



Tokyo Tech

OS16: 確率ロボティクスとデータ工学ロボティクス
～認識・行動学習・記号創発～

深層学習を用いたロボットナビゲーション

2022/09/06

東京工業大学 金崎朝子

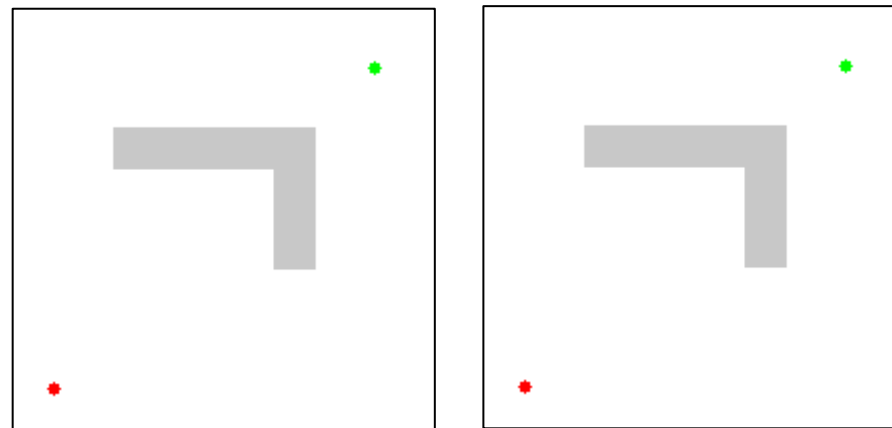
ロボットナビゲーション



A. Kanazaki, J. Nitta, and Y. Sasaki. **GOSELO: Goal-Directed Obstacle and Self-Location Map for Robot Navigation using Reactive Neural Networks.** *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, Vol.3, Issue 2, pp.696-703, 2018.

● A*探索 [Hart+, 1968]

- ダイクストラ法の拡張
- ヒューリスティック関数 $h(n)$ を導入
- 最短経路の出力が保証されている



左：ダイクストラ法、右：A*探索 [出典：Wikipedia]

- グラフ上の各ノード n のコスト $f(n)$ の定義：

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

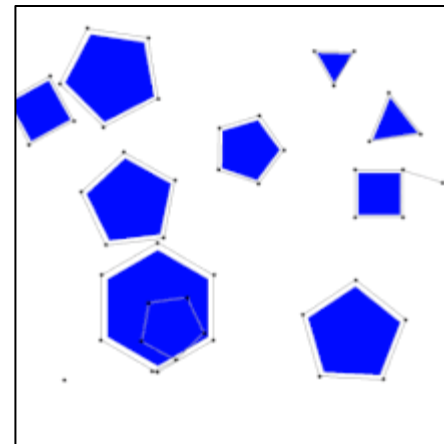
Startから n までの実コスト↑

↑ n からGoalまでの推定コスト
例) 直線距離

※ $h(n) = 0$ でダイクストラ法に一致

● Probabilistic Roadmaps (PRM) [Kavraki+, 1996]

- サンプリングベース
- (1) 空間からランダムに点を (たくさん) サンプリングし
- (2) 点間の衝突判定によりエッジ構築
- (3) Roadmap (グラフ) 完成
- (4) A*探索等のグラフ探索アルゴリズムを適用する

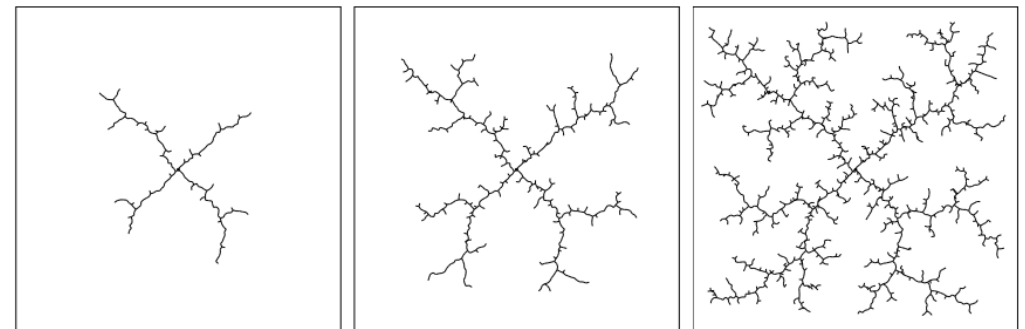


[出典: Wikipedia]

● Rapidly-exploring Random Tree (RRT) [LaValle, 1998] [LaValle&Kuffner, 2001]

- サンプリングベース
- (1) 空間からランダムに点を（一点だけ）サンプリングし
- (2) その点から最も近いノードを選択
- (3) (2)の点から(1)の点の方向にある距離進んだ点を新ノード追加
- (4) startからgoalまでが繋がった時点でTree完成
- (5) 親ノードを辿っていくことでPathを抽出

※startとgoalを交互に選択して枝を伸ばしていく方法もある
(Bi-Directional RRT, Bi-RRT)



[LaValle, 1998]

現実世界の不確かさへの対処

- 現実は思い通りにはならない
 - センサノイズ
 - 移動物体
 - 自己位置推定の失敗
 - 制御ノイズ、位置ずれ
 - etc.
- 強化学習でロバスト性の確保
 - 学習サンプル効率が悪い



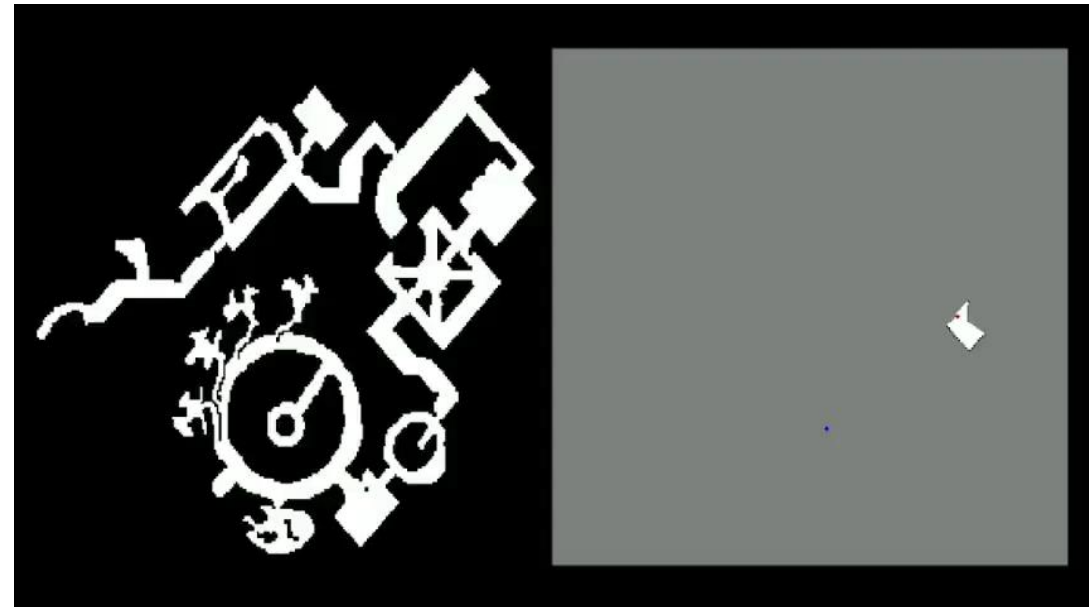
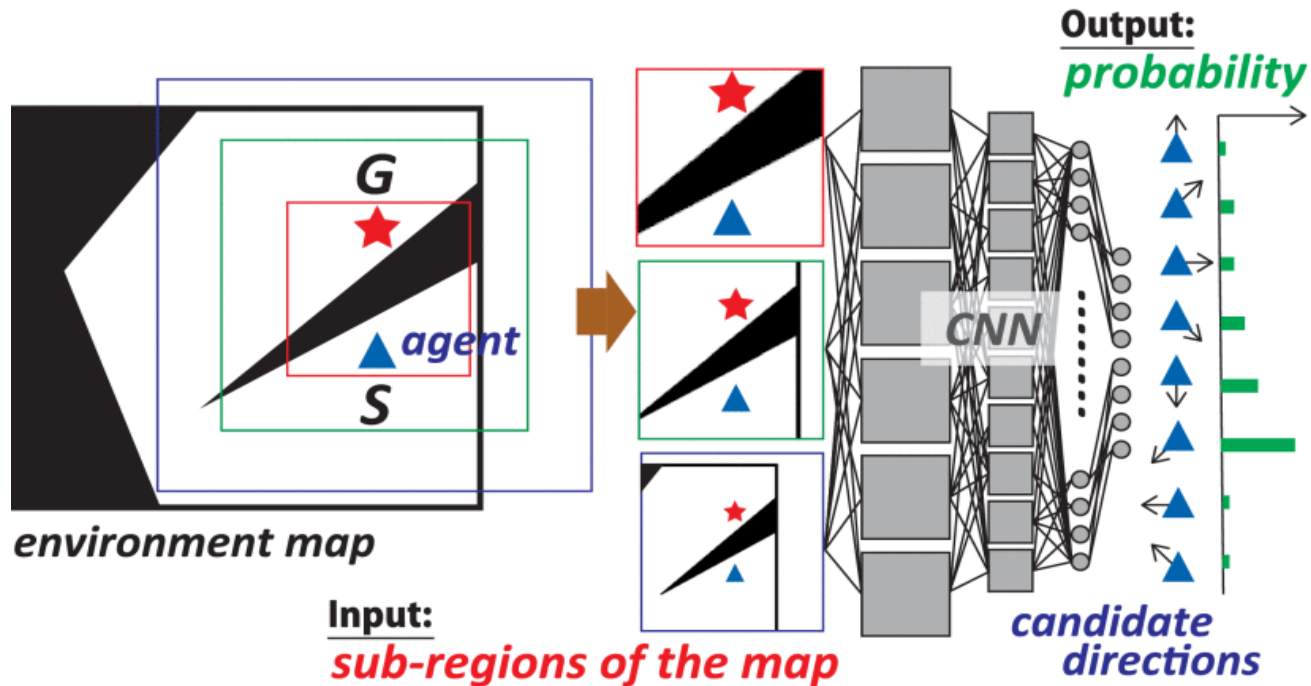
D. Gandhi, L. Pinto, A. Gupta. **Learning to Fly by Crashing.** In IEEE/RSJ IROS, 2017.

➡ 経路計画 x 深層（強化）学習

研究例① 経路計画の出力を深層学習で“真似る”

Asako Kanezaki, Jirou Nitta, and Yoko Sasaki. **GOSELO: Goal-Directed Obstacle and Self-Location Map for Robot Navigation using Reactive Neural Networks.** *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, Vol.3, Issue 2, pp.696-703, 2018.

- 2D地図を画像としてCNNに入力し、移動すべき方向を尤度として出力する。
- A*探索で教師データを無限に生成した。

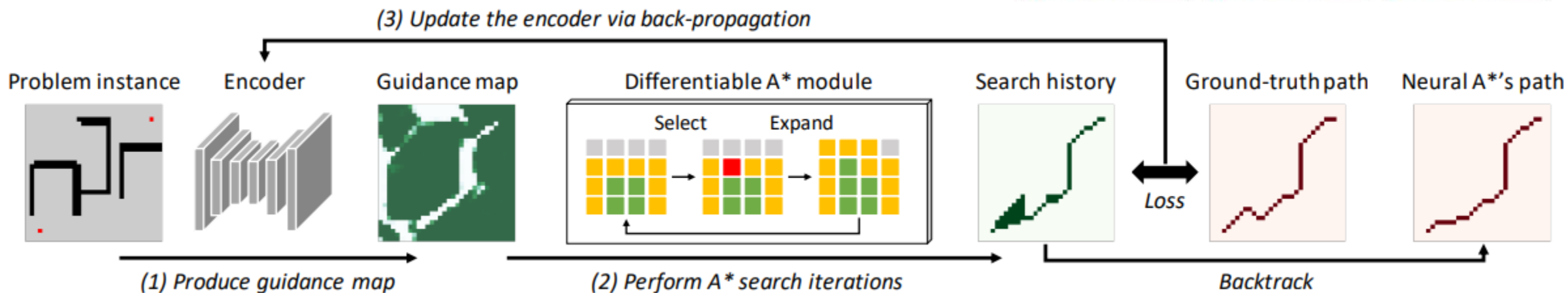
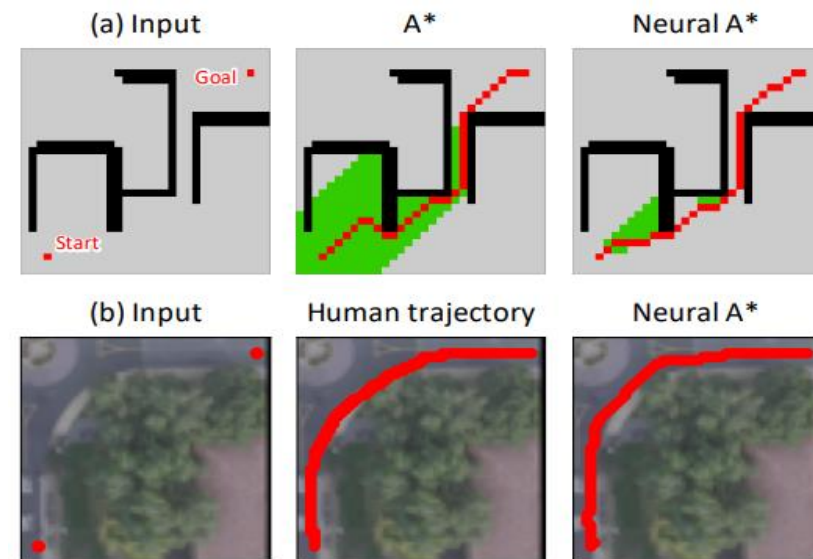


研究例② 経路計画の一部を深層学習で“置き換える”

Ryo Yonetani, Tatsunori Tanai, Mohammadamin Barekatin, Mai Nishimura, and Asako Kanezaki. **Path Planning using Neural A* Search**. *International Conference on Machine Learning (ICML)*, pp. 12029-12039, 2021.

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

- 微分可能A*モジュールを提案し
- $g(n)$ を構成するコスト関数をCNNで学習する
- A*のノード探索数を減らし高速化
- 最短経路に限らず、ヒトの軌跡データを学習することでヒトが選ぶような経路計画も可能に！

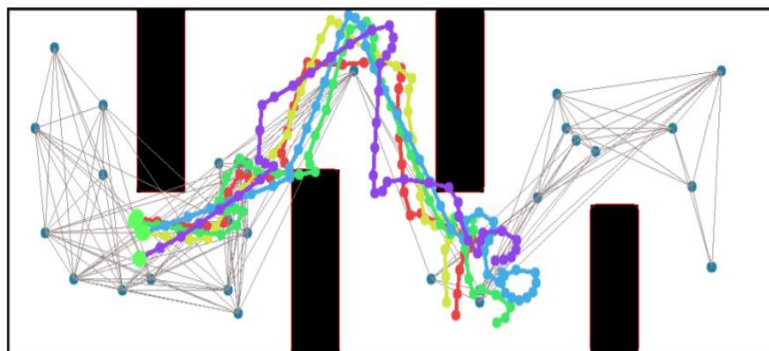


研究例③ 経路計画と深層強化学習を“組み合わせる”

● PRM-RL [Faust+, ICRA'18]

■ Global Planner:
PRMで経路計画

■ Local Planner:
強化学習で経路追従



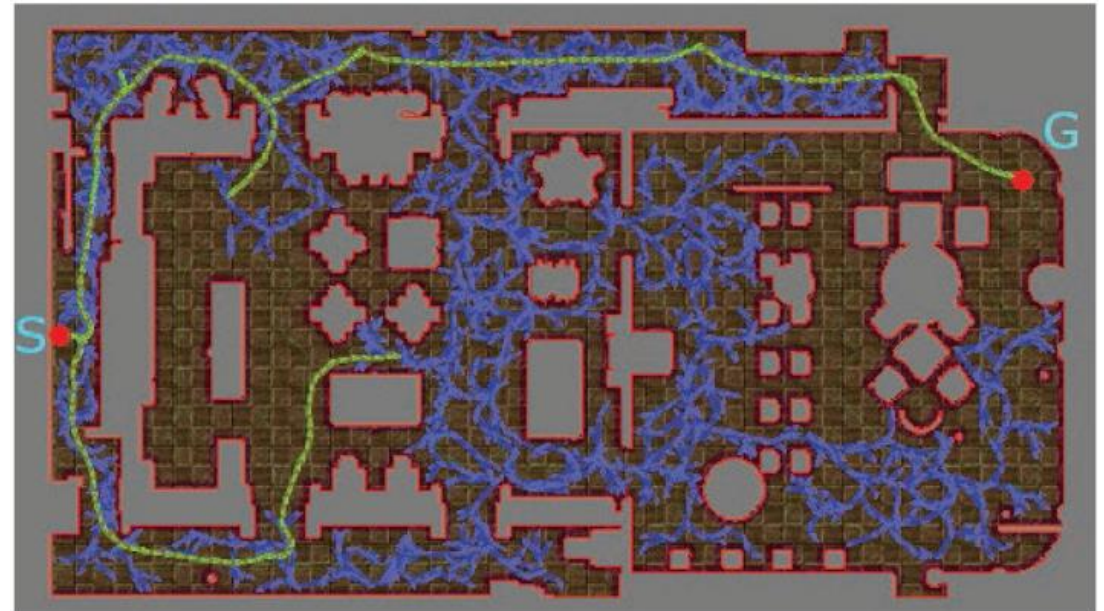
研究例④ 経路計画に深層強化学習を“利用する”

● RL-RRT [Chiang+, RA-L'19]

1. 障害物回避Local Plannerの強化学習
2. 障害物を考慮した到達可能性推定器の学習
3. その推定値を距離関数としたRRTのサンプリング

～再掲：RRTアルゴリズム～

- (1) 空間からランダムに点をサンプリングし
- (2) その点から最も近いノードを選択
- (3) (2)の点から(1)の点の方向にある距離進んだ点を新ノードとして追加
- (4) startからgoalまでが繋がったらTree完成
- (5) 親ノードを辿っていくことでPathを抽出



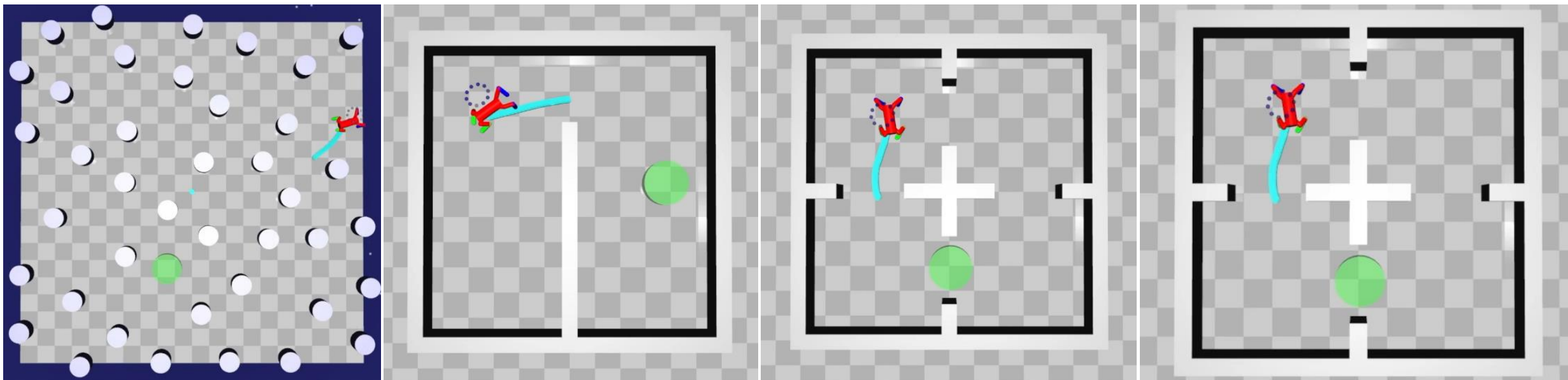
研究例⑤ 経路計画を深層強化学習に“利用する”

Kei Ota, Yoko Sasaki, Devesh K. Jha, Yusuke Yoshiyasu, and Asako Kanezaki. **Efficient Exploration in Constrained Environments with Goal-Oriented Reference Path.** *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020.

- GOSELO (研究例①) を拡張してWaypointsを出力
- Waypointsを受け取り、次の行動を決める制御部を強化学習する
- 強化学習の際に、Waypointsに沿う度合いを報酬に加える



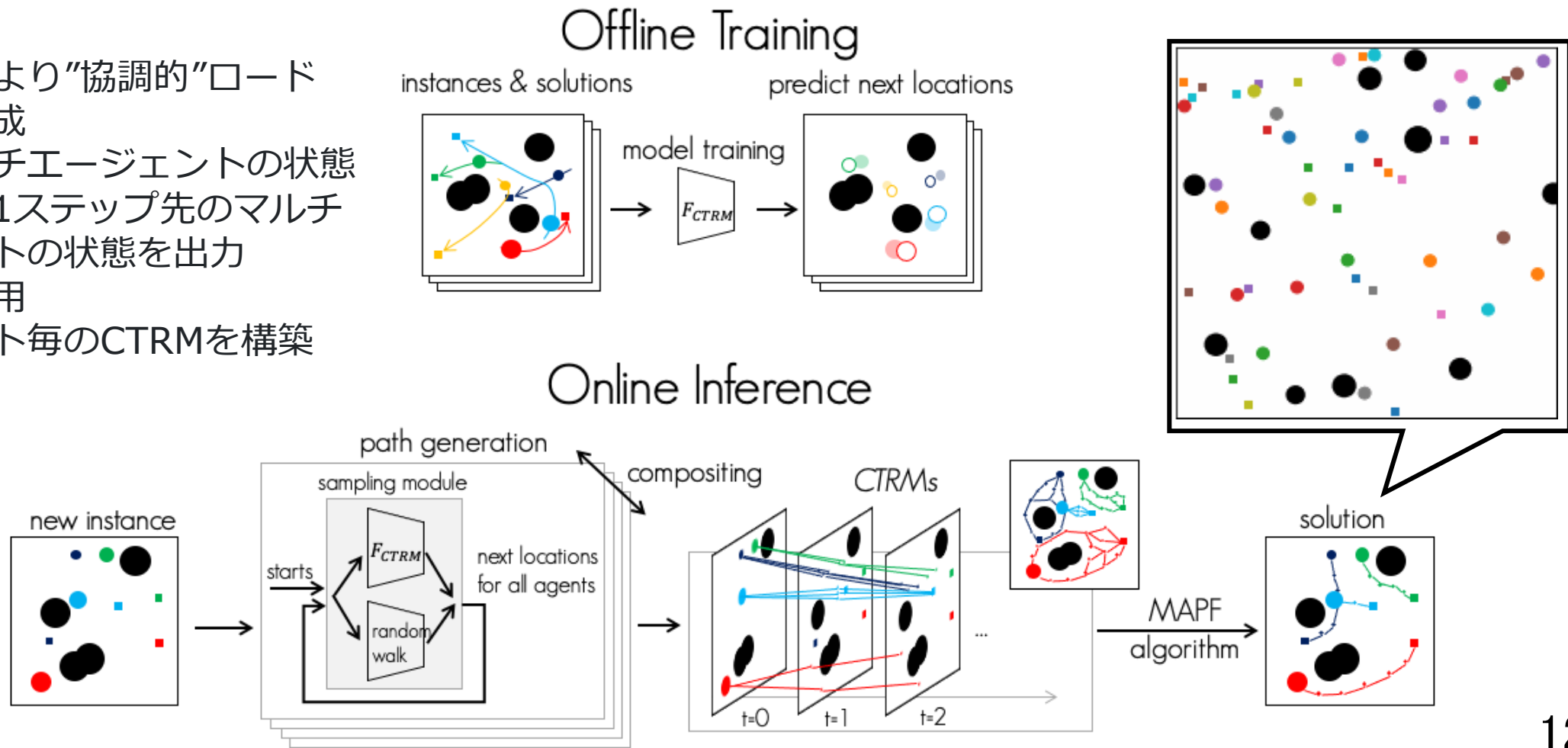
サンプル効率UP
汎化性UP



研究例⑥ マルチエージェント経路計画 + 深層学習

Keisuke Okumura, Ryo Yonetani, Mai Nishimura, and Asako Kanazaki. **CTRM: Learning to Construct Cooperative Timed Roadmaps for Multi-agent Path Planning in Continuous Spaces.** *Int. Joint Conf. on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS)*, 2022.

1. 深層学習により“協調的”ロードマップを生成
2. 現在のマルチエージェントの状態を入力し、1ステップ先のマルチエージェントの状態を出力
3. 繰り返し適用
4. エージェント毎のCTRMを構築



ここまでのまとめ



1. GOSELO [Kanezaki+, RA-L'18]
経路計画の出力を深層学習で“真似る”
2. Neural A* [Yonetani+, ICML'21]
経路計画の一部を深層学習で“置き換える”
3. PRM-RL [Faust+, ICRA'18]
経路計画と深層強化学習を“組み合わせる”
4. RL-RRT [Chiang+, RA-L'19]
経路計画に深層強化学習を“利用する”
5. Efficient Exploration [Ota+, IROS'20]
経路計画を深層強化学習に“利用する”
6. CTRMs [Okumura+, AAMAS'22]
マルチエージェント経路計画 + 深層学習



買い子を頼まれたロボット
-- generated by Midjourney



Tokyo Tech

より高度なナビゲーションタスクの研究紹介

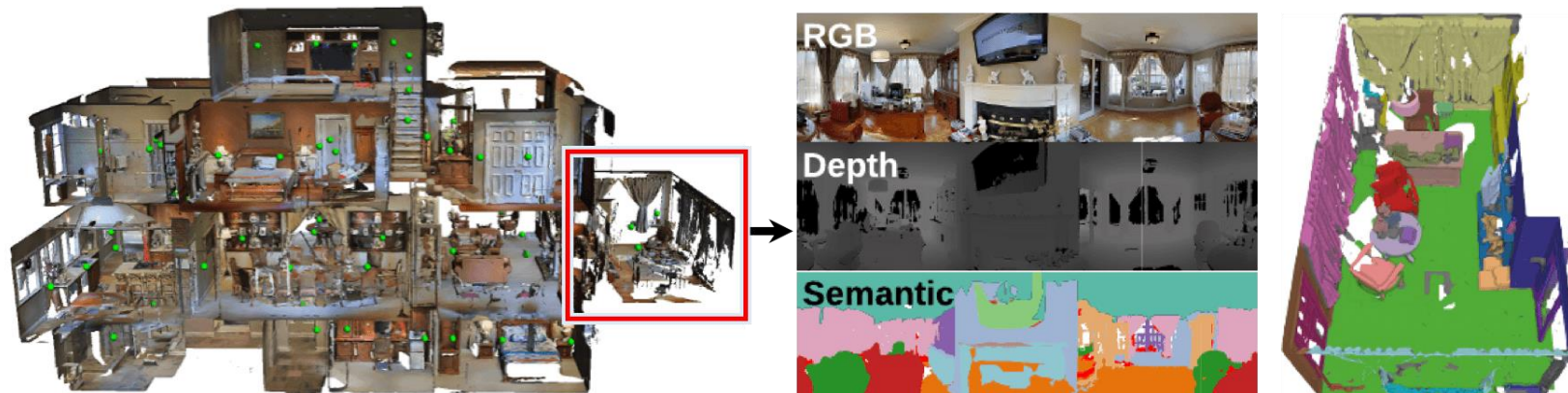
- *Point-goal* navigation: ゴール座標が与えられる
[Wijmans+, ICLR'20]
- *Image-goal* navigation: ゴールの画像が与えられる
[Chaplot+, CVPR'20] [Zhu+, ICRA'17]
- *Room-goal* navigation: ゴール=部屋 (単語)が与えられる
[Wu+, ICCV'19]
- *Object-goal* navigation: ゴール=物体 (単語)が与えられる
[Anderson+, 2018] [Batra+, 2020] [Ramakrishnan+, CVPR'22]
- *Audio-goal* navigation: ゴール=音源を探す
[Chen+, CVPR'21] [Chen+, ECCV'20]

cf.) Visual Exploration: 探索タスク (カバー範囲の広さを評価)
[Ramakrishnan+, ECCV'20] [Liu & Okatani, CVPR'22]

ナビゲーションタスクのデータセット

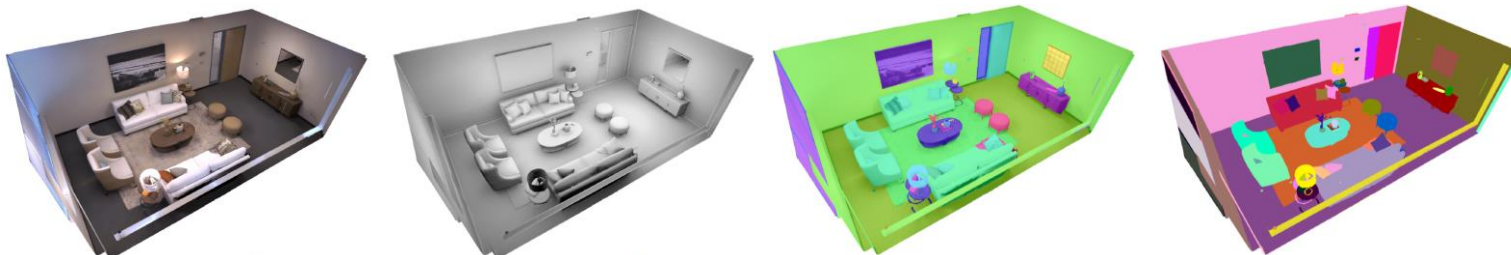
- Matterport3D

<https://niessner.github.io/Matterport/>



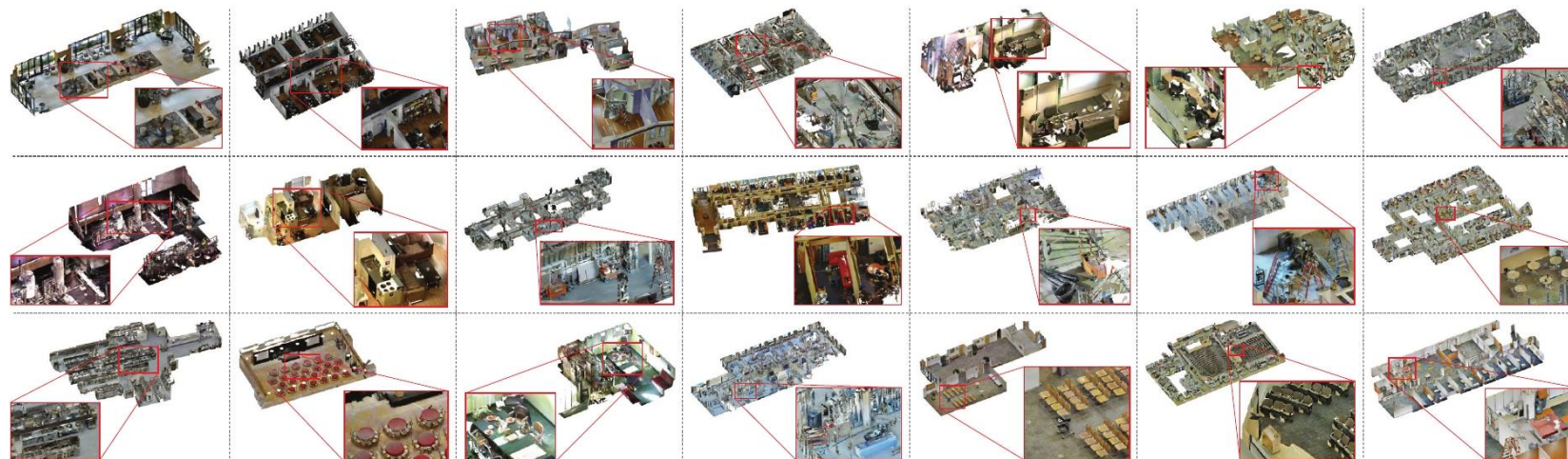
- Replica

<https://github.com/facebookresearch/Replica-Dataset>



- Gibson

<http://gibsonenv.stanford.edu/database/>



etc.

- Habitat-Lab

<https://github.com/facebookresearch/habitat-lab>



- AI2THOR <https://ai2thor.allenai.org/>



Physics



Object Manipulation

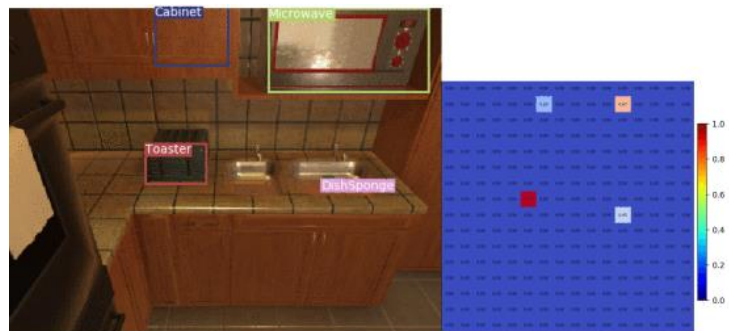


State Changes

Object-goal Navigationの研究例①

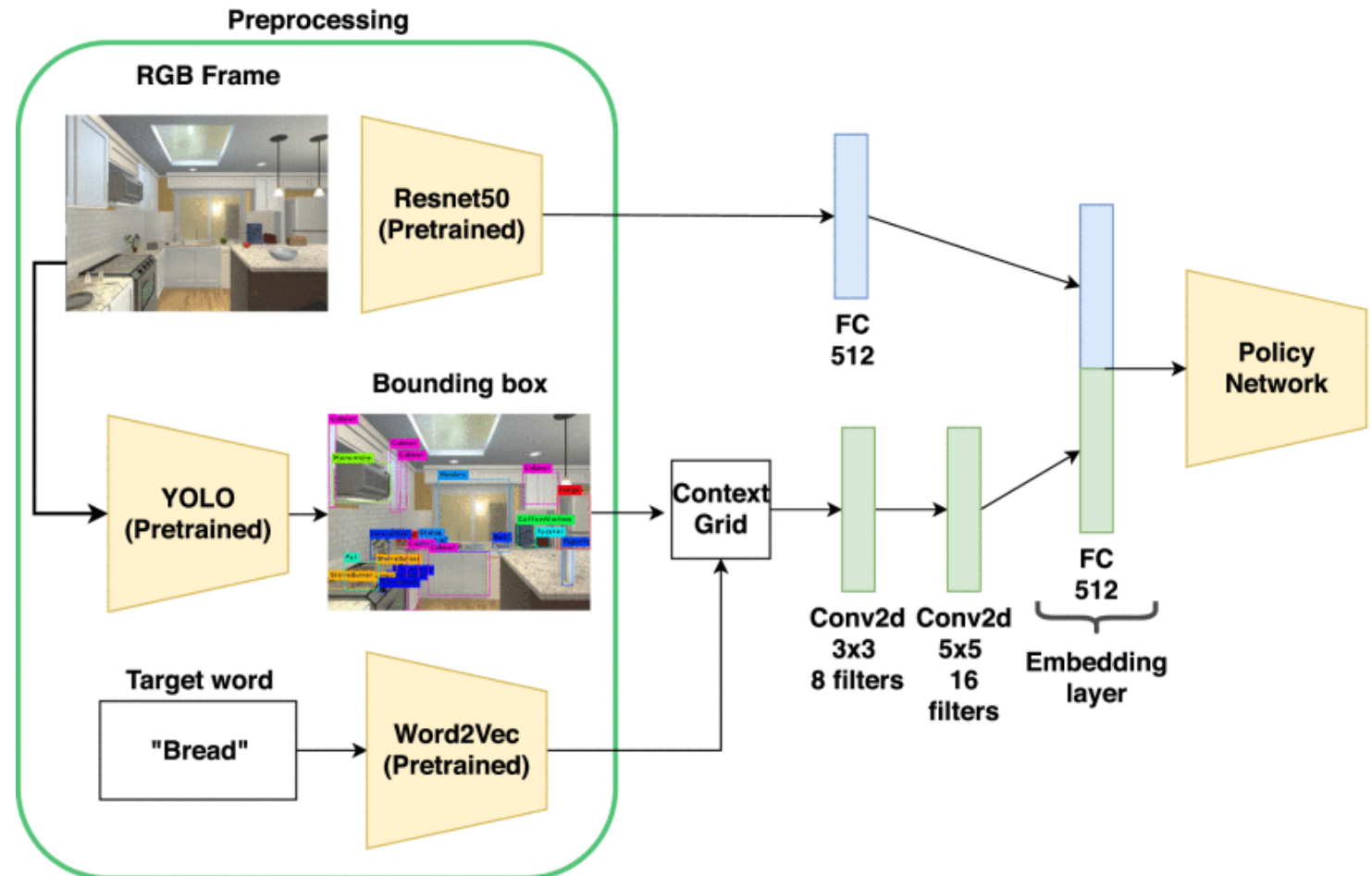
Raphael Druon, Yusuke Yoshiyasu, Asako Kanezaki, and Alassane Watt. **Visual Object Search by Learning Spatial Context.** *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, Vol.5, Issue 2, pp. 1279-1286, 2020.

- 画像だけでなく、画像からの物体検出結果をグリッド表示し、各物体とゴール物体とのWord2Vec類似度を記述したContext Gridを入力することで、
- 未知物体をも探索可能なObjNav手法を提案した。



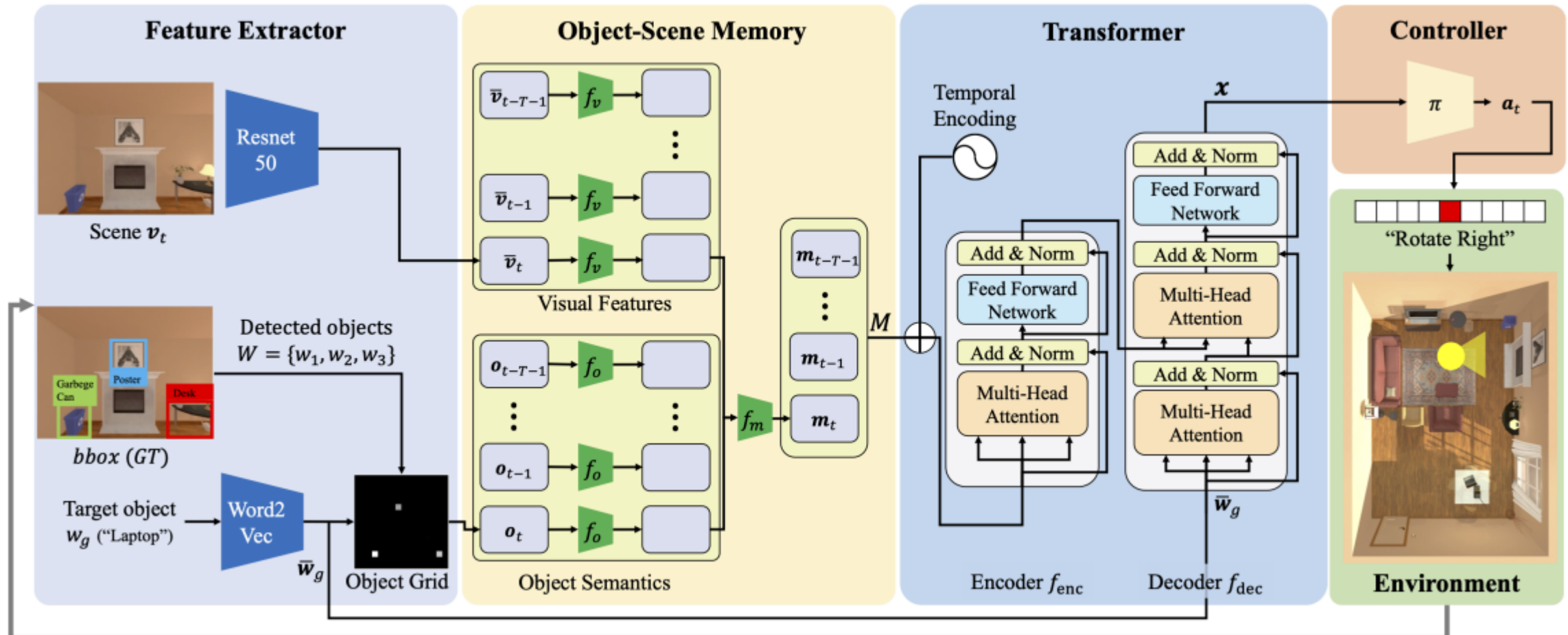
(a) YOLO output

(b) Context grid (16 x 16)



Object-goal Navigationの研究例②

Rui Fukushima, Kei Ota, Asako Kanezaki, Yoko Sasaki, and Yusuke Yoshiyasu. **Object Memory Transformer for Object Goal Navigation.** *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022.*



- 以下の項目について紹介した。
 - 経路計画 x 深層（強化）学習
 - 様々なVisual Navigationタスク
 - Object-goal Navigationの研究例
- ナビゲーションは、
 - ローレベル（制御）も難しいし
 - ハイレベル（探索）も難しい！解くべき課題は山積みである。



generated by Midjourney

[Hart+, 1968] Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107, 1968.

[Kavraki+, 1996] Kavraki LE, Svestka P, Latombe JC, Overmars MH. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 12(4):566-80, 1996.

[LaValle, 1998] LaValle, Steven M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. Technical Report. Computer Science Department, Iowa State University, 1998.

[LaValle&Kuffner, 2001] LaValle, Steven M. and Kuffner Jr., James J. Randomized Kinodynamic Planning. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)*, 20 (5): 378–400, 2001.

[Faust+, ICRA'18] A. Faust, O. Ramirez, M. Fiser, K. Oslund, A. Francis, J. Davidson, L. Tapia. PRM-RL: Long-range Robotic Navigation Tasks by Combining Reinforcement Learning and Sampling based Planning. In *IEEE ICRA*, 2018.

[Chiang+, RA-L'19] Chiang, Hao-Tien Lewis, Jasmine Hsu, Marek Fiser, Lydia Tapia, and Aleksandra Faust. RL-RRT: Kinodynamic motion planning via learning reachability estimators from RL policies. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4, no. 4 (2019): 4298-4305.

- [Wijmans+, ICLR'20] Erik Wijmans, Abhishek Kadian, Ari Morcos, Stefan Lee, Irfan Essa, Devi Parikh, Manolis Savva, and Dhruv Batra. DD-PPO: Learning Near-Perfect PointGoal Navigators from 2.5 Billion Frames. In ICLR, 2020.
- [Chaplot+, CVPR'20] Devendra Singh Chaplot, Ruslan Salakhutdinov, Abhinav Gupta, and Saurabh Gupta. Neural topological slam for visual navigation. In CVPR, 2020.
- [Zhu+, ICRA'17] Yuke Zhu, Roozbeh Mottaghi, Eric Kolve, Joseph J Lim, Abhinav Gupta, Li Fei-Fei, and Ali Farhadi. Target-driven Visual Navigation in Indoor Scenes using Deep Reinforcement Learning. In ICRA, 2017.
- [Wu+, ICCV'19] Yi Wu, Yuxin Wu, Aviv Tamar, Stuart Russell, Georgia Gkioxari, and Yuandong Tian. Bayesian Relational Memory for Semantic Visual Navigation. In ICCV, 2019.
- [Anderson+, 2018] Peter Anderson, Angel Chang, Devendra Singh Chaplot, Alexey Dosovitskiy, Saurabh Gupta, Vladlen Koltun, Jana Kosecka, Jitendra Malik, Roozbeh Mottaghi, Manolis Savva, et al. On evaluation of embodied navigation agents. arXiv preprint arXiv:1807.06757, 2018.
- [Batra+, 2020] Dhruv Batra, Aaron Gokaslan, Aniruddha Kembhavi, Oleksandr Maksymets, Roozbeh Mottaghi, Manolis Savva, Alexander Toshev, and Erik Wijmans. Objectnav revisited: On evaluation of embodied agents navigating to objects. arXiv preprint arXiv:2006.13171, 2020.
- [Ramakrishnan+, CVPR'22] Santhosh K. Ramakrishnan, Devendra Singh Chaplot, Ziad Al-Halah, Jitendra Malik, and Kristen Grauman. PONI: Potential Functions for ObjectGoal Navigation with Interaction-free Learning. In CVPR, 2022.
- [Chen+, CVPR'21] Changan Chen, Ziad Al-Halah, and Kristen Grauman. Semantic Audio-Visual Navigation. In CVPR, 2021.
- [Chen+, ECCV'20] Changan Chen, Unnat Jain, Carl Schissler, Sebastia Vicenc Amengual Gari, Ziad Al-Halah, Vamsi Ithapu, Philip W Robinson, and Kristen Grauman. SoundSpaces: AudioVisual Navigation in 3D Environments. In ECCV, 2020.
- [Ramakrishnan+, ECCV'20] Ramakrishnan, Santhosh K., Ziad Al-Halah, and Kristen Grauman. Occupancy anticipation for efficient exploration and navigation. In European Conference on Computer Vision, pp. 400-418. Springer, Cham, 2020.
- [Liu & Okatani, CVPR'22] Liu, Shuang, and Takayuki Okatani. Symmetry-aware Neural Architecture for Embodied Visual Navigation. In CVPR, 2022.