

1

## 能動推論に基づく搬送ロボット 制御手法の提案

大阪大学大学院情報科学研究科 村田研究室  
福山 敦也

1

## 研究背景

2

### ● 物流倉庫での自律型搬送ロボットの普及

- 荷物の搬送を自律的に行うロボットの活用
- 人と協同する環境への適応の検討
- カメラなどのセンサーを活用し、壁や棚、倉庫内で働く作業員などの障害物を回避しながらの搬送



図：物流倉庫と自律型搬送ロボット[1]

### ● 搬送における課題

- 作業員の移動などの環境変動やカメラの死角による**作業員の位置の不確実性**への対処が必要
  - 人の位置が正確にわからないことから速度をあげることができず、搬送効率に課題
- 衝突回避等の安全性と、搬送効率を両立する手法が必要
  - 生物はこの不確実性に対処できており、その行動原理を利用できる可能性
    - **能動推論**(2)の利用

[1] "Scaling mobile robots for success", <https://www.research.com/article/scaling-mobile-robots-for-success>, last accessed on 2025.02.10  
[2] K. Friston, T. FitzGerald, F. Rigollé, P. Schweinberger, G. Pezulo, "Active Inference: A Process Theory", Neural Computation, pp. 1-49 (2017)

2

## 能動推論

3

### ● 生物の行動を説明するフレームワーク

- 生物は周囲の観測を行い外界の状態を確率的に推論し、結果に基づき行動
- 状態の推論や行動の決定には**自由エネルギー**を利用
- 期待自由エネルギーでは生物が望む観測につながる行動を評価
  - 自身が望ましい観測を得られるような状態へと移行
  - 期待自由エネルギーを最も小さくする行動が選択



車がこちらへ来る確率が高く、衝突は望ましくない  
↓  
衝突を避けるような行動を選択

$$G(m, \pi) = -H(Q(\alpha_t | m)) + E_{Q(\alpha_t | m)}[H[P(\alpha_t | s_t)]] - \sum_{\alpha_t} Q(\alpha_t | m) \log P(\alpha_t | C)$$

( $\alpha$ : 観測,  $s$ : 状態,  $\pi$ : ポリシー)  
式: 期待自由エネルギー      選好 (望ましい観測)      図: 能動推論のイメージ

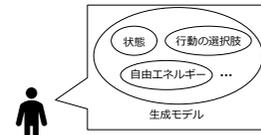
3

## 能動推論

4

### ● 生成モデルの利用

- 生物は**生成モデル**を所持
  - 生成モデルには状態や行動の選択肢、自由エネルギーなどが存在
  - 生成モデルを用いて能動推論を行い、行動を決定



図：生成モデル

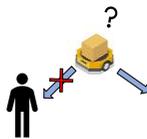
4

## 研究目的

5

### ● アプローチ

- 自律型搬送ロボットの行動決定に**能動推論**を利用
  - 生物の行動を説明するフレームワーク
  - 生物は不確実性のある状況でも周囲の情報を得るための観測と行動を行い、危険を回避
  - 能動推論をロボットの制御に適用することで作業員の位置の不確実性に対処し、衝突の回避が実現可能



図：自律型搬送ロボット

### ● 研究目的

- 能動推論を搬送ロボット自律制御へ適用し、安全性と効率の評価によりその可能性を検証

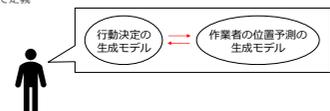
5

## 能動推論に基づく搬送ロボット制御手法

6

### ● 2種類の能動推論における生成モデルを設計

- **行動決定**の生成モデル
  - 能動推論を用いて行動決定を行うモデル
  - 自身の位置や速度を状態として定義
- **作業員の位置予測**の生成モデル
  - カメラからの情報をもとに作業員の位置の推論を行うモデル
  - 作業員の位置を状態として定義



図：提案手法の生成モデル

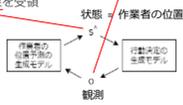
6

### 行動決定の生成モデル（観測）

7

#### ● 行動決定の流れ

- 倉庫内やロボットに取り付けられたカメラを用いて倉庫やロボットの周囲を観測
- 作業者の位置予測の生成モデルへ観測結果を送し、位置予測の結果を受領



図：各生成モデルの関係

- 受け取った結果から各位置における作業者の存在確率を求め、さらに衝突の有無などの観測確率  $P(o|s)$  を計算



図：行動決定の流れ

7

### 行動決定の生成モデル（状態の推論）

8

#### ● 行動決定の流れ

- 現在や未来の状態の事後分布を推論

- 4 種類の状態を定義

- 自身の位置
  - 倉庫内をグリッドに分割し、マス単位での存在確率
- 自身の速度
  - 1 ステップ当たりの速度 0,1,2,3 マスの 4 段階
- 障害物との衝突の有無
  - それ以前のステップでの衝突の有無
- 急停止の有無
  - それ以前のステップでの急停止の有無



図：行動決定の流れ

8

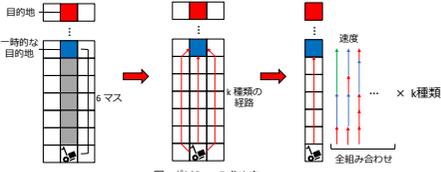
### 行動決定の生成モデル（行動決定）

9

#### ● 行動決定の流れ

- 求めた状態の事後分布をもとに行動を決定

- 行動の選択肢は行動の系列を表すポリシーとして定義



図：ポリシーの求め方

- 各ポリシーを期待自由エネルギーを用いて評価し、行動決定  
選好に基づき計算



図：行動決定の流れ

9

### 行動決定の生成モデル（選好）

10

#### ● 行動決定の流れ

- 選好はロボットが望ましいと感じる観測

- 目的地へ近い方が望ましいと感じる → 目的地へと誘導可能
- 障害物に当たることが望ましくないと感じる → 障害物を回避可能
- 自身の位置の観測への選好の例

$$P(o|C) = \sigma(C_i)$$

$$C_{or} = \begin{cases} \alpha & (o \text{ が目的地の場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

- $\alpha$  は目的地への選好を表すパラメータ ( $>0$  で目的地へと誘導が可能)



図：行動決定の流れ

10

### 死角への対処（存在確率）

11

#### ● 死角に存在する作業者の存在確率

- 作業者の位置予測の生成モデルの中で、死角に存在する作業者の存在確率を定義
- 倉庫内には倉庫やロボットに取り付けられたカメラから見ることができない死角が存在

$$s_{xrrn} = \begin{cases} bs_0 & (x \text{ が死角}) \\ bs_1 & (\text{死角から作業者が1ステップで} x \text{ に到達可能}) \\ bs_2 & (\text{死角から作業者が2ステップで} x \text{ に到達可能}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

死角から人が 2 ステップ以内で到達可能な範囲

- $bs_0$ 、 $bs_1$ 、 $bs_2$  は存在確率のパラメータ
- $bs_0$  を死角の警戒度と定義



図：死角の警戒

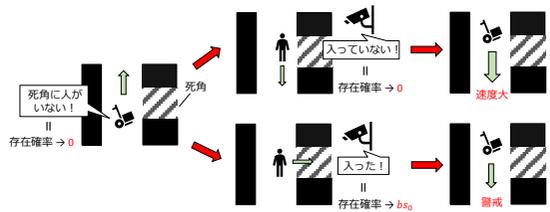
11

### 死角への対処（監視）

12

#### ● 死角の監視

- 観測できた死角の情報を状態で記憶、監視により更新



図：死角の監視

12

評価設定

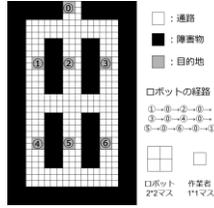
13

● 倉庫の内部構造

- 右図の通り
- ロボットは倉庫の出口への荷物の搬送を繰り返す実施
- ①番から順に6回搬送し、①番に戻るまでを1回と定義
- 1つの実験に対し20回の搬送を行い、平均値で評価

● 評価指標

- 安全性
  - 衝突回数
  - 急停止回数
  - 閾値以上の速度で作業者に近い回数
- 効率
  - 搬送に要した時間 (ステップ)



13

評価設定

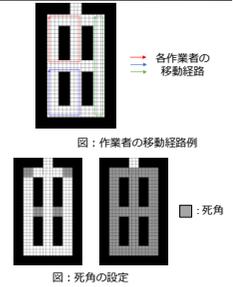
14

● 実験 1 (作業者の人数変化)

- 作業者の人数を1~5人に変化
- 作業者の移動経路は固定、速度はランダムに加減速
- 右図は作業者が3人の場合の移動経路の例

● 実験 2 (倉庫内に死角が存在する場合)

- 倉庫内に死角が存在
- 右図のような2パターンを用意 (左がパターン1、右がパターン2)
- 死角の警戒度を0~0.2に変化
- 作業者の人数は3人、移動経路は実験1と同様

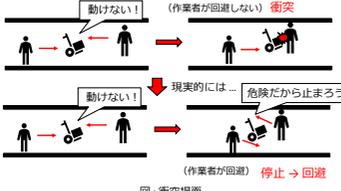


14

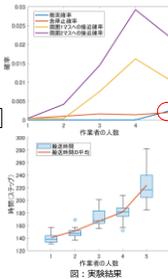
評価結果 (作業者の人数変化)

15

● 5人の場合で衝突が発生



- 急停止、接近確率 → 人数増で増加
- 衝突場面 → 人数増で増加
- 搬送効率 → 人数増で増加



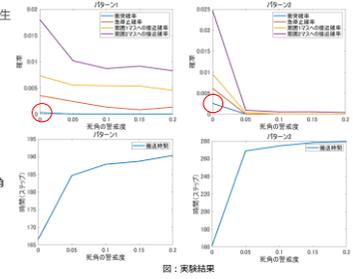
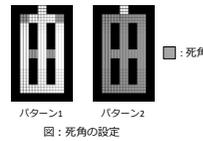
15

評価結果 (倉庫内に死角が存在する場合)

16

● 死角の警戒度が0の時に衝突が発生

- 警戒度をあげると回避が可能
- 急停止、接近確率 → 警戒度大で低下
- 搬送効率 → 警戒度大で増加



16

能動推論を用いる効果

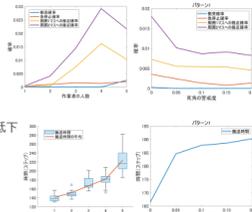
17

● 安全性

- 作業者の移動などの環境変動やカメラの死角から生じる作業者の位置の不確実性がある中でも **安全性の高い搬送**を実現可能

● 効率

- 作業者の人数や死角の範囲、警戒度が増えると低下
  - 警戒する場所が増え、より慎重な行動を選択



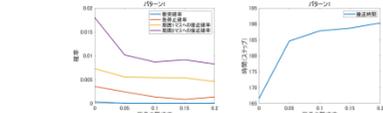
17

能動推論を用いる効果

18

● パラメータ設定による柔軟な搬送

- 死角の警戒度に対し安全性と効率にトレードオフの関係 (警戒度低 → 安全性低、効率高 / 警戒度高 → 安全性高、効率低)



- ロボットが運ぶ荷物の重さや個数などの規模から、急停止などの行動の許容量を決定し、それに基づいて警戒度の設定が可能 → 状況に応じた搬送の実現
- その他の目的地や速度への嗜好、障害物や急停止行動への嫌悪などのパラメータも状況に応じて変更することで柔軟な搬送が可能

18

## まとめと今後の課題

19

- **能動推論に基づく自律型搬送ロボット制御手法**
  - 能動推論を搬送ロボットの制御に適用することで、**作業者の位置の不確実性に対処し**衝突を回避するなど**安全性の高い搬送**を実現
- **今後の課題**
  - 従来の搬送ロボット制御手法との比較
    - 安全性、効率の面で本手法の優位性を確認
  - 計算時間の削減
    - より精密な制御のためには計算時間の増加の可能性
    - 現実のロボット制御への適用のためには削減が必要
  - 現実のロボット制御への適用