Методы многоагентного планирования траекторий с учётом кинодинамических ограничений

Заварзин Н.Ю.
zavarzin.niu@phystech.edu

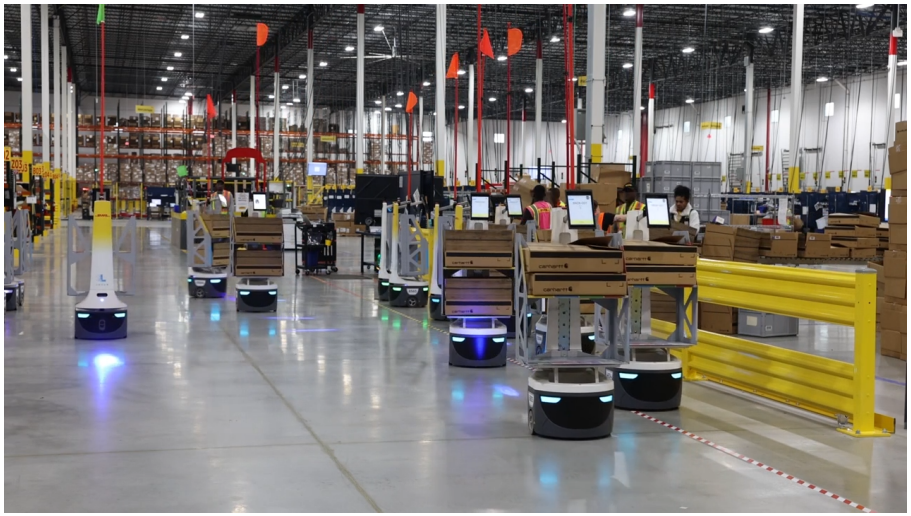
Московский физико-технический институт
Центр когнитивного моделирования МФТИ

2025 – Научно-исследовательский семинар

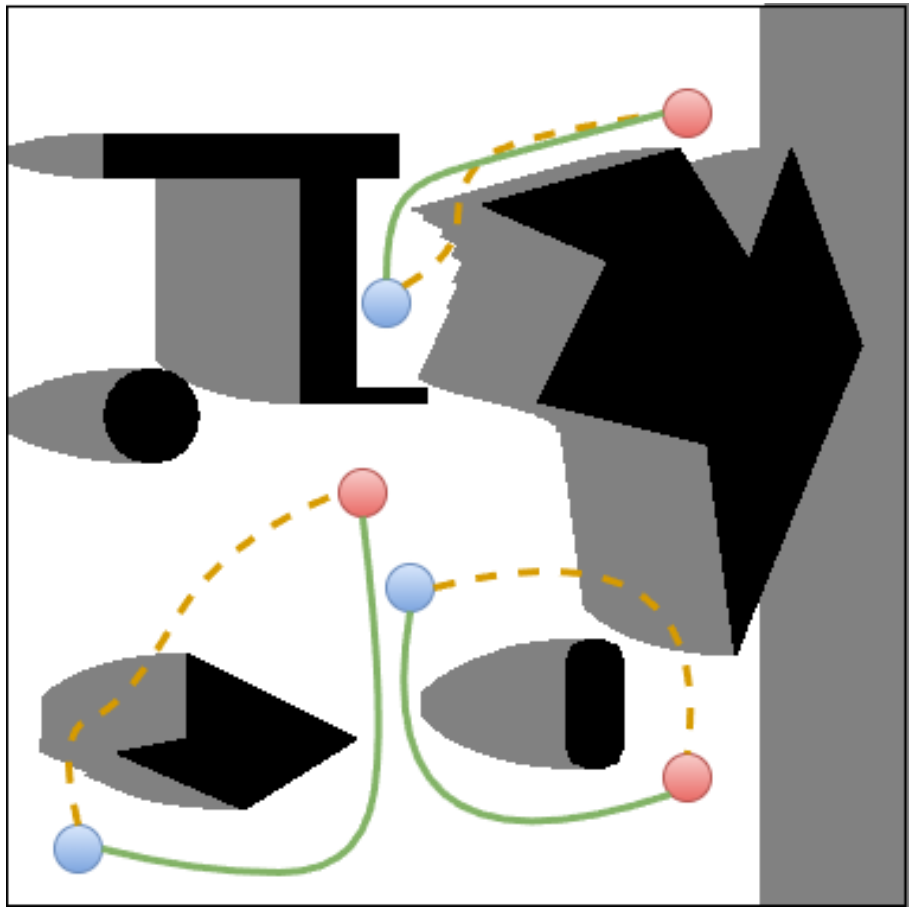




Мотивация







Постановка задачи

Модель движения:

$$\begin{cases} \dot{c}_i(t) = f_i(c_i(t), u_i(t)), \\ c_i(t_0) = c_{i,0}, \\ c_i(t_{i,1}) \in \mathcal{C}_{i,\text{goal}}, \end{cases} \qquad i = \overline{1, n}. \tag{1}$$

Обозначения:

- $c_i(t) \in \mathcal{C}_i$ — конфигурация i-го агента в момент времени t.
- $u_i(t) \in \mathcal{U}_i$ — управляющее воздействие на агента.
- $f_i(c_i, u_i)$ — дифференциальные ограничения.
- $c_{i,0}$ — стартовая конфигурация.
- $\mathcal{C}_{i,\text{goal}}$ — множество конечных конфигураций.
- $W \subseteq \mathbb{R}^2$ ($W \subseteq \mathbb{R}^3$) — рабочее пространство.
- $W_{\text{obs}}(t)$ — рабочая область статических и динамических препятствий.

Постановка задачи

Траекторией i-го агента будем называть отображение

$$\sigma_i \ : \ [t_0, T_{max}] \to \mathcal{C}_i,$$
$$\sigma_i(t_0) = c_{i,0},$$
$$\exists t_{i,1} \in [t_0, T_{max}] \ : \ \sigma_i(t_{i,1}) \in \mathcal{C}_{i,\text{goal}},$$
$$\forall t \in [t_0, t_{i,1}] \ : \ c_i(t) \in \mathcal{C}^i_{\text{free}}(t).$$

За Σ_i обозначим множество всевозможных траекторий i-го агента. Решением же системы (1) назовём $\sigma = (\sigma_1, \ldots, \sigma_n)$. Определим $\Sigma = \Sigma_1 \times \cdots \times \Sigma_n$ как множество всех решений.

Цель: минимизировать функцию стоимости $\texttt{Cost} : \Sigma \to \mathbb{R}_{\geqslant 0}$ на решениях системы (1), задаваемую выражением

$$\texttt{Cost}(\sigma) = \sum_{i=1}^{n} \texttt{Cost}_i(\sigma_i),$$

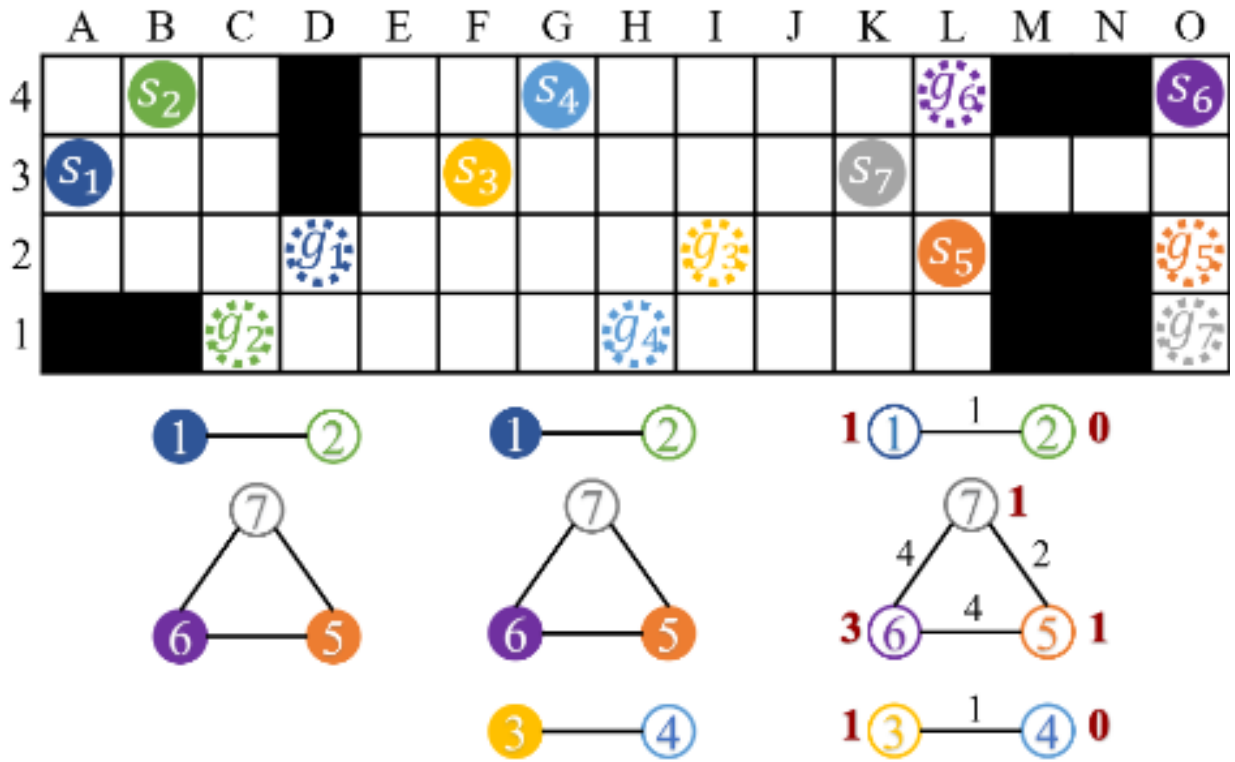
где $\texttt{Cost}_i : \Sigma_i \to \mathbb{R}_{\geqslant 0}$.

Анализ предметной области

Наиболее зарекомендовавшие себя подходы:

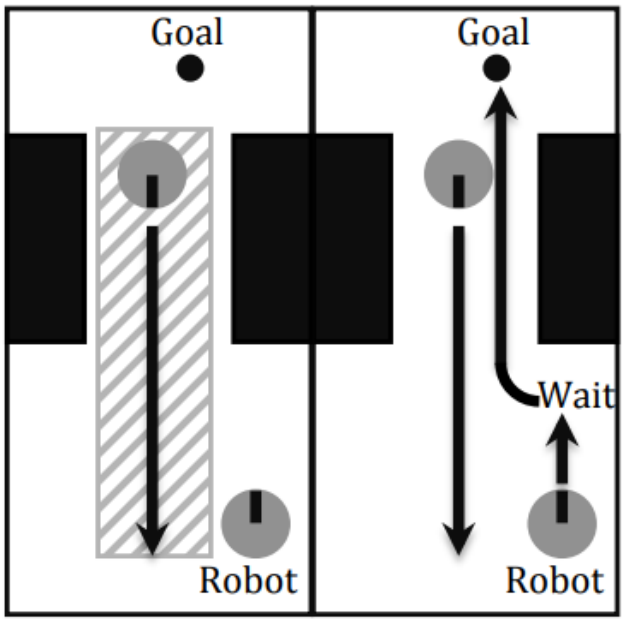
- **Эвристические методы** (OD, HCA*) строят графы и используют эвристические функции, вычислительно затратны, но как правило предоставляют теоретические гарантии оптимальности.
- **Методы на основе сэмплирования** (KRRT*) гибкие, легко адаптируются к меняющейся обстановке, но требуют сглаживания решений.
- **Оптимизационные алгоритмы** (Priority Planning + Potential Fields / Elastic Band) строят гладкие траекторий, но могут застревать в локальных минимумах.
- **Методы машинного обучения** (MADQN, MAPPO) могут учитывать много различных ограничений, но переобучаются.
- **Гибридные подходы** комбинируют классические методы с обучаемыми, извлекая их преимущества.

Алгоритм Priority-Based Search

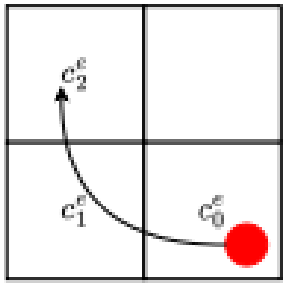


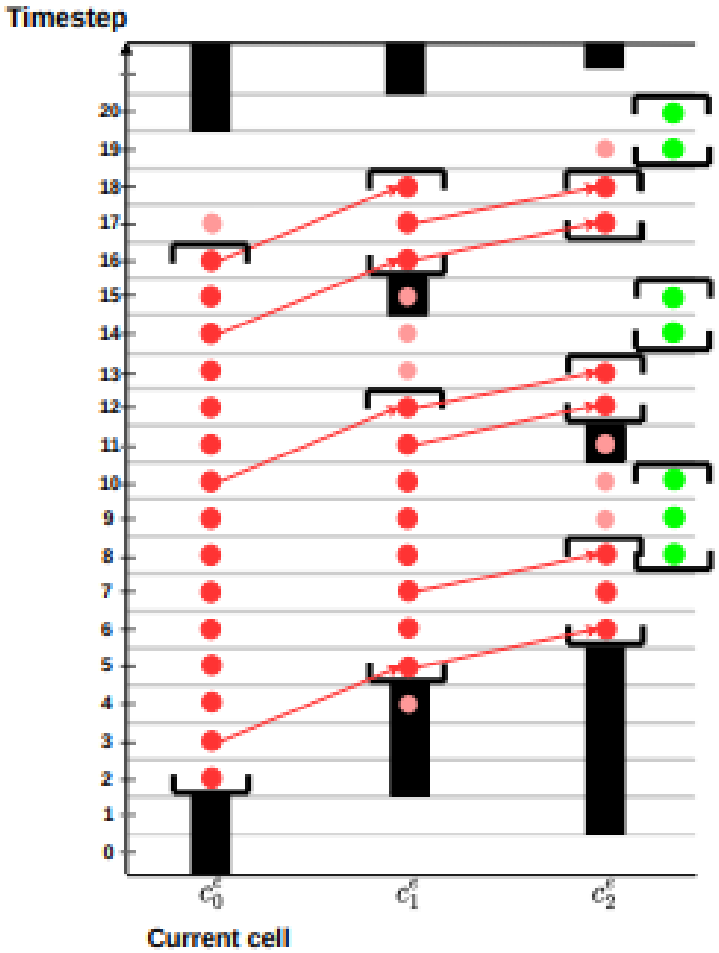
Суть работы алгоритма PBS

Алгоритм Safe Interval Path Planning with Interval Projections (SIPP-IP)



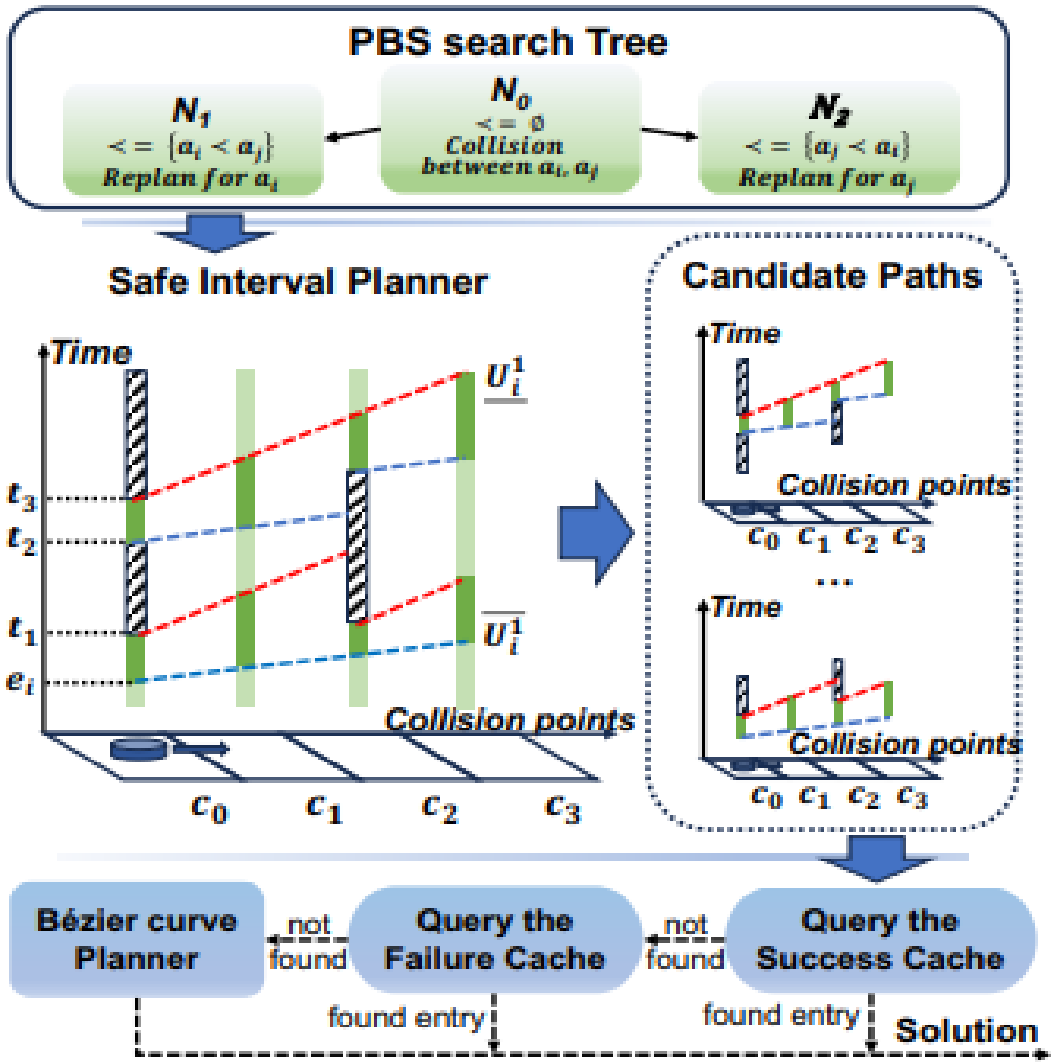
Идея SIPP





Модификация SIPP-IP

Алгоритм PSB

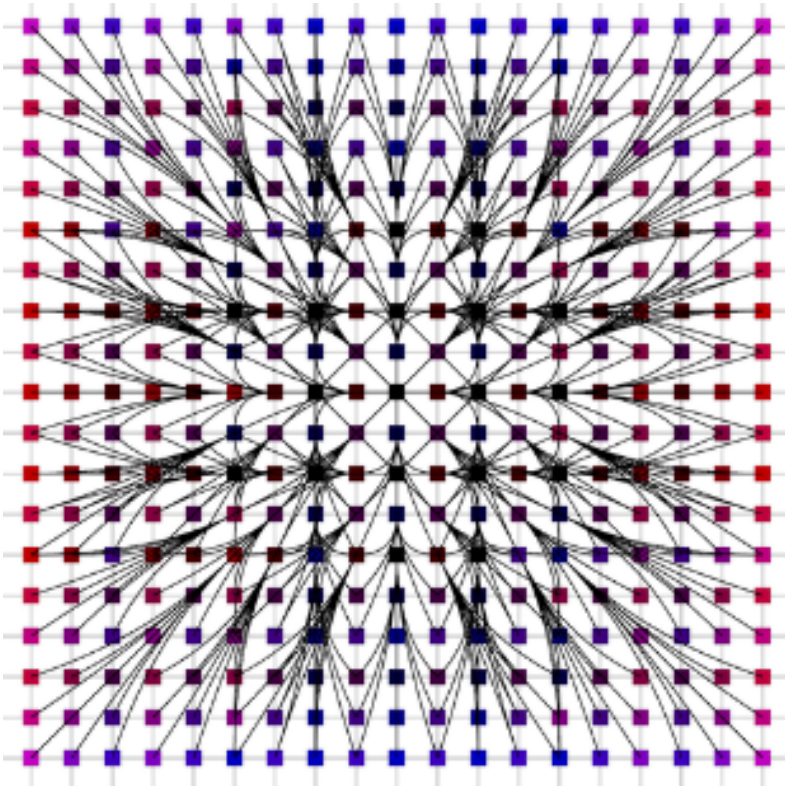


Суть работы алгоритма PSB

Заключение

Ближайшие направление исследования:

- Добавление новых примитивов
- Сравнение с PSB



Спасибо за внимание!

cogmodel.mipt.ru

zavarzin.niu@phystech.edu