АЛГОРИТМЫ РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ НА МНОЖЕСТВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТРАЕКТОРИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Андрейчук Антон Андреевич

Российский университет дружбы народов

Яковлев Константин Сергеевич, к.ф.-м.н.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-37-20893.)

Рассматриваемый сценарий

- Агенты = БПЛА, передвигающиеся в городе
  - с постоянной скоростью,
  - на заданной высоте,
  - *без возможности останавливаться во время полета*
- Каждый агент
  - Изначально находится на земле
  - Взлетает (*возможно с некоторой задержкой*)
  - Осуществляет полет к заданной цели
  - Приземляется (*тем самым исчезает с радара)*
- Стоимость решения
  - Сумма стоимостей индивидуальных решений каждого агента
- **100+ агентов** на графах большой размерности
  - Поиск оптимального решения может быть очень затратным. В работе **[Boyarski et al., 2015b]** алгоритм CBS смог решить только **50%** заданий для **80 агентов** (MT-граф размером 250x250 вершин, максимальное время работы – 5 мин.)
  - **Целью является получение субоптимальных решений с низкими вычислительными затратами**

без остановок во время полета

«невидимы» пока находятся на земле

[Boyarski et al., 2015b] E. Boyarski, A. Felner, R. Stern, G. Sharon, O. Betzalel, D. Tolpin, and E. Shimony. ICBS: The improved conflict-based search algorithm for multi-agent pathfinding. In Eighth Annual Symposium on Combinatorial Search, 2015.

Предлагаемый подход

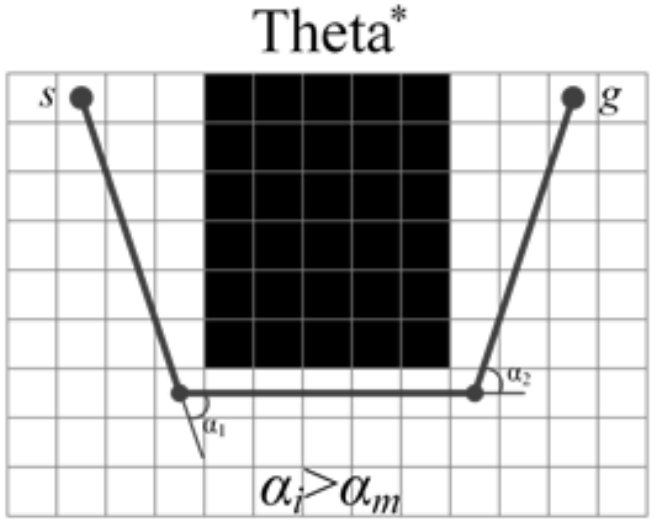
- Децентрализованный подход:
  - Независимое планирование траекторий, то есть траектория каждого агента строится без учета положения других агентов.
    - Theta* **[Nash et al., 2007]**
    - LIAN **[Yakovlev et al., 2015]**
  - **Централизованный процесс разрешения конфликтов**
    - **Формализовано понятие конфликта**
    - **Предложен алгоритм разрешения конфликтов**
      - Может быть представлен как жадная версия алгоритма CBS
      - На данный момент недостаточно хорошо изучен теоретически
      - Эффективен в практических задачах

[Nash et al., 2007] Alex Nash, Kenny Daniel, Sven Koenig, and Ariel Felner. Theta*: Any-angle path planning on grids. In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, volume 22, page 1177, Menlo Park, Calif, 2007. AAAI Press.
[Yakovlev et al., 2015] Konstantin Yakovlev, Egor Baskin, and Ivan Hramoin. Grid-based angle-constrained path planning. In Proceedings of The 38th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI2015), pages 208–221. Springer International Publishing, 2015.

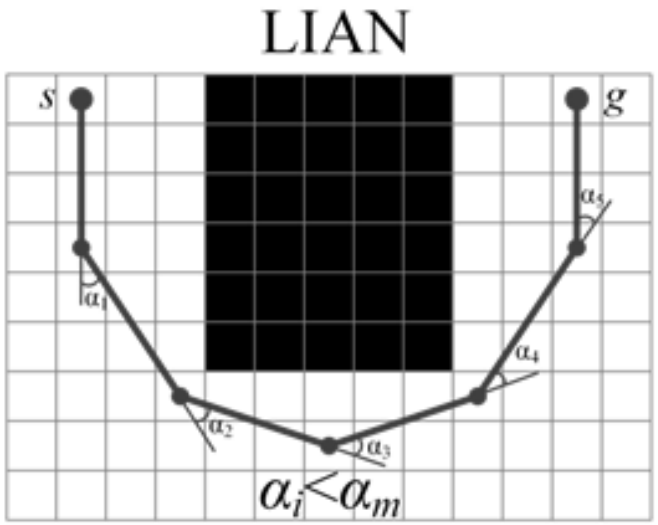
Виды путей

- Агент может двигаться в любом направлении
  - При условии, что концы секции находятся в центрах клеток

Theta* строит пути, которые состоят из последовательностей смежных секций – отрезков, соединяющих центры двух клеток.

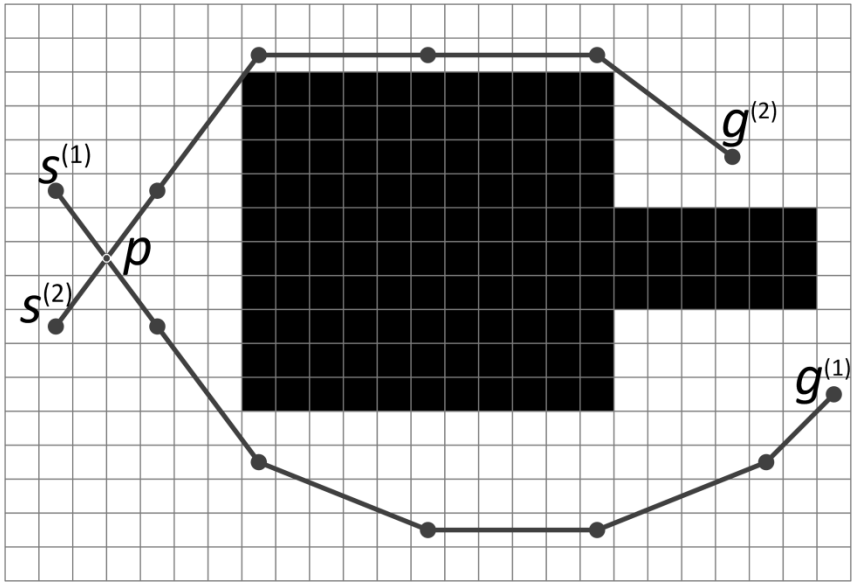


LIAN строит пути, которые состоят из последовательностей смежных секций, угол между которыми меньше некоторого заданного значения.



Δ-пути

- Задано фиксированное значение Δ
- **Δ-секция** – такая секция ***e***, что ***len*(*e*) ≈ Δ**
- **Δ-путь** – путь состоящий из Δ-секций, за исключением последней секции



(1) angle-constrained Δ-путь, Δ=5, α_m=25°

(2) any-angle Δ-путь, Δ=5

(1) LIAN строит Δ-пути по умолчанию

(2) Theta* может быть легко модифицирован для построения Δ-путей

Определения (1/2) :: Решения

Частичное решение (p-solution) = $\langle \pi^{(i)}, t^{(i)} \rangle$

$\pi^{(i)}$ – путь *i*-го агента

$\pi^{(i)} = \{ e_1^{(i)}, \ldots, e_j^{(i)}, \ldots , e_v^{(i)} \}$, $e_j^{(i)}$ – секция

$len(\pi^{(i)}) = len(e_1^{(i)}) + \ldots + len(e_v^{(i)})$ – длина пути

$t^{(i)}$ – задержка *i*-го агента

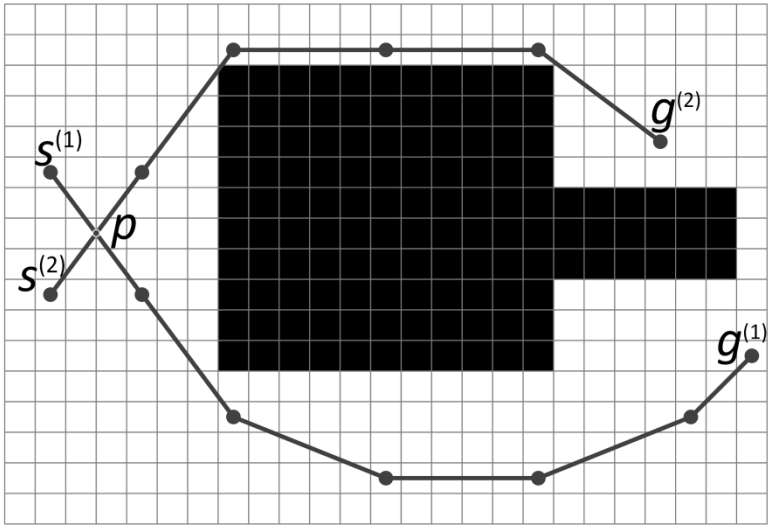
измеряется в тех же единицах, что и длина пути

$cost(PPS^{(i)}) = t^{(i)} + len(\pi^{(i)})$

Потенциальное решение

$\boldsymbol{PS} = \{PPS^{(1)}, \ldots, PPS^{(i)}, \ldots, PPS^{(n)}\}$

$\boldsymbol{cost(PS)} = \sum cost(PPS^{(i)})$



Определения (2/2) :: Конфликты

Пусть задана точка p: $p \in e_j^{(i)}$ ($e_j^{(i)} \in \pi^{(i)}$, $\pi^{(i)} \in PPS^{(i)}$)

g-значение этой точки:

Стартовая вершина секции

$$g(p, e_j^{(i)}, PPS^{(i)}) = t^{(i)} + len(e_1^{(i)}) + \ldots + len(e_{j-1}^{(i)}) + \text{dist}(\text{sp}(e_j^{(i)}), p)$$

Пусть даны секции $e_i \in PPS^{(1)}$ и $e_j \in PPS^{(2)}$

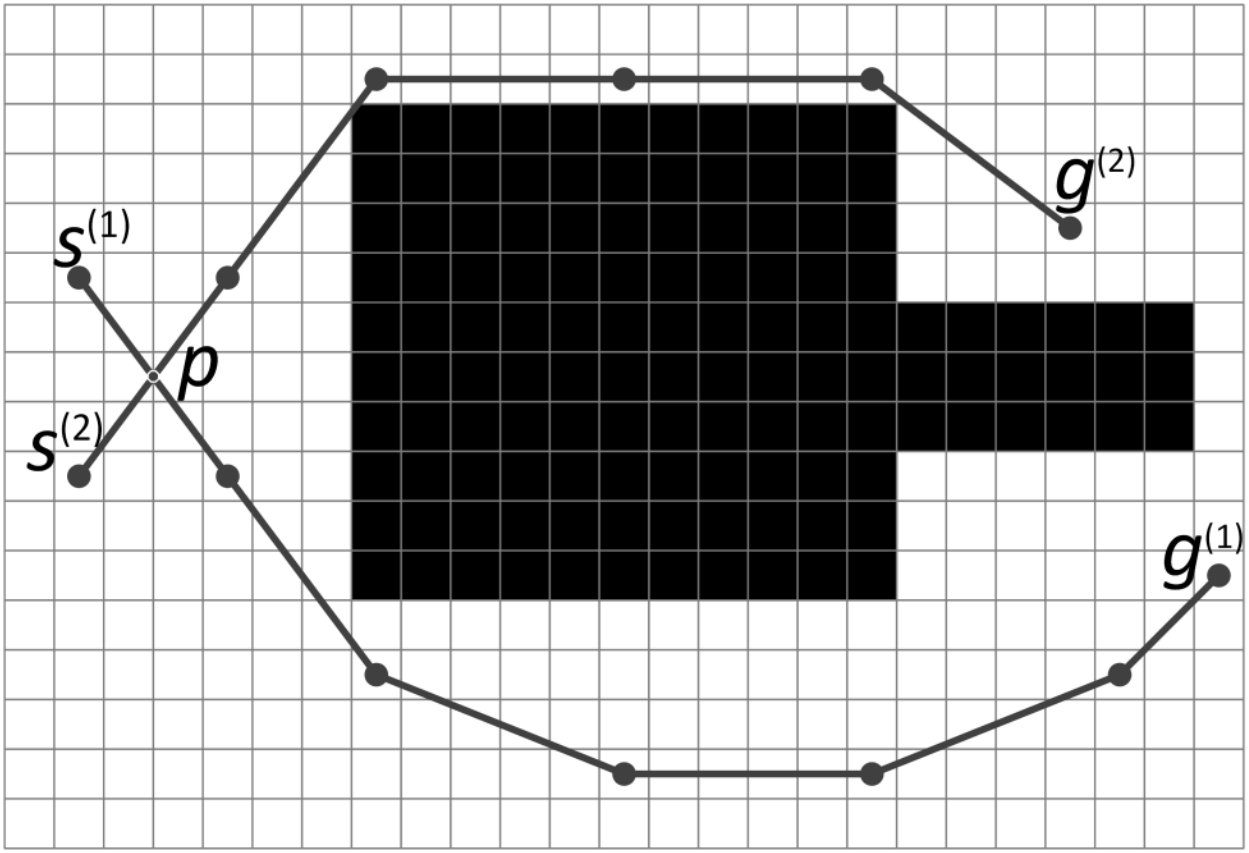
Секции являются конфликтными: $(e_i, e_j) \in$ SCON если

$$\exists p: p \in e_i,\ p \in e_j,\ \boldsymbol{g(p, e_i, PPS^{(1)}) = g(p, e_j, PPS^{(2)})}$$

Частичное решение является конфликтным: ($PPS^{(1)}$, $PPS^{(2)}$) $\in$ CON если

$$\exists e_i \in \pi^{(1)},\ e_j \in \pi^{(2)}: (e_i, e_j) \in \text{SCON}$$

Конфликты :: Пример



Если

$g(p, e_i, PPS^{(1)}) = g(p, e_j, PPS^{(2)})$, тогда $PPS^{(1)}$ и $PPS^{(2)}$ имеют конфликт между собой

Цель

Устранить все конфликты и получить **неконфликтное решение**

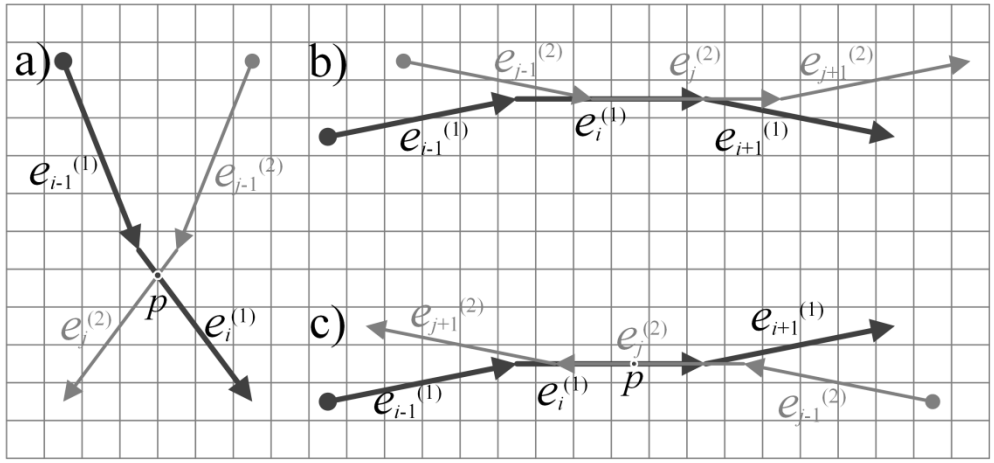
Решение является неконфликтным если $\forall i,j=1..n\ (PPS^{(i)}, PPS^{(j)}) \notin$ CON

Типы конфликтов

a) **Пересечение**

b) **Преследование**

c) **Лобовое столкновение**



Условия

1) **if** $dist(ep(e_i^{(1)}), ep(e_j^{(2)})) > len(e_i^{(1)}) + len(e_j^{(2)}) \Rightarrow$ конфликт не может существовать

   Агенты находятся слишком далеко друг от друга в пространстве

2) **if** $g(sp(e_i^{(1)}), PPS^{(1)}) \leq g(ep(e_j^{(2)}), PPS^{(2)})$ **and** $g(sp(e_j^{(2)}), PPS^{(2)}) \leq g(ep(e_i^{(1)}), PPS^{(1)}) \Rightarrow$ конфликт не может существовать

   Агенты находятся слишком далеко друг от друга во времени

Процедура идентификации конфликтов

- **if** конфликт может существовать
  - **if** секции **не коллинеарны** // возможен конфликт только 1-го типа
    - Проверить на конфликт типа **пересечение**

      рассчитать g-значения точки пересечения и проверить на эквивалентность
  - **else** // секции находятся на одной прямой
    - **if** секции сонаправлены
      - Проверить на конфликт типа **преследование**

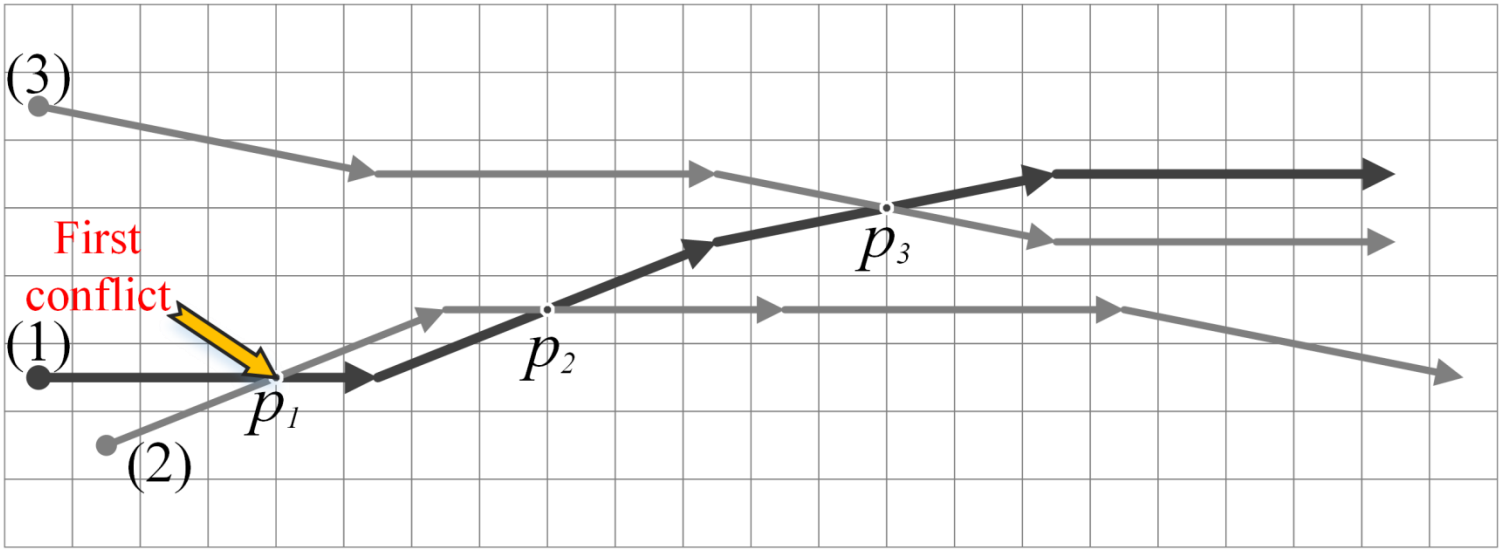
        рассчитать g-значение до любой точки в общем участке и проверить на эквивалентность
    - else // секции разнонаправленны
      - Проверить на конфликт типа **лобовое столкновение**

        if $g(sp(e_i^{(1)}), PPS^{(1)}) + dist(sp(e_i^{(1)}), ep(e_j^{(2)})) \le g(ep(e_j^{(2)}), PPS^{(2)})$ ***and*** $g(sp(e_j^{(2)}), PPS^{(2)}) + dist(sp(e_j^{(2)}), ep(e_i^{(1)})) \le g(ep(e_i^{(1)}, PPS^{(1)})$

        $\Rightarrow$ ***Конфликт существует***

Функция *FindFirstConflict*

- Вход: частичное решение $PPS^{(i)} \in PS$
  набор частичных решений $PS' \subseteq PS$
- Выход: ***первый найденный*** конфликт (пара секций)
  // в случае, когда конфликтов нет - возвращается $\varnothing$



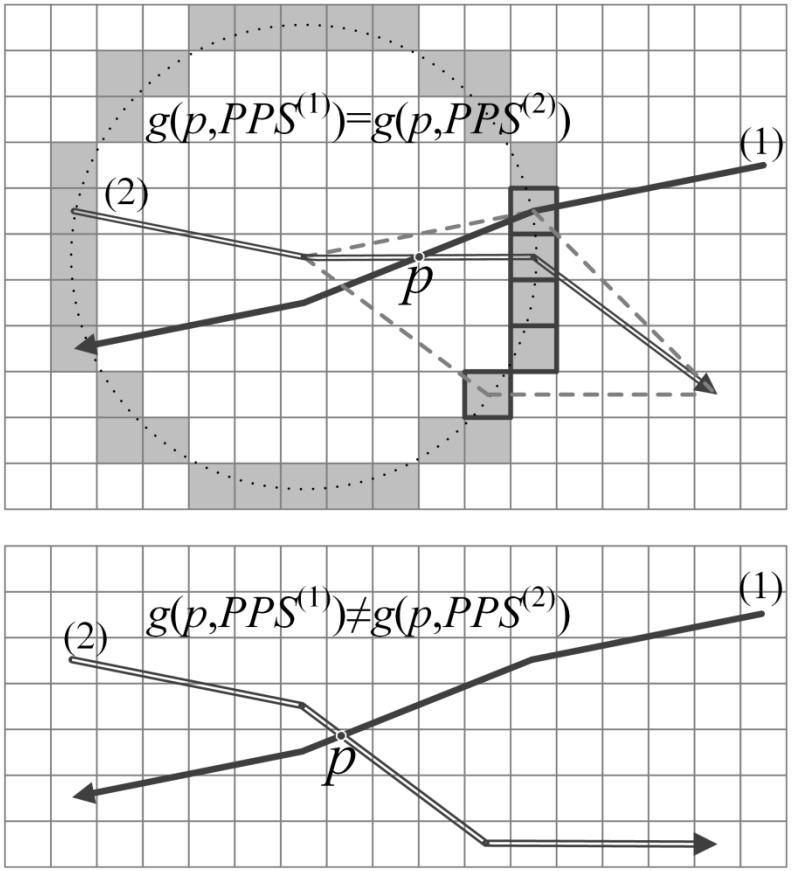
Локальное перепланирование

Идея

Построить похожий по форме путь с минимальными изменениями

Реализация

- Построить окружность
  центр – стартовая вершина секции
  радиус = Δ
- Отсечь вершины, неудовлетворяющие ограничению на угол отклонения
  значение α_m ($0<\alpha_m<90$) является входным параметром
- Выбрать вершину из результирующего множества



Алгоритм разрешения конфликтов

Algorithm 1: Conflicts resolution

Input: PS, Δ, α_m, *wait*; **Output:** $PS' \in$ NoCON

1: $\{HEAD, TAIL\} \leftarrow FormHeadAndTail(PS)$
2: **while** $TAIL \neq \varnothing$ **do**
3: $PPS^{(cur)} = \text{argmin}_{PPS \in TAIL} NumberOfConflicts(PPS, TAIL \cup HEAD)$
4: $TAIL.\text{remove}(PPS^{(cur)})$
5: **while** $(\{e_v^{(cur)}, e_w^{(k)}\} \leftarrow FindFirstConflict(PPS^{(cur)}, HEAD)) \neq \varnothing$ **do**
6: $\pi^{(new)} \leftarrow ComputeLocalDetour(PPS^{(cur)}, e_v^{(cur)}, PPS^{(k)}, \Delta, \alpha_m)$
7: **if** $\pi^{(new)} = \pi^{(cur)}$ **then**
8: $t^{(cur)} += wait$
9: **else**
10: $\{e_t^{(new)}, e_s^{(m)}\} \leftarrow FindFirstConflict(PPS^{(new)}, HEAD)$
11: **if** $\{e_t^{(new)}, e_s^{(m)}\} = \varnothing$ **or** $t > v$ **then**
12: $\pi^{(cur)} = \pi^{(new)}$
13: **else**
14: $t^{(cur)} += wait$
15: $HEAD.\text{add}(PPS^{(cur)})$
16: **return** *HEAD*

Предотвращение зацикливания

Идея

HEAD – «хорошие» агенты (набор частичных решений не имеющих конфликтов между собой)

TAIL – «плохие» агенты(частичные решения, которые имеют конфликты с агентами из *HEAD*)

Шаг алгоритма

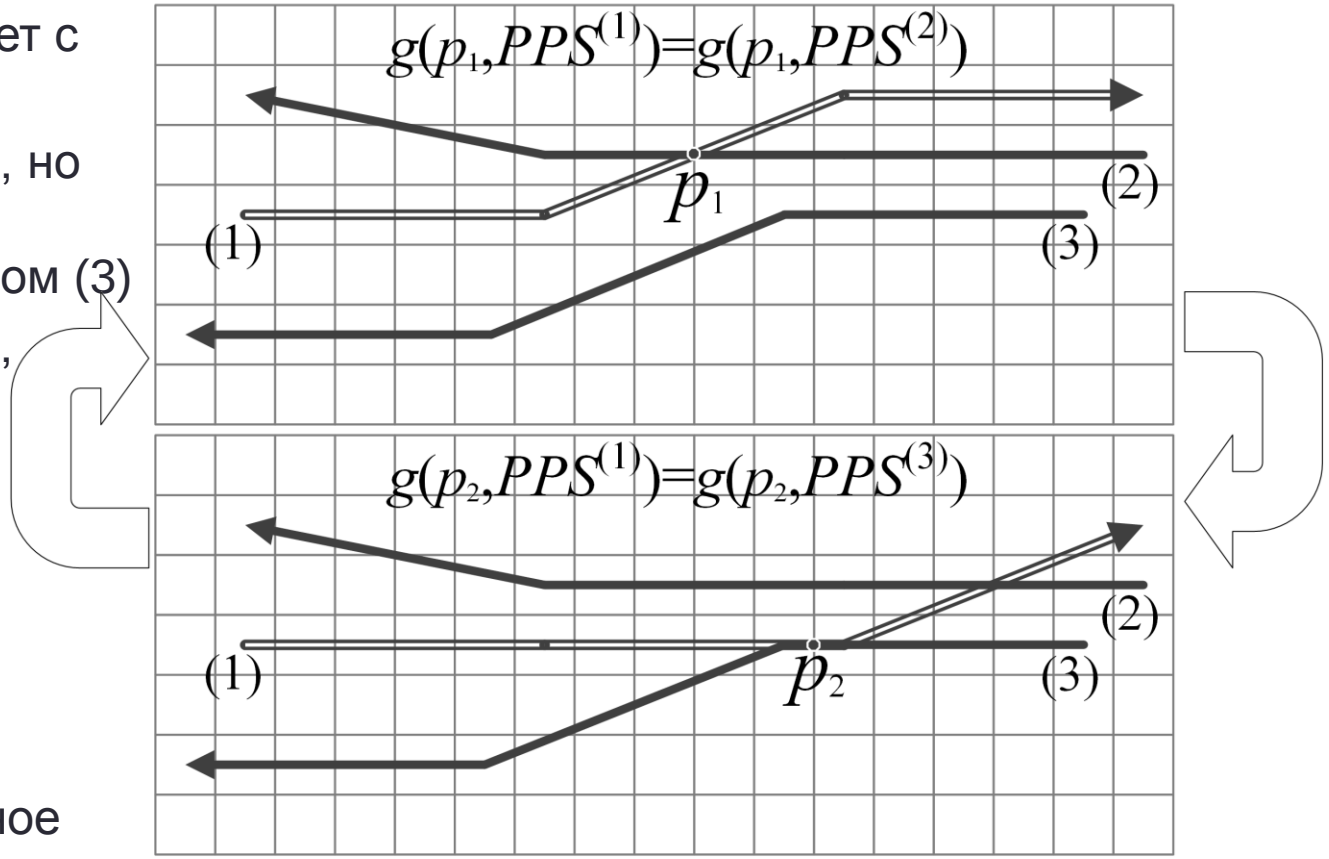
- Выбрать одного агента из *TAIL*
- Устранить все конфликты с *HEAD*
- Добавить в *HEAD*

Предотвращение зацикливания (Строки 10-14) :: Пример

- Агент (1) конфликтует с агентом (2)
- Конфликт разрешен, но теперь агент (1) конфликтует с агентом (3)
- Конфликт разрешен,

  но …

  Возникает цикл



Решение

1. Отменить перепланирование
2. Изменить частичное решение добавив задержку

Экспериментальные исследования:: Входные данные

OpenStreetMaps → 1347 x 1347 m фрагменты городских карт

(20-25% площади карт - здания)

100 фрагментов

1 фрагмент ~ **501 x 501**

(1 клетка ~ 2,7 m^2)

1 задание = стартовые и целевые положения для **100** агентов

2 типа расположения стартов и целей:

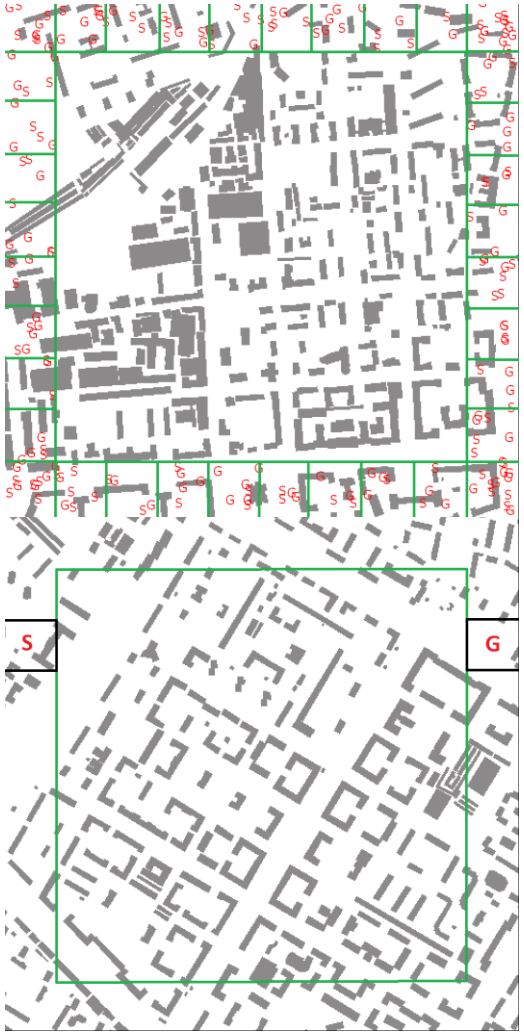
Тип-1 (разрозненный)

Тип-2 (сгруппированный)

2 задания первого типа на карту

2 задания второго типа на карту

400 заданий всего



Тип-1

Тип-2

Экспериментальные исследования:: Оборудование и алгоритмы

Конфигурация ПК

ОС: Windows7
CPU: iCore2Quad Q8300 @2.5ГГц
RAM: 2Гб

Параметры алгоритма

- $\Delta = 5$
- $\alpha_m = 25°$
- ***wait*** = 5

Алгоритмы планирования

- Theta * (модифицирован для построения Δ-путей)
- LIAN (для ускорения поиска использована взвешенная эвристика)

Все алгоритмы были написаны на C++ с использованием одних и тех же структур данных

Экспериментальные исследования:: Результаты (1/3)

Количество конфликтов после этапа независимого планирования

	Theta*		LIAN	
	Тип-1	**Тип-2**	**Тип-1**	**Тип-2**
Агенты	42.3	94.83	38.63	98.25
Секции	76.15	2 423.56	64.92	2 457.41

- Результаты сильно разнятся в зависимости от положения агентов

- Каждый агент конфликтует с несколькими другими агентами (в среднем от 2 до 5, как показал дополнительный анализ)
- Небольшое количество агентов создают большое число конфликтов друг с другом.

Экспериментальные исследования:: Результаты (2/3)

Статистика разрешенных конфликтов

	Theta*		LIAN	
	Тип-1	**Тип-2**	**Тип-1**	**Тип-2**
	Агенты			
Задержаны	12.07	64.685	15.3	72.335
Перепланированы	14.73	58.565	7.77	64.09
Не изменены	79.54	34.33	80.56	26.44
	Количество разрешенных конфликтов			
Задержкой	21.025	746.085	26.575	1 176.19
Перепланированием	30.935	1 442.185	12.7	638.3

Количество конфликтов, разрешенных с помощью перепланирования, у алгоритма LIAN значительно ниже из-за ограничений на максимальный угол отклонения между секциями.

Экспериментальные исследования:: Результаты (3/3)

Время работы алгоритма и стоимость найденного решения

Этап-1 – планирование; Этап-2 – разрешение конфликтов

		Theta*		LIAN	
		Тип-1	**Тип-2**	**Тип-1**	**Тип-2**
Этап-1	Время(с)	7.3783	6.9426	9.5827	5.387
	Стоимость	46 926	46 722	49 636	49 651
Этап-2	Время(с)	0.1466	0.804	0.1441	0.5926
	Стоимость	47 034 (+0.23%) *	50 477 (+8.04%)	49 772 (+0.27%)	55 566 (+11,91%)

- Этап разрешения конфликтов занимает меньше секунды
- Стоимость решения увеличивается незначительно

(*) В сравнении с начальной стоимостью, а не стоимостью оптимального решения

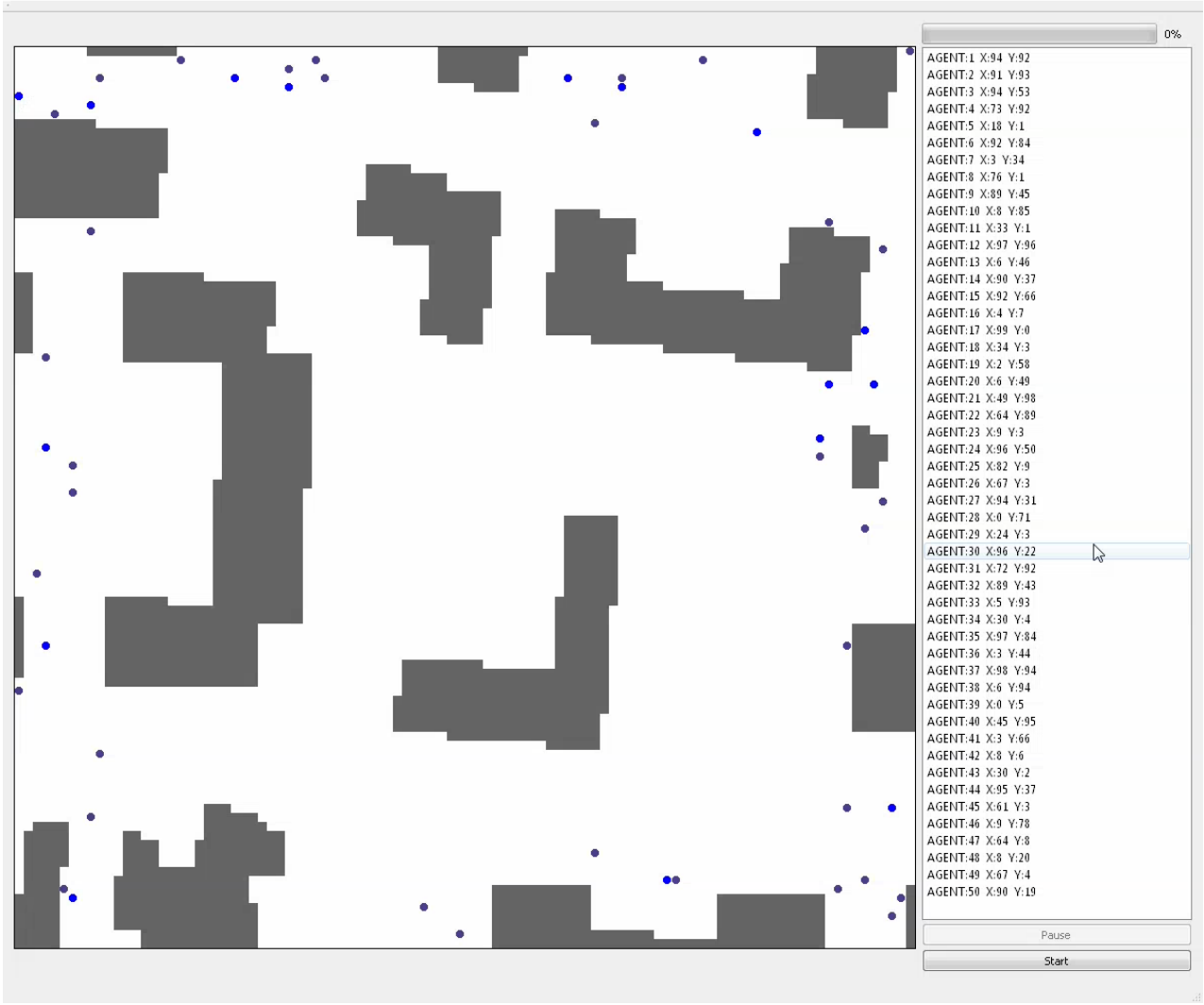
Заключение

- Изучена задача планирования совокупности неконфликтных траекторий на MT-графе для агентов, которые могут перемещаться в любом направлении
- Предложен алгоритм разрешения конфликтов
  - Может быть представлен как жадная версия алгоритма CBS
  - Субоптимальный
  - Вычислительно эффективен на практике (по крайней мере для предложенного в работе сценария)

Дальнейшая работа

- Экспериментальные исследования и сравнения с алгоритмом CBS
- Теоретическое изучение (доказательство полноты)
- Модификации алгоритма

Вопросы?


0%
AGENT:1 X:94 Y:92
AGENT:2 X:91 Y:93
AGENT:3 X:94 Y:53
AGENT:4 X:73 Y:92
AGENT:5 X:18 Y:1
AGENT:6 X:92 Y:84
AGENT:7 X:3 Y:34
AGENT:8 X:76 Y:1
AGENT:9 X:89 Y:45
AGENT:10 X:8 Y:85
AGENT:11 X:33 Y:1
AGENT:12 X:97 Y:96
AGENT:13 X:6 Y:46
AGENT:14 X:90 Y:37
AGENT:15 X:92 Y:66
AGENT:16 X:4 Y:7
AGENT:17 X:99 Y:0
AGENT:18 X:34 Y:3
AGENT:19 X:2 Y:58
AGENT:20 X:6 Y:49
AGENT:21 X:49 Y:98
AGENT:22 X:64 Y:89
AGENT:23 X:9 Y:3
AGENT:24 X:96 Y:50
AGENT:25 X:82 Y:9
AGENT:26 X:67 Y:3
AGENT:27 X:94 Y:31
AGENT:28 X:0 Y:71
AGENT:29 X:24 Y:3
AGENT:30 X:96 Y:22
AGENT:31 X:72 Y:92
AGENT:32 X:89 Y:43
AGENT:33 X:5 Y:93
AGENT:34 X:30 Y:4
AGENT:35 X:97 Y:84
AGENT:36 X:3 Y:44
AGENT:37 X:98 Y:94
AGENT:38 X:6 Y:94
AGENT:39 X:0 Y:5
AGENT:40 X:45 Y:95
AGENT:41 X:3 Y:66
AGENT:42 X:8 Y:6
AGENT:43 X:30 Y:2
AGENT:44 X:95 Y:37
AGENT:45 X:61 Y:3
AGENT:46 X:9 Y:78
AGENT:47 X:64 Y:8
AGENT:48 X:8 Y:20
AGENT:49 X:67 Y:4
AGENT:50 X:90 Y:19
Pause
Start