

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра "Информатика и управление в технических системах"

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ

Методические указания

к выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Навигация мобильных робототехнических систем"
для студентов направления подготовки
27.03.04 – Управление в технических системах



Севастополь
СевГУ
2025

УДК [007.52:531.1]:519.218](076.5)
ББК 32.816:22.172я73
Л73

Р е ц е н з е н т:

В. А. Крамарь – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры
"Информатика и управление в технических системах"

Составители: А. А. Кабанов, А. Д. Ляшко

Л73 Локализация мобильных роботов с использованием фильтра Частиц : методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Навигация мобильных робототехнических систем" для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра "Информатика и управление в технических системах ; сост.: А. А. Кабанов, А. Д. Ляшко. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 17 с. – Текст : электронный.

Приводится описание лабораторной работы, целью которой является изучение и разработка методов локализации мобильных роботов на основе фильтра частиц (Particle Filter) для повышения точности и надежности определения их местоположения в реальном времени в различных условиях окружающей среды.

Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах.

УДК [007.52:531.1]:519.218](076.5)
ББК 32.816:22.172я73

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры "Информатика и управления в технических системах", протокол № 6 от 25 марта 2025 г.

© Кабанов А. А., Ляшко А. Д., сост., 2025
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ	4
2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2.1 Модель мира.....	5
2.2 Частицы	8
2.3 Измерение.....	8
2.4 Распределение частиц	9
2.5 Отсев частиц (Resampling).....	10
3 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.....	11
4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ	14
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	15
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	16

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

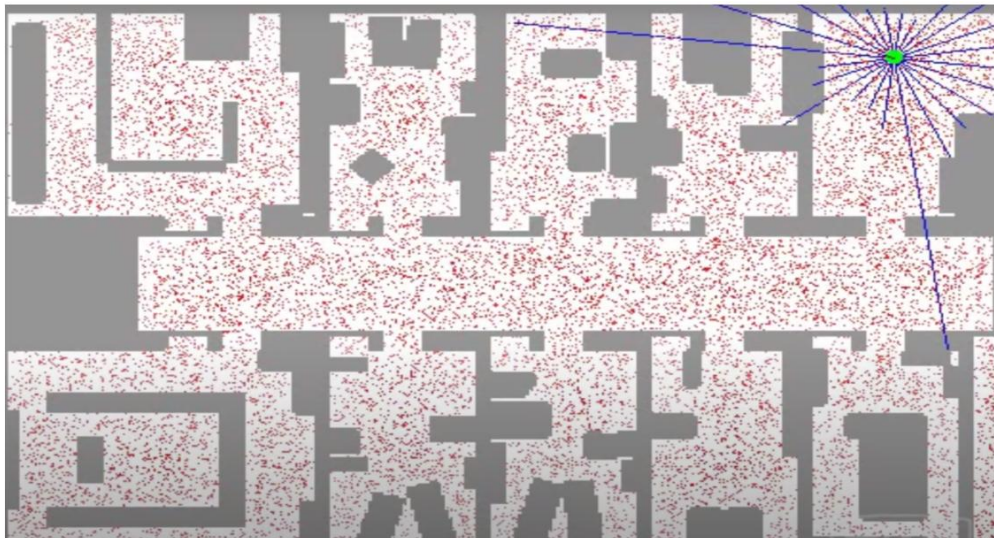
Целью данной работы является исследование и разработка методов локализации мобильных роботов на основе фильтра частиц (Particle Filter) для повышения точности и надежности определения их местоположения в реальном времени в различных условиях окружающей среды.

Все вычислительные процедуры и построения предлагается проводить с помощью математических пакетов MathCAD, MatLab, Octave, Python, которые обеспечивают высокую точность расчетов и удобство визуализации результатов.

2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В лабораторной работе № 2 вы узнали, что такое фильтр Калмана, и как он работает. Написали программу, которая описывала перемещение робота в двумерном пространстве, моделировала измерения его датчиков местоположения, и позволяла получить оценку местоположения и скорости движения робота в непрерывном пространстве. В этой лабораторной работе рассмотрим ещё один из методов решения задачи локализации – фильтр частиц (particle filter). Давайте посмотрим небольшую демонстрацию работы фильтра частиц.

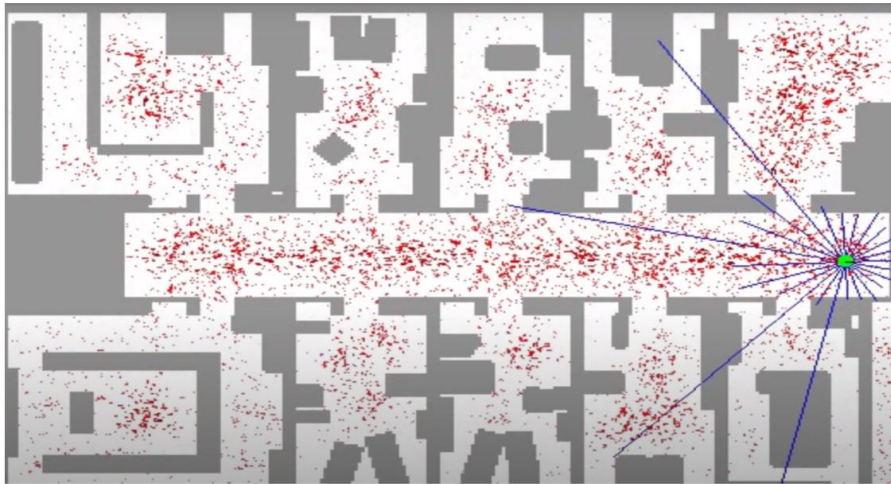
Шаг 1



На рисунке приведены результаты визуализации работы фильтра частиц, определяющего местоположение мобильного робота в офисном помещении. Сам робот обозначен на карте зелёной точкой. Робот оснащён сканирующим лазерным дальномером, что позволяет ему измерять дальность до окружающих его препятствий (стен). Для упрощения, на рисунке представлены лишь 10% лазерных лучей, измеряющих дальность до препятствий вокруг робота – они обозначены синим. Нетрудно заметить, что используется не самый точный датчик расстояния. Согласно полученным измерениям, некоторые из лазерных лучей

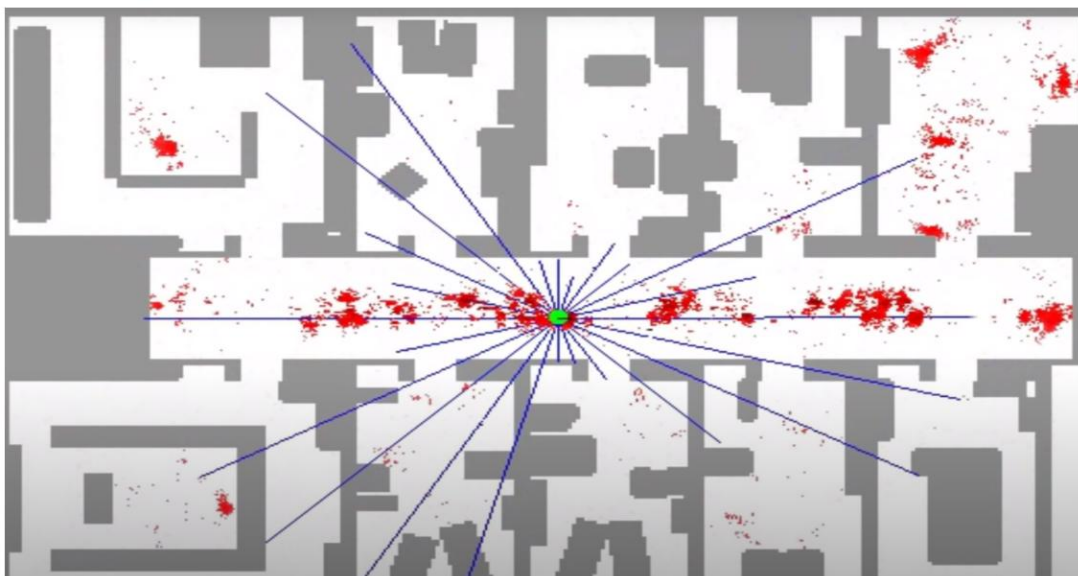
проходят сквозь стены! На практике такие ошибки – не редкость. Они могут быть вызваны целым рядом причин (помимо погрешности самого датчика), например переотражением лазерных лучей от зеркальных поверхностей. Красные точки на карте – теории о возможном местоположении робота (частицы). В начальный момент робот находится в состоянии полной неопределённости, и все эти теории случайным образом распределены по всей карте.

Шаг 2

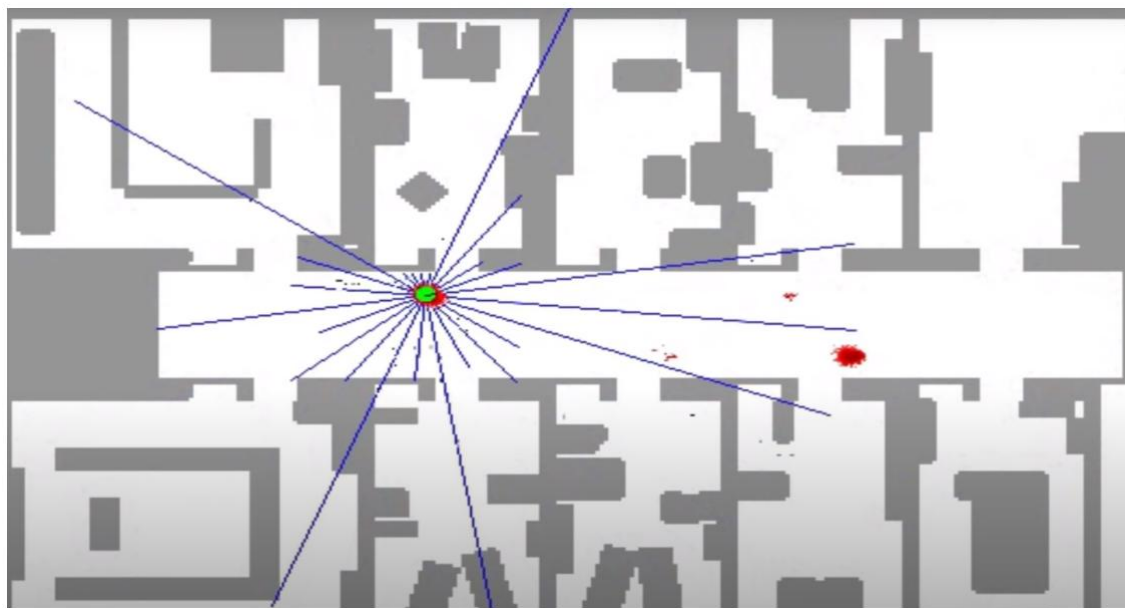


После того как робот выходит из начальной комнаты, распределение теорий (частиц) на карте значительно изменяется. Это происходит потому, что в каждый момент времени робот рассчитывает вероятность получения измеренных дальностей до препятствий в каждой из красных точек. Конечно же, геометрия помещений везде разная, и вероятность сделать полученные измерения в некоторых точках может настолько малой, что рассматривать эти точки как возможные координаты робота просто нецелесообразно.

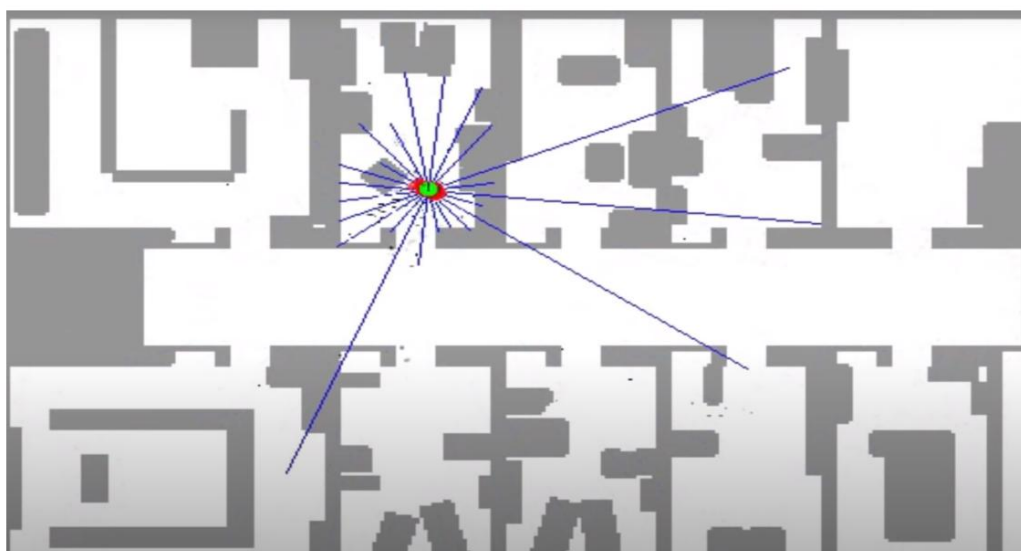
Шаг 3



По мере продвижения робота по коридору, мы видим, что теории о возможном местоположении робота начинают собираться в группы частиц, отмеченных красным цветом. Робот находится в одной из таких групп, но их всё ещё слишком много, чтобы мы могли с уверенностью сказать в какой именно.



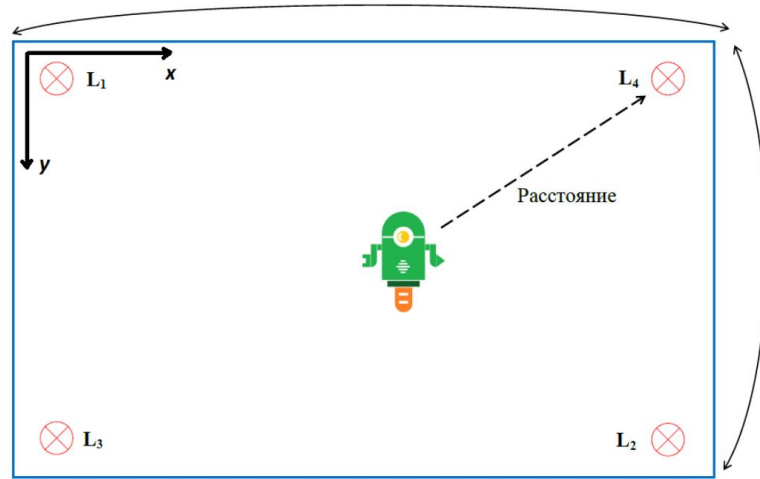
Через какое-то время остаётся только две большие группы частиц, но мы всё ещё не можем сказать, где именно находится робот. Это связано с тем, что обе группы находятся в главном коридоре, рядом со стеной и рядом с дверью в одну из комнат. В этом случае измерения, получаемые роботом, могут быть практически идентичными в обеих точках.



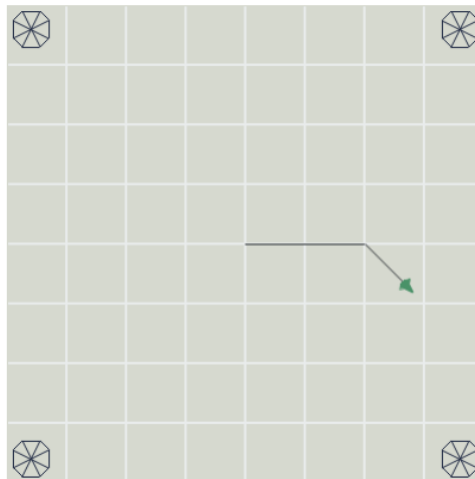
Стоит роботу войти в одну из комнат – неопределённость его местоположения достаточно быстро пропадает, ведь все комнаты в офисе отличаются. На первый взгляд эта демонстрация может выглядеть как магия или постановка, но на самом деле в её основе лежат чистая математика и теория вероятности.

2.1 Модель мира

Рассмотрим основные принципы работы фильтра частиц на простом примере. Допустим, что наш робот перемещается в циклическом двумерном пространстве.



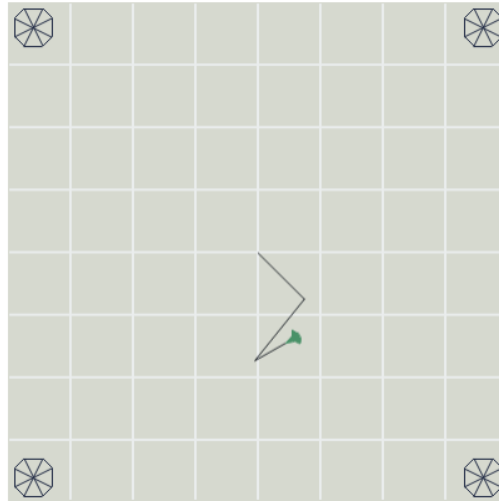
Под циклическостью пространства будем понимать, что, если робот выходит за левую границу карты – он выходит с правой границы. То же самое с верхними границами карты. Для успешной локализации роботу нужно осуществлять какие-нибудь измерения. Пусть в нашем мире будут четыре ориентира, расположенные по углам. Робот может в любой момент времени измерить дальность до каждого из этих ориентиров и, таким образом, понять, где именно он находится внутри нашего мира. Давайте визуализируем перемещение нашего робота в двумерном мире.



На рисунке зелёным цветом обозначен робот. Также обозначены четыре ориентира, расположенные по углам мира. Для удобства будем также отображать траекторию движения робота. Создадим робота с координатами 200, 200

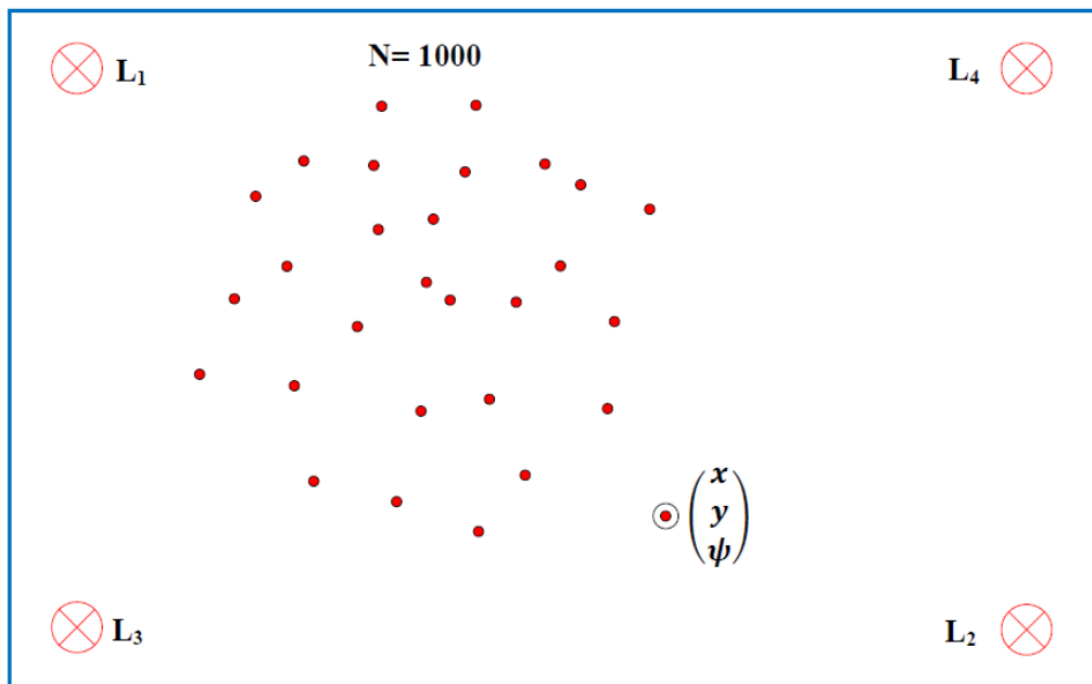
и нулевым углом курса, а затем задать ему последовательные команды движения:

- разворот на 45 град. и движение 50 м. вперёд
- разворот на 90 град. и движение 60 м. вперёд
- разворот на 30 град и движение на 30 м. назад



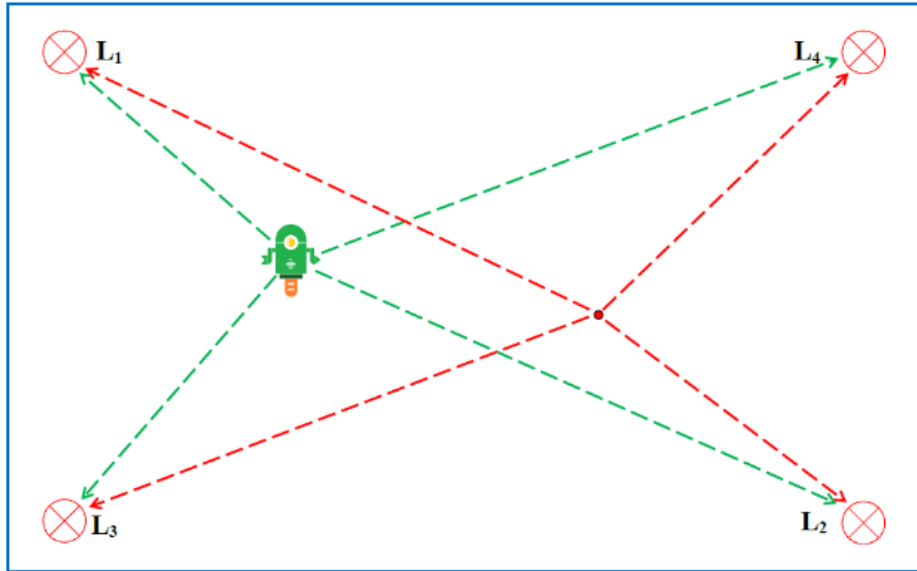
2.2 Частицы

Каждая частицы (отмеченная на рисунке красным цветом) – это, по сути, маленький виртуальный робот. У каждой частицы, также как и у робота, есть три параметра – координаты x, y и угол курса ψ . Для корректной работы фильтра обычно требуется очень много частиц



2.3 Измерение

Робот может измерять дальности до каждого из четырёх ориентиров, расположенных в нашем двумерном мире. Для того чтобы это учитывать, мы добавим каждой частице ещё один параметр – вес частицы.



$$f(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1(z_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

z_i - измерение частицы

μ – измерение робота

σ^2 - ошибка измерения

Вес частицы будет характеризовать, насколько точно измерения каждой отдельной частицы совпадают с измерениями местоположения робота. Вероятность частицы получить такое же измерение, которое получил робот можно рассчитать, используя формулу нормального закона распределения случайно величины. В качестве математического ожидания будем использовать измерения робота, а в качестве дисперсии – ошибку измерения. В нашем примере робот осуществляет четыре измерения дальностей до соответствующих ориентиров. В этом случае вес частицы можно рассчитать, как простое перемножение вероятностей всех измерений.

$$\omega_j = \prod f(z_i) = f(z_1) \cdot f(z_2) \cdot f(z_3) \cdot f(z_4)$$

Для статистического сравнения измерений используется метод `measurement_prob()`.

```
function prob = measurement_prob(robot, measurement, landmarks)
    prob = 1.0;
```

```

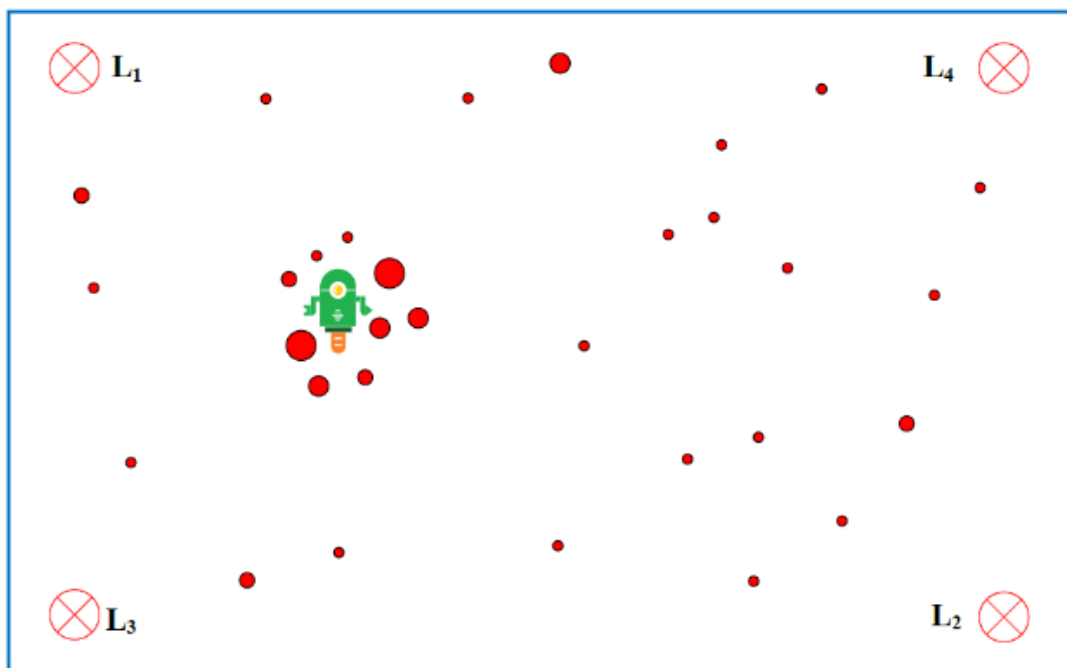
for i = 1:size(landmarks, 1)
    dist = sqrt((robot.x - landmarks(i,1))^2 + (robot.y - landmarks(i,2))^2);
    prob = prob * normpdf(dist, measurement(i), robot.sense_noise);
end
end

```

Этот метод рассчитывает вероятность частицы сделать такие же измерения, которые получил робот – вычисляет вес частицы. На вход метода подаётся массив измерений робота, состоящий из четырёх измерений дальности до ориентиров.

2.4 Распределение частиц

Если мы создадим большое множество частиц, и рассчитаем вес каждой из них, то мы увидим, что частицы с большим весом сосредоточены ближе к реальному местоположению робота.



В этом случае становится очевидным, что для решения задачи локализации нас интересуют частицы с большим весом, ведь вес частицы прямо пропорционален вероятности того, что её местоположение совпадает с местоположением робота.

2.5 Отсев частиц (Resampling)

Создадим множество из N частиц, каждая из которых обладает весом ω_i .

$$\begin{cases} (x_1, y_1, \psi_1) \rightarrow \omega_1 \\ (x_2, y_2, \psi_2) \rightarrow \omega_2 \\ \vdots \\ (x_N, y_N, \psi_N) \rightarrow \omega_N \end{cases}$$

Вес каждой частицы может иметь совершенно разные значения, и нас интересует только их вес относительно друг друга. Произведём нормализацию веса всех частиц, чтобы их суммарный нормализованный вес частиц равнялся 1.0.

Суммарный вес всех частиц:

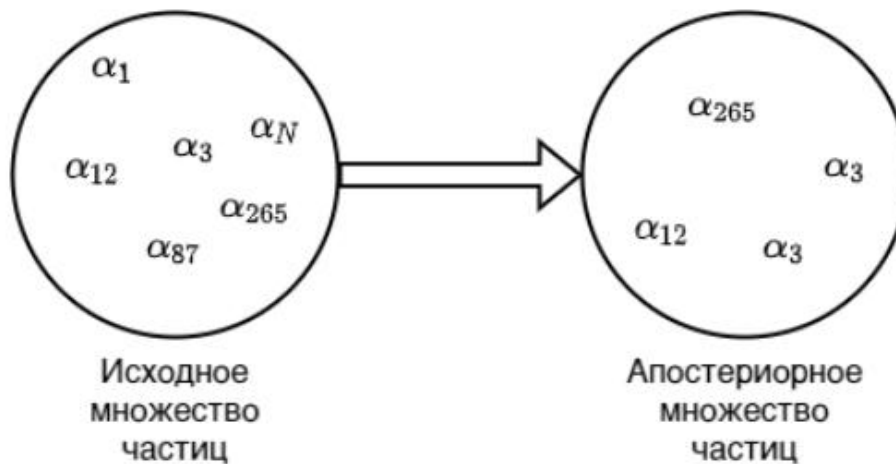
$$\Omega = \sum \omega_i$$

Нормализованный вес частиц:

$$\alpha_i = \frac{\omega_i}{\Omega} \rightarrow \begin{cases} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{cases} \quad \sum \alpha_i = 1$$

В этом случае, нормализованный вес α_i характеризует вероятность нахождения робота в координатах частицы.

Алгоритм отсева должен из исходного множества N частиц сформировать новое (апостериорное) множество, размер которого также равен N . При этом у каждой из частиц исходного множества должен быть шанс попасть в апостериорное множество, равный её нормализованному весу.



Заметим, что частица α_3 присутствует в апостериорном множестве дважды. Это логично, ведь если размер множества должен остаться без изменений, а переходят в него наиболее крупные частицы – это множество неизбежно будет содержать несколько копий крупных частиц.

3 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1

Создать робота в координатах 200, 200 с начальным углом курса равным 0. Дать команду роботу проехать 50 метров прямо, а затем повернуть на 90 градусов и проехать еще на 100 метров. Нужно написать функции: для измерения расстояний до меток, для перемещения робота, для вычисления вероятности измерения. Выведите текущие координаты робота и его угол курса, а также полученные в последней точке измерения дальности до ориентиров. В рамках этой задачи шумы движения, разворота и измерений не учитываются.

Координаты ориентиров.

```
landmarks = [20.0, 20.0; 380.0, 380.0; 20.0, 380.0; 380.0, 20.0];
```

Размер мира

```
world_size = 400.0
```

```
x = 200;
```

```
y = 200;
```

```
orientation = 0;
```

```
forward_noise = 0.0;
```

```
turn_noise = 0.0;
```

```
sense_noise = 0.0;
```

```
% Функция для измерения расстояний до меток
```

```
function Z = sense(x, y, landmarks, sense_noise)
```

```
    Z = zeros(size(landmarks, 1), 1);
```

```
    for i = 1:size(landmarks, 1)
```

```
        dist = norm([x - landmarks(i, 1), y - landmarks(i, 2)]) + normrnd(0.0, sense_noise);
```

```
        Z(i) = dist;
```

```
    end
```

```
end
```

Ответ на первую задачу:

```
[x=250 y=300 orient=1.5708]
```

```
362.35 152.64 243.52 308.71
```

Задание 2

Создать робота в координатах 200, 200 с начальным углом курса равным 0. Установите следующие параметры шумов: шум движения 5.0 м.; шум разворота 0.1 рад.; шум измерения 10 м. После этого дайте роботу команду проехать 50 метров прямо, а затем повернуть на 90 град. и проехать ещё 100 метров. После этого выведите текущие координаты робота и его угол курса, а также полученные в последней точке измерения дальности до ориентиров.

```
forward_noise = 5.0;
```

```
turn_noise = 0.1;
```

```
sense_noise = 10.0;
```

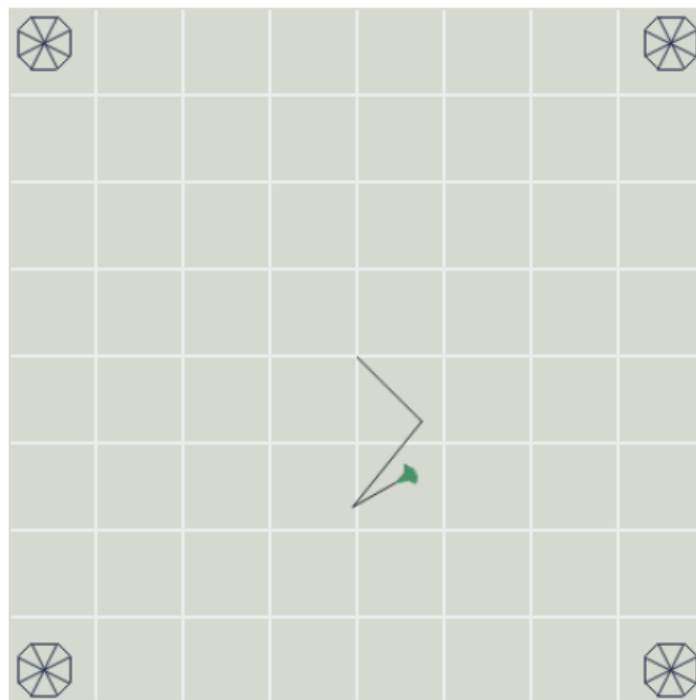
Задание 3

Создать робота с координатами 200, 200 и нулевым углом курса, а затем задать ему последовательные команды движения:

- разворот на 45 град. и движение 50 м. вперёд
- разворот на 90 град. и движение 60 м. вперёд
- разворот на 30 град и движение на 30 м. назад

Используйте при этом те же параметры шумов, что и раньше: шум движения 5.0 м; шум разворота 0.1 рад; шум измерения 10 м.

Траектория движения робота при этом будет выглядеть так:



После этого вам нужно создать из 1000 частиц, случайно распределённых по карте и задать для каждой из этих частиц аналогичные команды движения. Как при этом изменится распределение частиц на карте?

Задание 4

Создайте робота с координатами 150, 280.

Затем создайте частицу с координатами 280, 150 и рассчитайте вес этой частицы на основе измерений роботом дальности до четырёх ориентиров.

Шум движения 5.0 м.; шум разворота 0.1 рад.; шум измерения 10 м.

Задание 5

Написать программу, реализующую перемещение робота по заданному алгоритму и расчёт ошибки оценки местоположения робота.

Алгоритм программы:

- Начальные координаты: 200, 200, 0
- Два измерения
- Движение вперёд на 100 м.
- Измерение
- Поворот на 90 град. влево и движение вперёд 75 м.
- Измерение
- Поворот на 60 град. влево и движение вперёд 35 м.
- Измерение
- Поворот на 30 град. вправо и движение вперёд 50 м.
- Измерение
- Поворот на 210 град вправо и движение вперёд 120 м.
- Измерение
- Поворот на 90 град вправо и движение вперёд 100 м.
- Два измерения
- Расчёт ошибки оценки

Используйте следующие параметры шумов: шум перемещения 5.0 м; шум разворота 0.1 рад; шум измерений 10.0 м. Число частиц выберите самостоятельно.

В процессе выполнения задания вы можете столкнуться с тем, что в некоторых запусках программы не получается получить адекватную оценку местоположения робота. Это связано с тем, что алгоритм фильтра частиц сильно зависит от функций генерации случайных чисел. При создании начального распределения частиц – их может просто не оказаться рядом с роботом и со схожей ориентацией. На практике для предотвращения возникновения таких случаев используют большое количество частиц, чтобы вероятность сбоя была статистически незначительной. А в случае наличия сбоя – временно отключают этап измерений. Через какое-то время движения робот снова вернётся к состоянию полной неопределённости и можно будет начать решение задачи локализации сначала.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

В отчёте по лабораторной работе должны быть отражены цель, предварительные математические построения и расчёты, необходимые сведения о методах решения рассматриваемых задач и средствах системы Matlab, Python, тексты программ, схемы моделирования, численные и графические результаты расчётов и построений, выводы по работе.

Защита результатов лабораторной работы производится за компьютером при наличии работающих программ и полностью оформленного отчёта. В ходе защиты студент может получить дополнительные теоретические вопросы и практические задания по существу работы.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные принципы лежат в основе работы фильтра частиц?
2. Какие данные используются в фильтре частиц для определения положения робота?
3. Как происходит инициализация частиц в алгоритме фильтра частиц?
4. Каким образом обновляются частицы в процессе работы фильтра частиц?
5. Как осуществляется оценка состояния робота с использованием фильтра частиц?
6. Какие проблемы могут возникнуть при использовании фильтра частиц в навигации мобильных роботов?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов: учебно-методическое пособие / С. М. Власов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2017. — 169 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/110461> (дата обращения: 02.04.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Баланов, А. Н. Машинное обучение и искусственный интеллект : учебное пособие для вузов / А. Н. Баланов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2025. — 172 с. — ISBN 978-5-507-52891-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/462248> (дата обращения: 14.04.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Peter Corke. Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB // Springer, 2011, ISBN 978-3-642-20143-1, 570 p.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ

Методические указания

Составители: **Кабанов** Алексей Александрович,
Ляшко Александр Дмитриевич

В авторской редакции