

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域

「人間と調和した創造的協働を実現する  
知的情報処理システムの構築」

研究課題

「実践知能アプリケーション構築フレームワーク PRINTEPS  
の開発と社会実践」

## 研究終了報告書

研究期間 2014年10月～2020年3月

研究代表者：山口 高平  
(慶應義塾大学工学部 教授)

## § 1. 研究実施の概要

### (1) 実施概要

統合知能ロボットアプリケーション開発プラットフォーム PRINTEPS は、要素知能を連携させた統合知能アプリを開発できること、および、ユーザが使える AI ツールであることを大きな特色としており、以下、研究実施結果を具体的にまとめる。

●【ユーズ向け統合知能アプリケーションプラットフォーム】従来、データ粒度の多様性により、AI の要素知能の連携は困難であったが、PRINTEPS では、記号処理としての知識推論と音声対話、信号処理としての画像センシングと知的動作計画、機械学習・ディープラーニングという、5種類の要素知能を統合可能にし、AI ソフトウェアだけでなく知能ロボットアプリケーションまでも含む、多様な統合知能アプリケーションを開発できる。特に、日本語によりワークフローと業務ルールを記述すれば、準備したソフトウェアライブラリの範囲内で、自動プログラミング機能により、Pythonコードを自動生成し、AIロボットの推論・発話・動作が可能となることが大きな特色であり、既に 300 以上のソフトウェアライブラリを開発した。

●【クラスルーム AI】社会、算数、理科、総合科目などの授業において、10 名以上の教師と 1000 名以上の小学校児童を対象にして、PRINTEPS でシナリオを記述すれば、教師と AI ロボット間の多様なインタラクション、および、児童のグループ討論において、状況に応じて適切に発言する AI ロボットを実装でき、多様な HRI(ヒューマンロボットインタラクション)を実現し、先進的なクラスルーム AI になった。

●【ロボット喫茶店】一方、PRINTEPS では、入店時挨拶・座席案内・注文・飲み物の用意と運搬・会計・見送りなど、様々な喫茶店業務を代行する AI ロボット群を自動プログラミングにより設計実装できることを実証した

以下、PRINTEPS とその実証システムを実現するために必要であった、顕著な成果と科学技術イノベーションについて述べる。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1. マルチモーダルインタラクション

概要:

グループ議論の自動要約を目指し、議論参加者の注視行動、頭部動作、韻律情報にもとづき、要約に含めるべき重要発言を検出するモデルの作成に取り組んだ。4 種類の非言語情報については 3D-CNN を採用し、議論参加者間の行動パターンを畳み込み演算によりとらえることを提案している。モデル評価の結果、言語・非言語フュージョンモデルは、言語情報のみ、あるいは非言語情報のみのモデルを上回る性能を達成し、F-measure も 0.827 であった。

Fumio Nihei, Yukiko I. Nakano, and Yutaka Takase, “Meeting Extracts for Discussion Summarization based on Multimodal Nonverbal Information,” ICMI2016, pp.185-192, 2016. (採択率 17%)

Fumio Nihei, Yukiko I. Nakano, and Yutaka Takase, “Predicting meeting extracts in group discussions using multimodal convolutional neural networks,” ICMI 2017, pp. 421-425, 2017.

#### 2. 画像処理とディープラーニング

概要:

画像による環境センシングと認識技術に関する新規性の高い独創的なアルゴリズムを提案し、国際的に高く評価される学術論文誌やトップコンファレンスに採択された。その一つは、マルチモーダル回帰 CNN という新しい機械学習フレームワークを提案し、音声と映像の同期を効果的に実現可能であることを示し、信号処理のトップコンファレンスの ICASSP2018 に採択された。もう一つは、移動カメラ映像入力から復元される撮影環境の 3次元構造に機械学習を適用することにより、環境の意味ラベルマップ

を推定するアルゴリズムを提案し、既存の手法に対して高い性能を示すことに成功した。この成果は、トップコンファレンスの ICCV2019、IROS2018、さらに国際論文誌の IEEE Access に採択された。

Yoshikatsu Nakajima, Byeongkeun Kang, Hideo Saito, and Kris Kitani, “Incremental Class Discovery for Semantic Segmentation with RGBD Sensing,” Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 972–981, 2019.

### 3. 自然言語と知識処理の融合

#### 概要:

対話において、ユーザが発話した自然言語を大規模構造化知識ベースにアクセス可能なように、述語項構造抽出技術を用いて発話の中から RDF に相当する3つ組の情報を抽出し、その情報を元に Linked Open Data で構成されている知識ベースにアクセスするための SPARQL クエリを自動生成するセマンティックパーズング手法を開発した。さらに、構造化知識を埋め込み知識に変換することにより、自然言語と知識を結びつける柔軟な変換手法の開発を進め、深層学習を用いた日本語の対話システムを実装することによりその有効性を検証した。

#### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

##### 1. ユーザ指向 AI ロボットアプリケーション開発プラットフォーム PRINTEPS

#### 概要:

PRINTEPS では、知識ベース推論、音声対話、画像センシング、モーションプランニング、機械学習のソフトウェアモジュール群が組み込まれ、日本語で記述されたワークフローから、ROS 上で動作する Python プログラミングコードに自動変換する機能をもつため、エンドユーザが AI ロボットアプリケーションを自力で開発することができる。ユーザ指向 AI ツール PRINTEPS は、日欧 AI 共同研究 Human-Centric AI の具体的研究として位置づけられることから、政治経済から科学技術まで幅広く取り扱う英国雑誌、OpenAccessGovernment という Web 季刊誌に、2019 年 10 月、PRINTEPS の記事が掲載された。

Takahira Yamaguchi, OpenAccessGovernment 2019, pp.232–233, October 2019.

<https://www.openaccessgovernment.org/category/publications/>

##### 2. PRINTEPS の実践: マルチロボット喫茶店、クラスルーム AI ロボット

#### 概要:

PRINTEPS の有用性を評価するために、マルチロボット喫茶店と小学校での教師ロボット連携授業を実践してきた。2017 年 10 月、矢上祭(慶應応義塾大学理工学部学園祭)で、ソフトドリンクだけを販売するマルチロボット喫茶店を 2 日間営業し、約 100 名が来店した。2018 年度は、ソフトドリンクに加えて、クレープも販売し、顧客の写真を撮影し、ロボットハンドがチョコレートチューブを絞って、クレープ生地の上に似顔を描くサービスを提供し、2 日間で約 250 名が来店した。マルチロボット喫茶店は、世界でも類のない知能ロボットの研究実践例であり、2018 年 12 月に英国科学雑誌 Impact、2020 年 4 月に英国雑誌 OpenAccessGovernment に、本実践が記事として掲載された。Impact、OpenAccessGovernment は、共に世界中の大学、研究機関、国と地域の研究資金補助組織、政策、政府、民間、公共セクターのすべての主要な関係者に読まれる英国の雑誌であり、PRINTEPS を海外に広く周知できたといえる。また、2019 年 8 月には、13 名の小中学校教員を集めてセミナーを開催した。本セミナーを含めて、20 数名の教師が PRINTEPS を使ってロボット連携授業を開発し、650 名程度の生徒がその教師支援ロボット授業を体験してきており、クラスルーム AI を全国に普及する足掛かりができたと考えている。米国では、2018 年より、AI4K12 (AI for K-12) という小中学生のための AI 教育が開始されており、我が国においても子供達のための AI 教育基盤を整備する必要性があり、本成果がその一助になると考えている。

Takahira Yamaguchi, Impact, Volume 2018, Number 11, pp.19–21, 2018.

Takahira Yamaguchi, OpenAccessGovernment 2020, pp.460–462, January 2020.

Takahira Yamaguchi, OpenAccessGovernment 2020, pp.304–305, April 2020.

Takahira Yamaguchi, OpenAccessGovernment 2020, pp.262-264, July 2020.

<代表的な論文>

1. Fumio Nihei, Yukiko I. Nakano, and Yutaka Takase, “Meeting Extracts for Discussion Summarization based on Multimodal Nonverbal Information,” 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI2016), pp.185-192, 2016.
2. Fumio Nihei, Yukiko I. Nakano, and Yutaka Takase. 2017. Predicting meeting extracts in group discussions using multimodal convolutional neural networks. In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI 2017), pp.421-425, 2017.
3. Yoshikatsu Nakajima, Keisuke Tateno, Federico Tombari, and Hideo Saito, “Fast and Accurate Semantic Mapping through Geometric-based Incremental Segmentation,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.385-392, 2018.
4. Yosuke Kawasaki, Ayanori Yorozu, and Masaki Takahashi, “Autonomous Navigation using Multimodal Potential Field to Initiate Interaction with Multiple People,” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ①「知識」グループ

研究代表者: 山口 高平(慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目:

- ・PRINTEPS の開発と評価および多重知識ベース管理システムの研究

#### ②「音声」対話グループ

主たる共同研究者: 中野 有紀子(成蹊大学理工学部 教授)

研究項目:

- ・マルチモーダルインタラクションモジュールの構築

#### ③「画像」グループ

主たる共同研究者: 斎藤 英雄(慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目:

- ・実環境における人間動作認識と環境認識モジュールの構築

#### ④「対話継続」グループ

主たる共同研究者: 小林 一郎(お茶の水女子大学基幹研究院 教授)

研究項目:

- ・ユーザの興味推定に基づく対話管理モジュールの構築

#### ⑤「知的動作」グループ

主たる共同研究者: 高橋 正樹(慶應義塾大学理工学部 准教授)

研究項目:

- ・環境における環境認識、知識、音声対話に基づいた行動モジュールの構築

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

#### 山口グループ

##### ① 大阪府立大学 黄瀬浩一チーム

生徒の振る舞いを利用して、集中度や理解困難箇所を推定し、生徒の個別状態に応じて、適応的に教育支援を行うシステムにおいて、多重知識ベース管理システムの適用を検討した。

##### ② 名古屋工業大学 伊藤孝行チーム

伊藤チームの D-Agree において、オントロジーを利用して、意味的に議事進行を支援する機能を考察する。終了。

##### ③ ウィーン大学

Dimitris Karagiannis 教授は、物体、モデル、概念という 3 階層でロボットの振る舞いを記述する KbR (Knowledge based Robotics) のオーストリア国内プロジェクトを推進しており、KbR と PRINTEPS の融合をはかる。終了。

##### ④ 慶應義塾大学理工学部管財課

大学の事務処理は、パソコン上でのルーチンワークが多く、エクセルの VB マクロによりかなり効率化できる見込みがある。本共同研究では、VB マクロに加えて、複数のアプリに跨る反復処理を自動化する RPA(Robot Programming Automation)、業務ルール適用プロセスの自動化である BRMS(Business Rule Management Systems)、言葉の意味理解まで踏み込んだオントロジーの利用までを PRINTEPS を参考にして統合する事により、大学事務処理の効率化を研究した。この結果、1/3 程度、事務作業が効率化できることを実証した。なお、本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 RISTEX「人と情報のエコシステム」平成 29 年度企画調査の一環として実施した。

##### ⑤ 横須賀市立鶴久保小学校、慶應義塾幼稚舎、開智望小学校

クラスルーム AI のフィールド提供。終了。

- ⑥ 東京都杉並区立浜田山小学校  
クラスルーム AI のフィールド提供。2021 年度も実施予定。

#### 齋藤グループ

- ① 東京大学 佐藤洋一チーム  
多種多様なカメラを用いた画像認識に関する国際ワークショップ HDC2017 をコンピュータビジョン応用に関する国際会議 WACV2017 において共同開催した。
- ② 筑波大学 鈴木健嗣チーム  
鈴木チームの研究対象であるミライの体育館に取り付けられた天井カメラから、対象人物の位置を追跡する画像処理プログラムを開発している。また、慶應義塾幼稚舎での実証実験において撮影された映像に撮影される生徒達のプライバシーに関する諸問題を鈴木チームと共同で検討した。
- ③ 大阪府立大学 黄瀬浩一チーム  
生徒の振る舞いに基づく適応的教育支援システムにおける画像センシングの共同研究の可能性について検討した。
- ④ 産業技術総合研究所  
異なる光の波長毎の画像を撮影できるハイパースペクトルカメラを利用した物体認識技術について共同研究を進めた。
- ⑤ 東京大学 佐藤洋一チーム(杉本グループ・木谷グループ・慶應義塾大学医学部)  
術野を照明する无影灯に複数のカメラを取り付けたマルチカメラ搭載型无影灯により記録される多視点手術動画像を自動的に切り替えることにより、医師達の頭部や体による遮蔽を防ぎながら、カメラの切り替えによる映像の不連続性を最小限に抑えた手術映像を生成する研究を実施した。この切り替えのために、木谷グループの研究成果である多視点手術映像から術野領域を自動認識するアルゴリズムを利用した。

#### 高橋グループ

- ① 大阪大学 長井隆行チーム  
扉を開けるなどの複雑な動作はリアルタイムに軌道計画を行うことは難しい。人の模倣などの学習により動作を獲得する手法もあるが、状況毎に動作を作成する必要がある。そこで、人がロボットを操作したデータから学習によりプリミティブな動作を動作素として抽出し、ルール・動作オントロジーに基づき作成した動作素を手順に従ってつなぎ合わせることで、状況依存可能な動作計画手法を提案し、PRINTEPS を用いた実証を行った。
- ② (株) 日本総合研究所  
日本の圃場の現状に適した農作業の補助、代替システムとしてモジュール型ロボットシステムを提案している。農作業に応じてアタッチメントを変えることで多種多様な作業に対応可能なシステムであることを特徴とする。本システムのユーザは農業従事者であり、必ずしもロボット操作に慣れているわけではない。そのため、ロボットのタスクや動作を設計する際に PRINTEPS を用いることを想定して開発を進めている。既にロボットの仕様が決定し、2018 年 3 月に複数個所の農家で本システムを用いた試行実験を開始し、2019 年 4 月より複数の企業が管轄する圃場において運用試験を実施しながら開発を進めている。

#### 小林グループ

- ① ドイツ人工知能研究センター  
ドイツ人工知能研究センター主任研究員 Dr. Boris Brandherm がプロジェクトマネージャを務める DESIGNETZ プロジェクト (<https://www.designetz.de/>)における PRINTEPS の適用を検討した。本プロジェクトは、ドイツ、ザールランド州を含む 3 つの州における電力供給を安定に効率良く行うために 47 企業が出資している大型プロジェクトである。ここで検討した結果を基に、JSPS 二国間共同研究申請を行った。また、共同研究の準備段階として、お茶の水女子大学博士後期課程学生を半年間、ドイツ・ザールランド大学人工知能研究室、ドイツ人工知能研究センターにインターンとして派遣した。
- ② お茶の水女子大学附属小学校  
クラスルーム AI のフィールドを提供した。