

令和元年6月13日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12497

研究課題名(和文) 語彙獲得と地図生成の確率的生成モデル統合による創発的ロボットナビゲーションの実現

研究課題名(英文) Emergent Robot Navigation Integrating Unsupervised Word Discovery and Generative Model for Mapping and Localization

研究代表者

谷口 忠大 (Taniguchi, Tadahiro)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：80512251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では語彙獲得と地図生成を確率的生成モデルとして統合した革新的な空間表現手法の構築を目指して研究を行った。さらに、この空間表現手法に基づく創発的なロボットナビゲーション手法の開発を行った。このために具体的には、(1) 語彙獲得と地図生成を統合した確率的生成モデルの構築と機械学習手法の導出、(2) 語彙と地図の確率的生成モデルに基づく創発的ロボットナビゲーション手法の開発、(3) 創発的ロボットナビゲーション手法の実装と実環境での有効性実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間は移動や行動の指示を出す時に「玄関まで行って」「キッチンを掃除しておいて」などという言語的表現を自然と用いる。しかし、従来のロボットは場所に関する知識を客観的な座標系で管理しており、このような意味表現を持つわけではない。そこで、本研究ではロボットが言語的な知識で地図を学習し、表現し、そのような知識を用いて人間がロボットのナビゲーションを行える手法の研究を行った。具体的な成果としては語彙獲得と地図学習を融合的に行う手法や、言語的知識に基づく確率的な経路計画手法を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to construct an innovative space representation method for mobile robots that integrates vocabulary acquisition and map formation via a probabilistic generative model. Furthermore, we developed an emergent robot navigation method based on this space representation method. For this purpose, (1) we developed a probabilistic generative model integrating vocabulary acquisition and map generation and derived fast inference procedure, (2) we developed emergent robot navigation method based on probabilistic generation model of vocabulary and map, and (3) implemented the space representation method and demonstrated its effectiveness verification in a real environment.

研究分野：創発システム

キーワード：ロボットナビゲーション 確率モデル ソフトコンピューティング 地図生成 言語獲得

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットが実空間を適切に移動するためには何らかの空間表現を持つ必要がある。ここで空間表現とはロボットの現在位置と目的位置、及びそれらをつなぐ行動を結びつける情報であり、実測的な計量に基づく「地図」は空間表現の最も典型的な例である。ロボットがナビゲーションのための「地図」を得る手法としてはSLAM(自己位置と地図の同時推定)とそれに関わる手法が世界的に研究されてきた。一方で、既存のSLAMは多くの場合に地図情報を実空間の空間座標と一対一に対応したデータ表現として得るために、人間の生活空間を被覆するには膨大なメモリを必要とする。一方で、人間は「階段まで行って右」などと、言語的表現により非常に簡潔な空間表現を得て、それをコミュニケーションやナビゲーションに活用している。このような言語的で効率的な空間表現を、自律的な学習を通してロボットに持たせられないか、という問いが本研究課題の背景にある。また、代表者の谷口は記号創発ロボティクス研究の文脈の中で、教師なし語彙獲得に関する研究に関して顕著な成果をあげてきた。代表者と分担者はこれらの研究を通じて、人間とロボットの実世界協調を進展させるためには、ロボットによる言語的な空間表現手法の実現と、これに基づく全く新しいナビゲーション手法の開発が必要であると認識するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では語彙獲得と地図生成を確率的生成モデルとして統合した革新的な空間表現手法を構築する。さらに、この空間表現手法に基づく創発的なロボットナビゲーション手法を提案する。このために具体的には、(1) 語彙獲得と地図生成を統合した確率的生成モデルの構築と機械学習手法の導出、(2) 語彙と地図の確率的生成モデルに基づく創発的ロボットナビゲーション手法の開発、(3) 創発的ロボットナビゲーション手法の実装と実環境での有効性実証を行うことを主な課題とした。

近年、ロボットのナビゲーションはSLAM(自己位置と地図の同時推定)を用いる事が主流となっており、世界標準となりつつあるロボットミドルウェアROSにも利用されている。しかし、SLAMでは多くの場合に地図情報を実空間の空間座標と一対一に対応したデータ表現として得るために、人間の生活空間を被覆するには膨大なメモリが必要になる。一方で、人間はナビゲーションの際に「階段まで行って右」などと、言語的表現により非常に簡潔な空間表現を得ており、仔細な物理的地図を脳内に表現しているとは考えにくい。本研究はこのような言語的表現を用いた人間の空間認識をロボットにおいて効率的に実現するための手法を明らかにする。

本研究の中心となるアイデアは、ロボットの語彙学習と視覚情報及び運動情報に基づく地図生成自体を、学習時点から一体化させることで、地図に関わる語彙を効率的に学習させ、それらの語彙を用いたロボットナビゲーションを自然と実現させる点にある。教師なし語彙学習と地図生成は関連分野においても大きく異なる課題であり、これらを理論的に統合していくことを中心的な研究目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究目的に示した空間表現の確率モデルを構築し、また、これに基づく創発的ロボットナビゲーションを開発するために、(1) 語彙獲得と地図生成を統合した確率的生成モデルの構築と機械学習手法の導出、(2) 語彙と地図の確率的生成モデルに基づく創発的ロボットナビゲーション手法の開発、(3) 創発的ロボットナビゲーション手法の実装と実環境での有効性実証、に順次取り組んだ。語彙、視覚情報、位置情報を確率モデルにより統合し、互いの情報を相互推定可能とした上でロボットナビゲーションに活用する。実ロボットでの検証はロボカップ@ホームリーグの環境を活用することとした。

## 4. 研究成果

### (1) 語彙獲得と地図生成を統合した確率的生成モデルの構築と機械学習手法の導出

従来の地図生成後の語彙獲得と自己位置推定を統合した確率的生成モデルに画像情報を統合し、画像特徴と場所を表す語彙を統合した教師なし場所概念獲得手法を構築した。これをSpCoSLAMと呼称する。これはSpatial Concept formation with Simultaneous Localization and Mappingの略称である。さらにこの学習モデルにパーティクルフィルタに基づくオンライン推論手法を構築することにより、事前に地図も語彙も持たないロボットが自己位置を推定しながら、地図を生成し、語彙を獲得し、画像と語彙と位置情報を統合した場所概念を学習することが出来るようになった。しかし、初期のアルゴリズムでは、計算量がロボットの活動量(取得データの量)に比して線形的に増加するという問題があった。研究期間を通してその推論速度を向上させたスケラブルな推論手法である、SpCoSLAM2.0を開発した。図に

SpCoSLAM2.0 の動作のイメージ図を載せる．本成果は現在，学術論文誌に投稿中である．  
 また，ニューラルネットワークを導入した新しい地図生成手法の構築にも取組んだが，この課題に関しては現在も研究を継続中である．



Image	Correct word (English)	$i_t$	Step 15	$i_t$	Step 30	$i_t$	Step 50
	/kyouyuuseki/ (Shared desk)	1	/nobasyanyanamae/ /bawakyoo/ /yuseki/	1	/yusekinikibashita/ /kyoyuseki/ /kyoyusekidayo/	1	/kibashita/ /ni/ /kyouyuuseki/
	/ikidomari/ (End of the corridor)	3	/namaewa/ /enikimashita/ /gonobashiha/	3	/dayo/ /ikidomari/ /fokoga/	3	/idomari/ /miriiNgusupesu/ /koko/
	/robootookiba/ (Robot storage space)	4	/robotokiba/ /robotokibanya/ /rimasu/	6	/kochirawaagaro/ /botoki/ /baninarimasu/	6	/wabotookiba/ /robootookiba/ /kochiraga/

図 SpCoSLAM2.0 による地図生成と場所概念形成と語彙の同時学習

## (2) 語彙と地図の確率的生成モデルに基づく創発的ロボットナビゲーション手法の開発

移動ロボットが場所概念に得ることができれば，これを元に指示領域探索を行うことが出来る．語彙獲得と地図生成を確率的生成モデルとして統合した革新的な空間表現手法とそれに基づく創発的ナビゲーションの事前的研究として，場所概念を用いた指示領域探索手法を研究した．近年注目される「推論による計画」と強化学習アルゴリズムの相同性に着目し，確率的生成モデルに基づく場所概念生成モデルの上で計画問題を教師なし学習の推論問題に帰着させる方法を考案した．

## (3) 創発的ロボットナビゲーション手法の実装と実環境での有効性実証

場所概念の構築手法を基にしてロボットナビゲーションを行う実装を行った．特に拡張現実 (AR) 機器を用いた場所概念の可視化とインタラクションの実現を行い，本研究で開発したモデルの実応用に向けて研究開発を行った．また，上記で示した手法に関しては実環境データでの実験を行った．

これらのシステムの一部は，2018 年に開催された国際的なロボット競技のコンペティションである World Robot Summit (WRS) においてデモンストレーションを行い，Future Convenience Store Challenge という部門における接客タスクにおいて優勝を飾った．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

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 (IBIS2018) ディスカッショントラック, 2018

谷口彰, 萩原良信, 谷口忠大, 稲邑哲也, 場所概念と地図と言語モデルのスケラブルなオンライン学習, 第 36 回 日本ロボット学会 学術講演会, 2018

宮澤和貴, 岩田健輔, 勝又勇貴, 黄瀬輝, 田淵義基, 水地良明, 坂戸達陽, 相良陸成, 谷口忠大, 長井隆行, 複数の概念形成モデルの統合によるロボットの家事タスクの実現, 第 36 回 日本ロボット学会 学術講演会, 2018

谷口忠大, 未来社会における人間と機械の実世界コミュニケーションの実現に向けて, 2018, SICE 2018 未来創造イベント 特別ワークショップ 『SICE の輪で未来を創れ!』 Shota Isobe, Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi, Learning

Relationships between Objects and Places by Multimodal Spatial Concept with Bag of Objects, International Conference on Social Robotics 2017, (Best Interactive Session (Finalist))

磯部匠汰, 谷口彰, 萩原良信, 谷口忠大, 物体の共起性に基づいたマルチモーダル場所領域学習による場所の理解, 人工知能学会全国大会 (第31回) (JSAI2017), 2017

Akira Taniguchi, Tadahiro Taniguchi, Tetsunari Inamura, Simultaneous Estimation of Self-position and Word from Noisy Utterances and Sensory Information, IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, 2016.

Yoshinobu Hagiwara, Masakazu Inoue, Tadahiro Taniguchi, Place Concept Learning by hMLDA Based on Position and Vision Information, IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, 2016.

福井隆士, 石伏智, 萩原良信, 谷口忠大, 高野敏明, 移動ロボットによる画像特徴と場所を表す語彙を統合した教師なし場所概念獲得, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'16), 2016

福井隆士, 石伏智, 萩原良信, 谷口忠大, 移動ロボットによる場所概念に基づく指示領域探索, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.em.ci.ritsumei.ac.jp/jp/publications/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：萩原 良信

ローマ字氏名：Hagiwara Yoshinobu

所属研究機関名：立命館大学

部局名：情報理工学部

職名：講師

研究者番号 (8桁): 20609416

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。