

卒業論文

視覚と行動の end-to-end 学習により
経路追従行動をオンラインで模倣する手法の提案

-目的地を示してトポロジカルマップからシナリオを生成-

A proposal for an online imitation method of
path-tracking behavior by end-to-end learning of vision and action

-Generating scenarios from a topological map
by indicating the destination-

2024 年 12 月 提出

指導教員 林原 靖男 教授

千葉工業大学 先進工学研究科 未来ロボティクス専攻

21C1012 石原央介

概要

視覚と行動の end-to-end 学習により
経路追従行動をオンラインで模倣する手法の提案

-目的地を示してトポロジカルマップからシナリオを生成-

多くの自律移動ロボットは、占有格子地図などのメトリックマップを基にしたナビゲーションを利用している。本研究室の岡田らは、オドメトリや LiDAR のデータを用いたメトリックマップに基づいたナビゲーションを行い、その出力となる目標角速度とカメラ画像を模倣学習することで、学習後はカメラ画像のみで自律移動できる手法を提案した。また、実験により、ロボットが視覚に基づいて一定の経路を周回できることが確認されている。春山らは、岡田らの従来手法に、環境中の分岐路を検出する機能、分岐路での適切な進行方向を提示する機能、動的に経路を選択して移動する機能を追加することで、任意の目的地に向けて移動する手法を提案した。しかし、この手法では、任意の目的地に向けて移動する際に使用される、目的地までの経路を示す指示文（以後、シナリオと呼ぶ）は、人間が作成したものが使われていた。新たな経路をロボット自身がシナリオを作成する機能が求められる。本論文では、この機能を春山らの手法に追加し、ロボット自身にシナリオ作成をおこなわせ、任意の目的地に向けて自立移動できるかの検証をした。はじめに、ロボット自身が作成したシナリオで任意の目的地に自立移動できるのかを、シミュレータを用いて検証した。次に、実ロボットを用いた検証を行った。

キーワード: end-to-end 学習 自律移動ロボット ナビゲーション

abstract

A proposal for an online imitation method of path-tracking behavior by end-to-end learning of vision and action

-Generating scenarios from a topological map by indicating the destination-

Many autonomous mobile robots utilize navigation based on metric maps, such as occupancy grid maps. In our laboratory, we have proposed a method to acquire vision-based navigation by imitating actions of navigation based on these metric maps using vision as input. Furthermore, experiments have confirmed that robots can navigate a set course using vision as input. This method aims to acquire actions for following a route, where the routes for navigation were restricted to a fixed set. For moving towards any arbitrary destination, it is considered necessary to have the functionality to detect branching roads in the environment, present the appropriate direction at these branching points, and dynamically select and move along a route. In this paper, we attempt to expand the route for navigation from a fixed course to a route towards any arbitrary destination by adding these functions to the conventional methods of Okada et al. Initially, the function to dynamically select and move along a route was added. For verification, experiments using a simulator were conducted, and it was confirmed that the system could dynamically select and navigate different routes at the same branching point in vision-based navigation. Subsequently, by adding the function to detect branching roads from vision and present the direction towards the destination, we constructed a system capable of autonomous movement to the destination based on vision. Furthermore, experiments using real robots confirmed that the constructed system could follow a route based on vision and reach the destination.

keywords: end-to-end learning, autonomous mobile robot, navigation

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	関連研究	4
1.3	目的	7
1.4	論文構成	7
第 2 章	おわりに	8
2.1	結論	8
謝辞		11

図目次

1.1	Imitation method of path-tracking behavior	2
1.2	Autonomous mobility towards any destination	3
1.3	Branching paths in the environment and path selection at branching points	3
1.4	End-to-end driving via conditional imitation learning	4
1.5	Overview of Seiya and others proposed method	5
1.6	Embodied instruction following with LM-Nav	5
1.7	Miyamoto and others used topological map	6
1.8	Observation of robot behavior using semantic segmentation	6

表目次

第1章

序論

1.1 背景

一般的に，移動ロボットを目的地まで誘導する制御はナビゲーションと呼ばれ，工場内の巡回や，警備・配送業務などを行う自律移動ロボットに活用されている。これらの多くのロボットは，ナビゲーションに占有格子地図などの事前に作成したメトリックマップを用いている。例として，つくば市内の公道で行われる技術チャレンジであるつくばチャレンジにおいて，原らが行なった技術調査 [1] によると，参加した 57 チームの中で，50 のチームがメトリックマップに基づくナビゲーションを用いている。また，これらのチームの多くは，メトリックマップに基づくナビゲーションに LiDAR や IMU などのセンサ，ホイールエンコーダから算出したオドメトリを利用している。

これらの LiDAR やオドメトリ，メトリックマップに基づくナビゲーションの他に，カメラ画像と深層学習に基づくナビゲーションが研究 [2][3] されている。その中で，本研究室の岡田ら [4][5] は Fig. 1.1 に示すようにメトリックマップに基づくナビゲーションによる行動を，視覚を入力とした行動に模倣することで，視覚に基づくナビゲーションを獲得する手法を提案した（以後，岡田らの従来手法と呼ぶ）。また，提案した手法の有効性を，シミュレータと実ロボットを用いて検証する実験を行い，視覚に基づいて一定の経路を追従できることを確認している。この手法の利点として，一般的な模倣学習が人の拳動を模倣するのに対して，本手法では，メトリックマップに基づくナビゲーションの行動を模倣するため，データセットを収集する手間を省くことが可能という特長がある。

岡田らの従来手法では、経路を追従する行動の獲得を目的としていた。そのため、走行する経路は一定という制限があり、任意の目的地に向けて移動することはできない。Fig. 1.2 に示す目的地に向けて移動するためには、環境中の分岐路を検出する機能、分岐路で適切な進行方向を提示する機能、動的に経路を選択して移動する機能が必要と考えられる。

そこで、本論文では、岡田らの従来手法に対し、Fig. 1.3 のような分岐路を視覚に基づいて検出する機能、分岐路で目的地に向けた進行方向を提示する機能、動的に経路を選択して移動する機能を追加する。これにより、走行する経路を一定から、任意の目的地に向けた経路へ拡張することで、視覚に基づいて、経路を追従して目的地へ到達できる可能性がある。

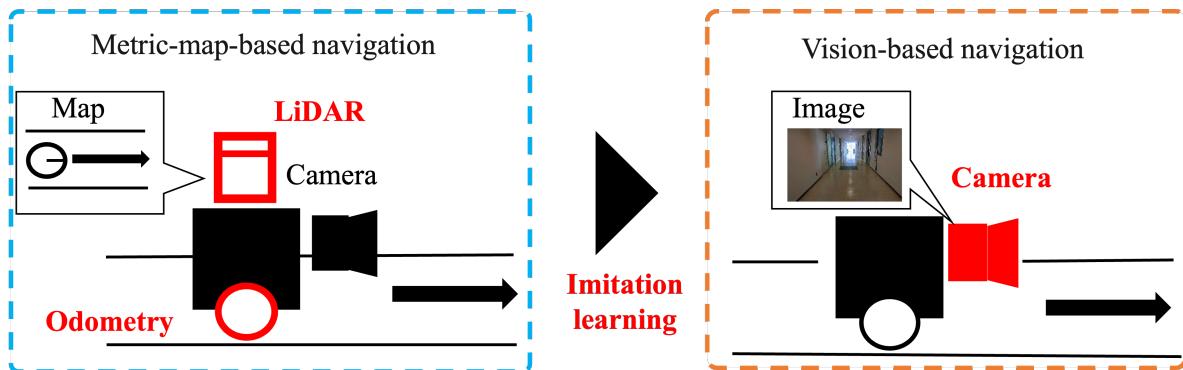


Fig. 1.1: Imitation method of path-tracking behavior

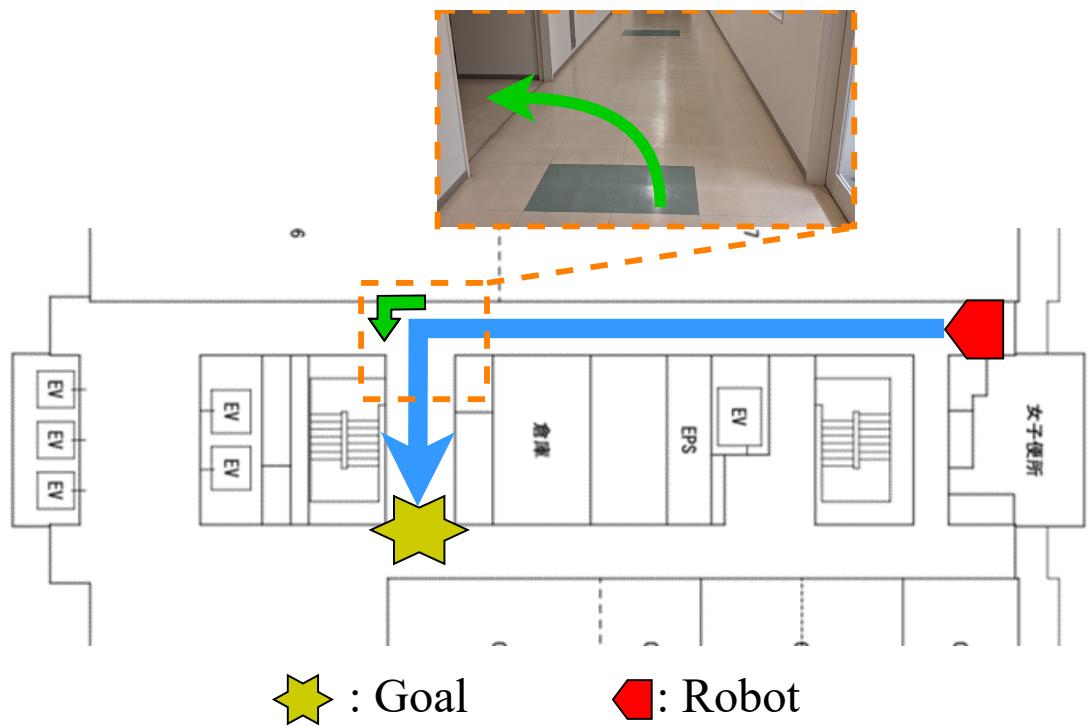


Fig. 1.2: Autonomous mobility towards any destination



Fig. 1.3: Branching paths in the environment and path selection at branching points

1.2 関連研究

分岐路で動的に経路を選択して移動する機能を有する視覚に基づくナビゲーションを，模倣学習により獲得する手法はいくつか提案されている。Felipe ら [6] は視覚を入力とする模倣学習を，左折や右折などの行動ごとにモデルを分けて行った。このモデルを目標とする経路方向のベクトルによって切り替えることで，Fig. 1.4 に示す経路選択が可能な視覚に基づく自律移動を行なっている。



Fig. 1.4: End-to-end driving via conditional imitation learning (Quoted from[6])

Seiya ら [7] は Fig. 1.5 に示すようにカメラ画像と目的地への方向を示すベクトルを入力，ステアリングの角度を出力として模倣学習を行なった。これにより視覚に基づくナビゲーションにおいて，屋内外の分岐路で目的地への方向を示すベクトルを与えることで，特定の経路が選択できることを確認している。

これらの研究により，経路の情報を含めて模倣学習することで，経路選択が可能な自律移動を獲得できることが確認されている。第??章ではこれらの研究を参考に，岡田らの従来手法に対し，経路を選択する機能の追加を試みる。

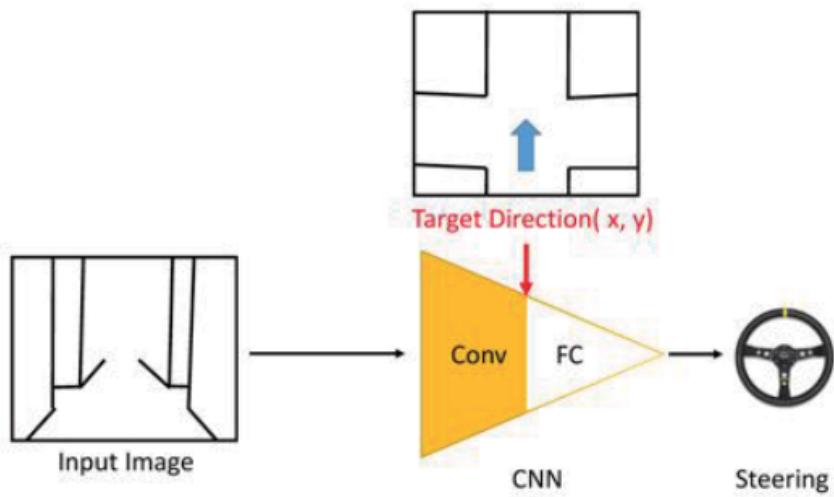


Fig. 1.5: Overview of Seiya and others proposed method (Quoted from[7])

次に任意の目的地に向けて移動が可能な視覚に基づくナビゲーションに関する研究について述べる。Dhruv ら [8] は、大規模な事前学習モデルを用いて、自然言語指示と画像を組み合わせたナビゲーションを提案している。この研究では、Fig. 1.6 に示すように、自然言語で指示されたランドマークを視覚によって検出し、これらのランドマークを経由して目的地へ自律移動する。実験では、停車中の車、道路標識、曲がり角といった道路の特徴をランドマークとして利用している。

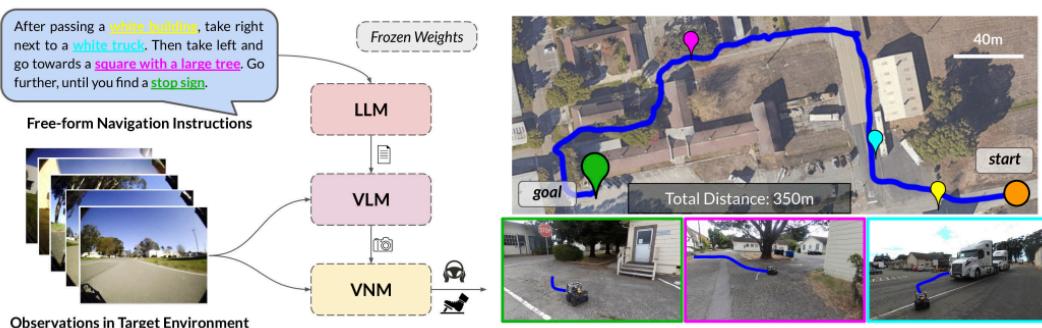


Fig. 1.6: Embodied instruction following with LM-Nav (Quoted from[8])

Miyamoto ら [9] は環境中のランドマークを含む Fig. 1.7 に示すトポロジカルマップと, Fig. 1.8 に示すセマンティックセグメンテーションを用いた, 視覚に基づくナビゲーションを提案している。実験では, 木などの植物や, 建物, 交差点などのランドマークを視覚によって検出し, これらをトポロジカルマップ上での経路の決定に利用している。



Fig. 1.7: Miyamoto and others used topological map (Quoted from[9])



Fig. 1.8: Observation of robot behavior using semantic segmentation (Quoted from[9])

これらの研究では, 視覚に基づくナビゲーションにおいて, 目的地への自律移動に標識や交差点といったランドマークを用いている。本論文では, 分岐路で動的な経路を選択した移動を行うことから, 「分岐路」などの通路の特徴をランドマークとして扱い, これを視覚に基づいて検出する。

1.3 目的

本論文では、岡田らの従来手法に対し、視覚から通路の特徴を検出する機能、目的地に向かって進行方向を提示する機能、動的に経路を選択して移動する機能を追加する。これにより、視覚に基づいて任意の目的地まで自律移動するシステムを構築する。また、構築したシステムにより目的地までカメラ画像の入力のみで自律移動できるかを、実ロボットを用いた実験により検証することを目的とする。

1.4 論文構成

第1章では本論文における、背景や関連研究、目的を述べた。第??章では本論文に関連する要素技術を述べる。第??章では本論文の議論のベースとなる先行研究について述べる。第??章では、経路選択機能の追加とその機能をシミュレータを用いて確認する実験について述べる。第??章では、構築するシステムとその有効性を実ロボットを用いて検証する実験について述べる。第2章では、本論文の結論を述べる。

第2章

おわりに

2.1 結論

本論文では、岡田らの従来手法に対し、動的に経路を選択して走行する機能や視覚に基づいて通路の特徴を検出する機能、分岐路において目的地に向かた進行方向を提示する機能を追加することで、走行する経路を一定の経路から、設定した任意の目的地に向かた経路へ拡張した。

はじめに経路選択機能の追加を目的として、データセットと学習器の入力へ目標方向を加えた。そして、追加した機能の有効性をシミュレータを用いた実験により検証した。実験では、視覚に基づくナビゲーションにおいて、同一の分岐路であっても目標方向の入力に従い、ロボットが適切に経路を選択して移動する様子が見られた。

次に、視覚から通路の特徴を検出する機能、分岐路で目標方向を提示する機能を追加した。目標方向を提示する機能には、島田らが提案したトポロジカルマップと「条件」や「行動」による経路の表現（シナリオ）を用いた。これにより、視覚に基づいて任意の目的地まで移動するシステムを構築した。そして、実ロボットを用いた実験を行い、構築したシステムにより、カメラ画像とシナリオに基づいて、経路を追従し、ロボットが目的地へ到達できることを確認した。

参考文献

- [1] Yoshitaka Hara , Tetsuo Tomizawa , Hisashi Date , Yoji Kuroda , Takashi Tsubouchi: “Tsukuba Challenge 2019: Task Settings and Experimental Results”. *Journal of Robotics and Mechatronics* 32.6 (2020), pp. 1104–1111. DOI: 10.20965/jrm.2020 . p1104.
- [2] Alex Kendall , Jeffrey Hawke , David Janz , Przemyslaw Mazur , Daniele Reda , John-Mark Allen , Vinh-Dieu Lam , Alex Bewley , Amar Shah: “Learning to Drive in a Day” (2018). arXiv: 1807.00412 [cs.LG].
- [3] Axel Sauer , Nikolay Savinov , Andreas Geiger: “Conditional Affordance Learning for Driving in Urban Environments” (2018). arXiv: 1806.06498 [cs.R0].
- [4] 岡田眞也 , 清岡優祐 , 上田隆一 , 林原靖男: “視覚と行動の end-to-end 学習により経路追従行動を オンラインで模倣する手法の提案”. 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI2020 予稿集 (2020), pp. 1147–1152.
- [5] 岡田眞也 , 清岡優祐 , 春山健太 , 上田隆一 , 林原靖男: “視覚と行動の end-to-end 学習により経路追従行動を オンラインで模倣する手法の提案 -経路追従行動の修正のためにデータセットを動的に追加する手法の検討-”. 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI2021 予稿集 (2021), pp. 1066–1070.
- [6] Felipe Codervilla , Matthias Müller , Antonio López , Vladlen Koltun , Alexey Dosovitskiy: “End-to-end Driving via Conditional Imitation Learning” (2018). arXiv: 1710. 02410 [cs.R0].
- [7] Seiya Shunya , Carballo Alexander , Takeuchi Eijiro , Miyajima Chiyomi , Takeda Kazuya: “End-to-End Navigation with Branch Turning Support Using Convolutional

- Neural Network”. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2018, pp. 499–506. DOI: [10.1109/ROBIO.2018.8665079](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665079).
- [8] Dhruv Shah ,Blazej Osinski ,Brian Ichter ,Sergey Levine: “LM-Nav: Robotic Navigation with Large Pre-Trained Models of Language, Vision, and Action” (2022). arXiv: [2207.04429 \[cs.RO\]](https://arxiv.org/abs/2207.04429).
- [9] Miyamoto Ryusuke ,Nakamura Yuta ,Adachi Miho ,Nakajima Takeshi ,Ishida Hiroki ,Kojima Kazuya ,Aoki Risako ,Oki Takuro ,Kobayashi Shingo: “Vision-Based Road-Following Using Results of Semantic Segmentation for Autonomous Navigation”. *2019 IEEE 9th International Conference on Consumer Electronics (ICCE-Berlin)*. 2019, pp. 174–179. DOI: [10.1109/ICCE-Berlin47944.2019.8966198](https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin47944.2019.8966198).

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心にご指導を頂いた林原靖男教授と上田隆一准教授に深く感謝いたします。屋外自律移動ミーティングや研究相談での厳しいご指導により，研究や技術的，人間的に成長できました。また，ご指導のおかげで2回の学会発表を行うことができました。(この修論の有様のように，文章を書く力は疑問が残りますが)

つくばチャレンジを通して実世界でロボットを動かす経験から，目的に必要な技術をリサーチし，それに基づいて実装する力と，挑戦を恐れず「手を動かして考える」姿勢を得ることができました。学部3年で配属されてからの，計4年間の研究室活動では，LiDARとIMUを破壊するなどの信じられない失態の数々を大変申し訳なく思っています。

研究面での議論やサポート，私生活での岡田眞也先輩，清岡優祐先輩への感謝は言葉に尽くせません。

また，研究室の同期，後輩(特に屋外自律三人衆)は日々の生活での研究に関する議論や，息抜きの時間に付き合ってください，ありがとうございました。そして，学部生の頃より，精神的に辛い時の支えであり，生活に潤いをくれた彼女へ深く感謝いたします。最後に，大学院を卒業するまでの24年間，私を育ててくださった両親に謝意を表します。