り出した局所画像データセットを利用した. なお, 提案方式は等身大の家事支援ロボットによる洗濯物片付けタスク等への応用があり, 模擬リビング環境における衣類の発見と回収を自動で行わせることに成功している.



図 1: 布製品を見つける

項目(B)では, 床やテーブル上に置かれたタオルやシャツなどの布製品について, それらが様々な形状で無造作に置かれている状態から, その種類を判別することに成功した. 布地やしわのでき方の違いを強調するための多方向・多スケール画像フィルタリング方式を提案し, その結果から弁別性の高い特徴量表現を生成する方式も提案した. 認識器の生成のため, 様々な置き方をした様々な布製品の画像データセットを利用した, 日常的に利用する 20 種類以上の布製品を対象とした実験では, 従来手法では 79%であった識別率が 99%まで向上することが確認された. 本方式については, 画像の小領域分割手法との組み合わせも提案され, 複数の布製品がまとめておかれている場合にも対応可能であることが示された.

項目(C)では, 無造作に置かれた布製品を効率よく展開するための手法として, 適切な二点の把持位置を一枚の距離画像から見つける方法を提案した. これは, 布のフチ(縁)を手掛かりとする表現方式を用いることで, 全体形状の性質を表現する方法と, 全体形状に対して適切な把持位置を記録させる方法を組み合わせている. 認識器の生成のため, 様々な置き方をした布製品の距離データを多数取得し, そこに適切な把持位置を人手によって指示した. 認識処理は, まず現在の布製品の形状と類似した形状状態を蓄積データから探索し, つぎに探索されたデータに紐づけされた把持位置情報を利用して, 入力データ中で適切な把持位置を決める流れで行われる. 小型のタオル



図 2: 把持位置を決める

ルを用いた実験では、適切な把持位置の検出率は70%を示した。図2に検出された把持位置の例を示す。上の画像は蓄積データの一つであり、入力形状と類似していると判断されたものである。下の画像は入力形状であり、色付きの点は適切な把持位置と判断された部分である。



図3：操作中の状態を知る

項目(D)では、人やロボットが操作している最中の布製品について、それらの状態表現を画像と三次元距離データを入力として行う方式を提案した。オプティカルフロー情報をベースとした複数の特徴量表現を適切に組み合わせ、布製品の大まかな状態遷移をグラフ構造として記録する方式を提案・評価した。認識器の生成のため、着衣の様子を時系列で計測したカラー画像と三次元距離画像の組み合わせデータセットを用いた。提案方式により、従来の関連研究では形状推定を行うために布操作の動きを一時的に止める必要のあったものが、動き情報を直接的に利用することにより不要になった。この成果は、等身大ロボットにより着座状態にある人に着衣を行う作業へ適用され、ロボットに搭載した力覚センサ等と連携を行うことで着衣作業が実現できることも示されている。図3は着衣実験中の処理結果を示している。上の画像は着衣が順調に進んでいる場合であり、下の画像では片足がズボンに引っ掛かっている。視覚処理によりこの状態をいち早く検知することができ、着衣対象者に大きな負荷をかけることなく着衣をやり直すことができた。

本研究の獨創性・新規性は、布という柔軟物体に関して明示的な形状モデルを持たせることなく、作業目的を達成できる方式を提案・実証しているところである。従来研究では、可変形状モデルを用いたり、動的計画法(DP)によるActive Contour Modelなどの位置合わせ手法を用いたりすることで布の状態推定を行うことが多かった。また、作業環境内で布製品の発見や選択などを行う課題のように、形状モデルが利用しづらい局面では、色情報を利用するなど簡易な対応が採られてきた。しかしながら、生活環境で布製品がどのように存在しているかを考えると、形状モデルを持たせるアプローチでは対応が難しい状況が多くある。例えば、無造作に丸められた布製品の形状状態を可変形状モデルで再現することは困難である。また、一般家庭には同じ色をした衣類が多く存在するため、色情報を用いる方式が機能しない局面は多くある。

このような現状を踏まえ、本研究では従来とは異なるアプローチを採ってきた。端的に言えば次の二つにまとめられる。(I)多種多様な布製品に関するセンサデータを事前に取得しておき、それらを統計処理しておいた情報を、認識等に利用する。(II)作業目的に沿った布製品のモデル化を行うために、センサデータから特徴量記述を行う方式に注力する。これら方針に従い、布製品の発見、種類の判別、操作状況の推定などが行えることを確認した。布製品の発見では、従来研究のような色の違いを前提とする方式から脱却することに成功した。種類の判別では、無造作に丸められた布製品に対しても機能する方式を提案し、識別率99%を達成した。操作状況の推定では、布の三次元形状推定を直接的に行うことなく、比較的少ない

このような現状を踏まえ、本研究では従来とは異なるアプローチを採ってきた。端的に言えば次の二つにまとめられる。(I)多種多様な布製品に関するセンサデータを事前に取得しておき、それらを統計処理しておいた情報を、認識等に利用する。(II)作業目的に沿った布製品のモデル化を行うために、センサデータから特徴量記述を行う方式に注力する。これら方針に従い、布製品の発見、種類の判別、操作状況の推定などが行えることを確認した。布製品の発見では、従来研究のような色の違いを前提とする方式から脱却することに成功した。種類の判別では、無造作に丸められた布製品に対しても機能する方式を提案し、識別率99%を達成した。操作状況の推定では、布の三次元形状推定を直接的に行うことなく、比較的少ない

計算量にて布製品操作の作業状況を推定することを可能にした。加えて、これらの成果は自律型ロボットの一機能として組み込まれ、洗濯物の収集や着衣補助動作など、具体的な生活支援タスクにも適用できる可能性が示された。図 4 に、ロボットによるいくつかの布製品操作実験の様子を示す。



図 3：布製品操作実験の様子

### 3. 今後の展開

我々が日常生活を送るうえで布製品はきわめて身近な存在である。その中で、洗濯物の扱いなどの家事活動について、自動機械によってその一部を代替するための研究開発を推し進めていくことで、労働年齢層の減少や高齢社会等の問題への確かな対策になると考えられる。例えば、洗濯物の整理など、布製品に関連する操作は我々にとって日常的である。上述した(A)～(D)の業績により、布製品の発見・種別・操作に関する要素技術が整ってきているため、このような作業を自動機械によって代替できれば、労働年齢層の生産的活動時間を確保させられる点などにおいて社会に対する貢献は大きいと思われる。また、布製品が扱われる様々な工場環境においては、対象物の自動的な計測・操作のためにベルトコンベア形式の大型機械を必要としたり、人手による事前準備を必要としている。本業績やその発展技術を利用することでそれらを省略できる可能性があり、機械の小型化などへ寄与することが期待できる。

布製品の認識と操作に関する研究開発は発展途上の段階にあり、未解決課題の多い分野である。その要因として、布製品に関する知識の表現方法が確立されていないことがある。本研究

では、上記(I)(II)に示したように蓄積データを主体とした知識表現を用いてきており、日常的な布製品の認識・操作における具体的な課題を設定して研究を行ったが、Yシャツなどの複雑な形状の布製品を畳んだり、装飾用として複雑に織り込まれた布地などを識別するには、これまでの研究成果にはまだ改良・発展の余地が多い。しかし、蓄積データ主体の方針で研究を進めているため、必要なセンサデータの提供と、それに対する適切なセンサ情報処理手法を提案することで、これまでの枠組みを保持しつつ、対象とする布製品の種類を増やすことができると考えられる。また、布製品に関わる作業には畳む・着る・敷く・拭くなど様々なものが存在するが、これまでの研究成果である「発見」「識別」「把持位置の選択」「操作中の状態認識」はこれらのいずれにも必要な要素技術となっており、継続的に研究活動を進めていくことで、従来技術では自動化が難しかった種々の作業に新たな解決策を示すことが期待できる。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

本研究のねらいは、布製品の扱いを可能にするための知能システムを確立し、大量の日常データを基に行動する自律ロボットの有用な行動例を示すことであった。これに対し、過去に蓄積したセンシング情報から種々のタスクに必要な「知識」を生成するための方法を提案・実証してきた。また、それを応用した自律ロボットの実験も行ってきた。具体的な成果は上述したとおりであり、作業の自動化に必要であろういくつかの項目について、従来研究で想定してきた前提条件が提案手法では不要となることを示してきた。また、日常生活でよく見られる「無造作に置かれた状態」の布製品を対象とした認識手法については、本研究により大きな進歩がみられた。これらの点で、布製品の情報知識化については一定の成果が得られたと考えられる。一方で、研究目標の達成を効率化すべき項目については、研究期間中に十分に醸成されない部分があった。例えば、センサデータの蓄積手法について、当初はロボットによる自動的なデータ収集までを視野に入れていたが、それについては継続的な研究活動が必要な段階にある。また、シャツなどの複雑な形状の布製品を折りたたむなどの作業については未着手であり、操作知識がより高度なものとなるためには、それらを可能にするためのさらなる研究を要する。ただし、これまでの研究活動は、これらの研究課題についての新たな基礎を与えるために十分な知見と成果を創出したものであり、高い発展性を有すると思われる。今後もこれまでの方針に則り、鋭意研究を進めていきたい。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

日用柔軟物の扱いを可能にするための知能システムを確立するという研究である。従来困難だったロボットによる柔軟物の取り扱いに挑戦している。

多種多様な布製品に関するセンサデータから特徴量記述を行い、シワや布地など、布製品ならではの性質に着目することで、処理速度や識別率などの点で従来手法よりも高性能な手法を開発している。また、ロボティクス応用についても、生活環境下で布製品を拾い集める、両手で布製品を畳む、座位にある人にズボンをはかせる等の作業において実現可能性を示した。日常生活でよく見られる「無造作に置かれた状態」の布製品を対象とした認識手法について、大きく進歩させた点を高く評価する。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. 山崎公俊, 稲葉雅幸:「布地, しわ, 布の折れ重なりに着目した画像特徴量による無造作に置かれた布製品の個体識別」, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.7, 2013.   |
| 2. Kimitoshi Yamazaki, Ryosuke Oya, Kotaro Nagahama and Masayuki Inaba:” A Method of State Recognition of Dressing Clothes Based on Dynamic State Matching,”, in Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013. |
| 3. Kimitoshi Yamazaki and Masayuki Inaba:” Clothing Classification Using Image Features Derived from Clothing Fabrics, Wrinkles and Cloth Overlaps,” in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems, 2013.          |
| 4. 山崎公俊:「無造作に置かれた布製品の把持位置決定手法」, 第19回ロボティクスシンポジウム, 2014.  |
| 5. 山崎公俊, 稲葉雅幸:「無造作に置かれた布製品の画像による分類」, 第17回ロボティクスシンポジウム, 2012.   |

### (2)特許出願

研究期間累積件数: 1件

1.

発明者: 山崎 公俊, 稲葉 雅幸

発明の名称: 特徴量抽出方法、被写体分類方法、被写体判別方法、特徴量抽出装置、被写体分類装置、被写体判別装置、特徴量抽出・被写体分類及び被写体判別プログラム及び該プログラムを記録した記録媒体

出願人: 科学技術振興機構

出願日: 2011/12/16

出願番号: 2011-275582 (PCT/JP2012/068229)

### (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)

- 招待講演: 山崎公俊「知能ロボットの認識・行動計画・システムインテグレーション」, 計測自動制御学会 中部支部 信州地区計測制御研究会
- 招待講演: 山崎公俊「布製品の認識と操作に向けたセンサ情報処理」, 筑波大学 第42回 UTARC セミナー.
- 招待講演: 山崎公俊「自律型生活支援ロボットのためのセンサ情報処理」, 日本機械学会ロボメカ部門第1地区技術委員会講演会「情報とロボティクス」
- 招待講演: 山崎公俊「生活環境下で行動する自律型ロボットのための視覚処理と認識」, 広島大学産学官連携推進研究協力会事業 講演会「感性がつなぐロボットと人の未来」
- 受賞: 計測自動制御学会 SI 部門若手奨励賞(受賞論文 山崎公俊, 稲葉雅幸:「布地としわに由来する画像特徴を用いた布製品の分類」)