

Алгоритмические основы робототехники

Лекция 1: Введение в робототехнику

Юрий Литвинов
y.litvinov@spbu.ru

17.02.2026

Организационное

- ▶ Семинары с одной вводной лекцией, две пары в неделю
- ▶ В конце устный экзамен и аттестация по докладам
 - ▶ Два доклада на полчаса
 - ▶ Два вопроса без подготовки
- ▶ Материалы лекций, темы докладов на
<https://hwproj.ru/courses/50079>
- ▶ Балльная система
 - ▶ 5 баллов за доклад
 - ▶ 10 баллов за экзамен
 - ▶ Итоговая оценка: ($\text{<сумма оценок>} - 5$) * 10
- ▶ Коммуникации — в чате потока
 - ▶ Также пишите в личку

Зачем этот курс

- ▶ Робототехника в общем смысле — очень перспективна
 - ▶ Беспилотные автомобили, БПЛА, «интернет вещей»
- ▶ Курс — краткий обзор того, что вообще бывает, какая наука за этим стоит, чем можно заниматься в магистратуре
- ▶ Немного общего низкоуровневого программирования, что никогда не лишне
- ▶ Речь в основном про наземные мобильные роботы
- ▶ Фокус на алгоритмике:
 - ▶ Не про паяльники и резьбу по дереву, не про теорию управления, не про искусственный интеллект
- ▶ Кому нужны робототехники-программисты: «Сколтех», ресурсный центр «Робототехника и БАС» СПбГУ, «Геоскан», АО «Кама», «Кибертех», ЦНИИ РТК, ...

Что будет в курсе

- ▶ Кинематика мобильного робота: виды и конфигурации колёс, «стандартная» трёхколёсная тележка, другие варианты кинематики (в т.ч. шагающие роботы)
- ▶ Сенсорика: типы и физические принципы работы сенсоров, работа с ошибками измерений.
- ▶ Отдельно видеокамеры, стереокамеры, сенсоры глубины
- ▶ Алгоритмы машинного зрения, сегментация
- ▶ Локализация, behavior-driven алгоритмы, belief representation, представление карты
- ▶ SLAM
- ▶ Планирование и «стратегическая» навигация
- ▶ Аппаратные робототехнические платформы, от Arduino до KUKA
- ▶ Программные платформы, ROS

Робототехника? Какая робототехника?

Робототехника — наука об автономных технических системах, или о разработке и применении роботов.

- ▶ Слово «Робот» придумал Карел Чапек ещё в 1920
- ▶ Часто под роботами понимают вообще автоматические машины для замены человека в труде
- ▶ Следуя традициям СПбГУ, будем понимать под роботами таковые машины с обратной связью
- ▶ Есть ещё кибернетика — наука об управлении, раздел прикладной математики

Какие роботы бывают

- ▶ Стационарные (манипулятивные) роботы
 - ▶ Промышленные роботы-манипуляторы
 - ▶ Дельта-роботы
- ▶ Мобильные роботы
 - ▶ Колёсные (гусеничные)
 - ▶ БПЛА, подводные/надводные
 - ▶ Шагающие



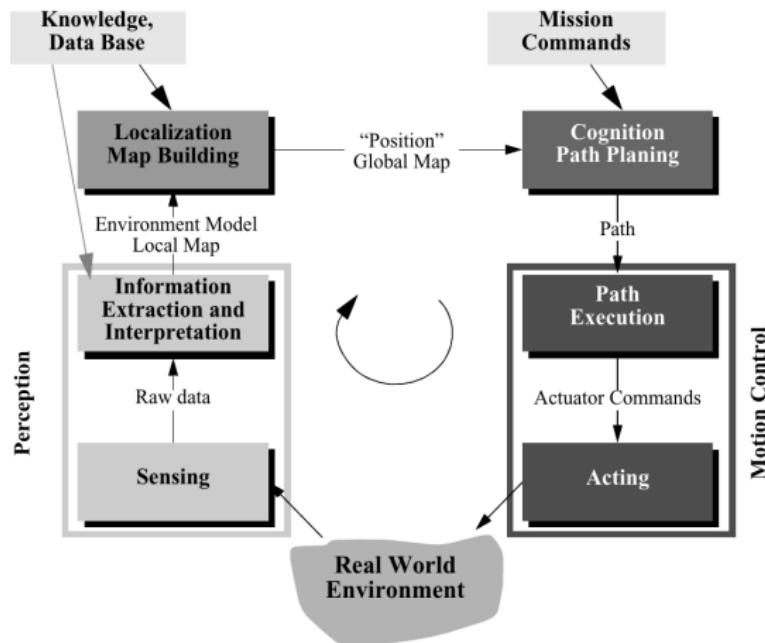
Робототехника на матмехе

- ▶ Образовательный конструктор ТРИК
- ▶ Среда программирования TRIK Studio/QReal:Robots
- ▶ Ресурсный центр «Робототехника и БАС»
- ▶ Кафедра теоретической кибернетики



Общая схема управления роботом

Sense-compute-control



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Базовые схемы управления

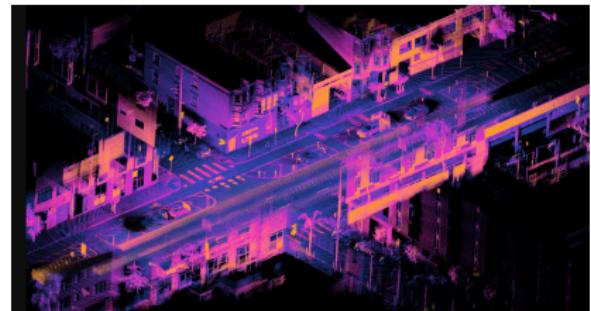
- ▶ Задача: имея установочное значение, вырабатывать управляющее воздействие так, чтобы система оставалась к установочному значению как можно ближе
- ▶ Релейный регулятор: скачкообразное переключение управляющего воздействия при достижении порогового значения
- ▶ Пропорциональный регулятор: управляющее воздействие пропорционально отклонению от установочного значения
- ▶ Пропорционально-дифференциальный регулятор: управляющее воздействие пропорционально отклонению от установочного значения и скорости изменения отклонения
- ▶ ПИД-регулятор: управляющее воздействие пропорционально всему выше и длительности отклонения

Демо

Демо на TRIX Studio

Продвинутые подходы

- ▶ Behavior-driven
 - ▶ Условие-реакция
 - ▶ Конечные автоматы
 - ▶ Дерево поведений
- ▶ Локализация и планирование
 - ▶ Локализация по ориентирам
 - ▶ SLAM



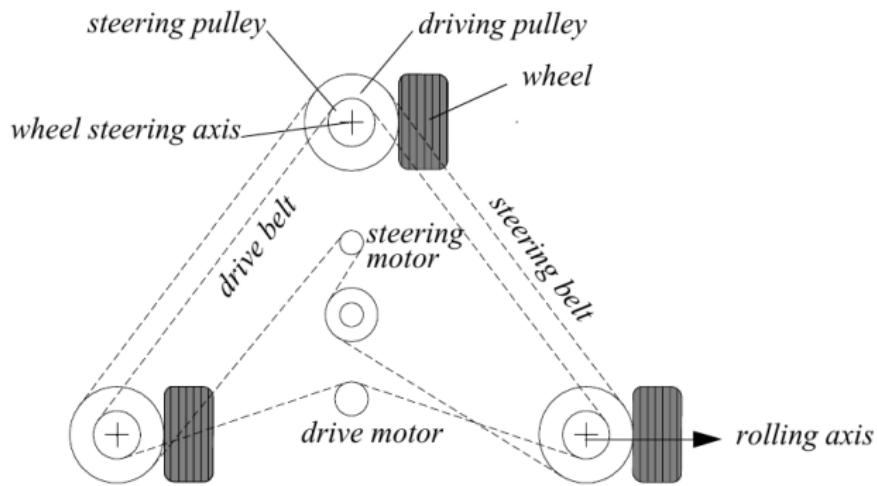
© https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping

Дьявол кроется в деталях

Кинематика робота

- ▶ Виды задач
 - ▶ Прямая кинематическая задача — есть модель и набор управляющих воздействий, какое положение робота займёт в пространстве?
 - ▶ Обратная кинематическая задача — есть модель и целевое положение робота, каков набор управляющих воздействий?
- ▶ Степени свободы — сколько независимых параметров описывают состояние модели
 - ▶ Не всегда всеми ими можно управлять
 - ▶ Голономность
- ▶ Модели:
 - ▶ Шагающие — 2, 4, 6 ног
 - ▶ Колёсные — четыре известных вида колеса, включая «шведские» и шар, более десятка известных конфигураций колёсных тележек
 - ▶ «Автомобильное» управление (Аккермана), дифференциальное («танковое»), омниколёса, «Synchro drive»

Пример: синхропривод



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Поза робота

Для трёхколёсной дифференциальной тележки

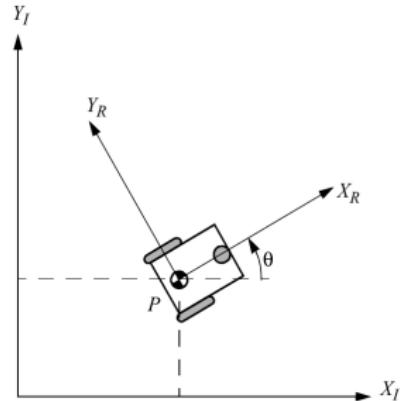
- ▶ Глобальная система координат
- ▶ Поза:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$

- ▶ Прямая кинематическая модель:

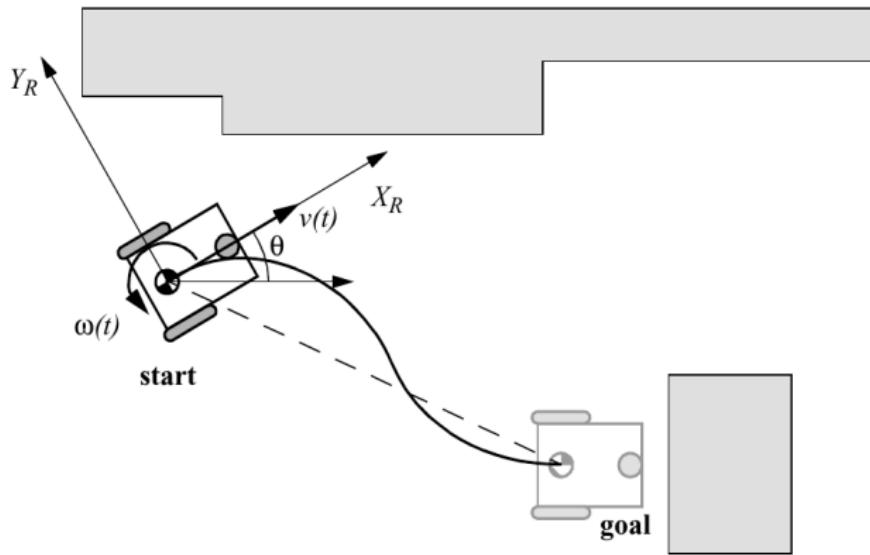
$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2)$$

- ▶ Каждая модель накладывает ограничения на возможные движения



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh,
Introduction to Autonomous Mobile
Robots

Задача управления



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

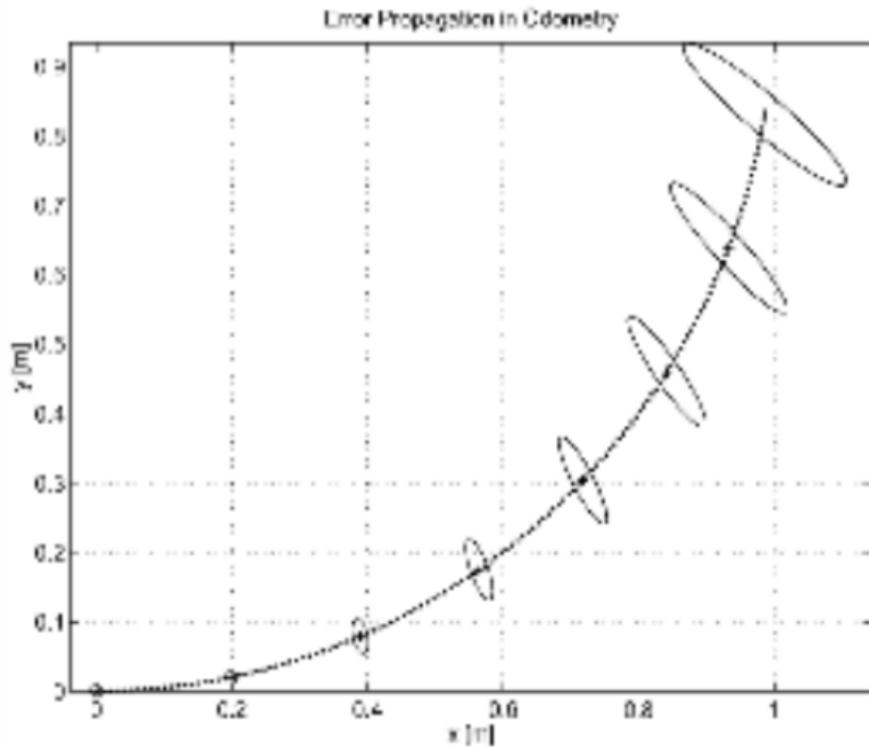
Виды сенсоров

- ▶ Тактильные: кнопки, бамперы, неконтактные датчики
- ▶ Энкодеры, разных видов: оптические, магнитные и т.п.
- ▶ Датчики направления: компас, гироскоп, инклинометр
- ▶ Датчики ориентиров: ГНСС, RF-метки и т.п.
- ▶ Активные расстояния: УЗ, ИК, лазерные, радар, структурный свет
- ▶ Движения/скорости: допплеровские радар или звуковые
- ▶ Машинное зрение: камеры разных видов, стереопары, лидары

Трудности

- ▶ Шумы, фильтрация
 - ▶ Случайные и систематические ошибки
 - ▶ Скользящее среднее, медианный фильтр, фильтр Калмана
- ▶ Sensor aliasing
- ▶ Представление неопределённости
 - ▶ Одна гипотеза, несколько гипотез
- ▶ Sensor fusion
- ▶ Распространение ошибки

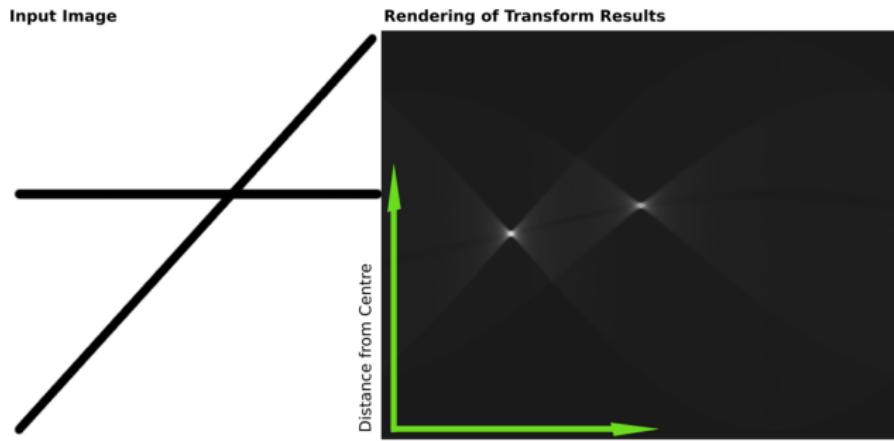
Распространение ошибки



«Высокоуровневая» сенсорика

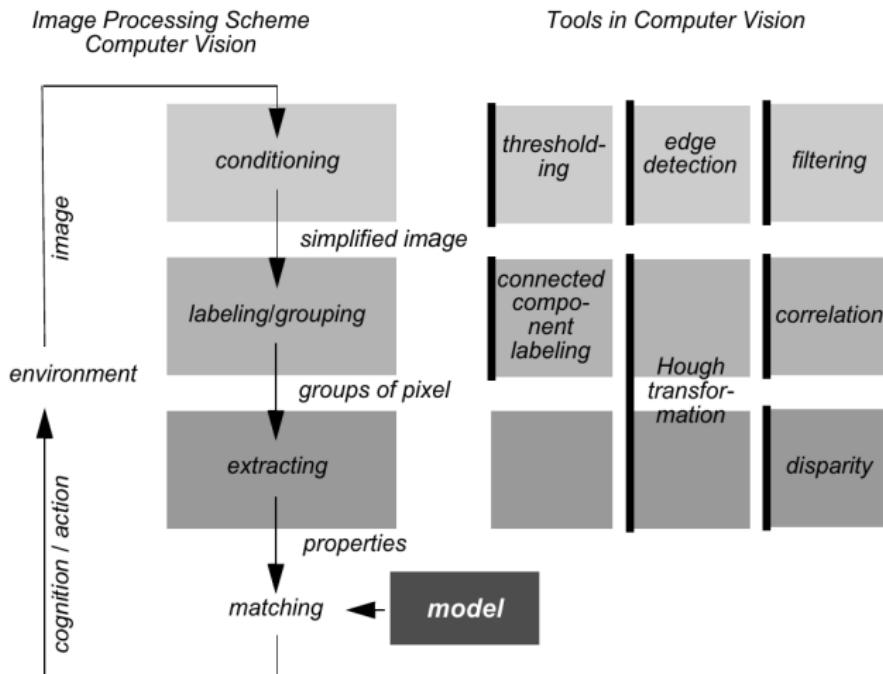
- ▶ Depth from focus
- ▶ Feature-based-стерео — много разных алгоритмов сопоставления точек на кадрах с разных ракурсов
 - ▶ Дескриптор — некое характерное представление точки, не зависящее от ракурса
- ▶ Оптический поток (тоже feature-based), визуальная одометрия
- ▶ Поиск границ, поиск геометрических примитивов
 - ▶ Лапласиан гауссиана, оператор Кэнни, преобразование Хафа
- ▶ Сегментация, кластеризация (сейчас в основном машобуч)
 - ▶ DBSCAN, RANSAC
- ▶ Whole-image features — гистограммы, «отпечатки»

Преобразование Хафа



© https://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Хафа

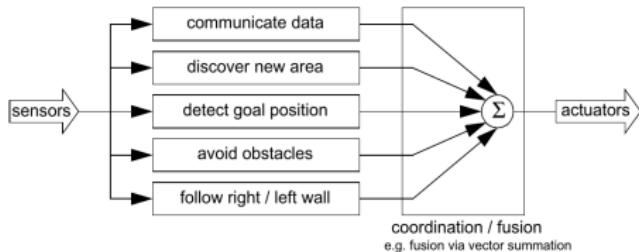
Общая схема сенсорики на CV



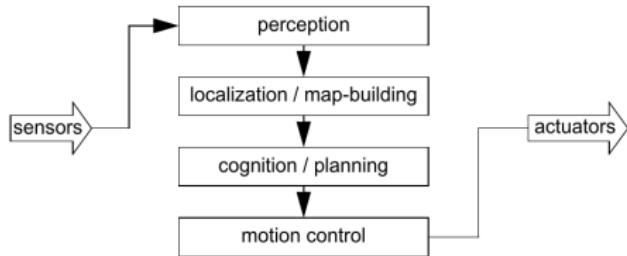
© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Задача навигации

Behavior-driven-навигация:

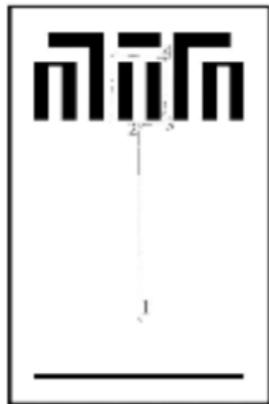


Навигация по карте:



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Определение положения



Path of the robot

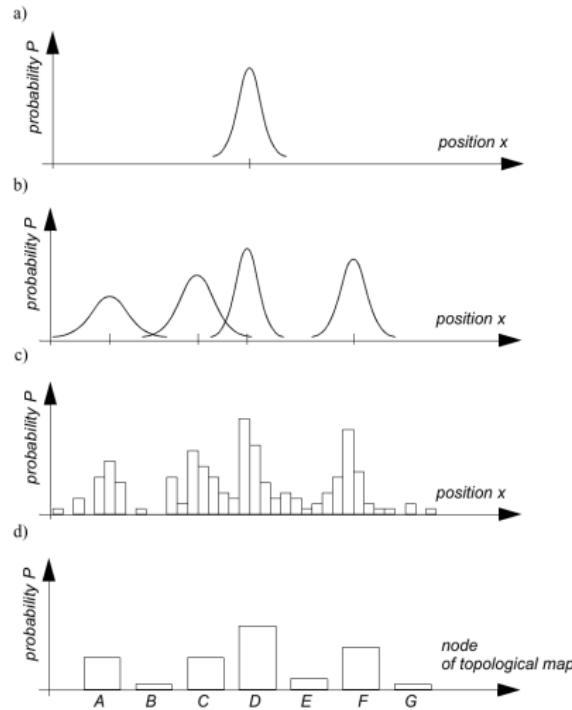


Belief states at positions 2, 3, and 4



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

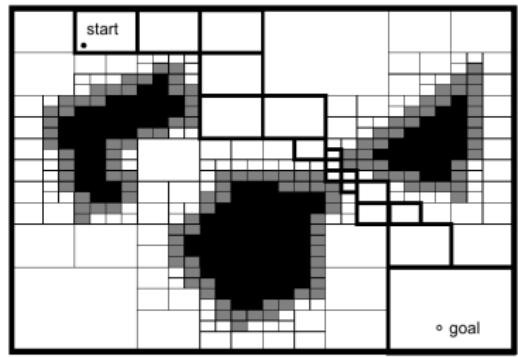
Belief representation



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Представление карты

- ▶ Непрерывное — геометрические примитивы
- ▶ Дискретное:
 - ▶ Сетка
 - ▶ Сетка с переменным размером ячейки
 - ▶ Топологическое (в виде графа локаций)

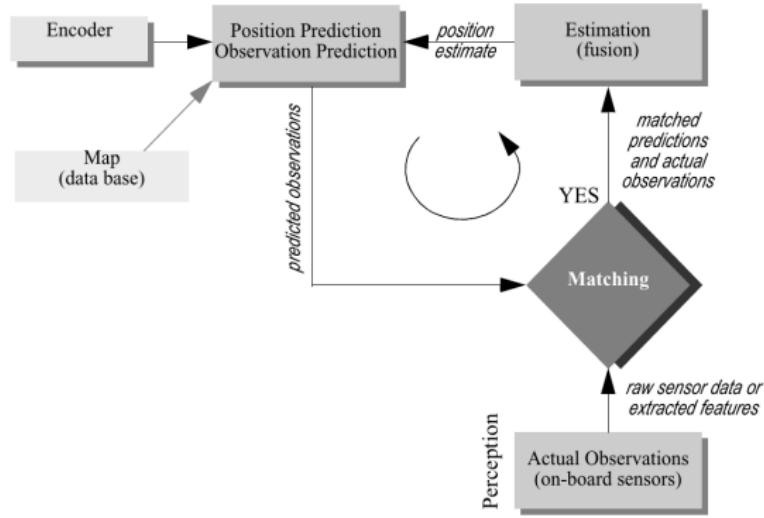


© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to
Autonomous Mobile Robots

Локализация

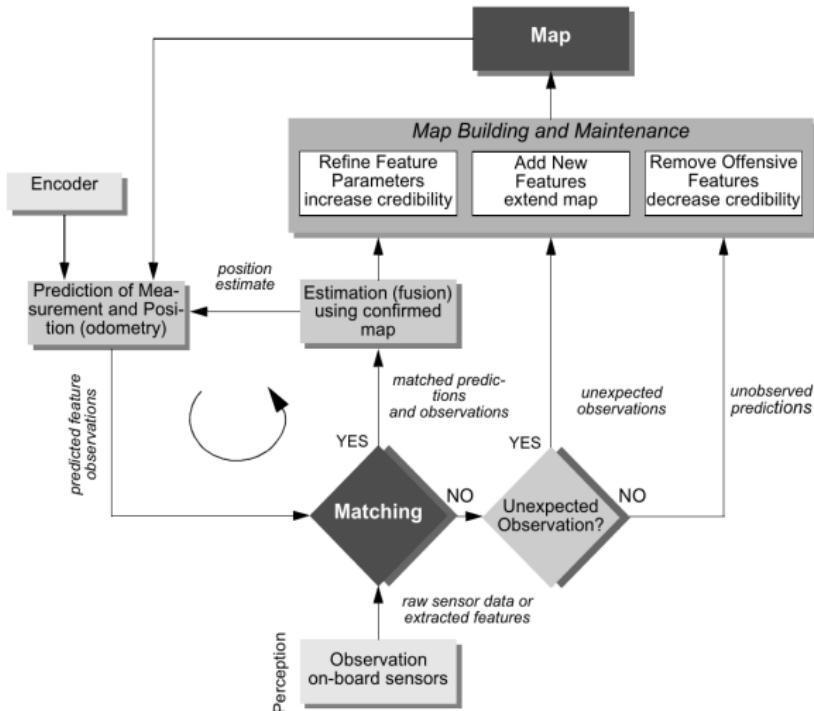
- ▶ Инерциальная навигация, проприоцепция
- ▶ Локализация по ориентирам
- ▶ Марковская — поддерживаем набор предположений о том, где мы, уточняем по сенсорам
- ▶ Фильтр Калмана — оптимизируем предсказанное положение робота и данные сенсоров
- ▶ Simultaneous Localization And Mapping — строим карту и пытаемся определить своё положение на ней

Схема локализации фильтром Калмана



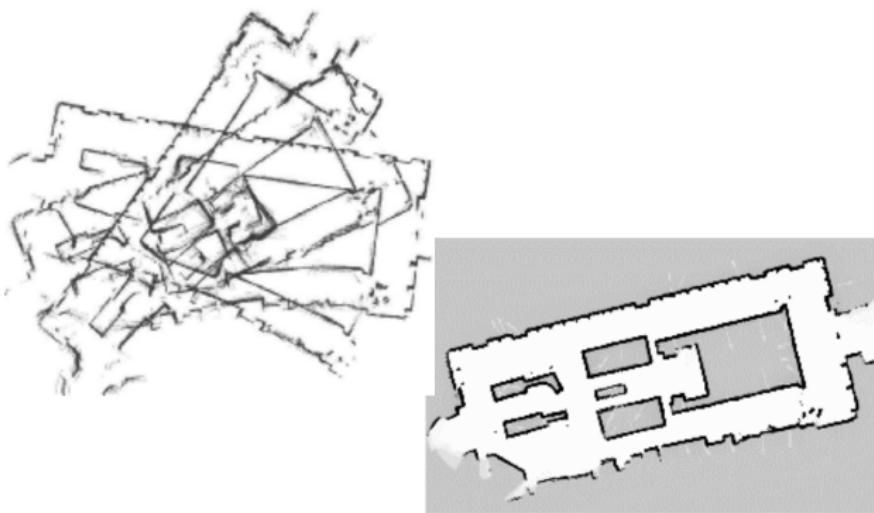
© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Схема SLAM



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Проблема замыкания траектории

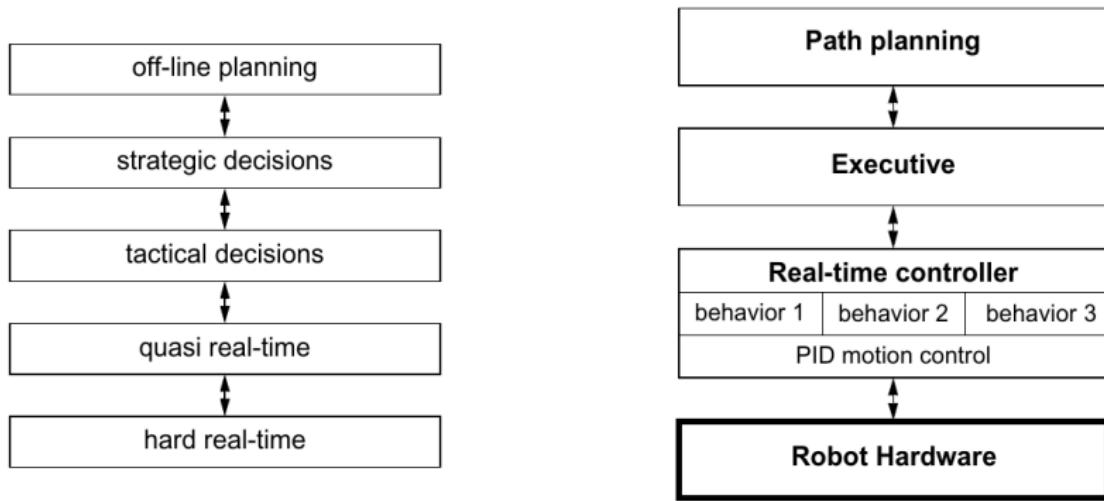


© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Задача навигации

- ▶ Задача: зная карту и своё положение на ней, достичь позиции (или группы позиций) p в момент времени не позже n
- ▶ Но есть нюансы:
 - ▶ Мы достигаем не позиции p , а состояния, в котором верим, что достигли позиции p , то есть строим траекторию не по карте, а по нашим представлениям
 - ▶ Как правило, мы не знаем точной карты
 - ▶ Кarta может меняться со временем
 - ▶ Задача обхода препятствий
- ▶ integrated planning and execution

Слоистая архитектура системы навигации



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots

Аппаратные платформы

- ▶ Готовые роботы — KUKA
- ▶ Платы «сделай сам» — Arduino в различных вариациях, Raspberry Pi, ...
- ▶ Образовательные/платформы для прототипирования — ТРИК, Vex, Fishertechnik



© R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh,
Introduction to Autonomous Mobile Robots

Симуляторы

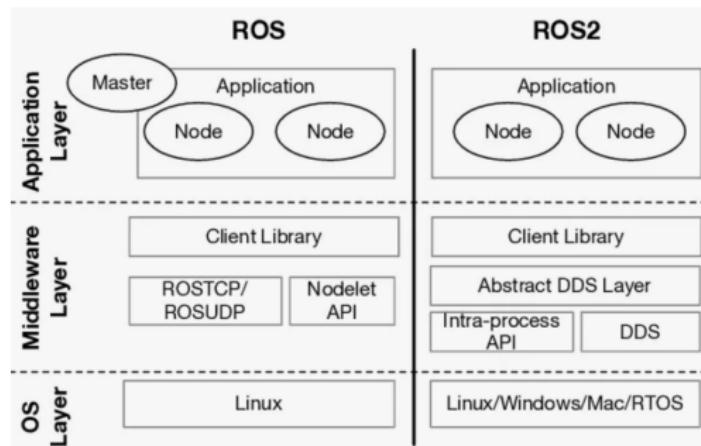
- ▶ Player/Stage/Gazebo
- ▶ Webots
- ▶ CoppeliaSim (бывший V-REP)
- ▶ Microsoft AirSim



© <https://microsoft.github.io/AirSim>

Программные платформы

- ▶ ROS/ROS2
- ▶ Player
- ▶ RT-middleware
- ▶ YARP



© <https://www.researchgate.net/figure/>

Comparison-between-ROS-and-ROS2_fig4_335382592

Книжка

Roland Siegwart, Illah Reza
Nourbakhsh, Introduction to
Autonomous Mobile Robots, MIT
Press, 2004, 321 pages

