

# 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

-トポロジカルマップとシナリオに基づく経路選択機能の追加と検討-

○春山健太（千葉工大），藤原恆（千葉工大）馬場琉生（千葉工大）

石黒巧（千葉工大）上田隆一（千葉工大）林原靖男（千葉工大）

## A proposal for an online imitation method of path-tracking behavior by end-to-end learning of vision and action - Adding and consideration of path selection function based on a topological map and scenario -

○ Kenta HARUYAMA (CIT), Masaki FUJIWARA (CIT), Ryusei BABA (CIT),

Takumi ISHIGURO (CIT), Ryuichi UEDA (CIT), Yasuo HAYASHIBARA (CIT)

**Abstract:** This manuscript describes a method for preparing a manuscript for the annual conference of the SICE SI division. This manuscript describes a method for preparing a manuscript for the annual conference of the SICE SI division. This manuscript describes a method for preparing a manuscript for the annual conference of the SICE SI division. This manuscript describes a method for preparing a manuscript for the annual conference of the SICE SI division.

### 1. 緒言

本研究グループでは、end-to-end 学習により、カメラ画像と目標とする経路の情報を入力として、経路を追従する行動をオンラインで模倣する手法を提案し、実験により手法の有効性を検証してきた。<sup>[1][2]</sup>

これまで提案した手法では、LiDAR やオドメトリ、事前に作成した地図といった、幾何学的な情報を入力とする ROS Navigation Stack<sup>[3]</sup>などの地図を用いたルールベース制御器によって経路追従する。その際、この行動をカメラ画像と目標とする進行方向の情報（以後、目標方向と呼ぶ）を入力、地図に基づく制御器が output するヨー方向の角速度としてオンラインで模倣学習する。これにより、Fig.1 に示すカメラ画像を入力とする経路追従行動を生成する。さらに、分岐路などで目標とする進行方向の情報（以後、目標方向と呼ぶ）に応じて、経路を選択して走行する。

この手法により、地図に基づく経路追従とカメラ画像を入力とする経路追従の 2 つのナビゲーション手段が得られる。この 2 つの手段を状況に応じて高い信頼性が見込まれる方を選択することで、経路追従を継続できる可能性が高まる。

前報では<sup>[1][2]</sup>、カメラ画像を入力とする経路追従における、目標方向の出力方法を議論の対象としていない。そのため、カメラ画像を入力とする経路追従においても、目標方向の出力を地図に基づいたルールベース制御器に依存する問題があった。この問題の解決には、地図に基づく制御器に依存しない、つまり幾何学的な地図を必要としない目標方向の出力方法が必要だと考えられる。この問題の解決に向けて、幾何学的な

地図を用いずに、目標方向を出力する手段を検討する。<sup>[4]</sup>

本稿では、カメラ画像を入力とする経路追従に対して、島田らが提案した「突き当りまで」という「条件」や「直進」などの「行動」による経路の表現（シナリオと呼ぶ）<sup>[4]</sup>を目標方向へ変換、出力する仕組みを追加する。事前に作成した幾何学的な地図を用いずに、カメラ画像とシナリオに基づいて経路を追従し、目的地まで自律移動する手法を提案する。また、実ロボットを用いた実験を通して、提案した手法の有効性を検証する。

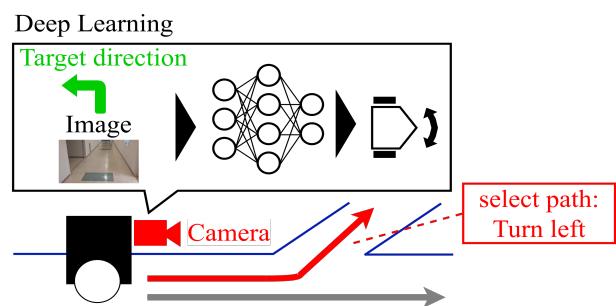


Fig.1 Path selection and following behavior based on camera images and target direction by imitation learning.

### 2. 提案手法

提案する手法では、カメラ画像と「三叉路まで直進」といったシナリオを入力として、経路を追従することで目的地まで自律移動する。この手法の特徴として、

目的地までの自律移動に、LiDARなどを用いて事前に作成した幾何学的な地図を必要としないことが挙げられる。ここでは全体の流れについて述べた後、それぞれの詳細を述べる。手法のシステム概要と動作例をFig.2に示す。

システムは、ロボットに取り付けたカメラから得た画像データと、人間が作成したシナリオを入力とし、  
 1) シナリオの「条件」の判定に用いる、通路の特徴を分類する通路分類器  
 2) シナリオを解釈し、目標方向へ変換して出力するモジュール  
 3) カメラ画像と目標方向に基づく経路追従モジュールの3つのモジュールで構成されている。Fig.2の動作例では、人間によって作成された「三叉路まで直進、右折」というシナリオがシステムへ入力されている。この入力されたシナリオを2)のモジュールが「条件」と「行動」に分解し、この行動を目標方向へ変換して出力する。具体的には、1)の通路分類器から「三叉路」という結果が得られるまで、「直進」の目標方向を出力し、3)の経路追従モジュールへ与える。3)の経路追従モジュールはカメラ画像と与えられた目標方向をもとに、「直進」の経路を追従する。1)の通路分類器から「三叉路」の分類結果が得られた場合、2)のモジュールは次に「右折」の目標方向を出力し、3)のモジュールは「右折」の経路を追従する。

## 2.1 カメラ画像と目標方向を入力とする経路追従

カメラ画像と目標方向の入力により、経路を追従するモジュールについて述べる。Fig.3に経路追従モジュールのシステムを示す。学習時は、2D-LiDAR やオドメトリ、占有格子地図に基づく、地図を用いたルールベース制御器(ROS Navigation Stack<sup>[3]</sup>)によって、設定した経路を走行する。その際、入力をカメラ画像、目標方向、出力をヨー方向の角速度(地図を用いたルールベース制御器が出力)として、0.2秒周期でデータセットに加える。さらに、バッチサイズを8として教師データをデータセットから抽出し、オンラインで模倣学習を行う。このデータセットにデータを追加、データの抽出、学習の一連の流れを1ステップとする。データセットの収集には、藤原らが提案したデータセットの不均衡の改善、学習時における積極的な蛇行といった最も成功率の高い手法を用いる。

学習後、カメラ画像とシナリオを解釈し、変換するモジュールから目標方向を与え、出力されるヨー方向の角速度によりロボットを制御する。前報では学習後も、地図を用いたルールベース制御器から生成される目標方向を用いていた。本稿では、学習後で用いる目標方向を、次の節で述べるシナリオに基づくナビゲーションから生成する。

## 2.2 シナリオに基づいた目標方向の指示

目的地まで到達するために必要な目標方向の出力を行うモジュールについて述べる。このモジュールは入力されたシナリオから「突き当たりまで」という「条件」や「直進」などの「行動」を解釈し、単語で構成された経路を目標方向へ変換して出力する。後述する分類器と組み合わせることで、幾何学的な地図を用いずに、目的地までの自律移動に必要な経路の情報を、経路追従モジュールへ指示することを可能とする。

「3つ目の三叉路まで直進、右折、突き当たりまで直進、停止」というシナリオを目標方向として変換する例を述べる。このモジュールでは、シナリオを句点ごとに分解後、「条件」と「行動」を示す言葉を抽出し、以下の項目に分けて登録する。

- 1) 通路の特徴
- 2) 順番
- 3) 方向
- 4) 行動

シナリオの例は句点ごとに3つ目の三叉路まで直進/右折/ 突き当たりまで直進/ 停止/ と区切られる。1つ目の区切りでは

- 1) 通路の特徴：三叉路
- 2) 順番：3
- 4) 行動：直進

2つ目の区切りでは

- 4) 行動：右折

が登録される。この一連の作業を末尾の区切りである「停止」が登録されるまで行う。ここで登録される「行動」をTable 1に示すワンホットベクトルで表現し、目標方向として、前述の経路追従モジュールへ与える。

Table 1 Target direction and data for imitation learning

Target direction	Data
Go straight	[1, 0, 0]
Turn left	[0, 1, 0]
Turn right	[0, 0, 1]
stop	[0, 0, 0]

## 2.3 カメラ画像を用いた通路分類

シナリオで用いる「条件」の達成を判別するために必要な通路の特徴をカメラ画像と深層学習によって分類する通路分類器について述べる。このモジュールは事前の学習を必要とするが、通路の特徴をRGBカメラのみで検出可能という特徴を持っている。通路分類器の概要をFig.4に示す。通路分類器はフレーム数16の一連の連続した画像データ(画像サイズを $64 \times 48$ )を入力とし、通路の特徴の分類を出力する。通路の特徴の分類は島田らの手法<sup>[4]</sup>に倣い、Fig.5に示した8つとする。通路分類器のネットワークアーキテクチャはDhaivatらが提案するCNNとLSTMを組み合わせたLRCN<sup>[5]</sup>を参考として構築した。なおシステムでは、CNNアーキテクチャをMobileNetV3-Large<sup>[6]</sup>、

次に分類器のデータセットの作成について述べる。地図を用いたルールベース制御器によって経路を走行し、その際、フレーム数16の一連の連続したRGBカメラ画像と通路の分類ラベルを1組とし、0.125秒周期でデータセットへ加える。分類ラベルのアノテーションは区間ごとに分類ラベルを生成する機能を追加した地図を用いたルールベース制御器の出力を用いて、自動的に行う。

学習するデータセット内で、各クラスのデータ数が大きく異なる不均衡データは、分類に大きな影響を与える<sup>[7]</sup>とされている。そのため、本稿では学習する際に、データセット内のクラス間のデータ数によって重み付けを行うコストアプローチ<sup>[8]</sup>を導入している。

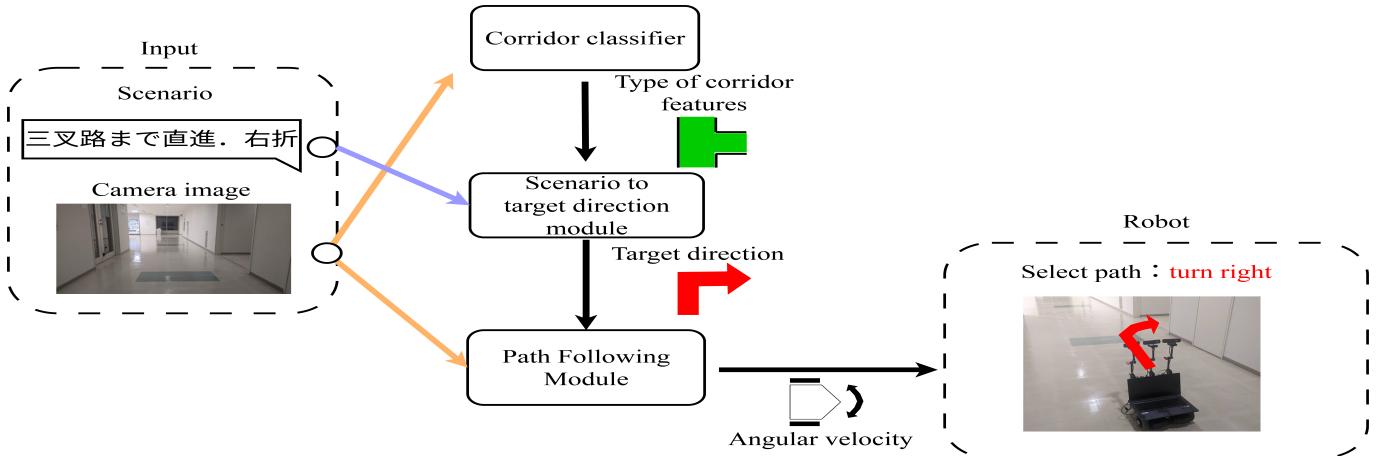


Fig.2 Overview of the system used in the method

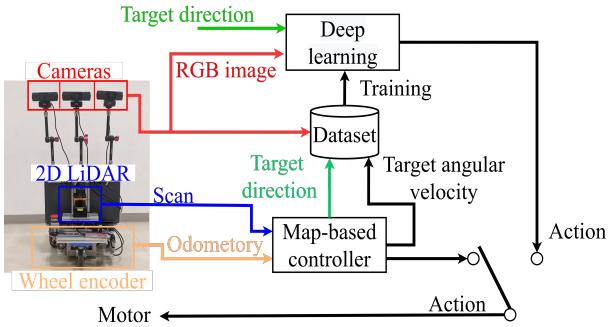


Fig.3 Imitation learning system with target direction

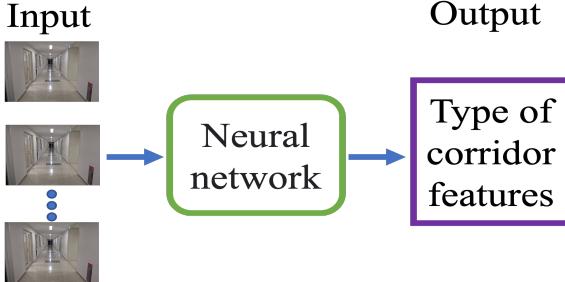


Fig.4 Types of corridor features classifier overview

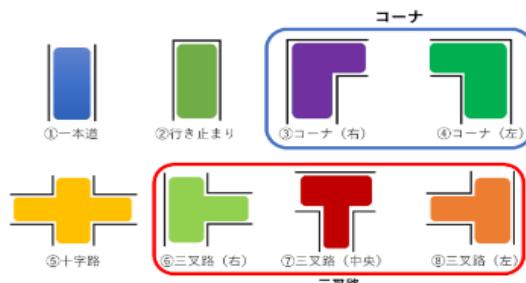


Fig.5 Types of corridor features

### 3. 実験

実ロボットを用いて、提案するカメラ画像を入力とする経路追従手法により、指示された経路を、カメラ画像に基づいて追従し、目的地へ到達可能であるか検証する。

#### 3.1 実験装置

実験には Fig.6 で示すカメラを 3 つ搭載したロボットを使用する。

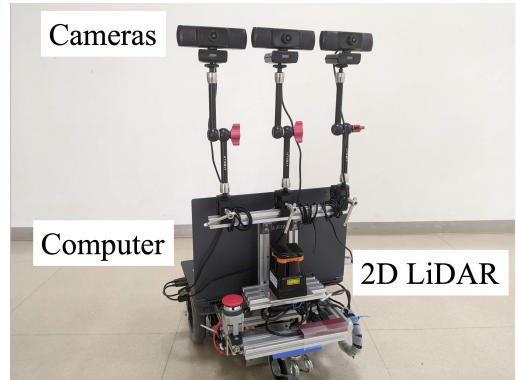


Fig.6 Experimental setup

#### 3.2 実験方法

実験環境として Fig.7 で示した千葉工業大学津田沼キャンパス 2 号館 3 階の廊下を用いる。経路は Fig.8 で示した a から n を順番に走行する。

実験では島田らが用いた 50 例のシナリオの中から、Fig.7 に示したエリアを対象として抽出した 7 例を用いる。シナリオの抽出において、1. 地図を用いたルールベース制御器で通行が困難な場所が含まれるもの。2. その場で「右を向く」といった学習器の出力を用いた走行では達成が困難なものを除外している。

まずははじめに通路分類器の訓練を行う。前述の経路を地図を用いたルールベース制御器の出力を用いて、3 周し、データセットを収集する。その際、データセットへのデータの追加は 0.125 秒周期で行う。収集したデータは、1, 2 周目を訓練データとし、3 周目をテストデータとする。それぞれのデータセットを構成する一連の連続した画像データの組数は訓練データは 5781 組、テストデータは 2902 組である。訓練はバッチサイズを 32 として、30 epoch 行った。訓練の結果、テストデータに対する Accuracy は 0.98 となった。

次に経路追従モジュールの訓練を行う。通路分類器の訓練と同様の経路を、オンラインで模倣学習しながら 1 周走行する。その際のステップ数は 120000 と

なった。データセットへのデータの追加は 0.2 秒周期で行う。

2 つのモジュールを訓練後、抽出した 7 例のうちの 1 例のシナリオをシステムに入力する。このシナリオのスタート地点ヘシナリオに基づいた向きでロボットを配置し、実験を開始する。なお、経路から外れるといった要因で走行の継続が困難になった場合でも即時失敗とせず、失敗箇所を記録しながら、人間が介入し、実験を継続する。Fig.9 に実験で用いたシナリオの 1 例を示す。

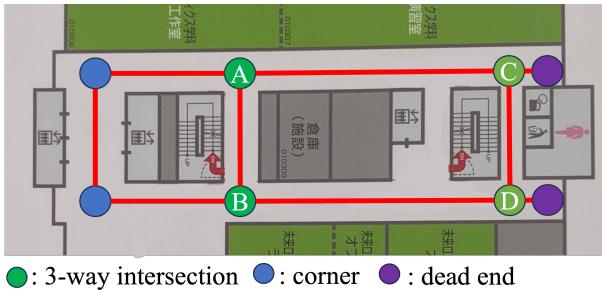


Fig.7 Experimental environment

### 3.3 実験結果

結果として、抽出した 7 例のうち、7 例すべての例で人間の介入なしで、ロボットが指定された経路を追従して目的地へ到達した。以上の結果から、提案するカメラ画像とシナリオに基づいて、経路を追従して目的地まで自律移動する手法の有効性が確認された。

## 4. 結言

本稿では、事前に作成した幾何学的な地図を用いず、カメラ画像とシナリオに基づいて経路を追従して目的地まで自律移動する手法を提案した。そして、実ロボットを用いた実験により提案手法の有効性を検証した。

## 参考文献

- [1] 春山健太, 藤原恆, 清岡優祐, 岡田真也, 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 -経路選択機能の追加-”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'22 予稿集. (2022).
- [2] 藤原恆, 春山健太, 馬場琉生, 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 -実環境における経路選択機能の検証と学習時間の短縮化の検討-”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'23 予稿集. (2023).
- [3] ROS Navigation Stack: *ROS Navigation Stack*. Accessed on 25.10.2023. URL: <https://github.com/ros-planning/navigation>.
- [4] 島田滉己, 上田隆一, 林原靖男: “トポロジカルマップを用いたシナリオによるナビゲーションの提案 -シナリオに基づく実ロボットのナビゲーション-”. 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE2020 予稿集. (2020).

- [5] Dhaivat Bhatt et al.: “Have I reached the intersection: A deep learning-based approach for intersection detection from monocular cameras”. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017, pp. 4495–4500. doi: 10.1109/IROS.2017.8206317.
- [6] Andrew Howard et al.: *Searching for MobileNetV3*. (2019). arXiv: 1905.02244 [cs.CV].
- [7] Harsurinder Kaur, Husanbir Singh Pannu, and Avleen Kaur Malhi: “A Systematic Review on Imbalanced Data Challenges in Machine Learning: Applications and Solutions”. *ACM Comput. Surv.* 52.4, (Aug. 2019). ISSN: 0360-0300. doi: 10.1145/3343440. URL: <https://doi.org/10.1145/3343440>.
- [8] Jie Xu et al.: “Fault Diagnosis on Imbalanced Data Using an Adaptive Cost-sensitive Multiscale Attention Network”. *2021 International Conference on Intelligent Technology and Embedded Systems (ICITES)*. 2021, pp. 77–82. doi: 10.1109/ICITES53477.2021.9637101.

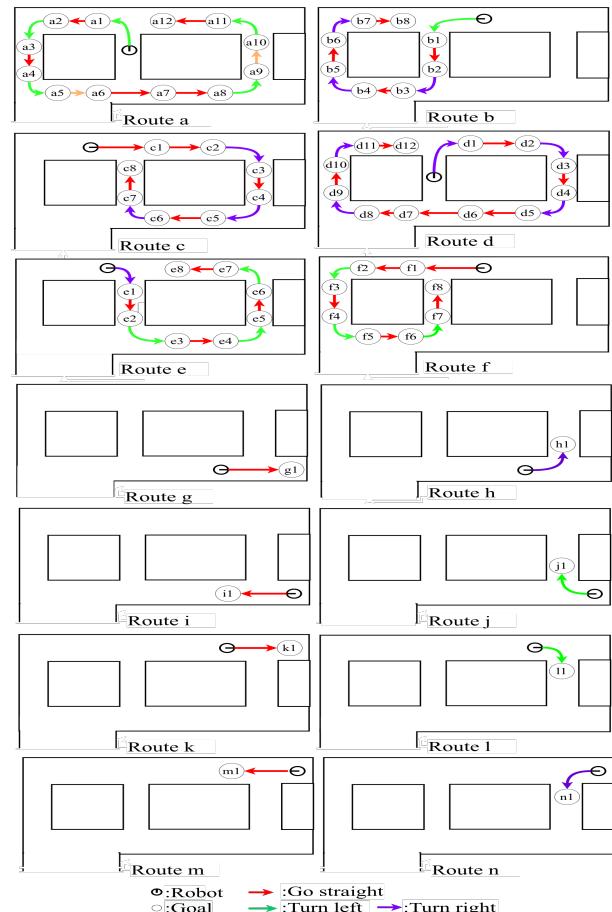
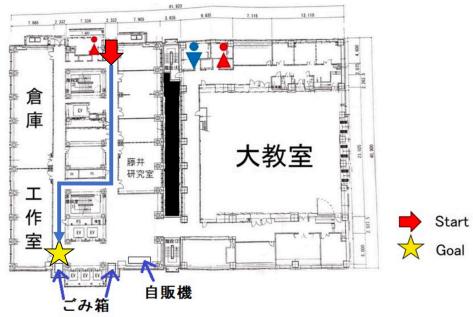
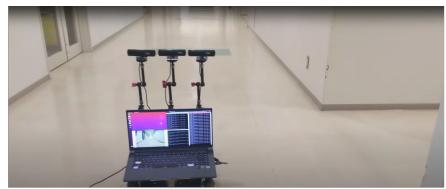


Fig.8 Route for the experiment



3つ目の三叉路まで直進、右折、突き当りまで直進、左折、  
左手に通路が見えるまで直進、停止

Fig.9 Example of the scenario



(1) First 3way : go straight



(3) Third 3way : turn right



(2) Second 3way : go straight



(4) End : turn right



(5) End : stop

Fig.10 Example of the scenario