

能動推論に基づく搬送と 倉庫内の状況監視を両立する 搬送ロボット制御手法の 提案と評価

大阪大学 基礎工学部
情報科学科ソフトウェア科学コース
村田研究室
福山 敦也

特別研究報告会 2024/2/14

● 物流倉庫での荷物の運搬

- 倉庫内では荷物を積み下ろしたり、運搬したりと荷物の位置や人の位置が目まぐるしく変化

● 自律型搬送ロボットの普及

- 荷物の運搬を自律的に行うロボットの活用
- 効率的な移動には障害物の位置を把握し、障害物がある可能性が低い効率的な経路を選択する必要



図：物流倉庫と自律型搬送ロボット[1]

● 倉庫内の状況の把握の必要性

- 障害物の位置
 - 障害物の回避には余分な移動が必要
 - 効率的な移動には障害物の位置を把握し、障害物がある可能性が低い効率的な経路を選択する必要
- 荷物（作業者）の位置
 - 従来の搬送ロボットでは倉庫内の荷物の位置を把握しきることが困難
 - 荷物を運び終わった後に次に運ぶべき荷物を探索する必要

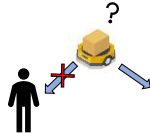
[1] "Scaling mobile robots for success", https://www.mh.com/etech/scaling_mobile_robots_for_success, last accessed on 2024-02-12

● 研究目的

- 自律型搬送ロボットによる荷物の運搬と倉庫内の状況把握の両立の実現

● アプローチ

- 自律型搬送ロボットの行動決定に能動推論[2]を利用
 - 人の脳の行動原理に倣った状態の推論方法
 - 搬送と倉庫内の状況把握を統合的に扱うことが可能
 - 能動推論における生成モデルを設計し、ロボットは生成モデルをもとに行動を決定



図：自律型搬送ロボット

[2] K. Friston, T. FitzGerald, F. Rigoli, P. Schwartenbeck, G. Pezzulo: "Active Inference: A Process Theory", Neural Computation, pp. 1-49 (2017)

● エージェントは自由エネルギーを最小化するように行動をすると仮定

- 自由エネルギー
 - 変分自由エネルギー：状態の推論に用いる
 - 期待自由エネルギー：行動の決定に用いる
- エージェントは観測と行動を繰り返す
- 期待自由エネルギーではエージェントが望む観測につながる行動を評価
- 望ましい観測は選好で定義

● 搬送と倉庫内の状況把握を統合的に扱うことが可能

- 期待自由エネルギー

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

状況把握に関連
選好
搬送に関連

- 行動決定の際上で式で表される期待自由エネルギーで搬送と状況把握の両方を評価することで統合的に扱う

● 能動推論における生成モデルを設計

- 倉庫の内部構造や搬送先である目的地の位置から右表の要素を設定
- 状態で作業者の位置を把握
- 尤度が障害物の位置と対応
- 選好が目的地の位置と対応

表：生成モデルの要素と内容の抜粋

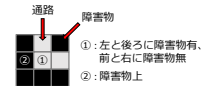
要素	内容
観測	自分の位置、障害物の有無
状態	自分の位置、作業者（荷物）の位置
尤度	ある位置である観測をする確率
選好	ロボットが望む観測

● ロボットは生成モデルをもとに行動を決定

- 能動推論を用いて行動決定を行うこととなり、搬送と状況把握の両立を実現

● 尤度

- ある位置での各観測をする確率
- ロボットは前後左右の障害物の有無を観測可能
- 前後左右の障害物の有無の組み合わせ 16 種類と障害物上という観測の計 17 種類の観測



図：観測例

● 選好

- 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 → 目的地へと誘導できる
 - 障害物に当たることが望ましくないと感じる → 障害物を回避できる
- 目的地への選好 (pr, α は選好の強さを表すパラメータ)

- α を変化させ評価

$$C_s = pr \left(1 - \frac{D(s)}{\max(D(s))} \right) \quad D(s): \text{目的地と位置 } s \text{ とのユークリッド距離}$$

$$C_{s_g} = pr + \alpha \quad s_g: \text{目的地}$$

作業者の位置の推論

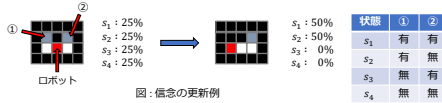
7

● 作業者の位置に関する状態の信念

表: 生成モデルの要素と内容 (再掲、抜粋)

要素	内容
状態	自分の位置、作業者(荷物)の位置

- ロボットは作業者の位置の情報を状態としてもち
- 作業者の位置の考えられる組み合わせと各状態が対応
 - 例えば作業者の位置の候補地点が 10 箇所で倉庫内の作業者が 2 人の場合、 $10C_2$ の 45通りが候補
- この状態の確率分布を信念とよび、実際の観測と変分自由エネルギーをもとに更新

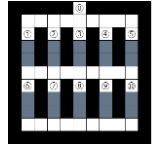


評価方法

8

● 倉庫の内部構造

- 右図のような構造で、荷物の積み下ろしを行う作業者がいる通路は 10 本ある
- ロボットは同じ位置にある荷物を倉庫の出口へと 3 回運搬する



● 障害物 □ 通路
■ 作業者のいる可能性のある経路
① ~ ④ 荷物の位置
⑤ 倉庫の出口
図: 倉庫の内部構造

● 能動推論を用いずに行動決定を行うロボットとの比較

- 常に目的地までの障害物のない最短経路を進むように行動
- 通路上の荷物の有無は観測した時に記憶
- 行動に現れる違いは状況把握のための行動の有無

● 評価指標

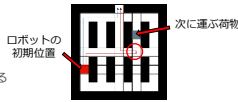
- 作業者の位置に関する状態の信念の変化
- 状況把握の経路長へ与える影響

評価結果: ロボットが進んだ経路と信念変化

9

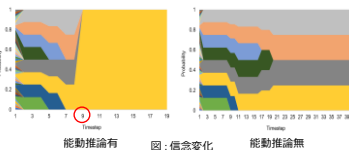
● 進んだ経路

- 赤い矢印が能動推論を用いたロボットの経路
- 青い矢印が能動推論を用いないロボットの経路
- 能動推論を用いると状況把握のための行動をとる



● 信念変化

- 各色の領域の縦軸の幅が対応する状態の確率
- 左図ではある状態の確率が 1 に → 状況を完全に把握
- 右図では 4 通りの可能性が最後まで存在
- 次に運ぶ荷物の位置がわかるため、以降の経路設計に活用



評価結果: 経路長への影響

10

● 上表

表: 能動推論を用いないロボットに対する経路長の増加率

パターン	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\alpha = 5$
1	+7.2%	+7.2%	+0%	+0%	+0%	+0%
2	+11%	+11%	+0%	+0%	+0%	+0%
3	+107%	+0%	+0%	+0%	+0%	+0%
4	+36%	+36%	+27%	+27%	+8.9%	+0%
5	+64%	+64%	+0%	+0%	+0%	+0%

● 下表

- α が大きくなるにつれ状況把握にかかる経路長が増加

● 結論

- 状況の把握度と経路長にトレードオフの関係
- 状況把握の重視度合いで α を変化させることで両立が可能

表: 状況を完全に把握するまでに要した経路長

パターン	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\alpha = 5$
1	8	8	n/a	n/a	n/a	n/a
2	8	10	n/a	n/a	n/a	n/a
3	12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
4	16	16	22	28	n/a	n/a
5	16	22	n/a	n/a	n/a	n/a

まとめと今後の課題

11

● 能動推論に基づく自律型搬送ロボット制御手法の実装

- 荷物の搬送と倉庫内の状況把握の両立の実現
 - 搬送ロボットの行動決定に能動推論を用いることで上記の両立が可能であることを確認

● 今後の課題

- 提案手法の改善
 - 実用に向けた計算速度の実現
- 倉庫内の状況把握による具体的な効果の検討
 - 状況把握によって期待される全体の運搬にもたらす効果の検証
- デジタルツインとの統合
 - 実世界をカメラなどのセンサーで認識し、仮想空間上で生成モデルと対応させる