

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19900

研究課題名（和文）自律移動ロボットによる場所概念学習の効率化のための能動的意思決定

研究課題名（英文）Active Decision Making for Efficient Learning of Spatial Concepts by Autonomous Mobile Robots

研究代表者

谷口 彰 (Taniguchi, Akira)

立命館大学・情報理工学部・講師

研究者番号：70831387

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：研究成果として、場所概念形成のための確率的生成モデルにおいて、パーティクルフィルタによる逐次ベイズ推論と情報利得に基づく探索位置決定を組み合わせた能動推論アルゴリズムを提案した。実験では、提案手法は家庭環境において、より正確かつ効率的に場所概念を形成できることを示した。この他に、場所概念の高精度かつ軽量のオンライン学習アルゴリズムにおける実証実験やサービスタスクにおけるロボットの行動決定問題に取り組んだ。また、空間認知を司る脳部位である海馬体を参照した確率的生成モデルの基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人同士のコミュニケーションにおいて、わからないことを聞く能力は重要である。ロボットにおいても同様であり、教示された内容の受動的な学習や命令された内容の一方的な実行のみでは本質的な意味での人とロボットの協働は実現できない。自らの知識獲得のために人に質問する能動学習は、人との言語的コミュニケーションの能力を拡張できる。能動学習は、知識を活用したタスク実行の能力と組み合わせることにより、言語を学習・使用し行動意思決定する高度な自律性の実現につながる。空間に関する汎用的な知識を持つロボットは、ナビゲーションを始めとする様々なタスクや場所ごとに適切な生活支援の実現につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：As research outcomes, we proposed an active inference algorithm that combines sequential Bayesian inference with particle filtering and determines search locations based on information gain in a probabilistic generative model to facilitate spatial concept formation. Experimental results demonstrated the enhanced accuracy and efficiency of the proposed method in forming spatial concepts within home environments. Furthermore, we presented a highly accurate and lightweight online learning algorithm for spatial concepts and addressed the issue of determining robot actions in service tasks. Additionally, we laid the foundation for a probabilistic generative model inspired by the hippocampus, a brain region associated with spatial cognition.

研究分野：記号創発ロボティクス

キーワード：能動探索 能動学習 能動的推論 確率的生成モデル 自律移動ロボット

得を用いて環境内で最も不確実性を減少できるであろう位置を選択・移動し、教示発話を含む観測情報を得る。こうした自律的な行動意思決定により学習の効率化を実現することで、人とロボットの言語的インタラクションおよびロボットによる生活支援のために貢献することを目指す。

3. 研究の方法

本研究課題で対象とする研究項目は以下の(1)–(3)の三つである。

- (1) 場所概念獲得モデルによる能動学習
- (2) 能動的場所概念学習と Active SLAM との統合
- (3) 視覚情報の学習への利用タイミングの選択

(1) 場所概念獲得モデルによる能動学習

場所概念獲得モデルは階層ベイズモデルであるため、Taniguchi らの能動知覚手法[3]を適用することが可能である。情報利得最大化基準が劣モジユラ性を満たすことが知られており、情報利得が最大となる位置でユーザから場所の名前を得れば、最小質問回数で網羅的に場所の名前を学習できることが期待される。このように、能動学習を最適化問題に帰着させることでロボットの自律的な質問行動の意思決定を実現する。能動学習の処理フローを図2に示す。また、「ここはどこですか?」のみならず「ここはダイニングですか?」といった質問を確率的予測に基づき行うことで、ユーザが教示にかかる負担を減らすことを行う。さらに、エントロピーを用いて不確実性を最小化する手法や、自由エネルギー原理に基づく能動推論の適用などについても検討し比較優位性を示す。

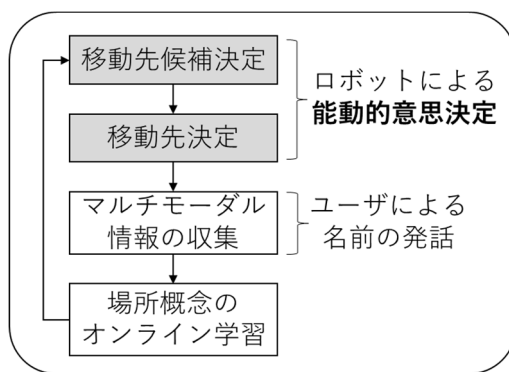


図2：能動学習の処理フロー

(2) 能動的場所概念学習と Active SLAM との統合

Active SLAM のための能動探索[2]とマルチモーダルカテゴリゼーションによる能動知覚[3]は共に情報利得の期待値を最大化する定式化をとる。SpCoSLAM は SLAM とマルチモーダルカテゴリゼーションの統合モデルであり(図3)、[2, 3]を数的に統合する形で実現できると考える。モデル全体に対し情報利得最大化基準を適用することでマルチモーダル情報の不確実性を相互に考慮した能動学習を可能とする。また、能動知覚[3]や(1)では、取得データや目標位置を決定する。一方で Active SLAM [2]では目標位置までの移動軌跡を含めて定式化されている。そのため、能動学習アルゴリズムを移動軌跡の意思決定問題として統合する。

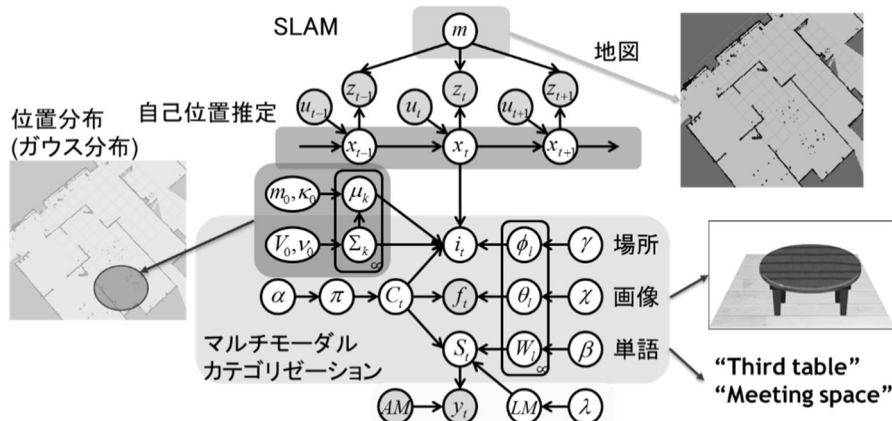


図3：SpCoSLAM の確率的生成過程を表すグラフィカルモデル

(3) 視覚情報の学習への利用タイミングの選択

これまでの研究では、視覚情報は人からの発話をトリガーとして取得され場所概念学習に利用されていた。しかし、視覚情報は言語情報と異なり移動中も取得することが可能であり、視覚の利用は場所概念を汎化する上で重要である。例えば「エレベータホール」という場所概念を学習済みのロボットが、別の場所に来てエレベータを観測した場合、人からの発話教示なしにその場所に「エレベータホール」という単語をマッピングすることができる。

視覚情報を随時利用する場所概念のオンライン推定の場合には、以下の問題に対処する必要があり、ロボットが一度探索し地図生成と場所概念獲得を行った領域に再度訪れた際に、環境に変化がない場合、その時点で得られる視覚情報を逐次学習に利用するのは非効率的である。また、言語情報よりも視覚情報のデータ数が多くなるために、視覚情報のみ強く影響された場所概念が獲得される可能性がある。そのため、環境に変化がなく新しく学習する必要がないと判断したデータに対しては学習を行わず、以前学習した環境と異なっていると判断した場合には新たなデータとして学習することで、さらなる効率的な場所概念の学習が可能になることが期待される。これを(1)、(2)と統一的な基準を用いて実現する。

これら(1)-(3)について、実ロボットおよびシミュレータ環境を用いて実験・評価する。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

本研究課題の主な成果を以下に示す。

ロボットの能動的な探索による場所概念形成の効率化

研究成果として、場所概念形成のための確率的生成モデルにおいて、パーティクルフィルタによる逐次ベイズ推論と情報理論的尺度に基づく探索位置決定を組み合わせた能動学習アルゴリズム SpCoAE を提案した。実験では、シミュレータ上での家庭環境において、提案手法はより正確な場所概念の形成を実現できることを示した。また、場所概念と環境地図の同時推定モデルである SpCoSLAM において実世界での能動探索を実現した。統合的な能動学習アルゴリズムの実現によって、より効率的な場所概念の学習が可能になり、さらなるユーザの負担軽減につながることを期待される。これらの成果について論文を投稿した。

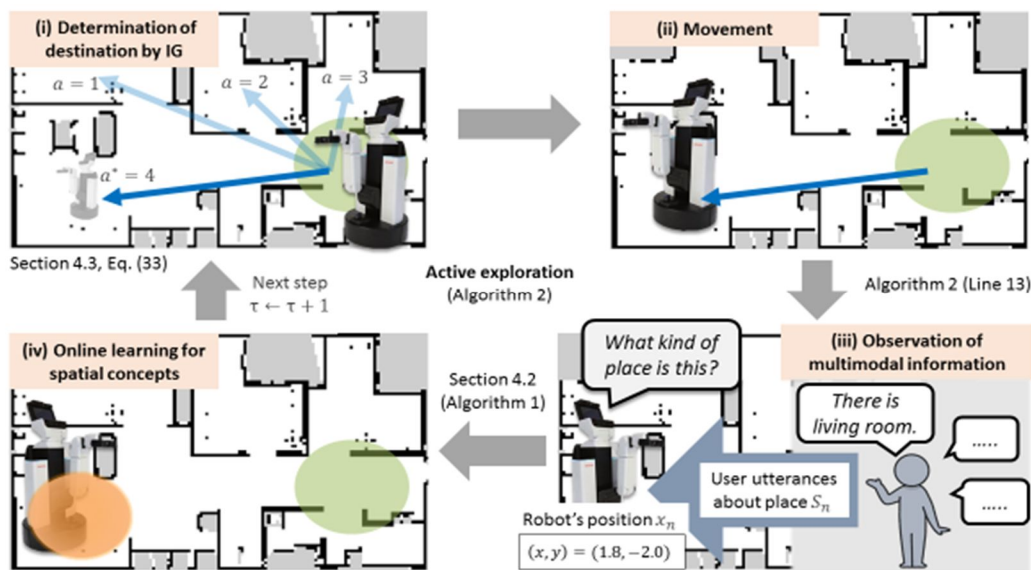


図4：ロボットの能動的な探索による場所概念形成の流れ

この他に、知覚や学習に関わる能動的意思決定において計算論的神経科学で提唱されている自由エネルギー原理や能動推論について調査した。場所概念形成の確率的生成モデル上での情報利得に基づく能動探索と自由エネルギー原理に基づく能動的推論との数理的な関係性について考察した。

物体の片づけタスクや探索タスクのための場所概念を用いた確率的プランニング

モデルの尤度が最も高くなる位置に移動することで、学習した場所概念によりサービスタスクにおけるロボットの能動的意思決定を実現できることを示した。また、これまでの場所概念形成のモデルに加えて、確率論理に基づく常識的知識を活用することにより、新たな環境へロボットを導入する際の環境適応のための学習コストを低減することを実現した。この成果は国際会議 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII)において Best Paper Award を獲得した。

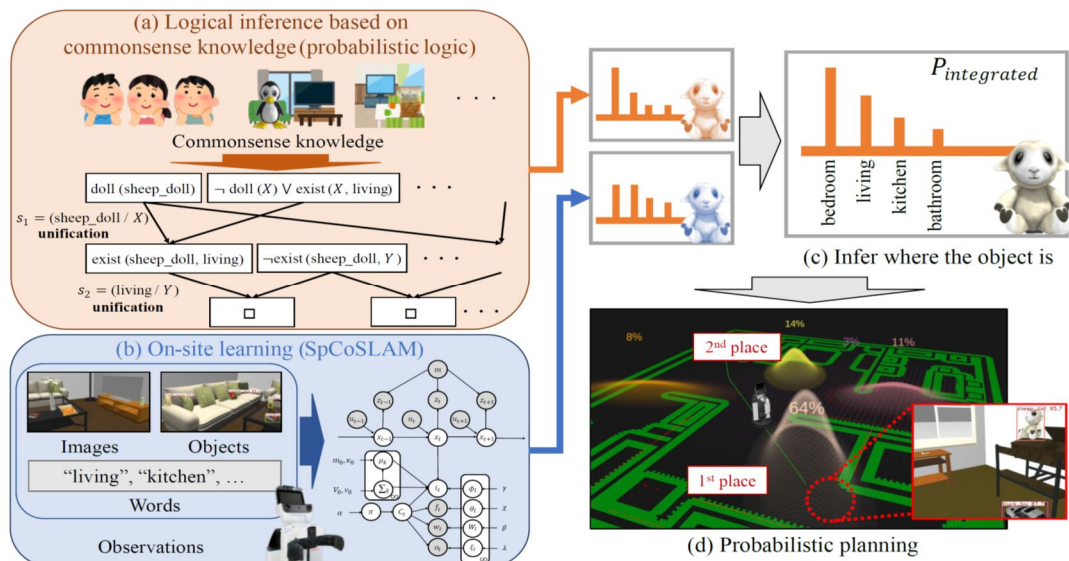


図 4：常識的知識と現場知識との統合による素早い環境適応

その他の成果

上記の 2 つの代表的研究成果の他に、場所概念の高精度かつ軽量なオンライン学習アルゴリズムの実証、複数環境における地図や場所概念の知識転移、空間認知を司る脳部位である海馬体を参照した確率的生成モデルの提案といった成果を得た。

知識転移では、確率的生成モデルの事前分布として複数の環境にわたって共有される変数を導入することで、部分的な観測情報からでも知識を転移し補填できることを示した。複数環境に渡って汎化された知識は、ロボットが新規な環境におかれた際に、探索や学習を効率良く進めるための良い事前知識となることが期待される。

ナビゲーションや空間認知に関わる脳部位である海馬体の機能や構造を参照することでモデルやアルゴリズム構築のための基盤を得た。工学的な空間認識のモデルに対し海馬体の構造と機能を対応付けることで新たな空間認識のモデルを構築するに至った。これにより、より安定した自己位置推定やナビゲーションの実現可能性が示唆される。

これら研究実績として、複数件の国際学術誌への採録や学会での発表を行った。上記により、本研究課題の目的に対して、十分な成果を得られたと考えている。

(2) 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

ロボットの持つ地図に場所の意味を付加する Semantic Mapping の研究は近年、ロボティクスの分野において重要視されており、本研究も Semantic Mapping の研究の一つとして位置づけられる。しかし、多くの既存研究では、地図上のある領域に事前に用意した場所のラベルを与えるものが多く、能動的に新規な場所のカテゴリや名前を学習するロボットの研究は少ない。本研究では、個々の環境に応じた生活支援を可能とするための知識獲得を行うものであり、関連研究分野との比較においても先端的なアプローチである。

また本研究はノンパラメトリックベース、ディープラーニングなど機械学習の先端技術を用いた教師なし能動学習であり、知識獲得に関する研究における本研究の意義は非常に大きい。モデル全体が教師なし学習により構成されているため、潜在的なすべてのデータに対して人がタグ付けを行う必要がないという工学的利点も持つ。

(3) 今後の展望

ロボットが人の生活支援を行う上で、環境の地図および場所に関するカテゴリ知識（場所概念）を得ることは重要である。空間に関する汎用的な知識を持つロボットは、ナビゲーションを始めとする様々なタスクや場所ごとに適切な生活支援を行うことが可能になると考えられる。

能動学習は単なるロボットの意思決定・行動生成のみならず、自らの知識獲得のために人に質問することで、人との言語的コミュニケーションの能力を拡張することができる。能動学習の能力は、学習した知識を活用したタスク実行の能力と組み合わせることにより、言語を学習・使用し行動意思決定する高度な自律性の実現に繋がると考える。

今後の展望として、自在な質問生成によるロボットの知識獲得が挙げられる。SpCoAE では「ここはどこですか?」という質問から場所に関する語意学習を実現した。これを発展させ「ここはダイニングですか?」や「コップはどこにありますか?」といった多様な質問を確率的予測に基づき行うことなどが考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Taniguchi Tadahiro, Yamakawa Hiroshi, Nagai Takayuki, Doya Kenji, Sakagami Masamichi, Suzuki Masahiro, Nakamura Tomoaki, Taniguchi Akira	4. 巻 150
2. 論文標題 A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 293 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.02.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Taniguchi Akira, Fukawa Ayako, Yamakawa Hiroshi	4. 巻 151
2. 論文標題 Hippocampal formation-inspired probabilistic generative model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 317 ~ 335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.04.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sagara Rikunari, Taguchi Ryo, Taniguchi Akira, Taniguchi Tadahiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Automatic selection of coordinate systems for learning relative and absolute spatial concepts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2022.904751	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Taniguchi Tadahiro, El Hafi Lotfi, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Akira, Shimada Nobutaka, Nishiura Takanobu	4. 巻 35
2. 論文標題 Semiotically adaptive cognition: toward the realization of remotely-operated service robots for the new normal symbiotic society	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 664 ~ 674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1928552	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sagara Rikunari, Taguchi Ryo, Taniguchi Akira, Taniguchi Tadahiro, Hattori Koosuke, Hoguro Masahiro, Umezaki Taizo	4. 巻 36
2. 論文標題 Unsupervised lexical acquisition of relative spatial concepts using spoken user utterances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 54 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.2007168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hagiwara Yoshinobu, Taguchi Keishiro, Ishibushi Satoshi, Taniguchi Akira, Taniguchi Tadahiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Hierarchical Bayesian model for the transfer of knowledge on spatial concepts based on multimodal information	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 33 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.2004224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katsumata Yuki, Kanechika Akinori, Taniguchi Akira, El Hafi Lotfi, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Tadahiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Map completion from partial observation using the global structure of multiple environmental maps	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 279 ~ 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2029762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taniguchi Akira, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Tadahiro, Inamura Tetsunari	4. 巻 44
2. 論文標題 Improved and scalable online learning of spatial concepts and language models with mapping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Autonomous Robots	6. 最初と最後の頁 927 ~ 946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10514-020-09905-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taniguchi Akira, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Tadahiro, Inamura Tetsunari	4. 巻 34
2. 論文標題 Spatial concept-based navigation with human speech instructions via probabilistic inference on Bayesian generative model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1817777	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taniguchi Akira, Isobe Shota, El Hafi Lotfi, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Tadahiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Autonomous planning based on spatial concepts to tidy up home environments with service robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 471 ~ 489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1890212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Akira Taniguchi, Maoko Muro, Hiroshi Yamakawa, Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Brain-inspired probabilistic generative model for double articulation analysis of spoken language
3. 学会等名 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Furukawa, Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Symbol Emergence as Inter-personal Categorization with Head-to-head Latent Word
3. 学会等名 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitoshi Nakamura, Lotfi El Hafi, Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, and Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Multimodal Object Categorization with Reduced User Load through Human-Robot Interaction in Mixed Reality
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoichi Hasegawa, Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, Lotfi El Hafi, Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Inferring Place-Object Relationships by Integrating Probabilistic Logic and Multimodal Spatial Concepts
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川 翔一, 萩原 良信, 谷口 彰, エル ハフィ ロトフィ, 谷口 忠大
2. 発表標題 確率論理と場所概念を結合したモデルによる場所の学習コストの削減
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 忠大, 山川 宏, 長井 隆行, 銅谷 賢治, 坂上 雅道, 鈴木 雅大, 中村 友昭, 谷口 彰
2. 発表標題 WB-PGM: 全脳確率的生成モデル - 発達するロボットのための認知アーキテクチャに向けて -
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大山瑛, 長谷川翔一, 中川光, 谷口彰, 萩原良信, 谷口忠大
2. 発表標題 実世界のマルチモーダル情報に基づく指示語を含んだ言語指示の外部照応解析
3. 学会等名 言語処理学会第29回年次大会(NLP2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tadahiro Taniguchi, Lotfi El Hafi, Yoshinobu Hagiwara, Akira Taniguchi, Nobutaka Shimada, and Takanobu Nishiura
2. 発表標題 Development of Semiotically Adaptive Cognition For Realizing Remotely Operated Service Robots in New Normal Society
3. 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rikunari Sagara, Ryo Taguchi, Akira Taniguchi, and Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Simultaneous Learning of Relative and Absolute Spatial Concepts Without Any Prior Distinction
3. 学会等名 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 毅士, 谷口 彰, エル ハフィ ロトフィ, 萩原 良信, 谷口 忠大
2. 発表標題 場所概念獲得がLoop Closure性能に及ぼす影響評価
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 RSJ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 翔一, 谷口 彰, 萩原 良信, エル ハフィ ロトフィ, 中島 毅士, 谷口 忠大
2. 発表標題 確率論理と場所概念モデルの結合による確率的プランニング
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 RSJ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Katsumata, Akira Taniguchi, Lotfi El Hafi, Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 SpCoMapGAN: Spatial Concept Formation-based Semantic Mapping with Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口彰, 田淵義基, エル ハフィ ロトフィ, 萩原良信, 谷口忠大
2. 発表標題 環境の能動的な探索による効率的な場所概念の形成
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝又勇貴, 谷口彰, エル ハフィ ロトフィ, 萩原良信, 谷口忠大
2. 発表標題 Generative Adversarial Networksと場所概念形成の確率モデルの融合に基づくSemantic Mapping
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口慶志郎, 萩原良信, 谷口彰, 谷口忠大
2. 発表標題 異なる環境の知識転移を行う場所概念形成モデルにおける新規環境での適応的学習
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝又勇貴, 兼近晃徳, 谷口彰, エルハフィロトフィ, 萩原良信, 谷口忠大
2. 発表標題 深層生成モデルを用いた地図補完とSLAMの統合
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

創発システム研究室 http://www.em.ci.ritsumeai.ac.jp/ 谷口彰 (Akira Taniguchi) のページ https://sites.google.com/site/ataniguchi0403/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------