

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Телематика (при ЦНИИ РТК)»

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Семинар по роботизированным системам»
на тему «Муравьиный алгоритм и алгоритм коллективного распределения
целей»

по направлению 02.04.01.02 «Организация и управление
суперкомпьютерными системами»

Выполнил: Титов А.И.
Проверил: Моторин Д.Е.

Санкт-Петербург
2019

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ | 3 |
| 1 Описание алгоритмов | 4 |
| 1.1 Алгоритм Diamond-Square | 4 |
| 1.2 Муравьиный алгоритм | 5 |
| 1.3 Алгоритм коллективного распределения целей | 7 |
| 2 Программная реализация | 9 |
| 3 Результаты | 11 |
| 3.1 Diamond-Square | 11 |
| 3.2 Муравьиный алгоритм | 14 |
| 3.3 Коллективное распределение целей | 16 |
| 3.4 Замеры времени работы | 17 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 19 |
| ЛИТЕРАТУРА | 20 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходный код | 21 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблицы замеров времени | 35 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики решений | 40 |

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью курсовой работы является реализация и исследование алгоритмов для построения оптимальных путей роботов до целей. Далее под роботом, для простоты, будет иметься в виду непосредственно начальная координата пути, а под целью, соответственно, конечная координата.

Таким образом, требуется создать карту местности, на которой помещается набор роботов и набор целей, после чего каждому роботу оптимально назначить цель и построить путь до нее.

Для этого требуется реализовать следующие алгоритмы:

- Алгоритм для процедурного построения реалистичной карты местности [1];
- Алгоритм коллективного распределения целей [2];
- Алгоритм поиска пути [3].

Для генерации реалистичной карты среды выбран алгоритм Diamond-Square [4]. Алгоритм коллективного распределения целей описан в [2] в главе «Алгоритм коллективного улучшения плана 3.7» на стр. 102. Для вычисления пути от робота до цели рассматривается муравьиный алгоритм [5].

Выполняются следующие задачи для достижения цели:

1. Реализация алгоритма Diamond-Square;
2. Реализация муравьиного алгоритма;
3. Реализация алгоритма коллективного распределения целей;
4. Исследования реализованного функционала.

Реализация осуществляется на языке Python. Исследование реализованного функционала заключается в следующем:

1. Генерация 10 различных карт для каждого размера из: 25x25, 50x50, 100x100, 250x250, 500x500, 1000x1000;
2. На каждой из сгенерированных карт создаются наборы роботов и, соответственно, цели к ним в численности: 5, 10, 20, 50 (наборов каждого размера для каждой карты тоже должно быть по 10, но из соображений производительности этот пункт опущен);
3. Для заданных наборов распределяются цели по роботам;
4. Для каждого построенного набора строятся графики, отображающие зависимость времени выполнения программы от размеров карт и численности роботов. (В начальном задании указано построить график, содержащий все измеренные времена, но для наглядности графики строятся только для средних элементов замеров, а полную картину отражают таблицы в ПРИЛОЖЕНИЕ Б);
5. Теоретическое исследование реализуемого функционала.

1 Описание алгоритмов

В данной главе представлен разбор теоретических принципов работы реализуемых алгоритмов.

1.1 Алгоритм Diamond-Square

В данной работе для процедурной генерации реалистичной карты местности используется алгоритм Diamond-Square[4]. Прочие применяемые алгоритмы описаны в [1].

Алгоритм имеет ограничения на размеры получаемой карты высот - $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$.

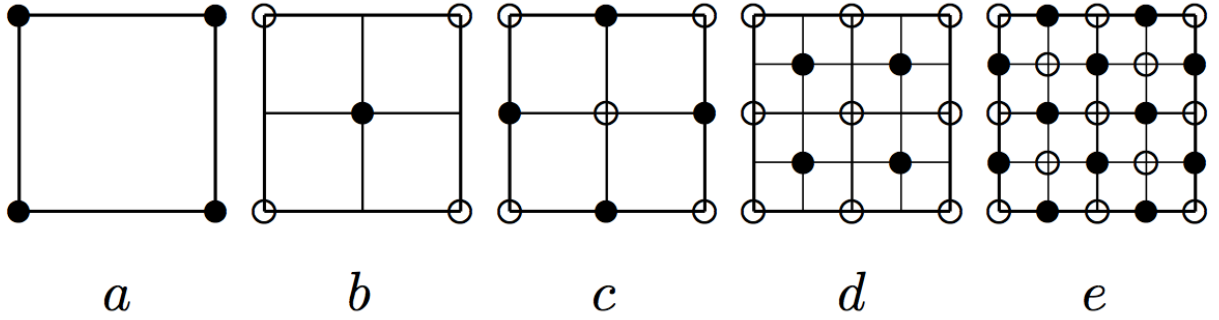


Рис. 1: Этапы работы алгоритма Diamond-Square

Алгоритм включает в себя следующие этапы (отображены на Рис. 1):

- а) **Инициализация** Пусть n и m - заданные ширина и высота требуемой карты высот. Чтобы использовать алгоритм для заданного размера требуется создать карту с шириной и высотой равными:

$$n' = 2^{\log_2(\max(n,m)-1)} + 1$$

Для каждого углового элемента полученной карты генерируем случайное значение. Диапазон случайных значений в общем случае может быть любым, но в данной работе возьмем его равным $[0, \frac{n+m}{2}]$. В целом данный диапазон не влияет на производительность алгоритма или на возможность его реализации, он может быть и отрицательным, как, например в случае, когда 0 - это уровень моря.

- б) **Этап Diamond** На этом этапе находится центральная точка рассматриваемого квадрата, как среднее значение от его углов:

$$m[s/2][s/2] = \frac{m[0][0] + m[0][s] + m[s][0] + m[s][s]}{4} + rand(-R * s, R * s)$$

где m - это рассматриваемый квадрат, s - количество узлов на ребре квадрата, R - задаваемый коэффициент.

- с) **Этап Square** Здесь рассматривается ромб с вершинами, вычисленными на этапе Diamond. Подход схожий с этапом Diamond, только теперь высчитываются центральные элементы ребер квадрата по двум углам квадрата и двум центральным точкам,

одна из которых - центр рассматриваемого квадрата, а вторая центр соседствующего квадрата. Существует проблема на краях генерируемой карты, ведь в таком случае нет центра соседствующего квадрата. В данной работе было принято следующее решение: при отсутствии соседствующего квадрата брать среднее от 3-ех точек - двух вершин и центра рассматриваемого квадрата.

d-e) **Итерации по рассматриваемым квадратам** Итерации проходят по строкам и столбцам с шагом s :

В каждой итерации по столбцам происходят этапы Square и Diamond, если итерация упирается в край карты, то происходит переход на следующую строку. При достижении правого нижнего угла матрицы значение s обновляется $s = s/2$ и итерации по строкам и столбцам происходят заново.

Критерий останова: $s = 2$.

После выполнения приведенных выше этапов построенная карта обрезается до размера $n \times m$. Для удобства дальнейшей работы муравьиного алгоритма из построенной карты генерируется нормированная карта.

1.2 Муравьиный алгоритм

Для построения путей роботов до целей был выбран муравьиный алгоритм [5]. Алгоритм имеет хорошую практическую применимость в такого рода задачах [5][6][7]. Существуют и прочие алгоритмы, которые весьма подробно описаны в [3].

Основная идея алгоритма заключается в следующем:

Запустить на карту некоторую популяцию муравьев, которые должны дойти от начальной точки до конечной, при том каждую вершину пути муравей выбирает основываясь на концентрации феромона на вершине. После того, как все муравьи построили путь - они обновляют концентрацию феромона для каждой вершины, которая была задействована в построении пути. Далее запускается следующая популяция муравьев, которая основывается на уже обновленных значениях концентрации феромона.

Данный алгоритм имеет низкую производительность при использовании его в чистом виде, однако при применении эвристик можно добиться значительного улучшения производительности.

Основные этапы реализуемого муравьиного алгоритма:

1. Изначально генерируется матрица размера равного размеру карты, содержащая начальные значения концентрации феромонов τ_{ij} . В общем случае значения матрицы случайны и очень близки к нулю, однако в данной работе применена следующая эвристика:

$$\tau_{ij} = 1 - \left(\frac{\rho((i, j), target)}{\max_{i,j}(\rho((i, j), target))} + rand(-R, R) \right)$$

где ρ - это двумерное Евклидово расстояние, $target$ - цель, $0 < R < 1$ - это задаваемое значение шума (вносится для того, чтобы приблизить эвристику к общему подходу). Если полученное значение < 0 , то $\tau_{ij} = 0$.

2. Популяция муравьев помещается в начальную координату робота.

3. Следующая вершина карты выбирается случайно. Вероятность выбора вершины j в общем случае задается следующей формулой:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)}{\sum_{j \in N_i^k} \tau_{ij}^\alpha(t)}$$

Здесь i – вершина в настоящий момент, N_j^k – список доступных вершин, α – параметр определяющий влияние концентрации феромона на результат, t – текущая итерация алгоритма.

Для достижения лучшей производительности используются две эвристики:

- Эвристика по расстоянию

Значение эвристики $\eta_{d \ ij}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_{d \ ij} = \exp((target - \max(|j[0] - target[0]|, |j[1] - target[1]|) - \min_{j \in N_i}(target - \max(|j[0] - target[0]|, |j[1] - target[1]|))))$$

где $target[0]$ – это координата цели по оси X, а $target[1]$ – это координата цели по оси Y. так же и с точкой j . В общем случае можно было использовать любое число в основании степенной функции, потому что это требуется исключительно для того чтобы избежать нулевой вероятности.

- Эвристика по высоте

Значение эвристики $\eta_{h \ ij}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_{h \ ij} = 1 - |m[j[0]][j[1]] - m[i[0]][i[1]]|$$

где m – это сгенерированная карта местности.

Таким образом вероятность выбора вершины j с учетом эвристик задается формулой:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{d \ ij}^\beta \eta_{h \ ij}}{\sum_{j \in N_i^k} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{d \ ij}^\beta \eta_{h \ ij}}$$

4. После прохода всего пути всеми муравьями из каждого пути удаляются петли, а концентрация феромона изменяется согласно следующей формуле:

$$\tau_{ij}^\alpha(t+1) = (1-p)\tau_{ij}^\alpha(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \frac{q}{L_k(t)}$$

Где p определяет скорость испарения феромонов, n_k – это количество муравьев, $L_k(t)$ – длина пройденного муравьем пути, q – задаваемый параметр.

5. Итерации продолжаются до достижения критерия остановки, который в данном случае задается указанием количества итераций.

Данный алгоритм имеет временную сложность $O(t_n p_n n^4)$, где t_n – количество итераций алгоритма, p_n – размер популяции, n – количество узлов на ребре карты высот.

1.3 Алгоритм коллективного распределения целей

Алгоритм коллективного распределения целей достаточно подробно описан в [2]. Идея заключается в том, чтобы назначить цель роботу только в том случае, если оценка эффективности для достижения роботом цели выше чем до других целей и выше, чем для других роботов и этой цели.

Пусть имеется N роботов и соответственно такое же число целей. Задачу можно записать следующим образом:

$$Y_c = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N d_{j,l} n_{j,l} \rightarrow \max$$

где $n_{j,l}$ определяется при ограничении:

$$\sum_{l=1}^N n_{j,l} \leq 1, j = 1, \dots, N$$

В качестве оценки эффективности будем использовать Евклидово расстояние от начальной координаты робота до цели.

Алгоритм заключается в следующем:

1. Роботы делают попытку выбора целей в порядке возрастания номеров.
2. Каждый робот может выбирать не более, чем одну цель, после чего не участвует в выборе целей в данной реализации итерационной процедуры.
3. Цель, для которой выполняется условие:

$$\sum_{j=1}^N n_{j,l} < n_l^{\max}, l \in [1, M], n_l^{\max} = 1, 2, 3, \dots$$

т. е. необеспеченная цель, выбирается роботом, еще не выбравшим какую-либо цель, для которого оценка эффективности $d_{j,l}$ этой цели имеет наибольшее значение по сравнению с другими роботами, не выбравшими свои цели.

4. Если на момент выбора цели j -м роботом группы имеется несколько необеспеченных целей, имеющих для данного робота одинаковые значения оценки эффективности, то робот выбирает только одну цель, в соответствии с заранее определенным правилом, одинаковым для всех роботов данной группы. Например, он может выбирать цель с наименьшим номером. Другими словами, если:

$$d_{j,l_1} = d_{j,l_2} = \dots = d_{j,l_i} \\ l_1 < l_2 < \dots < l_i$$

И выполняется условие из предыдущего пункта, то j -м роботом выбирается цель с номером l_1 , т. е. $i_j = l_1$.

5. Если несколько роботов имеют одинаковые значения оценки эффективности для l -й цели ($l \in [1, M]$) при условии, что она не обеспечена, то выбор этой цели осуществляется роботом с наименьшим номером.

6. Если максимальное значение оценки эффективности $d_{k^*l^*} = \max_k d_{kl^*}$ некоторой цели T_{l^*} принадлежит роботу R_j , делающему выбор, т. е. $k^* = j$, то робот R_j выбирает данную цель, полагая $i_j = l^*$. В противном случае (когда $k^* \neq j$) робот R_j отказывается от выбора в данном итерационном цикле.

2 Программная реализация

Программ написана на языке Python3.7. Для реализации были использованы следующие библиотеки:

- *math*;
Библиотека соержжит математические функции. В реализованной программе используется для таких функций, как `exp()` и `ceil()`.
- *numpy*;
Библиотека для работы с многомерными массивами. В программе используется как удобный контейнер для хранения матриц и массивов, а также для различного рода взаимодействия с ними.
- *bisect*;
Библиотека обеспечивает поддержку списка в отсортированном порядке с помощью алгоритма деления пополам. В программе используется в реализации метода рулетки для случайного выбора с заданными весами.
- *time*;
Библиотека для работы со временем. Используется в реализации замеров времени работы алгоритмов.
- *matplotlib*;
Графическая библиотека. Используется для построения графиков.
- *progressbar*.
Библиотека для вывода в консоль состояния выполнения программы в процентном соотношении. Используется для мониторинга состояния программы во время выполнения, так как программа запускалась для длительных расчетов данный инструмент показался необходимым.

В качестве среды разработки использовалась Visual Studio Code. Длительные тесты проводились на виртуальной машине предоставляемой компанией Amazon в качестве одной из услуг AWS (Amazon Web Sevices) - Amazon Elastic Compute Cloud (EC2). Была использована виртуальная машина Amazon Linux AMI (1 vCPUs, 2.5 GHz, Intel Xeon Family).

Все функции и модули программы содержат комментарии.

Главный модуль программы - **main.py**. В нем содержатся исключительно функции для тестирования программ и параметры для запуска алгоритмов. Также при реализации программы были подобраны оптимальные параметры для инициализации алгоритмов.

Для инициализации объекта графа, используются следующие значения параметров:

Коэффициент гладкости карты: 0.3

Коэффициент зашумленности 0.1

начального феромона:

Для муравьиного алгоритма используются следующие значения параметров:

| | |
|--|-----|
| Размер популяции: | 80 |
| Количество итераций: | 10 |
| Коэффициент влияния концентрации феромона: | 1.0 |
| Коэффициент влияния эвристики по расстоянию: | 1.0 |
| Коэффициент испарения феромона: | 0.9 |
| Параметр влияния длины пути на значение феромона: | 100 |

Модуль **graph.py** содержит класс *Graph*, описывающий карту высот, а также все взаимодействующие с ней элементы, такие как матрицы эвристик, матрица концентраций феромонов, нормированная карта высот и пр. . Параметры, определяющие размер карты высот, гладкость карты и зашумленность начальной концентрации феромонов подаются в конструктор класса. Карта высот генерируется в методе класса *generate()*. Взаимодействие с феромонами и эвристиками также определено в этом классе.

Модуль **ant.py** содержит два класса: *Ant* и *EAlg*. Параметры, влияющие на поведение муравьиного алгоритма подаются в конструктор класса *EAlg*. Метод этого класса, принимающий в качестве аргументов объект класса *Graph*, начальные координаты пути и конечные координаты пути, выполняет поиск оптимального пути. В этом методе инициализируются объекты класса *Ant*, который непосредственно строит путь на каждой итерации, обновляет феромоны, и т.д. .

Модуль **planning.py** содержит функцию *planning*, которая в качестве аргументов принимает объекты классов *Graph* и *EAlg*, размер наборов роботов (целей), а также объекты инструментального характера для работы библиотеки *progressbar*. В данной функции выполняется алгоритм коллективного распределения целей.

Все модули взаимодействуют с модулем **tools.py**. В этом модуле функции инструментального характера необходимые как для функционирования основных алгоритмов (например, поиск соседних точек в графе), так и функции для построения графиков и вывода результатов.

Полный листинг программы можно посмотреть в ПРИЛОЖЕНИЕ А.

3 Результаты

В данном разделе представлены непосредственно результаты работы реализованной программы, а также их исследование.

3.1 Diamond-Square

Было необходимо сгенерировать карты размером 25×25 , 50×50 , 100×100 , 500×500 , 1000×1000 . Результаты работы алгоритма Diamond-Square представлены на Рис. 2-7.

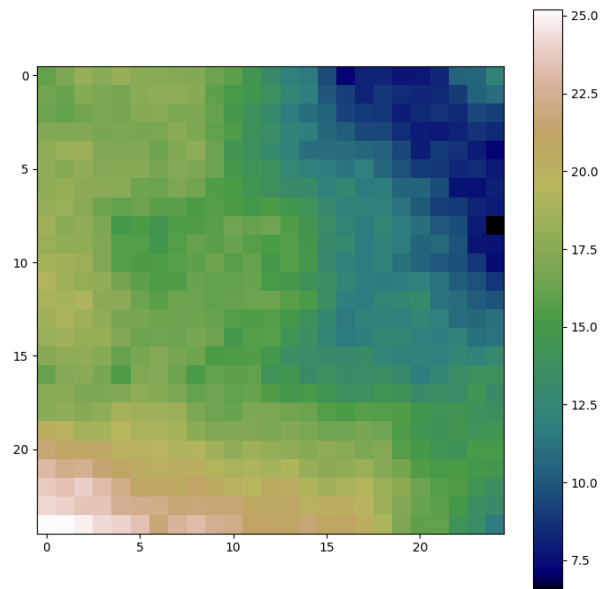


Рис. 2: Карта размера 25x25

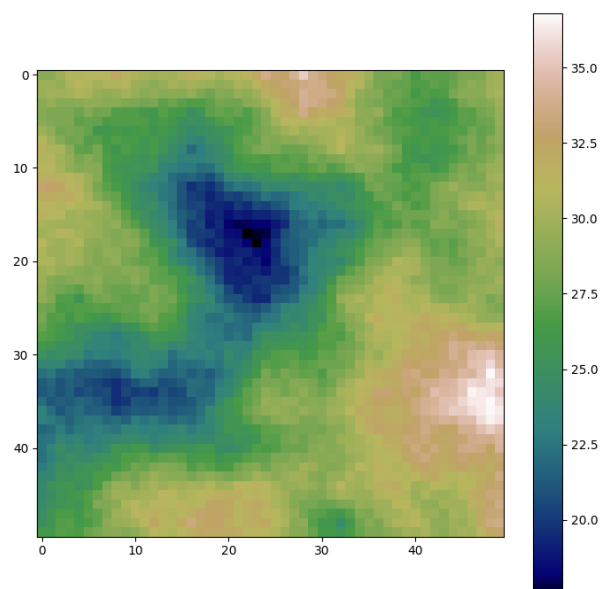


Рис. 3: Карта размера 50x50

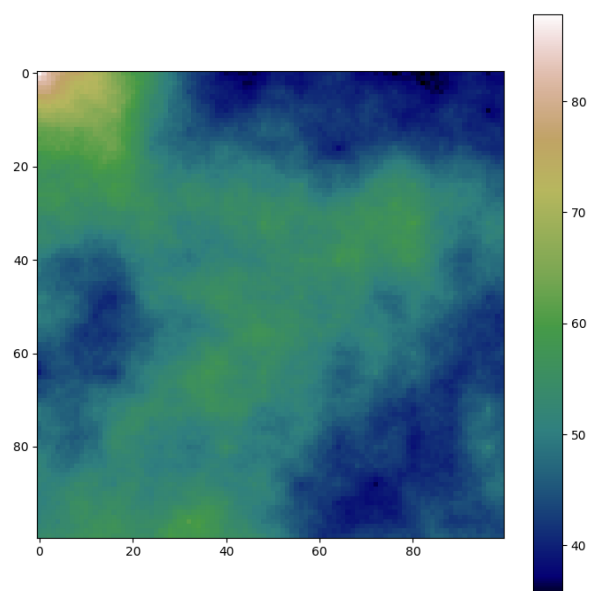


Рис. 4: Карта размера 100x100

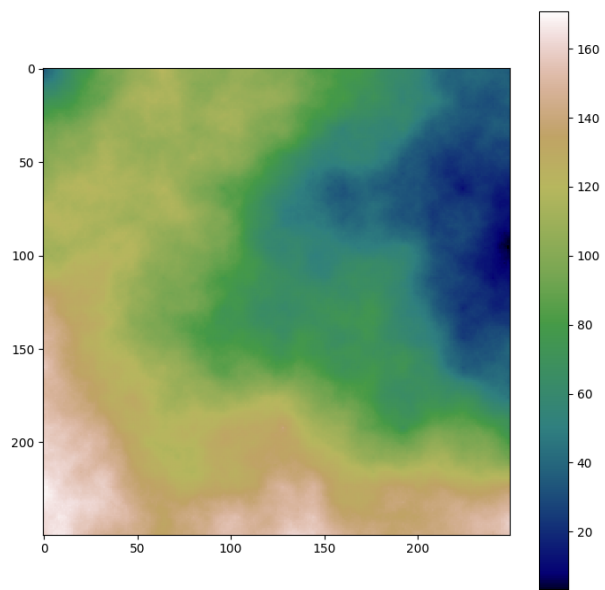


Рис. 5: Карта размера 250x250

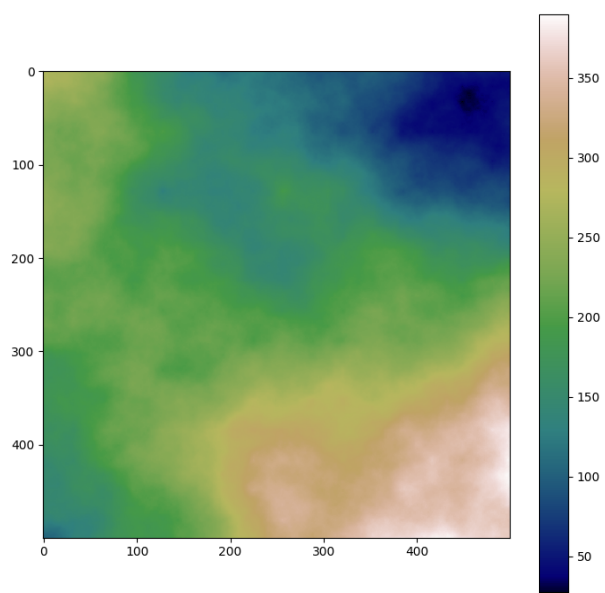


Рис. 6: Карта размера 500x500

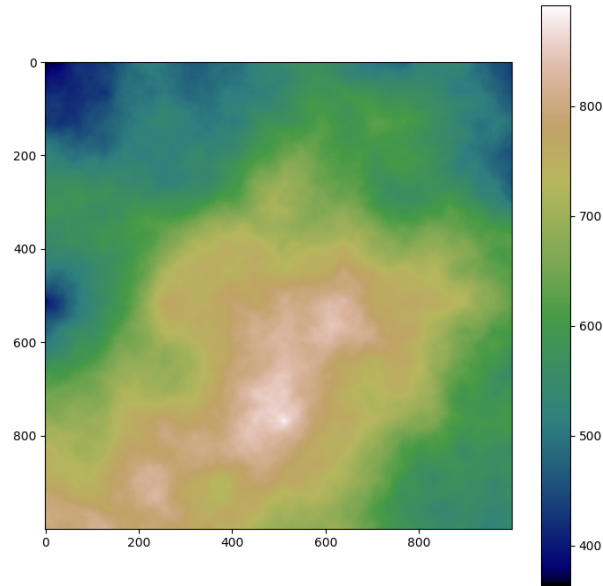
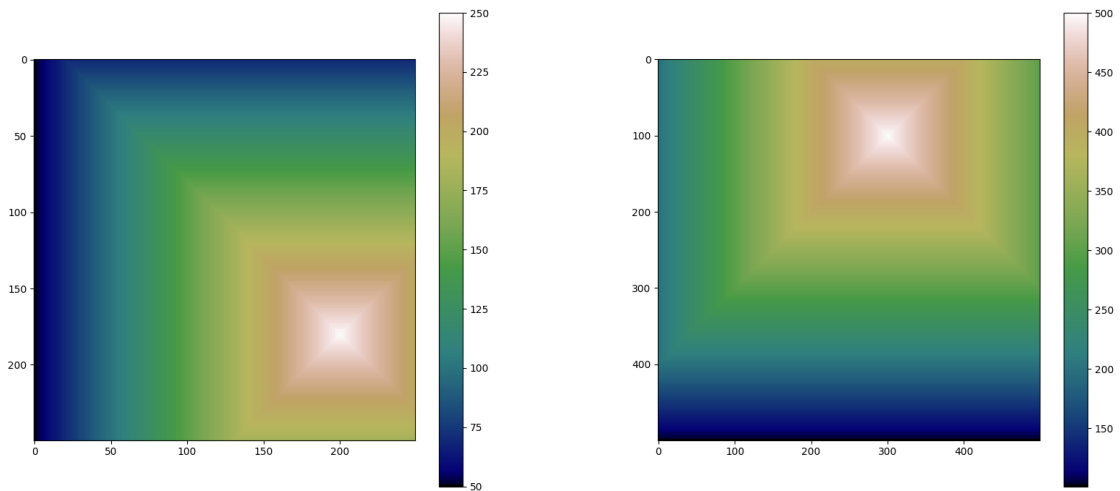


Рис. 7: Карта размера 1000x1000

3.2 Муравьиный алгоритм

Так как реализованный алгоритм отличается от классического представления муравьиного алгоритма использованием эвристик, то имеет смысл продемонстрировать генерируемые в процессе работы программы карты эвристики. Так как эвристика по высоте определяется только в зависимости от координат соседних точек, то ее сложно представить в виде графика. На Рис. 8 представлены карты эвристики по расстоянию для разного размера карты высот и разных целевых точек.

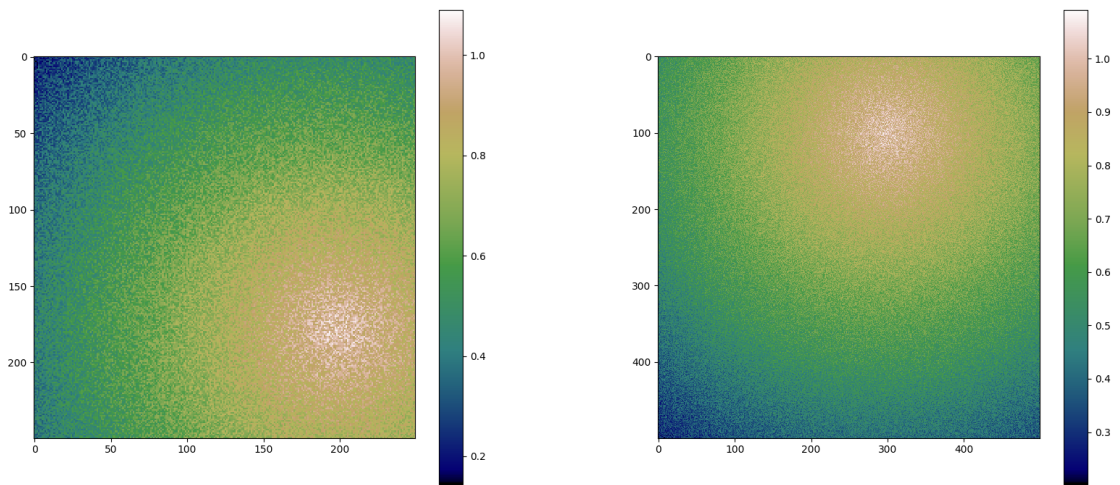


Карта 250x250, Цель (180, 200)

Карта 500x500, Цель (100, 300)

Рис. 8: Эвристики по расстоянию

На Рис. 9 представлены карты начальной концентрации феромонов для разного размера карты высот и разных целевых точек. Карты зашумлены для приближения работы алгоритма в начальной итерации к общему случаю с случайными значениями концентрации феромонов.



Карта 250x250, Цель (50, 80)

Карта 500x500, Цель (345, 345)

Рис. 9: Начальная концентрация феромонов

На Рис. 10-11 представлены результаты поиска пути для этих эвристик и начальных феромонов. Начальная координата - черная, конечная - красная.

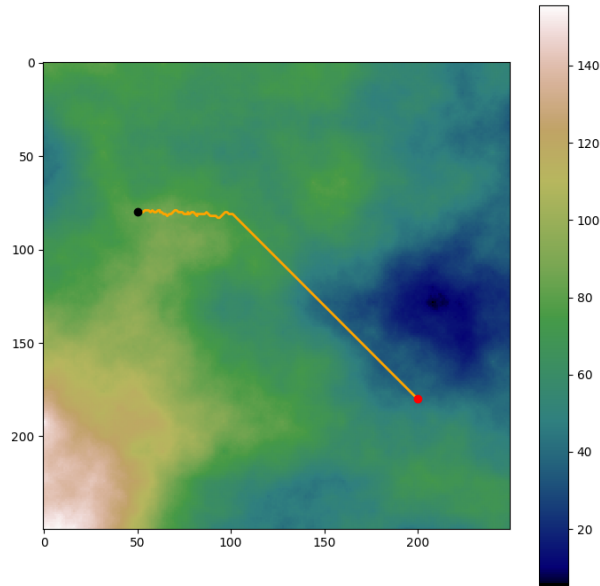


Рис. 10: Построенный путь для робота на карте размера 250x250

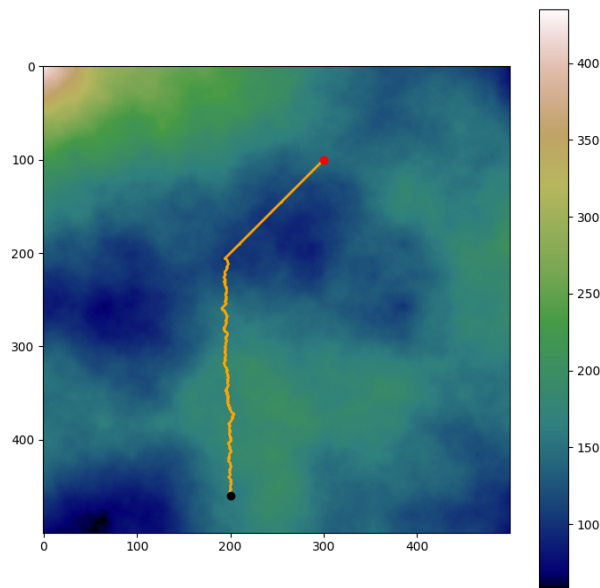


Рис. 11: Построенный путь для робота на карте размера 500x500

3.3 Коллективное распределение целей

Примеры результатов работы алгоритма коллективного распределения целей представлены на Рис. 12-13.

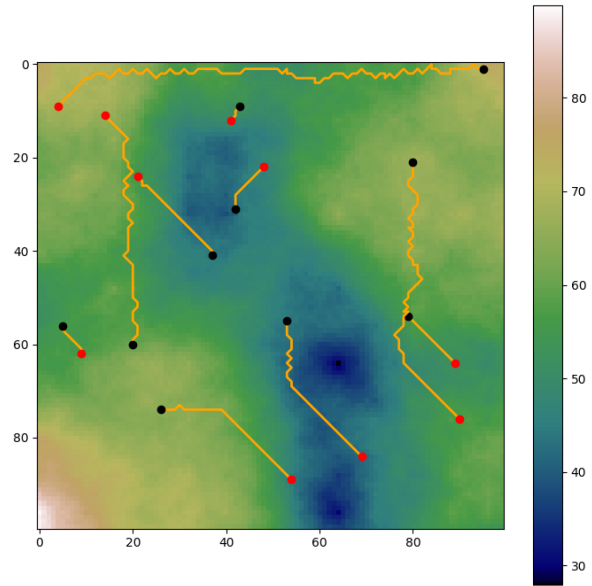


Рис. 12: Построенные пути для 10 роботов на карте размера 100x100

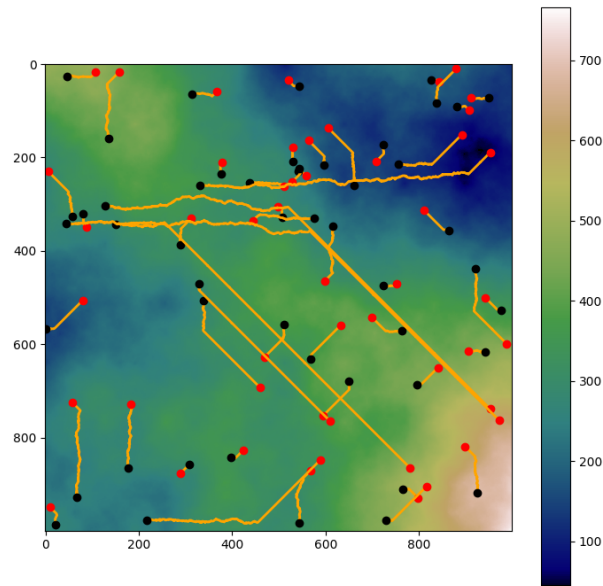


Рис. 13: Построенные пути для 50 роботов на карте размера 1000x1000

3.4 Замеры времени работы

На Рис. 14 представлена плоскость отображающая зависимость времени вычислений от количества роботов и размера карты. На плоскости отображены только средние элементы замеров, полную информацию о замерах времени можно найти в ПРИЛО-

ЖЕНИЕ Б. Для наглядности ось по времени представлена в виде логарифмической шкалы.

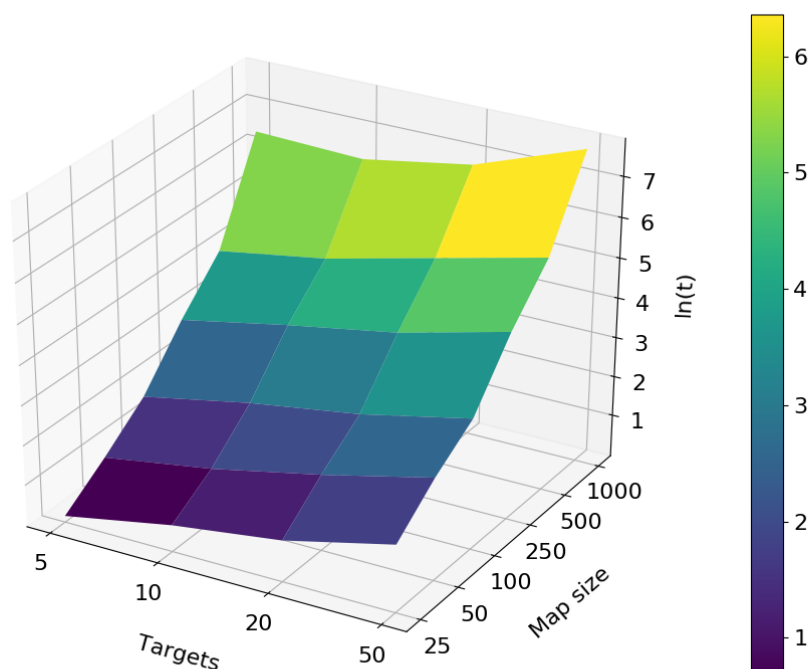


Рис. 14: Зависимость времени вычислений (с.) от размера карты и количества роботов

Практические результаты действительно отображают, что наибольшее влияние на время выполнение оказывает размер карты высот и меньшее влияние, однако все равно ощутимое, оказывает количество роботов. Общее время вычислений составило ≈ 14 часов. Так как время выполнения теста уже с таким количеством вариаций внушительное, то генерация 10-ти разных наборов данных для каждой карты и каждого количества роботов была опущена.

Из таблиц в ПРИЛОЖЕНИЕ Б также можно сделать вывод о том, что влияние оказываемое алгоритмом распределения целей на общую работу программы минимально и время его работы зависит от количества роботов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения курсовой работы были выполнены следующие задачи:

- Генерация карт размеров 25x25, 50x50, 100x100, 250x250, 500x500, 1000x1000 с помощью алгоритма Diamond-Square;
- Были распределены цели по роботам используя алгоритм коллективного распределения целей для численностей 5, 10, 20 и 50;
- Для роботов были построены оптимальные пути используя муравьиный алгоритм.

В работе проведено исследование сложностей алгоритмов. Теоретическая сложность муравьиного алгоритма $O(t_n p_n n^4)$. Однако результат значительно улучшается с помощью эвристик. Эвристики необходимы для решения проблемы низкой сходимости муравьиного алгоритма. Также в ходе работы были подобраны оптимальные параметры для работы муравьиного алгоритма.

При замерах времени работы программы была выявлена линейная зависимость времени выполнения от размера карты высот. Учитывая предыдущий вывод о сложности муравьиного алгоритма можно сделать вывод, что алгоритм коллективного распределения целей значительно сэкономил время работы программы. Сложность этого алгоритма является пропорциональной количеству роботов (целей).

Таким образом, учитывая, что рассмотренный алгоритм распределения целей весьма низкокзатратен (время выполнения менее доли секунды), но при этом значительно улучшает суммарное время работы программы, то его практическая применимость в подобного рода задачах не стоит под вопросом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Miguel Monteiro de Sousa Frade. Genetic Terrain Programming // Universidad de Extremadura, 2008, pp. 103
- [2] Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // Физматлит, 2009, 279с.
- [3] Gregor Klančar. Path Planning // Wheeled Mobile Robotics, 2017, pp. 161-206
- [4] Jacob Olsen. Realtime Procedural Terrain Generation // University of Southern Denmark, 2004, pp. 20
- [5] M. Brand, M. Masuda, N. Wehner, X.-H. Yu. Ant colony optimization algorithm for robot path planning // Computer Design and Applications (ICCD) 2010 International Conference on, vol. 3, 2010, pp. 436-440.
- [6] Alpa Reshamwala, Deepika P Vinchurkar. Robot Path Planning using An Ant Colony Optimization Approach: A Survey // (IJARAI) International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, Vol. 2, No.3, 2013, pp. 7
- [7] Sangita Sarangi. Optimization of Robot Motion Planning using Ant Colony Optimization // National Institute of Technology, Rourkela, 2011, pp. 81

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходный код

Ниже приведен исходный код на языке Python

main.py

```
1  """main file"""
2  import progressbar
3  from tools import plot_map
4  from tools import plot_paths
5  from tools import plot_heuristic_d
6  from tools import plot_pheromone
7  from tools import plot_time_correlation
8  from tools import plot_path
9  from graph import Graph
10 from ant import EAlg
11 from planning import planning
12
13 EALG_OBJ = EAlg(
14     80,
15     10,
16     1.0,
17     1.0,
18     0.9,
19     100
20 )
21
22 def main_test():
23     """Main function \n
24         Result of this I will use for report"""
25     sizes = (25, 50, 100, 250, 500, 1000)
26     targets_numbers = (5, 10, 20, 50)
27     prog_bar_it = [0]
28     max_val = sum(targets_numbers) * len(sizes) * 10
29     bar_ = [progressbar.ProgressBar(maxval=max_val).start()]
30     for size in sizes:
31         for targets_num in targets_numbers:
32             time_file_path = "data/time/" + str(size) + "x" + str(size) +
33                 ↪ "/" + str(targets_num) + ".data"
34             file = open(time_file_path, "w+")
35             file.write("size: " + str(size) + "\n")
36             file.write("targets_num: " + str(targets_num) + "\n")
37             file.write("Map\tAntTime\tPlanTime\tFullTime" + "\n")
38             ant_times = []
39             plan_times = []
40             full_times = []
41             opt_paths = []
42             graphs = []
43             for map_it in range(10):
44                 graph = Graph(size, size, 0.3, 0.1)
45                 graph.generate()
46                 path, _, alg_time = planning(prog_bar_it, bar_, graph,
47                     ↪ EALG_OBJ, targets_num)
48                 opt_paths.append(path)
49                 graphs.append(graph)
50                 ant_times.append(alg_time["AntColony"])
51                 plan_times.append(alg_time["Planning"])
```

```

50         full_times.append(alg_time["Whole"])
51         file.write(str(map_it) + "\t" + str(alg_time["AntColony"])
52                 ↪ + "\t" + str(alg_time["Planning"]) + "\t" + str(
53                 ↪ alg_time["Whole"]) + "\n")
54     ant_times_sort = ant_times
55     ant_times_sort.sort()
56     ant_idx = ant_times.index(ant_times_sort[4])
57
58     plan_times_sort = plan_times
59     plan_times_sort.sort()
60     plan_idx = plan_times.index(plan_times_sort[4])
61
62     full_times_sort = full_times
63     full_times_sort.sort()
64     full_idx = full_times.index(full_times_sort[4])
65
66     file.write("mean map by ant:" + "\t" + str(ant_times[ant_idx])
67             ↪ + "\t" + str(plan_times[ant_idx]) + "\t" + str(
68             ↪ full_times[ant_idx]) + "\n")
69     file.write("mean map by plan:" + "\t" + str(ant_times[plan_idx]
70             ↪ ]) + "\t" + str(plan_times[plan_idx]) + "\t" + str(
71             ↪ full_times[plan_idx]) + "\n")
72     file.write("mean map by full:" + "\t" + str(ant_times[full_idx]
73             ↪ ]) + "\t" + str(plan_times[full_idx]) + "\t" + str(
74             ↪ full_times[full_idx]) + "\n")
75     file.close()
76
77     plot_file_name = "data/mean_paths/" + str(size) + "x" + str(
78             ↪ size) + "/" + str(targets_num) + ".png"
79     plot_paths(graphs[full_idx], opt_paths[full_idx],
80             ↪ plot_file_name)
81
82 def examples_of_data():
83     """Necessary for report"""
84     sizes = [250, 500]
85     end_points = [[50, 80],
86                  [345, 345]]
87     for it, _ in enumerate(sizes):
88         graph = Graph(sizes[it], sizes[it], 0.3, 0.1)
89         graph.generate()
90         graph.init_pheromone_n_heuristics(end_points[it])
91         caption = str(sizes[it]) + "x" + str(sizes[it])
92         plot_heuristic_d(graph, "data/heuristics_example/heuristic_d_" +
93                 ↪ caption + ".png")
94         plot_pheromone(graph, "data/heuristics_example/pheromone_" +
95                 ↪ caption + ".png")
96         plot_map(graph, "data/maps_example/" + caption + ".png")
97
98 def dev_test():
99     """Function for development \n
100        I use it for testing components"""
101     size = 1000
102     graph = Graph(size, size, 0.3, 0.2)
103     graph.generate()
104     prog_bar_it = [0]
105     max_val = 50

```

```

94     bar_ = [progressbar.ProgressBar(maxval=max_val).start()]
95     opt_paths, _, alg_time = planning(prog_bar_it, bar_, graph, EALG_OBJ,
    ↪ 50)
96     print(alg_time)
97     plot_paths(graph, opt_paths, "data/mean_paths/test.png")
98
99     def single_path_test():
100         """plot single paths for different maps"""
101         sizes = [250, 500]
102         robots = [[50, 80],
103                  [200, 460]]
104         targets = [[200, 180],
105                   [300, 100]]
106         file = open("data/path_example/costs.data", "w+")
107         for it, _ in enumerate(sizes):
108             graph = Graph(sizes[it], sizes[it], 0.3, 0.2)
109             graph.generate()
110             path, cost = EALG_OBJ.get_path(graph, robots[it], targets[it])
111             caption = str(sizes[it]) + "x" + str(sizes[it])
112             plot_path(graph, path, "data/path_example/" + caption + ".png")
113             file.write(caption + ":\t" + str(cost) + "\n")
114         file.close()
115
116     def time_correlation():
117         """plot surface with mean times by ready data"""
118         sizes = (25, 50, 100, 250, 500, 1000)
119         targets_numbers = (5, 10, 20, 50)
120         plot_time_correlation(sizes, targets_numbers)
121
122     single_path_test()
123     # examples_of_data()
124     # dev_test()
125     # main_test()
126     # time_correlation()

```

graph.py

```

1  """Graph class"""
2  import math
3  import numpy as np
4  from tools import get_conj
5  from tools import get_distance_proj
6  from tools import get_distance
7  from tools import get_mean
8
9  class Graph:
10     """class for diamond square algorithm"""
11     def __init__(self, n, m, R, pheromone_eur_par):
12         self.n = n
13         self.m = m
14         self.max_element = pow(2, math.ceil(math.log(max(n, m) - 1, 2)))
15         self.matrix = np.zeros((self.max_element + 1, self.max_element +
    ↪ 1))
16         self.norm_matrix = np.zeros((self.max_element + 1, self.
    ↪ max_element + 1))
17         self.height = (n + m) / 2

```

```

18     self.pheromone_eur_par = pheromone_eur_par
19     self.max_dist_z = 0.0
20     self.max_dist_x_y = get_distance_proj([0, 0], [self.n - 1, self.m
    ↪ - 1])
21     self.available_moves = [[float(0) for x in range(n)] for y in
    ↪ range(m)]
22     self.heuristic_h = [[float(0) for x in range(n)] for y in range(m)
    ↪ ]
23     self.costs = [[float(0) for x in range(n)] for y in range(m)]
24     self.heuristic_d = np.zeros((n, m))
25     self.pheromone = np.ones((n, m))
26     self.R = R
27     self.first_call = True
28
29     def generate(self):
30         """main method"""
31         self.matrix[0][0] = np.random.uniform(low=0, high=self.height)
32         self.matrix[self.max_element][self.max_element] = np.random.
    ↪ uniform(low=0, high=self.height)
33         self.matrix[self.max_element][0] = np.random.uniform(low=0, high=
    ↪ self.height)
34         self.matrix[0][self.max_element] = np.random.uniform(low=0, high=
    ↪ self.height)
35
36         side_length = self.max_element
37         while side_length != 1:
38             x_1 = 0
39             y_1 = 0
40             x_2 = side_length
41             y_2 = side_length
42             while True:
43                 self.square(x_1, y_1, x_2, y_2)
44                 self.diamond(x_1, y_1, x_1, y_2)
45                 self.diamond(x_1, y_2, x_2, y_2)
46                 self.diamond(x_2, y_2, x_2, y_1)
47                 self.diamond(x_2, y_1, x_1, y_1)
48                 if y_2 == self.max_element:
49                     if x_2 == self.max_element:
50                         break
51                     else:
52                         x_1 += side_length
53                         x_2 += side_length
54                         y_1 = 0
55                         y_2 = side_length
56                 else:
57                     y_1 += side_length
58                     y_2 += side_length
59                 side_length = int(side_length / 2)
60         self.matrix = self.matrix[0:self.n, 0:self.m]
61         self.matrix = np.around(self.matrix, decimals=3)
62         self.max_dist_z = np.amax(self.matrix) - np.amin(self.matrix)
63         self.norm_matrix = self.matrix - np.amin(self.matrix)
64         self.norm_matrix = self.norm_matrix / self.max_dist_z
65
66     def square(self, x_1, y_1, x_2, y_2):
67         """square step of algorithm"""

```



```

68     rad = (x_2 - x_1) / 2
69     center_x = int(x_1 + rad)
70     center_y = int(y_1 + rad)
71     vertexes = [self.matrix[x_1][y_1],
72                 self.matrix[x_2][y_2],
73                 self.matrix[x_1][y_2],
74                 self.matrix[x_2][y_1]]
75     self.matrix[center_x][center_y] = (get_mean(vertexes)) + np.random
    ↪ .uniform(low=(- self.R * rad * 2), high=(self.R * rad * 2))
76
77 def diamond(self, x_1, y_1, x_2, y_2):
78     """diamond step of algorithm"""
79     vertexes = []
80     x = 0
81     y = 0
82     rad = 0.0
83     if x_1 == x_2:
84         center_y = int((y_1 + y_2) / 2)
85         rad = abs(y_2 - center_y)
86         if x_1 not in (0, self.max_element):
87             vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
88                         self.matrix[x_2][y_2],
89                         self.matrix[x_1 - rad][center_y],
90                         self.matrix[x_1 + rad][center_y]]
91         else:
92             if x_1 == 0:
93                 vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
94                             self.matrix[x_2][y_2],
95                             self.matrix[x_1 + rad][center_y]]
96             if x_1 == self.max_element:
97                 vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
98                             self.matrix[x_2][y_2],
99                             self.matrix[x_1 - rad][center_y]]
100
101         x = x_1
102         y = center_y
103     else:
104         center_x = int((x_1 + x_2) / 2)
105         rad = abs(x_2 - center_x)
106         if y_1 not in (0, self.max_element):
107             vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
108                         self.matrix[x_2][y_2],
109                         self.matrix[center_x][y_1 - rad],
110                         self.matrix[center_x][y_1 + rad]]
111         else:
112             if y_1 == 0:
113                 vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
114                             self.matrix[x_2][y_2],
115                             self.matrix[center_x][y_1 + rad]]
116             if y_1 == self.max_element:
117                 vertexes += [self.matrix[x_1][y_1],
118                             self.matrix[x_2][y_2],
119                             self.matrix[center_x][y_1 - rad]]
120
121         x = center_x
122         y = y_1
123     self.matrix[x][y] = get_mean(vertexes) + np.random.uniform(low=(-
    ↪ self.R * rad * 2), high=(self.R * rad * 2))

```

```

122
123 def get_size(self):
124     """Get size of graph in format (,)"""
125     return (self.n, self.m)
126
127 def init_pheromone_n_heuristics(self, end_point):
128     """Init pheromone matrix, heuristic_d matrix, heuristic_h matrix
129         ↪ of distances to available \n
130         moves by z and available_moves matrix of lists"""
131     if self.first_call:
132         for it in range(self.n):
133             for jt in range(self.m):
134                 dist_to_conj = []
135                 conj_points = get_conj(self.norm_matrix, [it, jt])
136                 for point in conj_points:
137                     dist_to_conj.append(get_distance([it, jt], point,
138                         ↪ self.matrix))
139                     self.costs[it][jt] = dist_to_conj
140                     self.available_moves[it][jt] = conj_points
141                 self.first_call = False
142     else:
143         self.heuristic_h = [[float(0) for x in range(self.n)] for y in
144             ↪ range(self.m)]
145         self.heuristic_d = np.zeros((self.n, self.m))
146         self.pheromone = np.ones((self.n, self.m))
147
148     end_point_val = max(self.n, self.m)
149     for it in range(self.n):
150         for jt in range(self.m):
151             if not (it == end_point[0] and jt == end_point[1]):
152                 pheromone = 1 - (get_distance_proj([it, jt], end_point
153                     ↪ ) / self.max_dist_x_y + np.random.uniform(- self.
154                     ↪ pheromone_eur_par, self.pheromone_eur_par))
155                 if pheromone < 0:
156                     self.pheromone[it][jt] = 0.0
157                 else:
158                     self.pheromone[it][jt] = pheromone
159                 z_dist_to_conj = []
160                 conj_points = get_conj(self.norm_matrix, [it, jt])
161                 for point in conj_points:
162                     z_dist_to_conj.append(1 - abs(self.norm_matrix[point
163                         ↪ [0]][point[1]] - self.norm_matrix[it][jt]))
164                 self.heuristic_h[it][jt] = z_dist_to_conj
165                 self.heuristic_d[it][jt] = end_point_val - max(abs(it -
166                     ↪ end_point[0]), abs(jt - end_point[1]))
167
168 def update_pheromone(self, pheromone_increment: np.array,
169     ↪ evaporation_coef):
170     """Updates pheromone values"""
171     self.pheromone *= (1 - evaporation_coef)
172     self.pheromone += pheromone_increment
173
174 def get_pheromone(self, position):
175     """Returns pheromone value for position"""
176     return self.pheromone[position[0]][position[1]]
177
178

```

```

170     def get_heuristic_h(self, position):
171         """Returns list of distance by z to possible moves for ant"""
172         return self.heuristic_h[position[0]][position[1]]
173
174     def get_available_moves(self, position):
175         """Returns list of possible moves for ant"""
176         return self.available_moves[position[0]][position[1]]
177
178     def get_heuristic_d(self, position):
179         """Returns heuristic_d value for position"""
180         return self.heuristic_d[position[0]][position[1]]
181
182     def get_cost(self, position):
183         """Returns list costs for conjugate positions"""
184         return self.costs[position[0]][position[1]]
185
186     def get_pos_parameters(self, position):
187         """Returns parameters for possibility calculating \n
188         return available_moves, pheromones, heuristic_d, self.
189         ↪ get_heuristic_h(position)"""
190         available_moves = self.get_available_moves(position)
191         heuristic_d = []
192         pheromones = []
193         for move in available_moves:
194             heuristic_d.append(self.get_heuristic_d(move))
195             pheromones.append(self.get_pheromone(move))
196         min_h_d = min(heuristic_d)
197         heuristic_d = [val - min_h_d for val in heuristic_d]
198         sum_d = sum([math.exp(w_d) for w_d in heuristic_d])
199         heuristic_d = [math.exp(w_d) / sum_d for w_d in heuristic_d]
200         return available_moves, pheromones, heuristic_d, self.
201         ↪ get_heuristic_h(position), self.get_cost(position)
202
203     def get_matrix(self):
204         """Returns surface in matrix formats"""
205         return self.matrix

```

ant.py

```

1  """Evolution algorithm implementation"""
2  import numpy as np
3  from graph import Graph
4  from tools import choice
5
6  class Ant:
7      """Single ant behavior"""
8      def __init__(self, graph: Graph, start, alpha, beta, q):
9          self.graph = graph
10         self.position = start
11         self.alpha = alpha
12         self.beta = beta
13         self.path = [start]
14         self.path_length = 0.0
15         self.last_cost = 0.0
16         self.q = q
17         self.increase = [0.0]

```

```

18         self.iteration = 0
19         self.fail = False
20
21     def get_pos(self):
22         """Get ant's position"""
23         return self.position
24
25     def move(self):
26         """Move ant in next graph's point"""
27         available_moves, moves_pheromones, moves_heuristic_d,
28             ↪ moves_heuristic_h, moves_costs = self.graph.
29             ↪ get_pos_parameters(self.position)
30         weights = []
31         sum_w = 0.0
32         for it in range(len(available_moves)):
33             weight = moves_pheromones[it] ** self.alpha *
34                 ↪ moves_heuristic_d[it] ** self.beta * moves_heuristic_h[it]
35                 ↪ ]
36             sum_w += weight
37             weights.append(weight)
38         weights = [w / sum_w for w in weights]
39         choosen_idx = choice(weights)
40         self.position = available_moves[choosen_idx]
41         self.path.append(self.position)
42         # if moves_costs[choosen_idx] == 0.0: # was Loch Ness bug and this
43             ↪ is for safety
44         #     moves_costs[choosen_idx] += 0.01
45         self.increase.append(moves_costs[choosen_idx])
46         self.path_length += moves_costs[choosen_idx]
47         self.iteration += 1
48
49     def get_position(self):
50         """Returns position of ant"""
51         return self.position
52
53     def get_pheromone_increase(self, idx):
54         """Return pheromone increase for idx move"""
55         return self.q / self.increase[idx]
56
57     def get_path_length(self):
58         """Returns path length"""
59         return self.path_length
60
61     def get_path(self):
62         """Returns path"""
63         return self.path
64
65     def delete_loops(self):
66         """Delete loops from path"""
67         for it in self.path:
68             if self.path.count(it) > 1:
69                 idx = self.path.index(it)
70                 for jt in range(idx, len(self.path) - 1 - self.path[::-1].
71                     ↪ index(it)): #last idx
72                     self.path.pop(idx)
73                     self.path_length -= self.increase[idx]

```

```

68         self.increase.pop(idx)
69
70 class EAlg:
71     """Evolution algorithm"""
72     def __init__(self, pop_size, iter_size, alpha, beta, rho, q):
73         self.pop_size = pop_size
74         self.iter_size = iter_size
75         self.alpha = alpha
76         self.beta = beta
77         self.rho = rho
78         self.q = q
79
80     def get_path(self, graph: Graph, start: [], end_point: []):
81         """Main method of algorithm, which find best path\n
82         It returns cost and path
83         """
84         path = []
85         path_length = float('inf')
86         graph.init_pheromone_n_heuristics(end_point)
87         lim = 0
88         if (graph.get_size()[0] + graph.get_size()[1]) / 2 < 100:
89             lim = 10000
90         else: lim = graph.get_size()[0] * graph.get_size()[1] / 10
91         for it in range(self.iter_size):
92             pheromone_increment = np.zeros(graph.get_size())
93             for ant_it in range(self.pop_size):
94                 ant = Ant(graph, start, self.alpha, self.beta, self.q)
95                 while ant.get_pos() != end_point:
96                     ant.move()
97                     if ant.iteration == lim:
98                         ant.fail = True
99                     break
100                 pos = ant.get_pos()
101                 pheromone_increment[pos[0]][pos[1]] += ant.
102                     ↪ get_pheromone_increase(len(ant.get_path()) - 1)
103                 if not ant.fail:
104                     ant.delete_loops()
105                     if ant.get_path_length() < path_length:
106                         path = ant.get_path()
107                         path_length = ant.get_path_length()
108                 if not ant.fail:
109                     graph.update_pheromone(pheromone_increment, self.rho)
110
111         return path, path_length

```

planning.py

```

1  """Planning algorithm"""
2  from time import time
3  import numpy as np
4  from graph import Graph
5  from ant import EAlg
6  from tools import get_distance_proj
7
8  def planning(prog_bar_it, bar_, graph: Graph, model: EAlg,
9      ↪ number_of_targets):

```

```

9      """Returns list with robot's paths to targets and list of lenghts this
      ↪ paths"""
10     robots = []
11     targets = []
12     x_max, y_max = graph.get_size()
13
14     for it in range(number_of_targets):
15         while True:
16             robot = [np.random.randint(low=0, high=x_max),
17                     np.random.randint(low=0, high=y_max)]
18             if robot not in robots:
19                 if robot not in targets:
20                     robots.append(robot)
21                     break
22         while True:
23             target = [np.random.randint(low=0, high=x_max),
24                     np.random.randint(low=0, high=y_max)]
25             if target not in robots:
26                 if target not in targets:
27                     targets.append(target)
28                     break
29
30     costs = [[0.0 for x in range(number_of_targets)] for y in range(
      ↪ number_of_targets)]
31     for it in range(number_of_targets):
32         for jt in range(number_of_targets):
33             costs[it][jt] = get_distance_proj(robots[it], targets[jt])
34
35     time_dic = {}
36
37     plan_start = time()
38
39     opt_paths = []
40     opt_costs = []
41     opt_pairs = []
42
43     have_pair = np.zeros(number_of_targets)
44     while not all(have_pair):
45         it = 0
46         while True:
47             if not have_pair[it]:
48                 idx = costs[it].index(min(costs[it]))
49                 cost = costs[it][idx]
50                 if cost == min([row[idx] for row in costs]):
51                     opt_pairs.append([it, idx])
52                     have_pair[it] = True
53                     costs[it] = [float('inf') for it in range(
      ↪ number_of_targets)]
54                     for jt in range(number_of_targets):
55                         costs[jt][idx] = float('inf')
56                     break
57             else: it += 1
58         else: it += 1
59
60     ant_start = time()
61     time_dic["Planning"] = round(ant_start - plan_start, 3)

```

```

62
63     for pair in opt_pairs:
64         prog_bar_it[0] += 1
65         bar_[0].update(prog_bar_it[0])
66         path, cost = model.get_path(graph, robots[pair[0]], targets[pair
        ↪ [1]])
67         opt_paths.append(path)
68         opt_costs.append(cost)
69
70
71
72     time_dic["AntColony"] = time() - ant_start
73     time_dic["Whole"] = round(time_dic["AntColony"] + time_dic["Planning"]
    ↪ ], 3)
74
75     return opt_paths, opt_costs, time_dic

```

tools.py

```

1  """usefull functions"""
2  import math
3  import bisect
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6  from matplotlib import rcParams
7  from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
8
9  def plot_surface(matrix, sizes, targets_numbers, file_name):
10     """Plot 3d surface"""
11     rcParams.update({'font.size': 16})
12     (x, y) = np.meshgrid(np.arange(matrix.shape[1]), np.arange(matrix.
    ↪ shape[0]))
13     fig = plt.figure()
14     ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
15     surf = ax.plot_surface(x, y, np.log(matrix), cmap=plt.get_cmap("
    ↪ viridis"))
16     ax.set_xlabel('Targets', labelpad=20)
17     ax.set_ylabel('Map size', labelpad=20)
18     ax.set_zlabel('ln(t)', labelpad=10)
19     plt.xticks(range(len(targets_numbers)), targets_numbers)
20     plt.yticks(range(len(sizes)), sizes)
21     fig.colorbar(surf)
22     fig.set_size_inches(12.5, 8.5)
23     fig.savefig(file_name, dpi=100)
24     plt.close(fig)
25
26  def plot_time_correlation(sizes, targets_numbers):
27     """tool for plot surface from time data"""
28     matrix = np.zeros((len(sizes), len(targets_numbers)))
29     for it, _ in enumerate(sizes):
30         root = "data/time/" + str(sizes[it]) + "x" + str(sizes[it]) + "/"
31         for jt, _ in enumerate(targets_numbers):
32             file_path = root + str(targets_numbers[jt]) + ".data"
33             file = open(file_path)
34             mean_time = float(file.readlines()[15].rstrip().rsplit("\t")
    ↪ [3])

```

```

35         matrix[it][jt] = round(mean_time, 3)
36     plot_surface(matrix, sizes, targets_numbers, "data/time/mean_surface.
    ↪ png")
37
38 def plot_map(graph, file_name):
39     """Plot map in heatmap format"""
40     plot_heatmap(graph.get_matrix(), file_name)
41
42 def plot_paths(graph, paths, file_name):
43     """Plot paths on map"""
44     fig = plt.figure()
45     ax = fig.add_subplot(111)
46     pl = ax.imshow(graph.get_matrix(), cmap=plt.get_cmap("gist_earth"))
47     fig.colorbar(pl)
48     fig.set_size_inches(8.5, 8.5)
49     for path in paths:
50         ax.plot([x for x, y in path], [y for x, y in path], linewidth=2.0,
    ↪ c="orange")
51         ax.plot(path[0][0], path[0][1], "ro", c="black")
52         ax.plot(path[len(path) - 1][0], path[len(path) - 1][1], "ro", c="
    ↪ red")
53     fig.savefig(file_name, dpi=100)
54     plt.close(fig)
55
56 def plot_path(graph, path, file_name):
57     """Plot single path on map"""
58     fig = plt.figure()
59     ax = fig.add_subplot(111)
60     pl = ax.imshow(graph.get_matrix(), cmap=plt.get_cmap("gist_earth"))
61     fig.colorbar(pl)
62     fig.set_size_inches(8.5, 8.5)
63     ax.plot([x for x, y in path], [y for x, y in path], linewidth=2.0, c="
    ↪ orange")
64     ax.plot(path[0][0], path[0][1], "ro", c="black")
65     ax.plot(path[len(path) - 1][0], path[len(path) - 1][1], "ro", c="red")
66     fig.savefig(file_name, dpi=100)
67     plt.close(fig)
68
69 def plot_heuristic_d(graph, file_name):
70     """Plot heuristic by distance in heatmap format"""
71     plot_heatmap(graph.heuristic_d, file_name)
72
73 def plot_pheromone(graph, file_name):
74     """Plot pheromone heatmap"""
75     plot_heatmap(graph.pheromone, file_name)
76
77 def plot_heatmap(matrix, file_name):
78     """Plot 2d heat map"""
79     fig = plt.figure()
80     ax = plt.imshow(matrix, cmap=plt.get_cmap("gist_earth"))
81     fig.colorbar(ax)
82     fig.set_size_inches(8.5, 8.5)
83     fig.savefig(file_name, dpi=100)
84     plt.close(fig)
85
86 def cdf(weights):

```



```

87     """generate weights"""
88     total = sum(weights)
89     result = []
90     cumsum = 0
91     for w in weights:
92         cumsum += w
93         result.append(cumsum / total)
94     return result
95
96 def choice(weights):
97     """choice with prob"""
98     cdf_vals = cdf(weights)
99     x = np.random.uniform(low=0.0, high=1.0)
100    idx = bisect.bisect(cdf_vals, x)
101    return idx
102
103 def get_conj(matrix, point):
104     """returns conjugate points for point in matrix"""
105     conj_points = []
106     top_left = True
107     top_right = True
108     bottom_left = True
109     bottom_right = True
110     if point[0] > 0:
111         conj_points.append([point[0] - 1, point[1]])
112     else:
113         top_left = False
114         top_right = False
115     if point[0] < matrix.shape[0] - 1:
116         conj_points.append([point[0] + 1, point[1]])
117     else:
118         bottom_left = False
119         bottom_right = False
120     if point[1] > 0:
121         conj_points.append([point[0], point[1] - 1])
122     else:
123         bottom_left = False
124         top_left = False
125     if point[1] < matrix.shape[1] - 1:
126         conj_points.append([point[0], point[1] + 1])
127     else:
128         top_right = False
129         bottom_right = False
130
131     if top_left:
132         conj_points.append([point[0] - 1, point[1] - 1])
133     if top_right:
134         conj_points.append([point[0] - 1, point[1] + 1])
135     if bottom_left:
136         conj_points.append([point[0] + 1, point[1] - 1])
137     if bottom_right:
138         conj_points.append([point[0] + 1, point[1] + 1])
139
140     return conj_points
141
142 def get_distance_proj(x, y):

```

```
143     """distance between two point by x and y using Euclid metric"""
144     return math.sqrt((x[0] - y[0]) ** 2 + (x[1] - y[1]) ** 2)
145
146 def get_distance(x, y, matrix):
147     """distance between two point by x, y and z using Euclid metric"""
148     return math.sqrt((x[0] - y[0]) ** 2 + (x[1] - y[1]) ** 2 + (matrix[x
        ↪ [0]][x[1]] - matrix[y[0]][y[1]]) ** 2)
149
150 def get_mean(some_list):
151     """Returns mean value of list"""
152     return sum(some_list) / len(some_list)
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблицы замеров времени

Ниже приведены замеры времени (с.) муравьиного алгоритма для каждой сгенерированной карты и каждого количества роботов:

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1.5568 | 1.69588 | 2.75487 | 4.2076 |
| 2 | 1.69226 | 1.80428 | 3.21331 | 4.2441 |
| 3 | 1.09952 | 1.34256 | 2.66641 | 6.43867 |
| 4 | 0.96775 | 3.23578 | 2.67067 | 4.53471 |
| 5 | 0.80875 | 1.89084 | 3.0447 | 5.53788 |
| 6 | 1.1738 | 2.62321 | 2.6756 | 5.01334 |
| 7 | 1.40806 | 1.95556 | 2.0411 | 6.20485 |
| 8 | 1.08748 | 2.11052 | 2.38643 | 5.60215 |
| 9 | 1.26882 | 1.84033 | 2.1164 | 5.56547 |
| 10 | 0.73943 | 1.60901 | 3.37735 | 5.15904 |
| Средний элемент | 1.09952 | 1.84033 | 2.67067 | 5.15904 |

Размер карты: 25x25

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 2.15365 | 3.59408 | 6.54677 | 10.73975 |
| 2 | 1.71077 | 3.3017 | 6.41902 | 11.11771 |
| 3 | 3.33052 | 2.96686 | 7.60223 | 12.24219 |
| 4 | 2.48163 | 4.87254 | 9.19686 | 12.41132 |
| 5 | 3.9287 | 3.95599 | 6.41092 | 11.49145 |
| 6 | 1.6465 | 4.43041 | 7.68628 | 13.13047 |
| 7 | 2.31836 | 4.70432 | 5.39536 | 13.06448 |
| 8 | 1.93215 | 2.44238 | 5.48949 | 12.79632 |
| 9 | 2.99847 | 2.71091 | 7.70761 | 15.13225 |
| 10 | 2.68102 | 4.48696 | 6.36677 | 15.12783 |
| Средний элемент | 2.31836 | 3.59408 | 6.41902 | 12.41132 |

Размер карты: 50x50

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 6.32895 | 8.73452 | 14.94095 | 24.71504 |
| 2 | 5.26532 | 9.12678 | 13.68367 | 30.10719 |
| 3 | 4.87571 | 12.12137 | 14.66411 | 26.09427 |
| 4 | 5.98595 | 7.40209 | 12.80597 | 23.22383 |
| 5 | 3.94488 | 10.1101 | 17.56255 | 28.4082 |
| 6 | 7.12389 | 8.61739 | 13.43984 | 25.22285 |
| 7 | 5.36162 | 8.51896 | 13.89583 | 25.27979 |
| 8 | 5.02578 | 9.56457 | 11.74729 | 23.15173 |
| 9 | 5.34449 | 13.91983 | 14.71402 | 22.08825 |
| 10 | 6.81967 | 9.45882 | 17.0239 | 31.06226 |
| Средний элемент | 5.34449 | 9.12678 | 13.89583 | 25.22285 |

Размер карты: 100x100

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 42.28026 | 32.36046 | 52.14858 | 107.19252 |
| 2 | 19.01642 | 27.00166 | 69.75315 | 103.9241 |
| 3 | 20.36057 | 30.91856 | 45.16012 | 103.12069 |
| 4 | 17.64865 | 38.52182 | 52.3477 | 115.31906 |
| 5 | 19.1544 | 39.6922 | 60.39992 | 123.05207 |
| 6 | 25.56097 | 25.46197 | 49.70063 | 121.08852 |
| 7 | 18.23112 | 34.0119 | 58.34534 | 93.98898 |
| 8 | 13.38648 | 34.57604 | 51.70425 | 105.00388 |
| 9 | 17.92189 | 35.83925 | 48.98953 | 98.69694 |
| 10 | 23.87057 | 26.68619 | 54.96598 | 103.89223 |
| Средний элемент | 19.01642 | 32.36046 | 52.14858 | 103.9241 |

Размер карты: 250x250

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 47.88517 | 73.60561 | 137.27325 | 308.64456 |
| 2 | 48.11748 | 105.09704 | 167.23236 | 321.9515 |
| 3 | 64.0862 | 109.30441 | 143.13767 | 335.52867 |
| 4 | 59.32068 | 187.01288 | 168.12613 | 364.50322 |
| 5 | 75.32691 | 124.74065 | 178.59087 | 319.94925 |
| 6 | 61.19254 | 79.99268 | 128.15281 | 503.20078 |
| 7 | 51.79195 | 87.23905 | 198.67009 | 341.6798 |
| 8 | 58.80499 | 87.76271 | 282.89796 | 311.80583 |
| 9 | 56.37451 | 80.41181 | 277.18092 | 283.16109 |
| 10 | 56.46719 | 103.25168 | 243.64185 | 409.125 |
| Средний элемент | 56.46719 | 87.76271 | 168.12613 | 321.9515 |

Размер карты: 500x500

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 985.46655 | 292.70027 | 847.49595 | 2510.47386 |
| 2 | 289.54574 | 551.28631 | 879.1982 | 1478.33745 |
| 3 | 775.55588 | 516.55046 | 493.11726 | 2206.79318 |
| 4 | 612.46158 | 1196.72224 | 596.36857 | 2167.35525 |
| 5 | 356.07551 | 626.02555 | 757.65001 | 2049.00236 |
| 6 | 258.13347 | 1190.34369 | 1356.15285 | 2417.78241 |
| 7 | 1100.10644 | 554.87698 | 1412.94535 | 2335.37329 |
| 8 | 715.70122 | 372.30212 | 1571.87906 | 4075.23897 |
| 9 | 905.14539 | 777.73305 | 2050.20857 | 4158.50932 |
| 10 | 170.51577 | 1581.04043 | 2182.6365 | 4512.15843 |
| Средний элемент | 612.46158 | 554.87698 | 879.1982 | 2335.37329 |

Размер карты: 1000x1000

Ниже приведены замеры времени (с.) алгоритма планирования для каждой сгенерированной карты и каждого количества роботов:

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.005 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.005 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |

Размер карты: 25x25

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.005 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |

Размер карты: 50x50

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |

Размер карты: 100x100

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |

Размер карты: 250x250

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|-----|-----|-------|-------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.003 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |

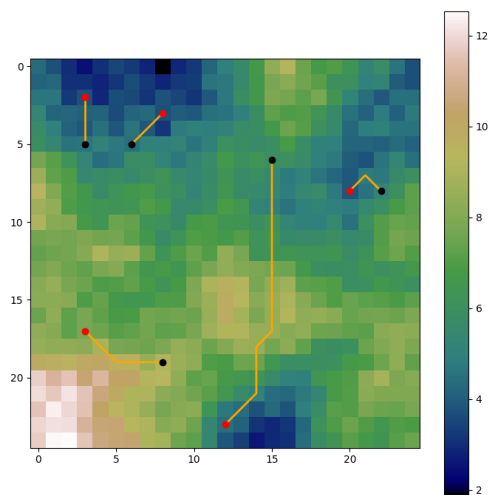
Размер карты: 500x500

| № карты\Кол-во роботов | 5 | 10 | 20 | 50 |
|------------------------|-----|-----|-------|-------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.003 | 0.005 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.003 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.004 |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.002 | 0.005 |
| Средний элемент | 0.0 | 0.0 | 0.001 | 0.004 |

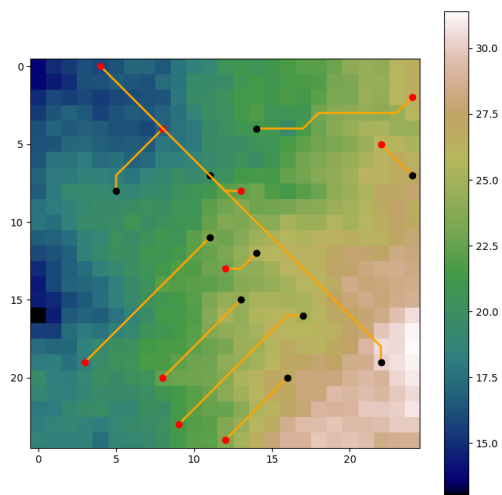
Размер карты: 1000x1000

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики решений

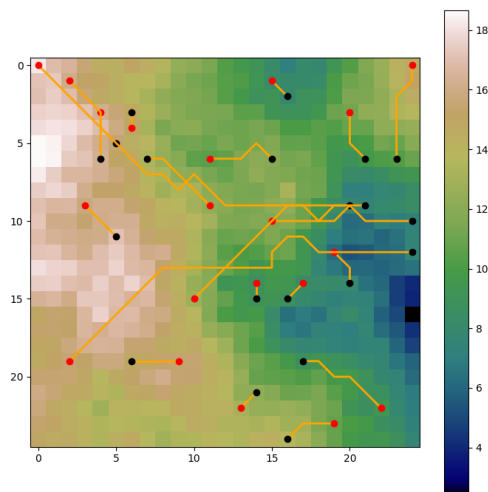
Ниже представлены построенные пути с средним временем выполнения для разного числа роботов и разных размеров матриц (черным отмечены роботы, красным - цели):



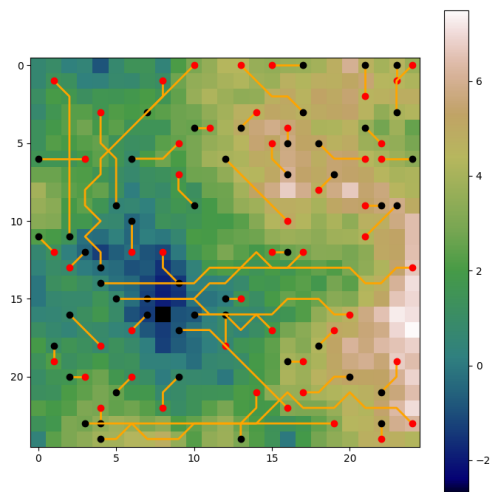
5 роботов



10 роботов

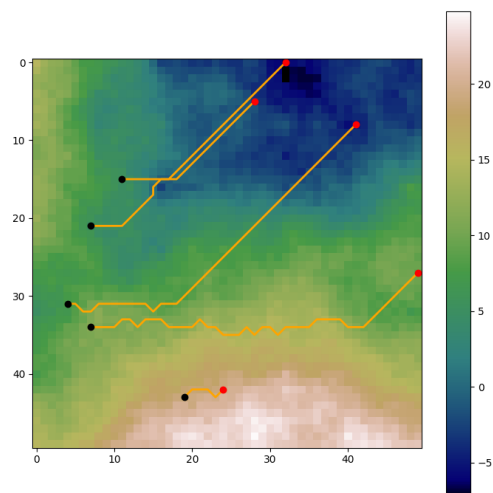


20 роботов

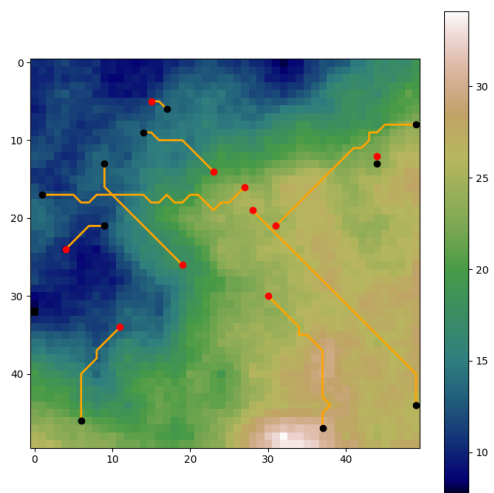


50 роботов

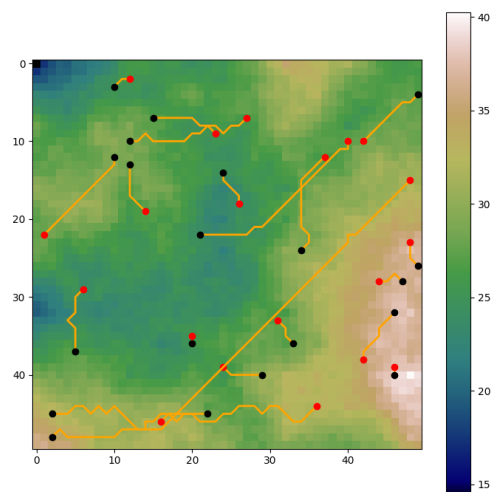
Размер карты: 25x25



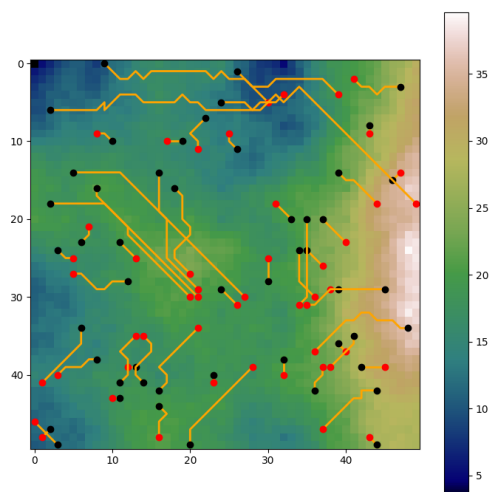
5 роботов



10 роботов

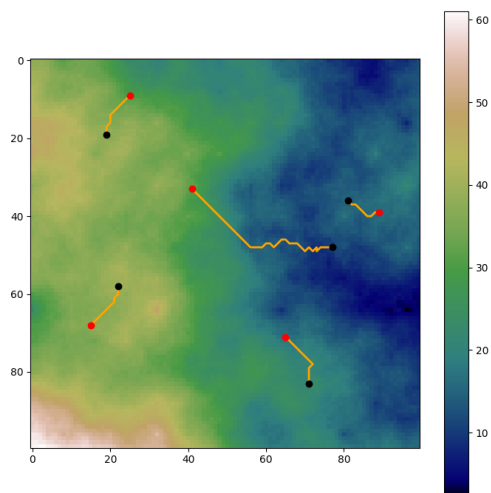


20 роботов

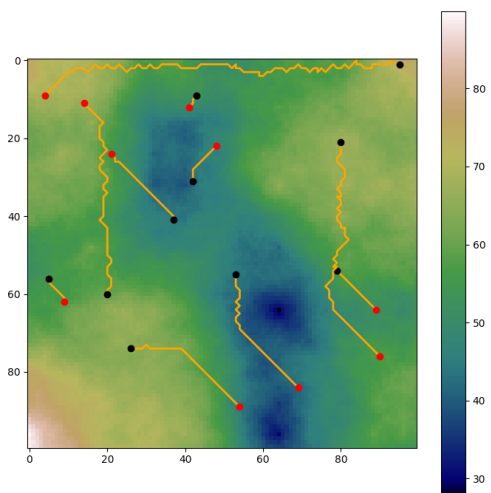


50 роботов

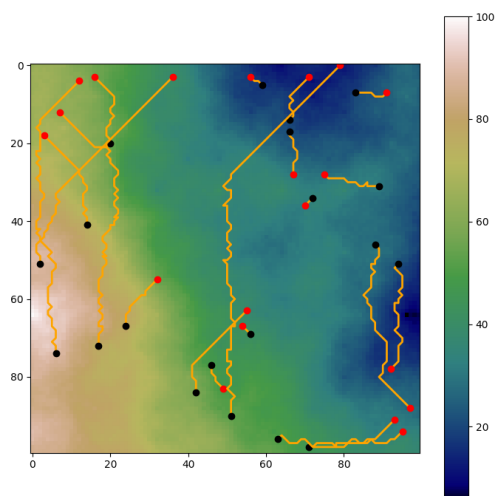
Размер карты: 50x50



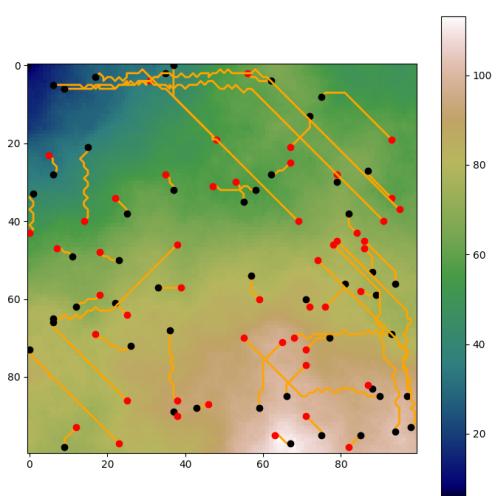
5 роботов



10 роботов

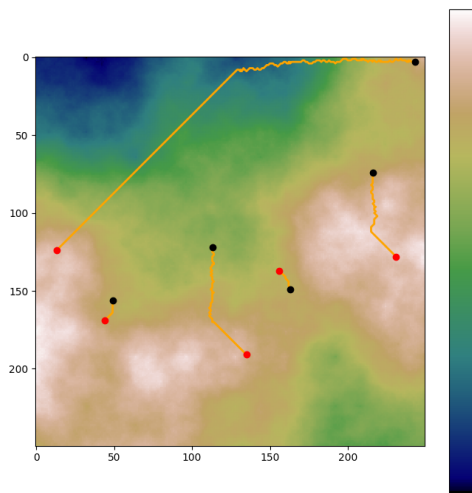


20 роботов

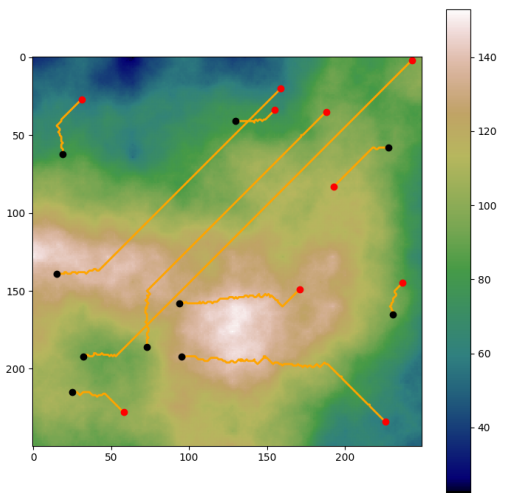


50 роботов

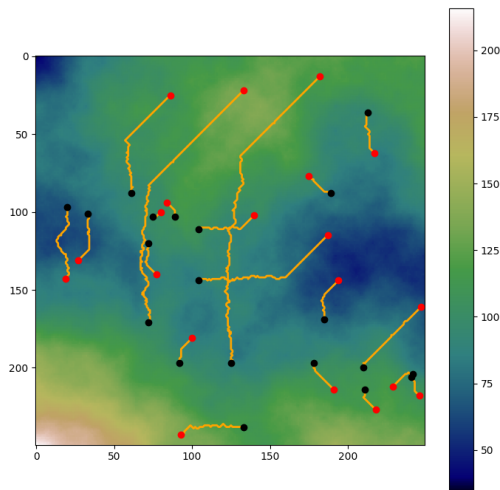
Размер карты: 100x100



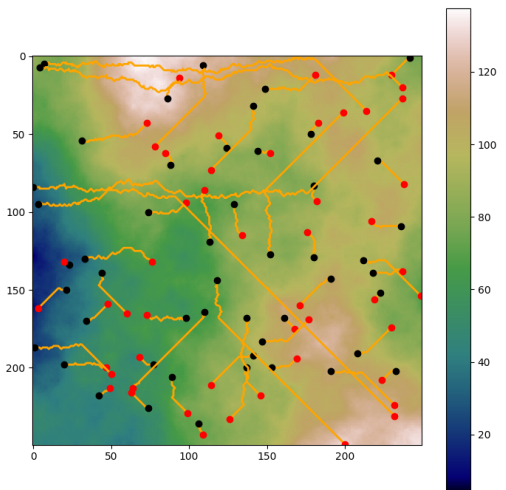
5 роботов



10 роботов

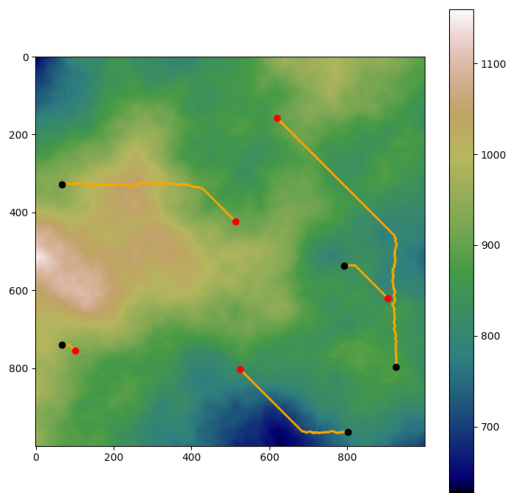


20 роботов

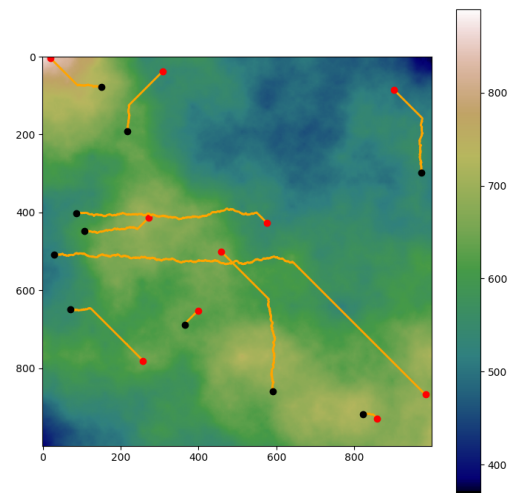


50 роботов

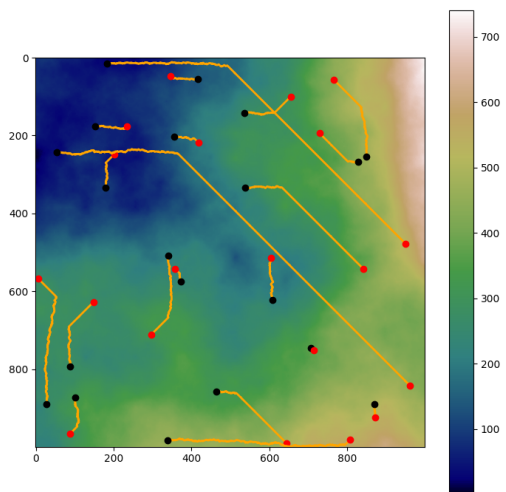
Размер карты: 250x250



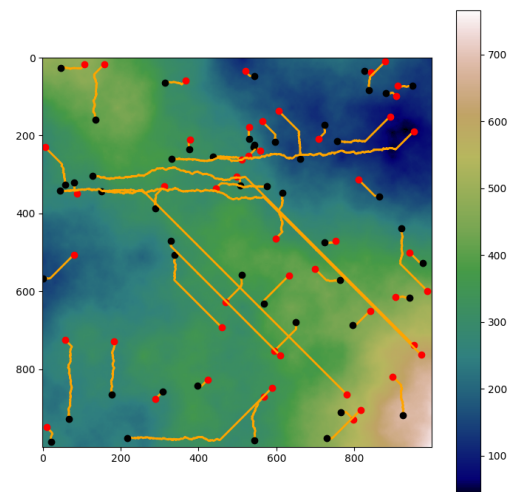
5 роботов



10 роботов



20 роботов



50 роботов

Размер карты: 1000x1000