Методы и алгоритмы планирования пути многозвенного манипулятора

Керимов Н.М.
kerimov.nm@phystech.edu

Центр когнитивного моделирования МФТИ

2025 – Научно-исследовательский семинар

Мотивация

- Использование манипуляторов в мелкосерийном и единичном производстве, на логистических складах;
- Совместная работа манипуляторов и человека;



Рис.: Пример многоагентной работы на производстве.



Рис.: Робот airlab Boxer с манипулятором от Franka.

Цель и задачи

Цель работы: Разработать метод делиберативного планирования пути манипулятора в среде с динамическими препятствиями.

Выделенные подзадачи:

- Разработать среду для проведения массовых экспериментов по планированию с возможностью визуализации результата;
- Реализовать современные методы планирования;
- Разработать свой метод;
- Провести эксперименты.

Постановка задачи планирования в динамических средах

- Рабочее пространство (W): трёхмерное рабочее пространство.
- Конфигурационное пространство (C): пространство углов сочленений.
- Время (T): ограниченное.
- Препятствия (O)
- Определение пути:
  - Траектория (π): путь $\pi(t)$ на времени $t \in [0, t_{arrival}]$.
  - Без коллизий: свободен от столкновений, если для всех $t \in [0, t_{arrival}]$ занимаемое роботом место $R(\pi(t))$ не пересекается с $O(t)$.

Цель: Найти $t_{arrival} \leq t_{max}$ и путь без коллизий $\pi(t)$:

- Стартовая конфигурация: $\pi(0) = q_{start}$
- Целевая конфигурация: $\pi(t_{arrival}) = q_{goal}$

Разработка среды

Была разработана среда для генерации и проведения массовых экспериментов по планированию и визуализации результатов в ПО Blender. В этой среде также была написана реализация алгоритмов DRGBT, ST-RRT*, а также собственно разработанного алгоритма.

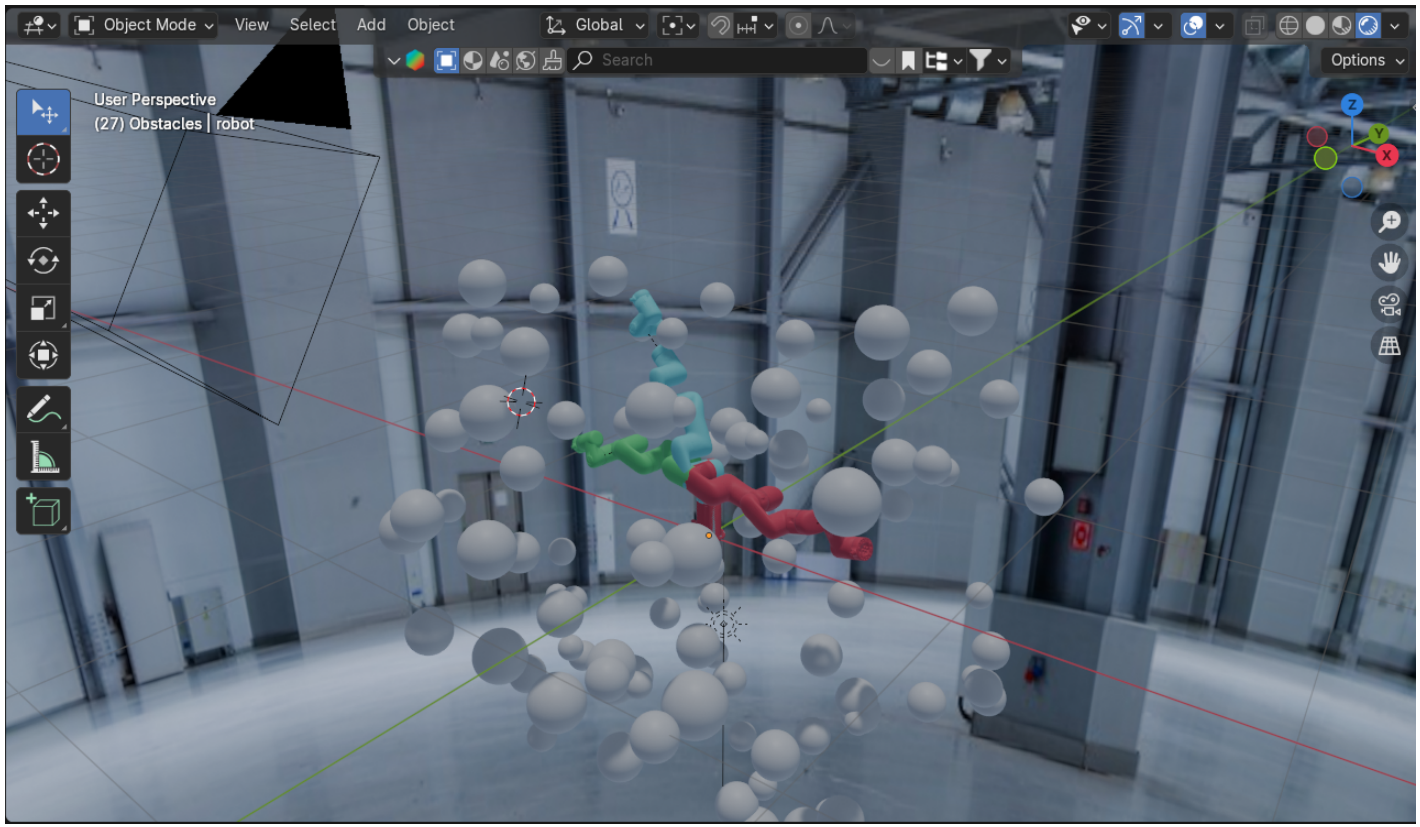
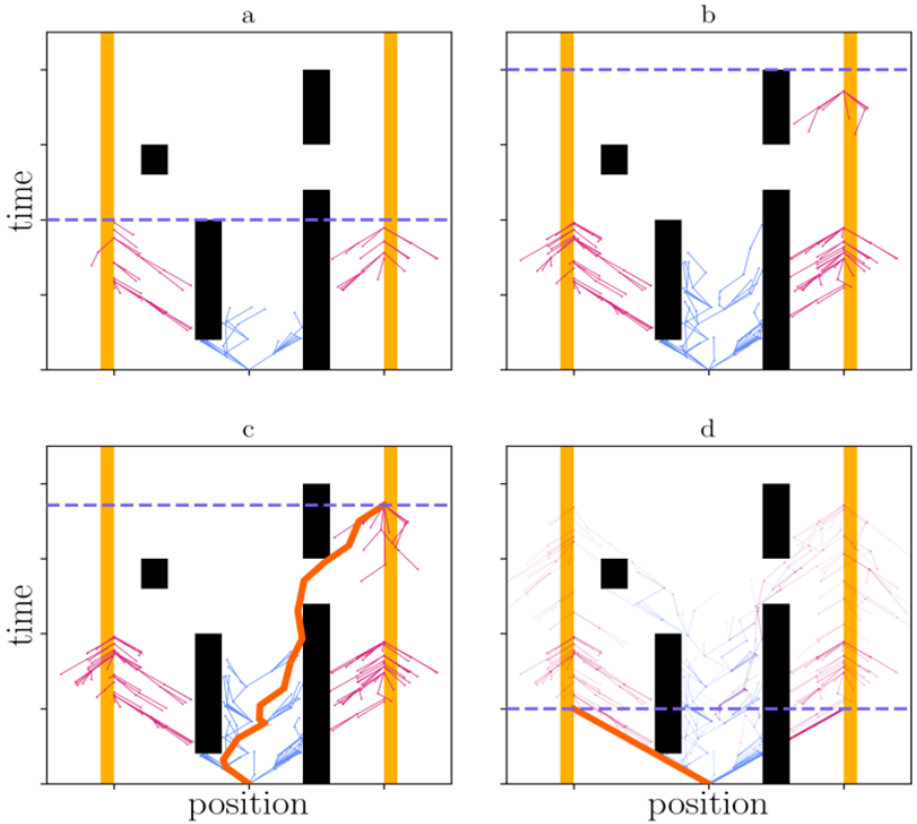


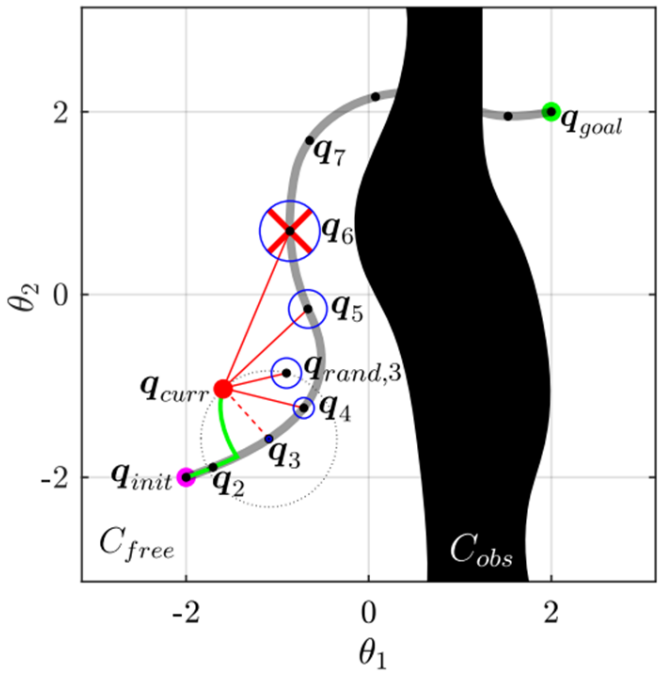
Рис.: Пример результата планирования в ПО Blender

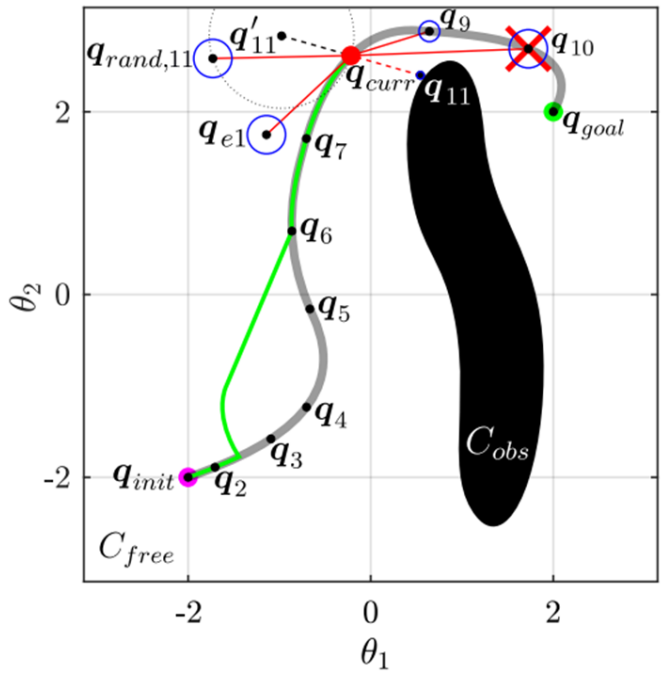
ST-RRT[1] (Делиберативный метод)

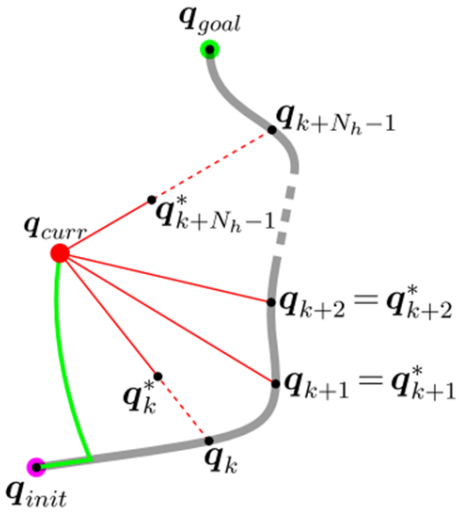


[1] Francesco Grothe и др. «ST-RRT*: Asymptotically-Optimal Bidirectional Motion Planning through Space-Time». В: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. 2022.

DRGBT[2] (Реактивный метод)

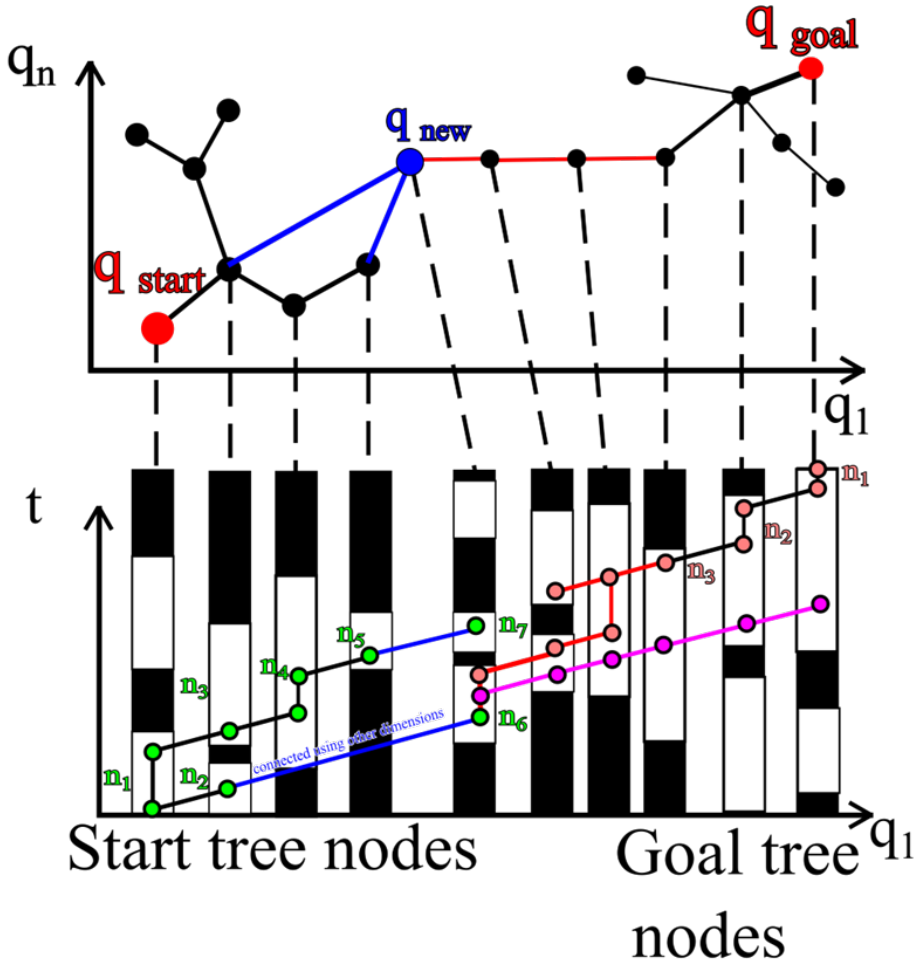






[2] Nermin Covic, Bakir Lacevic и Dinko Osmankovic. «Path Planning for Robotic Manipulators in Dynamic Environments Using Distance Information». В: *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2021, с. 4708—4713. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636730.

SI-RRT (Делиберативный метод)



Псевдокод Si-RRT

Algorithm 1: SI-RRT Planner

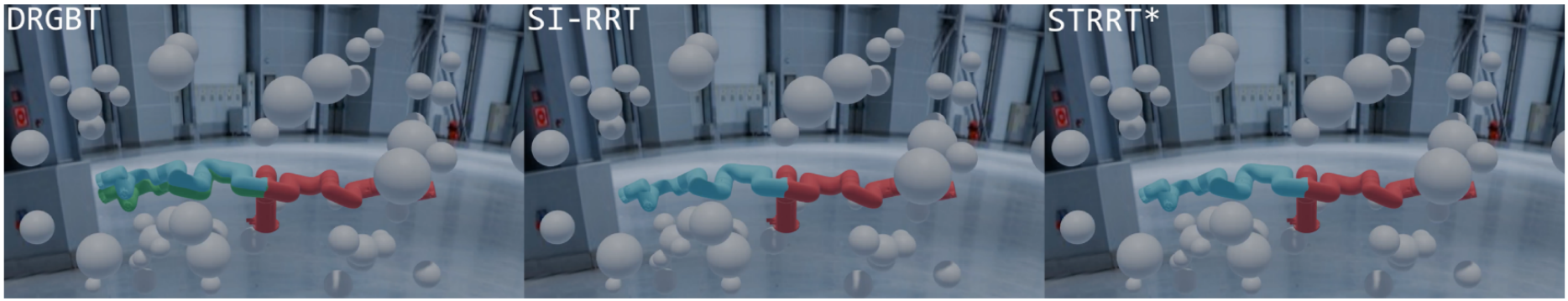
Input: $\mathbf{q}_{start}, \mathbf{q}_{goal}, t_{max}, \Delta_{planner}, \Delta_{parent}$

$n_{start} := (\mathbf{q}_{start}, si_{first}); time(n_{start}) = 0;$
$n_{goal} := (\mathbf{q}_{goal}, si_{last}); time(n_{goal}) = t_{max};$
$\mathcal{T}_{start} := \{n_{start}\}; \mathcal{T}_{goal} := \{n_{goal}\};$
$\mathcal{T}_{current} := \mathcal{T}_{start}; \mathcal{T}_{other} := \mathcal{T}_{goal};$
while *goal not reached or have time to plan* **do**
  $\mathbf{q}_{sampled} :=$ `sampleCFG();`
  $\mathbf{q}_{new} :=$ `extend`$(\mathbf{q}_{sampled}, \mathcal{T}_{current});$
  if $q_{new} = \emptyset$ **then**
    `swap`$(\mathcal{T}_{current}, \mathcal{T}_{other});$
    continue
  $\{si\} :=$ `getSafeIntervals`$(\mathbf{q}_{new});$
  $\{n_{new}\} :=$ `setParent`$(\mathcal{T}_{current}, \mathbf{q}_{new}, \{si\});$
  if $\{n_{new}\} = \emptyset$ **then**
    `swap`$(\mathcal{T}_{current}, \mathcal{T}_{other});$
    continue
  $\mathcal{T}_{current}.Add(\{n_{new}\});$
  $\{n_{join}\} :=$ `connect`$(\mathcal{T}_{other}, \mathbf{q}_{new}, \{n_{new}\});$
  if $\{n_{join}\} \neq \emptyset$ **then**
    `uniteTrees`$(\mathcal{T}_{start}, \mathcal{T}_{goal}, \{n_{join}\});$
    return success;
  `swap`$(\mathcal{T}_{current}, \mathcal{T}_{other});$
return fail;

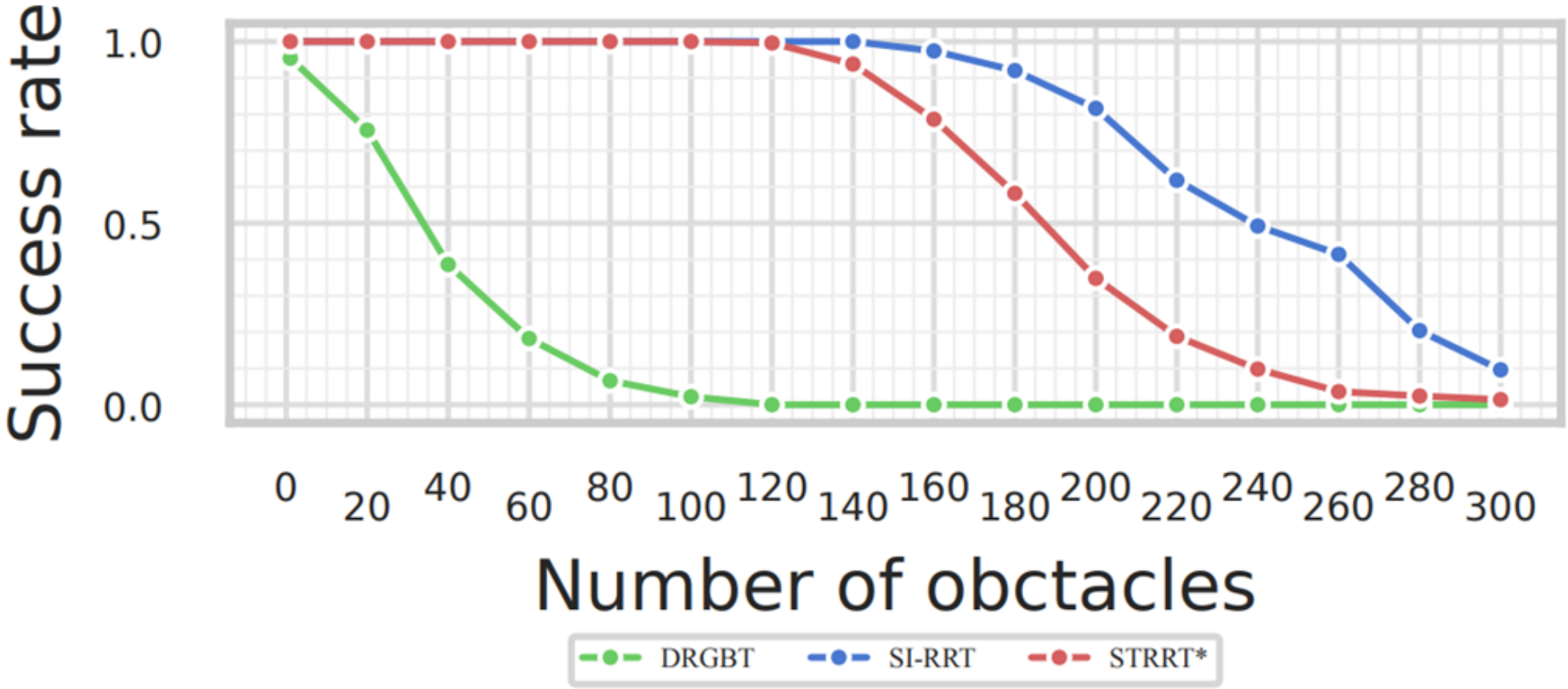
Рис.: Псевдокод SI-RRT

Проведение экспериментов

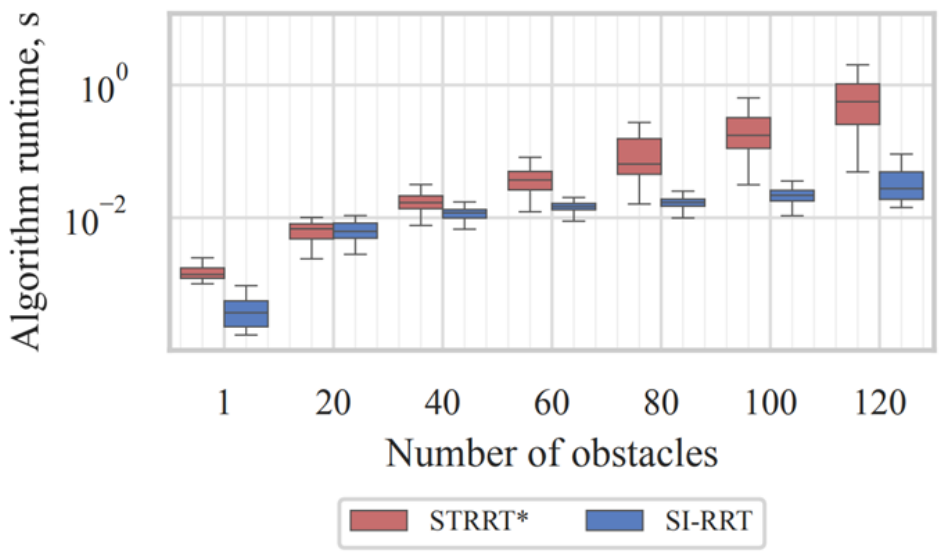
- Сферы случайного размера, двигающиеся со случайной скоростью, использовались как препятствия;
- Рабочая зона 2 на 2 метра, препятствия отскакивают от границ;
- Начальное и конечное положение манипулятора гарантировано без коллизий;
- Количество препятствий варьировалось от 1 до 300 с шагом 20;
- Сначала создавалась сцена с 300 препятствиями, потом удалялись случайные;
- Было создано 50 сцен с разным положением препятствий;
- Каждый тест выполнялся каждым планировщиком 10 раз

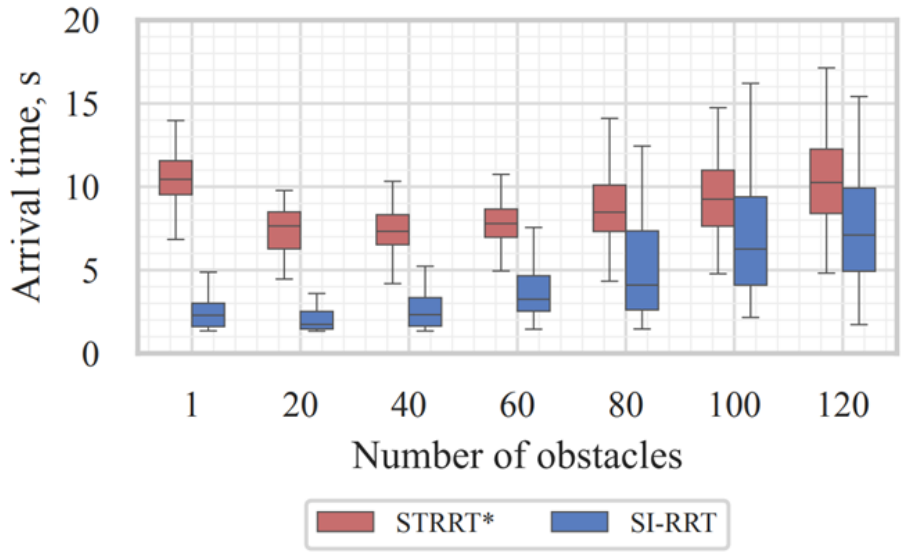


Результаты сравнения



Результаты сравнения





Публикация результатов

Алгоритм нового планировщика и полученные результаты экспериментов были приняты на конференцию ICAPS2025 (A*). Весь исходный код выложен в публичный репозиторий GitHub.



Safe Interval Randomized Path Planinng For Manipulators

Nuraddin Kerimov, Aleksandr Onegin, Konstantin Yakovlev

Published: 01 Mar 2025, Last Modified: 01 Mar 2025 35th International Conference on Automated Planning and Scheduling ArchivalandOralPresentation Everyone Revisions BibTeX CC BY 4.0

Paper Length: Short paper
Industry Paper: No
Student Paper: Yes
Type Of Contribution: Algorithms
Topic: Robotics and Control Theory
Mandatory Subject Tags: PS: Search in planning and scheduling, ROB: Motion and path planning
TL;DR: We suggest an efficent combination of safe-interval path planning and rapidly-exploring random trees for high-dimensional planning.
Abstract:
Planning safe paths in 3D workspace for high DoF robotic systems, such as manipulators, is a challenging problem, especially when the environment is populated with the dynamic obstacles that need to be avoided. In this case the time dimension should be taken into account that further increases the complexity of planning. To mitigate this issue we suggest to combine safe-interval path planning (a prominent technique in heuristic search) with the randomized planning, specifically, with the bidirectional rapidly-exploring random trees (RRT-Connect) -- a fast and efficient algorithm for high-dimensional planning. Leveraging a dedicated technique of fast computation of the safe intervals we end up with an efficient planner dubbed SI-RRT. We compare it with the state of the art and show that SI-RRT consistently outperforms the competitors both in runtime and solution cost.

Ethical And Societal Impact Statement: No, we do not think our submission needs to do so.
Formatting Compliance: Yes
Supplementary Materials: zip
Supplementary Materials Anonymisation: Yes
Submission Number: 153

Дальнейшая работа

- Проведение многоагентных экспериментов;
- Проведение экспериментов на реальном роботе;
- Теоретическое изучение алгоритма;
- Разработка anytime версии;
- Разработка обучаемых методов планирования траектории.

Спасибо за внимание!

kerimovnm@mail.ru