

大阪大学 1

## 複数のセンサ・アクチュエータを用いた人物探索における 能動推論の有効性の評価

大阪大学 基礎工学部 情報科学科 村田研究室  
小菅 瑛斗

特別研究報告書 2024.2.14

1

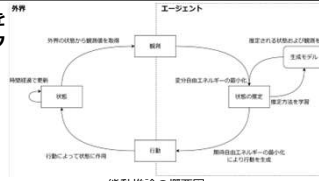
研究背景 2

- **物理空間の情報の把握**
  - 例：医療現場や工場、農場の状況把握などの工業目的
    - 人手不足の解消、大規模システムの管理
  - 例：交通情報推定や迷子 / 徘徊老人 / ペット探索などの生活目的
    - Society 5.0、スマートシティ
  - 物理空間の情報を集積することが重要
- **全ての情報を集積するのは非現実的**
  - 情報の欠損より不確実性が存在
- **情報の不確実性を表現し、減少させる仕組みが必要**
  - 得られた観測により欠損情報の不確実性を表現
  - 不確実性を減少させるための行動を推論
  - 観測と行動を繰り返して効果的に情報の不確実性を減少

2

能動推論 [1] 3

- **エージェントの環境推定と行動推論をモデル化した統一的なフレームワーク**
  - 変分自由エネルギー：環境を信念として推定
  - 期待自由エネルギー：信念の不確実性を減少させる行動を推論
- エージェントは観測と行動の繰り返しにより環境を理解
- 状態の予測を行う生成モデルを更新



能動推論の概要図

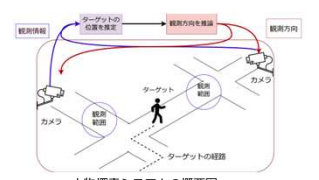
- **能動推論を利用して倉庫内でマッピングを行う先行研究 [2]**
  - 倉庫内のマップを状態として表現
  - マップ内で 1 台のロボットを制御して前方に取り付けられたカメラで環境を観測
  - 観測と制御の繰り返しによりトポロジカルマップを生成

[1] K. Friston, F. Rigoli, D. Ognibene, C. Mathys, T. Fitzgerald, and G. Pezzulo, "Active inference and epistemic value," Cognitive Neuroscience, vol. 6, pp. 187-214, May 2015.  
[2] O. C. et al., T. Verbeek, T. Van de Maek, B. Dhooch, and A. Saffon, "Robot navigation as hierarchical active inference," Neural Networks, vol. 142, pp. 192-204, May 2021.

3

研究目的と研究手法 4

- **研究目的**
  - 人物探索における能動推論の有効性の評価
    - 可動式カメラによる観測情報から物理空間の状態を信念として推定
    - 可動式カメラをアクチュエータする行動と推定によりモデルを更新
    - 観測と行動の相互フィードバックにより効果的な人物探索が可能であるか
- **研究手順**
  - 人物探索システムの策定
  - 能動推論のフレームワークを適用
  - シミュレーション評価
    - 人物の捕捉割合
    - 生成モデル更新の妥当性

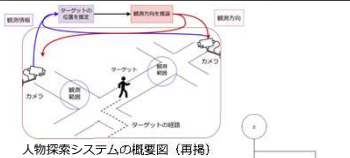


人物探索システムの概要図

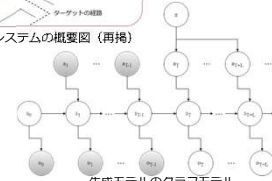
4

本報告で想定する人物探索システム 5

- **複数の可動式カメラとマップ、ターゲットで構成**
  - 離散ステップで生成モデルを作成
  - 観測  $o_t$ ：ターゲットの有無
  - 状態  $s_t$ ：マップ上でのターゲットの位置
  - 行動  $a_t$ ：可動式カメラの向きの変更
- ターゲットの規則を利用 [3] (状態  $s_t$  の遷移)
  - 地点による差
  - 移動目的による差
  - 時間帯による差
- こうした移動規則から生成モデルを更新
  - ターゲットの位置予測に利用



人物探索システムの概要図 (再掲)



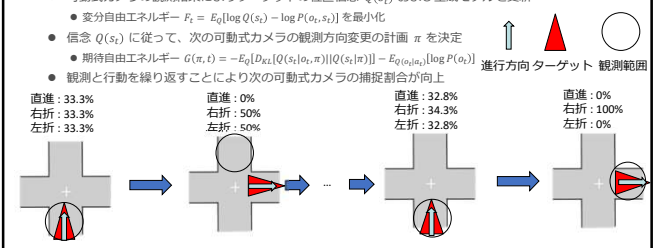
生成モデルのグラフモデル

[3] 国土交通省, "まちの活性化を測る歩行者量調査のガイドライン," <https://www.mlit.go.jp/common/001239968.pdf>, 2018

5

人物探索への能動推論の適用 6

- **観測と可動式カメラの制御を繰り返すことにより効率的に人物探索**
  - 可動式カメラの観測結果によりターゲットの位置信念  $Q(s_t)$  および生成モデルを更新
    - 変分自由エネルギー  $F_t = E_Q[\log Q(s_t) - \log P(o_t, s_t)]$  を最小化
  - 信念  $Q(s_t)$  に従って、次の可動式カメラの観測方向変更の計画  $\pi$  を決定
    - 期待自由エネルギー  $G(\pi, t) = -E_Q[D_{KL}[Q(s_t|a_t, \pi) || Q(s_t|\pi)]] - E_Q(o_t|a_t) \log P(o_t)$
  - 観測と行動を繰り返すことにより次の可動式カメラの捕捉割合が向上



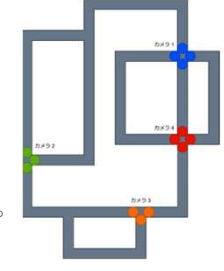
ターゲット位置の信念更新例

6

### 評価環境

7

- マップ
  - 右図に示す構成
- 可動式カメラ
  - 配置された交差点の方向を一つ決定して観測
  - ターゲットの交差点進入および離脱を観測可能
  - ターゲットを正しく識別できると仮定
- ターゲット
  - マップ上に 1 つ存在
  - 交差点においては、いずれか一つの道を選択
  - 移動の規則性: 交差点において直進確率 (直進を選択する確率) を持つ
  - マップの経路長によるターゲットの移動時間の差は考えない



マップと可動式カメラの観測可能位置

7

### 評価方法

8

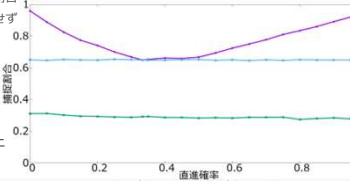
- 捕捉割合により評価
  - (捕捉割合) = (実際に捕捉できた回数) / (ターゲットが捕捉可能な位置にいた回数)
  - 捕捉割合が高ければ人物探索を有効に行えていることが確認
  - ターゲットの直進確率による捕捉割合の変化を評価
  - 比較手法の 1 つ目として可動式カメラを無作為に動かす手法
    - ターゲット位置の不確実性を信念として表現せずに行動する手法
  - 比較手法の 2 つ目としてターゲットの直進確率 0.33 を与える能動推論
    - ターゲットの規則性としての直進確率を利用しない手法
- 生成モデルの更新を評価
  - ターゲットの直進確率が事前知識と異なる場合
  - 環境の傾向を捉えることができることを確認

8

### 評価結果：ターゲット捕捉割合

9

- 直進確率の傾向が強くなるにしたがって捕捉割合が向上
  - 直進確率 0.33 から 0.5 では優位性なし
    - 直進確率 0.33 ⇒ 十字路において規則性なし
    - 直進確率 0.5 ⇒ T字路において規則性なし
  - 生成モデルにより環境をより正確に表現
  - 行動に組み入れることでより高い捕捉割合
  - 直進確率を利用しないと捕捉率は向上せず
- 無作為に観測方向を決定するよりも高い捕捉割合
  - ターゲットの位置を信念として表現
  - 信念の不確実性を減少させるようにカメラを制御することで捕捉割合が向上



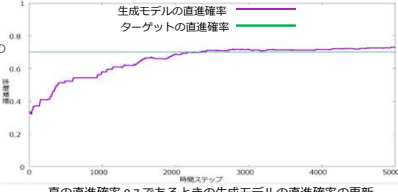
直進確率による捕捉割合の比較

9

### 評価結果：生成モデルの更新

10

- ターゲットの真の直進確率が 0.7 である場合
  - シミュレーション開始時の初期値としてターゲットの直進確率 0.33 を与える
  - エージェントによる生成モデルの更新: 0.33 ⇒ 0.72
    - 推定した状態から生成モデルを更新
    - 観測と行動を繰り返すことで生成モデルが環境の傾向を捉えていることを確認
- 課題
  - 真の直進確率を得るまで多くの観測を要する
  - ⇒ ドローン派遣などより能動的な推論の導入が必要



真の直進確率 0.7 であるときの生成モデルの直進確率の更新

10

### まとめと今後の課題

11

- 能動推論による複数の可動式カメラによる人物探索を実施
  - 人物探索においてターゲットの位置の不確実性を減少させるように可動式カメラを制御
  - 生成モデルを更新することでターゲットの規則性を可動式カメラの制御に反映
  - 単純化した環境で有効性が表れていることを確認
- 今後の課題
  - より複雑な条件での検証
    - ターゲットが複数人である場合
    - ターゲットの規則性が場所や時間帯、その人物の特徴 (年齢・性別など) によって変化
    - 他の手法との比較
  - 様々なセンサ・アクチュエータを利用した情報取得
    - 深度カメラ、Lidar デバイスなどのセンサ
    - ドローンやロボットなどの、モビリティを有するアクチュエータ
  - 生成モデルのよりよい更新方法
    - 収束までに必要なステップ数、収束の誤差

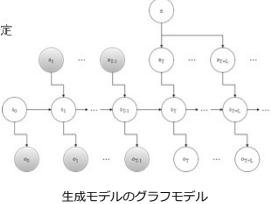
11

### 生成モデル

12

- 未来の状態および観測を生成
  - $P(\hat{g}, \hat{s} | \pi) = P(s_0) P(\pi) \prod_{t=1}^T P(s_t | s_{t-1}, \pi) \prod_{t=0}^T P(o_t | s_t)$
  - 可動式カメラはこの生成モデルをもとに観測方向を決定
- 生成モデルの構成要素

記号	説明
$P(s_0)$	初期のターゲット位置
$P(\pi)$	可動式カメラの観測方向
$P(s_t   s_{t-1}, \pi)$	ターゲットの移動規則
$P(o_t   s_t)$	可動式カメラの認識誤差



生成モデルのグラフモデル

12

## 自由エネルギー原理

13

- **変分自由エネルギー：状態の推定を行うために計算**
  - $F_t = E_Q[\log Q(s_t) - \log P(o_t, s_t)]$
  - エージェントは真の状態を知ることが出来ないため近似事後信念  $Q(s_t)$  を導入
  - 変分ベイズによって生成モデルから得られる  $P(o_t, s_t)$  に近似  $\Rightarrow$  変分自由エネルギーの最小化
- **期待自由エネルギー：行動計画を行うために計算**
  - $G(\pi, t) = -E_Q[D_{KL}[Q(s_t|\alpha_t, \pi)||Q(s_t|\pi)]] - E_{Q(o_t|\alpha_t)}[\log P(o_t)]$
  - 期待自由エネルギーは将来予想される変分自由エネルギーの期待値
  - 第一項目は情報利得（どの程度信念の不確実性を減少させるか）を表現
  - 第二項目は事前嗜好（報酬）を表現
  - さらに各ポリシーごとにソフトマックス関数にかけることによりポリシーの分布として表現
    - $P(\pi) = \sigma(-\gamma G(\pi))$
  - エージェントはこの期待自由エネルギーを最小化するポリシー（行動計画）を選択

13

## 現在実用化されている人物探索サービス

14

- **伊丹市：まちなかミマモルメ [4]**
  - 高齢者および小学生向けのサービス
  - 街中に設置されたビーコン受信機が小型タグを検知
- **セコム：セコムみまもりホン [5]**
  - 小型デバイスに搭載された GPS により居場所を把握
  - 本人がブザー用ストラップを引っ張ることで緊急通報
- **本人がタグ・デバイスを保持していることが前提**
  - 忘れる、落とす、故障などのリスク
- **誰もが安心して生活できるためにはデバイスやタグによらない探索が必要**
  - 可動式カメラによる探索

[4] 伊丹市, "位置情報通知サービス「まちなかミマモルメ」", [https://www.city.itami.lg.jp/SOSIKU/TOSHIKOTU/TOSI\\_ANZEN/camera/mimamome.html](https://www.city.itami.lg.jp/SOSIKU/TOSHIKOTU/TOSI_ANZEN/camera/mimamome.html), 2022

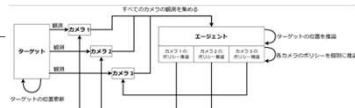
[5] SECOM, "高齢者向けケータイとして最適な「セコムみまもりホン」のご紹介.", <http://www.secom.co.jp/mimamori/col.htm#03.html>, 2019

14

## 複数の可動式カメラによるターゲット位置推定

15

- **先行研究 [2] では単一のセンサ・アクチュエータを利用**
  - 複数のセンサ・アクチュエータの利用によってより多くの応用への適用が期待
- **複数のアクチュエータの行動推論**
  - 全ての行動の組み合わせを考えるため計算量大
- **行動推論は各アクチュエータごとに個別に推論**
  - 組み合わせにより環境が変化しない場合
  - アクチュエータごとに期待自由エネルギーを計算し最小化する行動を推論



複数のアクチュエータによる行動推論のシステム

ポリシー推論を高速化したシステム

[2] O. C. and T. Verbeke, T. Van de Melle, B. Dhoedt, and A. Saffon, "Robot navigation as hierarchical active inference," *Neural Networks*, vol. 142, pp. 192–204, May 2021.

15