

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: Глазунов В.В.

Санкт-Петербург  
2019

# Оглавление

<b>ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ</b>	<b>3</b>
<b>1 Описание алгоритмов</b>	<b>4</b>
1.1 Алгоритм Diamond-Square . . . . .	4
1.2 Муравьиный алгоритм . . . . .	5
1.3 Алгоритм коллективного распределения целей . . . . .	5
<b>2 Программная реализация</b>	<b>6</b>
<b>3 Результаты</b>	<b>7</b>
3.1 Diamond-Square . . . . .	7
3.2 Муравьиный алгоритм . . . . .	8
3.3 Коллективное распределение целей . . . . .	10
3.4 Замеры времени работы . . . . .	11
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>12</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>13</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходный код</b>	<b>14</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблицы замеров времени</b>	<b>28</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики решений</b>	<b>33</b>

# 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 изначальном 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 -  $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$ .

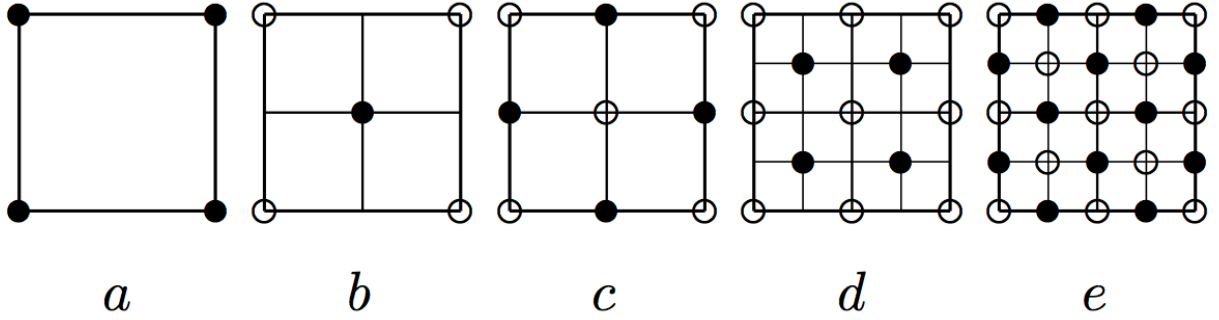


Рис. 1: Этапы работы алгоритма Diamond-Square

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:

$$m[s/2][s/2] = \frac{m[0][0] + m[0][s] + m[s][0] + m[s][s]}{4} + \tau$$

где  $m$  - это рассматриваемый квадрат,  $s$  - количество узлов на ребре квадрата.  $\tau$  - случайная величина (шум), диапазон случайной величины  $[-R * s, R * s]$ , где  $R$  - задаваемый коэффициент.

- в) **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  $n \times m$ .

## 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 прийти от начальной точки до конечной, при этом 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:

- Изначально генерируется матрица, содержащая значения концентрации феромонов  $\tau_{ij}$ . Для простоты матрица заполняется случайными очень маленькими значениями (в общем случае изначально значения должны быть равными 0).

## 1.3 Алгоритм коллективного распределения целей

## 2 Программная реализация

## 3 Результаты

### 3.1 Diamond-Square

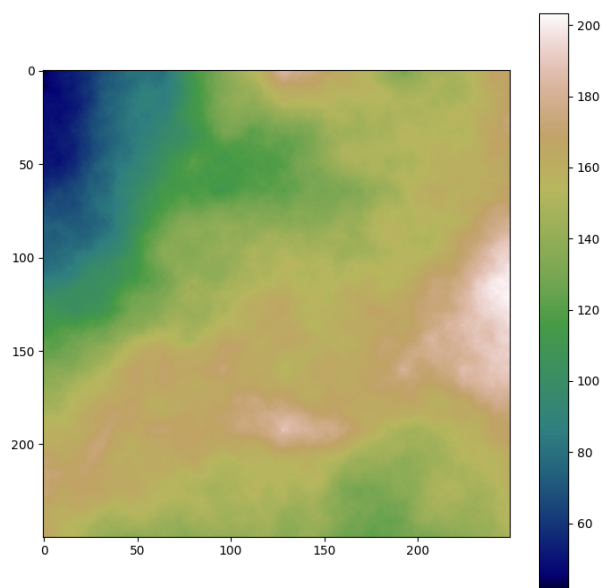


Рис. 2: Карта размера 250x250

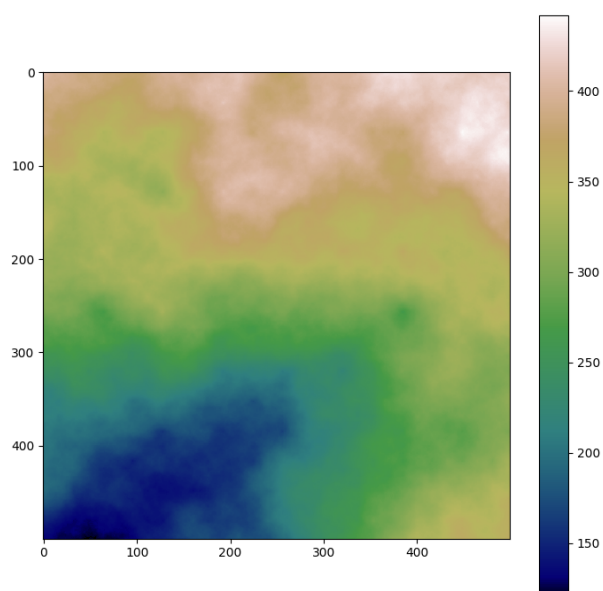
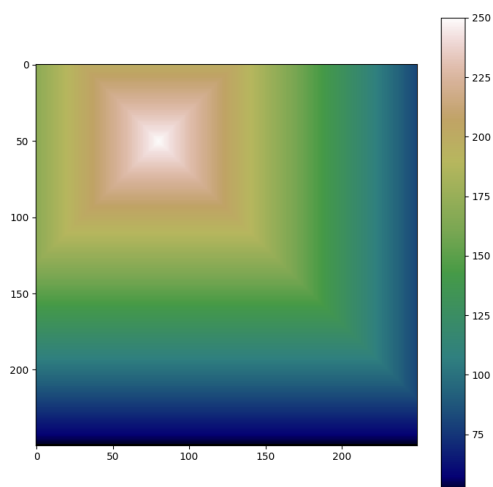
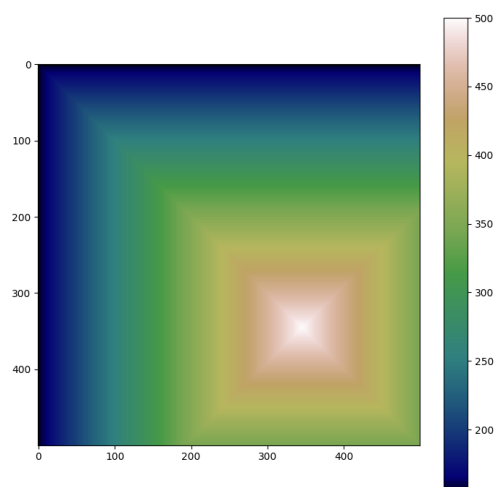


Рис. 3: Карта размера 500x500

## 3.2 Муравьиный алгоритм

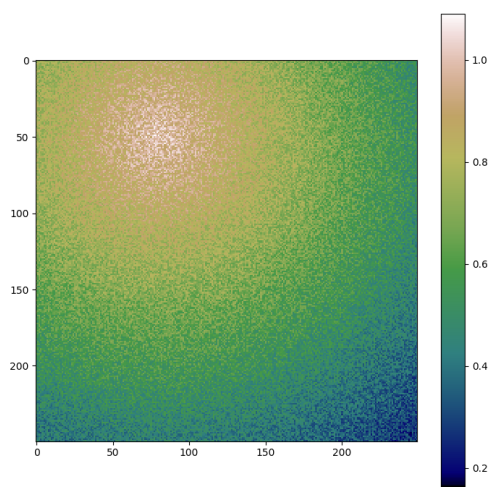


Карта 250x250, Цель (50, 80)

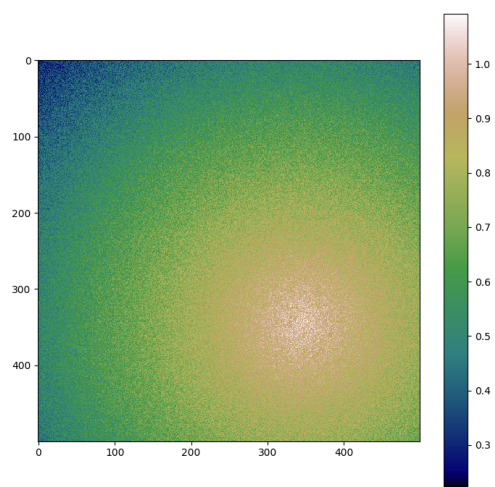


Карта 500x500, Цель (345, 345)

Рис. 4: Эвристики по расстоянию



Карта 250x250, Цель (50, 80)



Карта 500x500, Цель (345, 345)

Рис. 5: Начальная концентрация феромонов



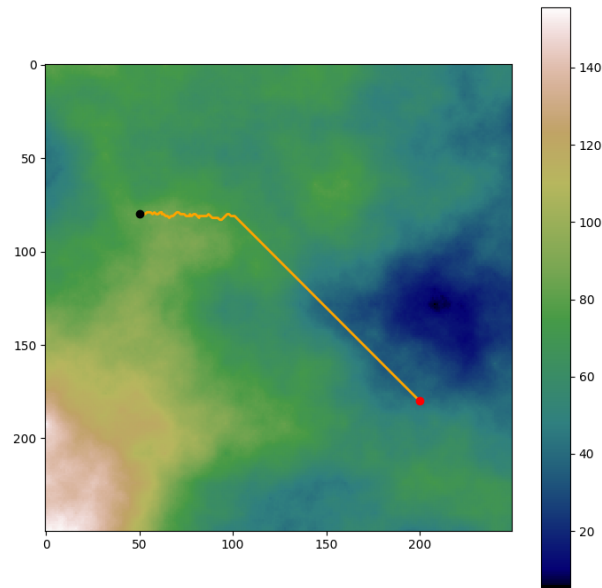


Рис. 6: Построенный путь для робота на карте размера 250x250

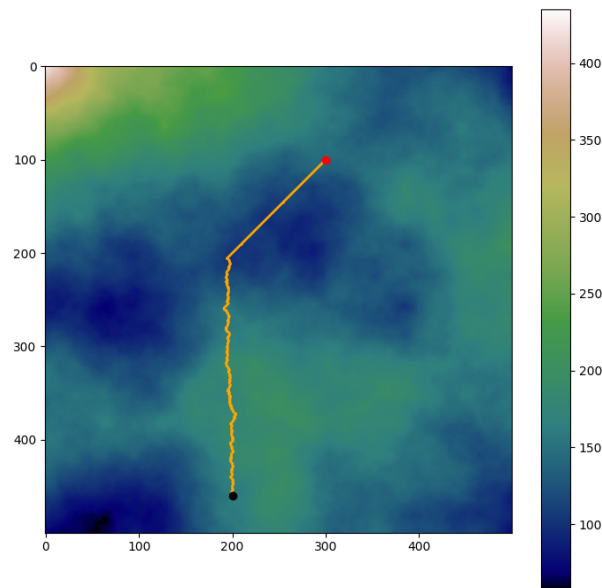


Рис. 7: Построенный путь для робота на карте размера 500x500

### 3.3 Коллективное распределение целей

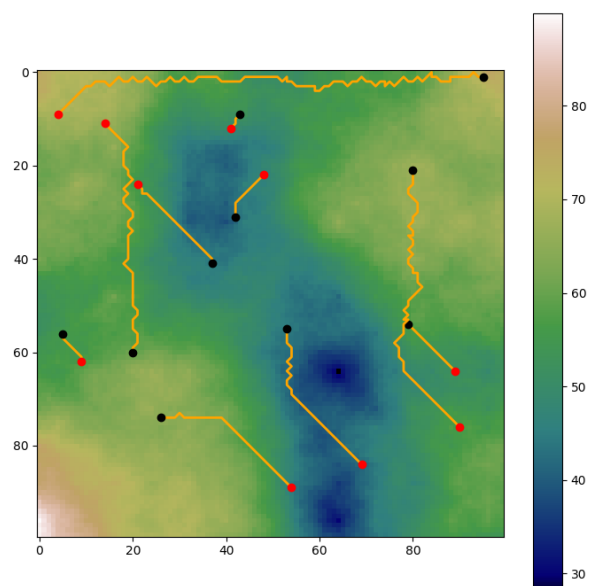


Рис. 8: Построенные пути для 10 роботов на карте размера 100x100

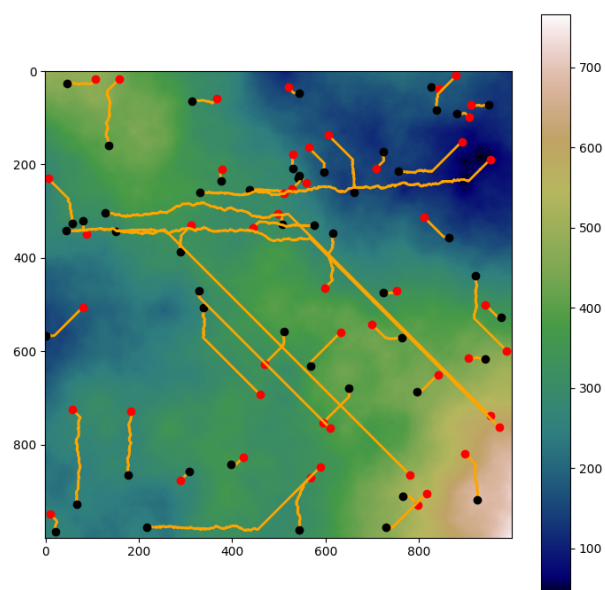


Рис. 9: Построенные пути для 50 роботов на карте размера 1000x1000

### 3.4 Замеры времени работы

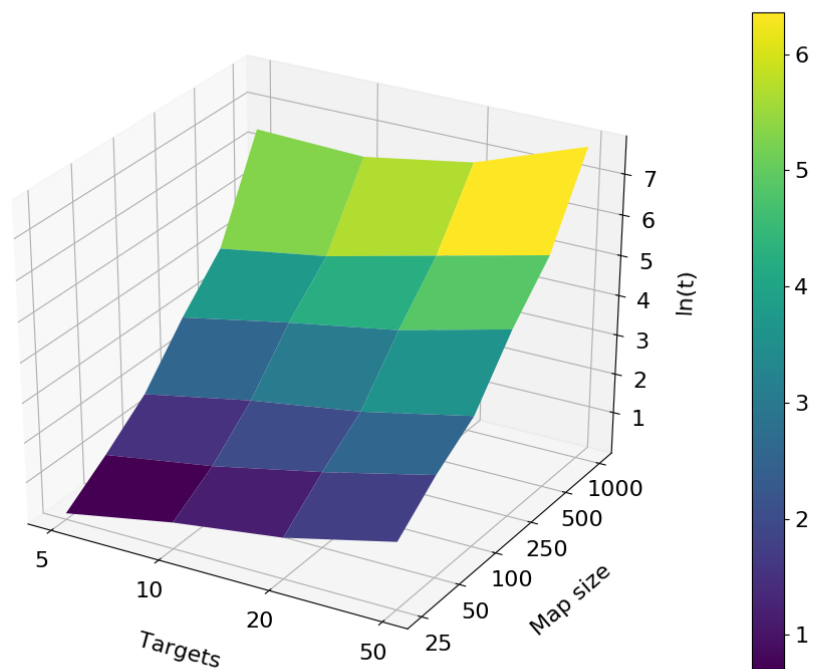


Рис. 10: Зависимость времени вычислений (с.) от размера карты и количества роботов

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

## 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     50,
15     10,
16     1.0,
17     1.0,
18     0.9,
19     50
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 lengths 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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
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

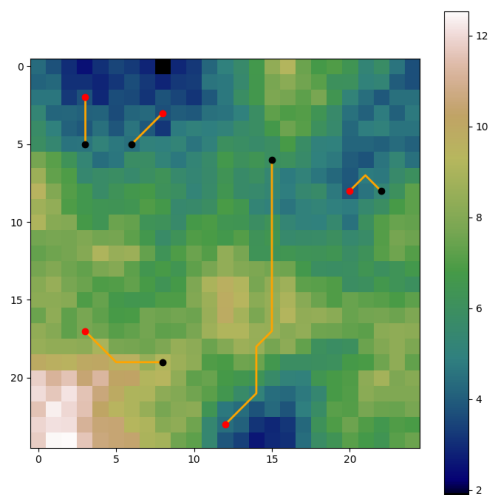
№ карты\Кол-во роботов	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
1	0.0	0.0	0.003	0.005
2	0.0	0.0	0.0	0.004
3	0.0	0.0	0.001	0.004
4	0.0	0.0	0.0	0.003
5	0.0	0.0	0.001	0.004
6	0.0	0.0	0.001	0.004
7	0.0	0.0	0.0	0.004
8	0.0	0.0	0.001	0.004
9	0.0	0.0	0.001	0.004
10	0.0	0.0	0.002	0.005
Средний элемент	0.0	0.0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

Размер карты: 1000x1000

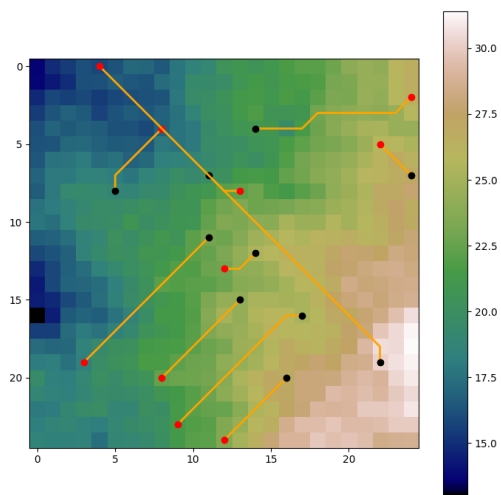


## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики решений

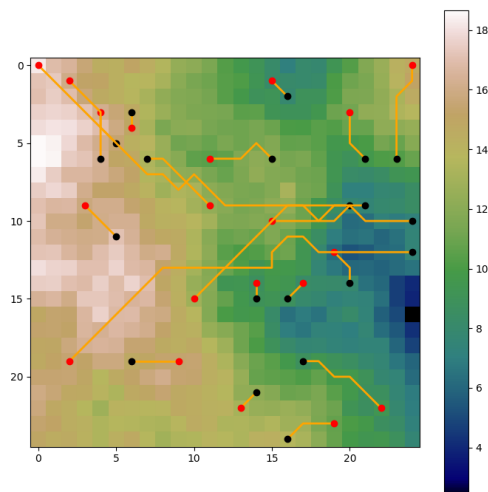
Ниже представлены построенные пути с средним временем выполнения для разного числа роботов и разных размеров матриц (черным отмечены роботы, красным - цели):



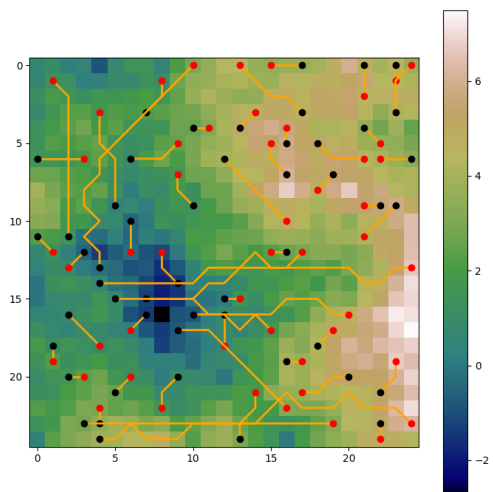
5 роботов



10 роботов

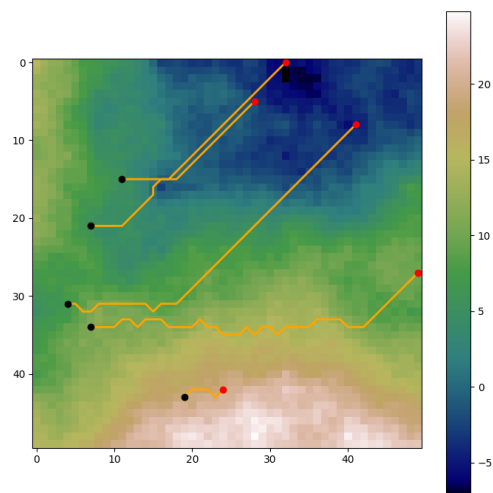


20 роботов

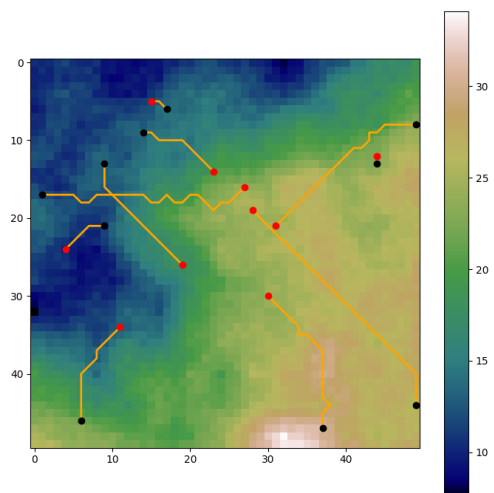


50 роботов

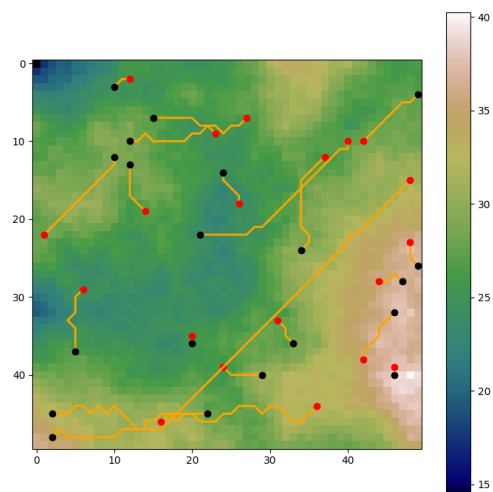
Размер карты: 25x25



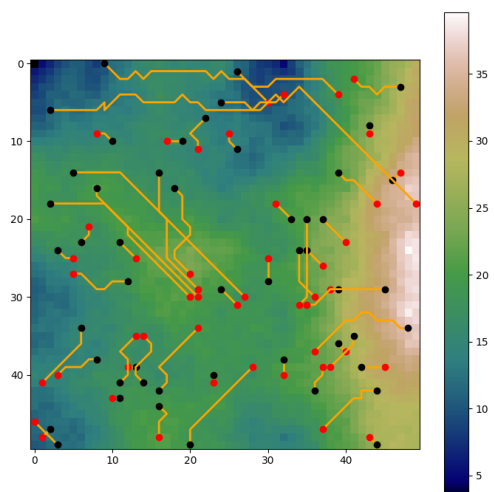
5 роботов



10 роботов

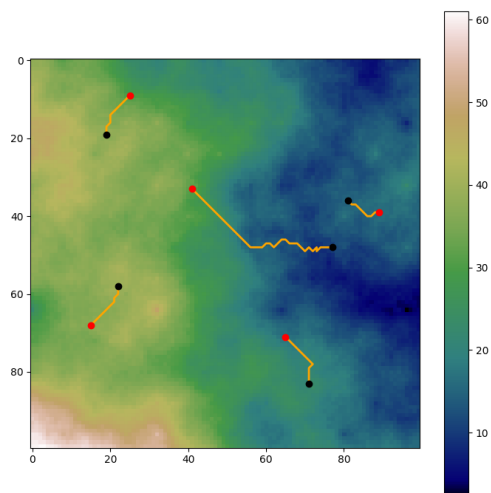


20 роботов

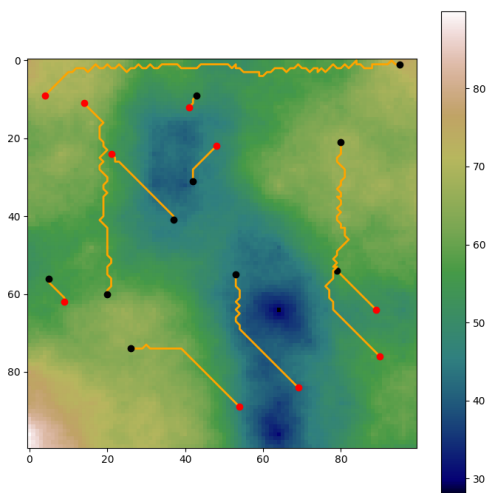


50 роботов

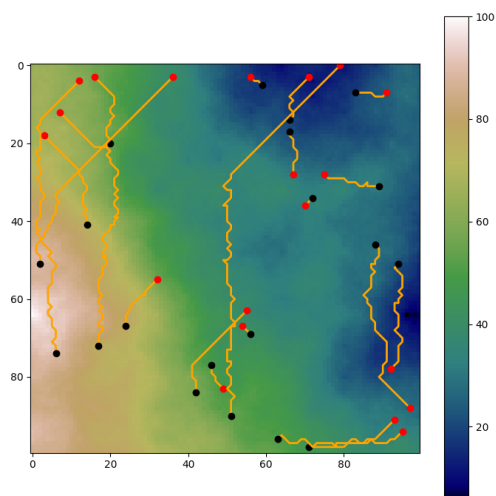
Размер карты: 50x50



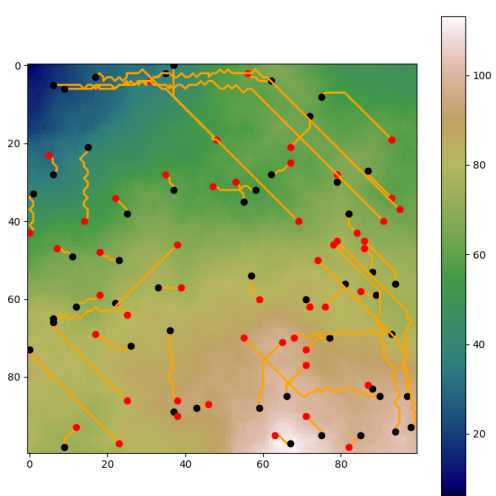
5 роботов



10 роботов

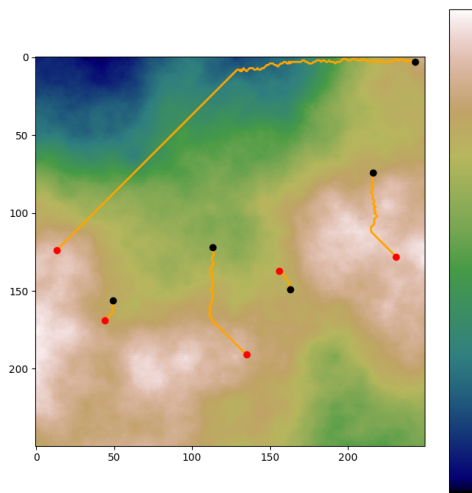


20 роботов

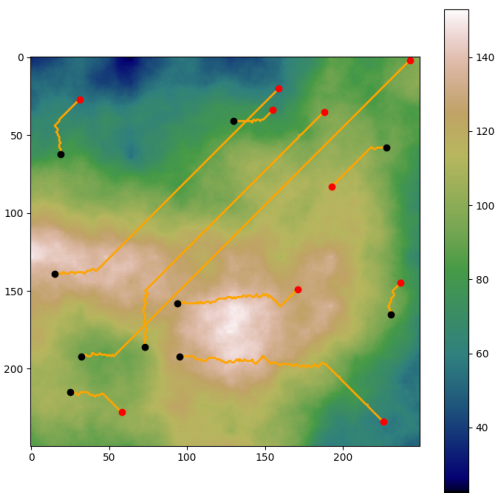


50 роботов

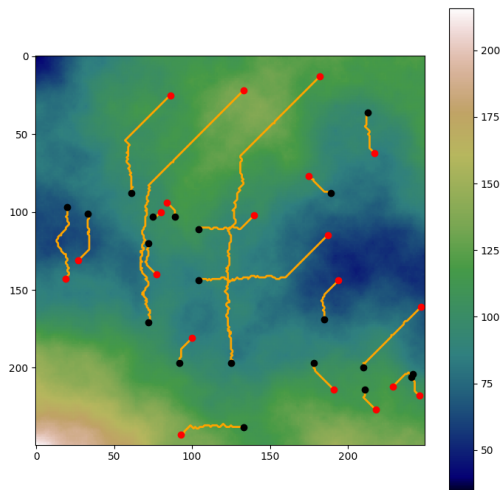
Размер карты: 100x100



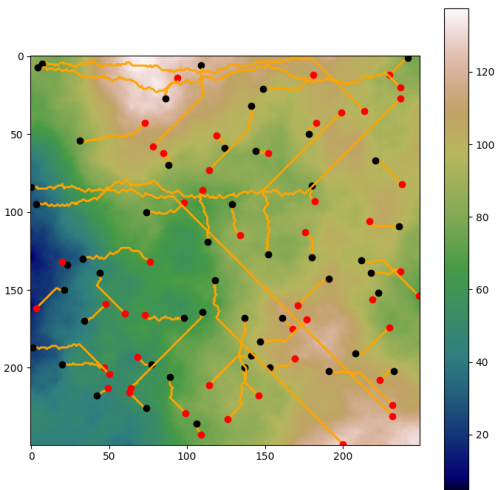
5 роботов



10 роботов

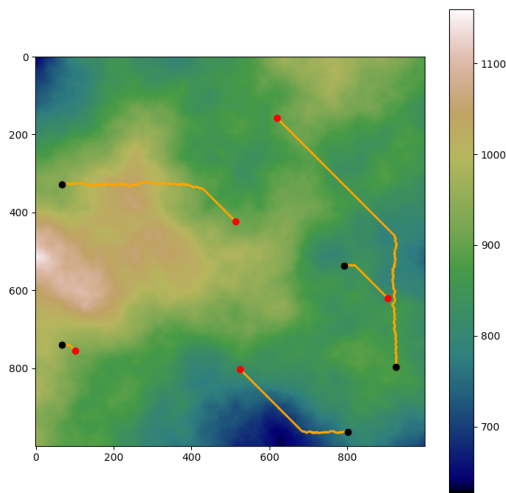


20 роботов

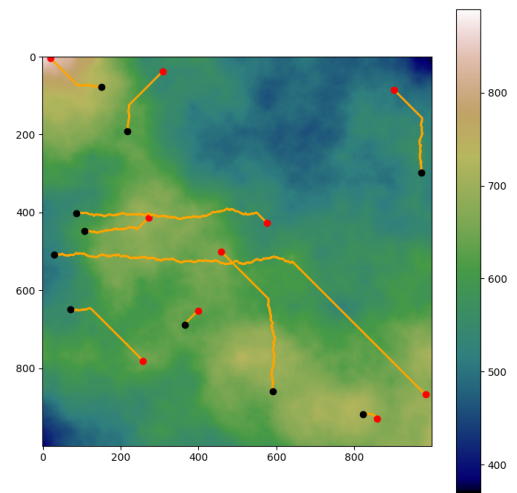


50 роботов

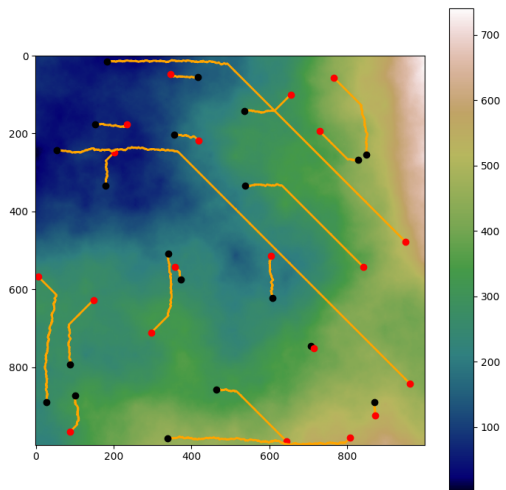
Размер карты: 250x250



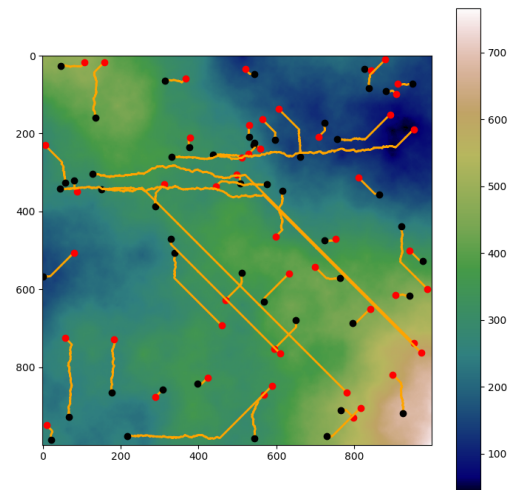
5 роботов



10 роботов



20 роботов



50 роботов

Размер карты: 1000x1000