

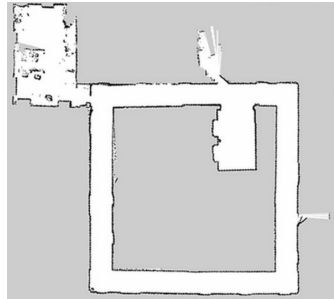
Разработка и анализ методов восстановления карты проходимости на основе показаний датчиков измерения расстояния

Денис Шепелев

студент группы 073а
ФУПМ МФТИ

Карта проходимости

- ▶ Карта проходимости - сетка, состоящая из квадратных клеток одинакового размера.
- ▶ Клетка карты - некоторая область пространства, содержащая информацию о наличии препятствия в соответствующей этой клетке территории.
- ▶ Такие карты используются в мобильной робототехнике для навигационных задач.



Датчики измерения расстояния

- ▶ Сонары
- ▶ Лидары
- ▶ Стереокамеры

Сонары выбраны в качестве основного датчика, так как они значительно дешевле и доступнее лидаров, и могут использоваться при любом освещении, в отличие от стереопары.

Постановка задачи восстановления карты проходимости

Дано:

- ▶ Картируемое окружение статично.
- ▶ Даны наблюдения датчиков:

$$Z = \{z_1, \dots, z_T\}$$

$$z_t = (x_t, y_t, \varphi_t, r_t)$$

Цель:

- ▶ Восстановить карту проходимости m на основе наблюдений датчиков Z .

Существующие методы картирования

На данный момент можно выделить два семейства методов восстановления карты проходимости

- ▶ основанные на обратной модели сенсора:

$$p(m|Z) \tag{1}$$

- ▶ основанные на прямой модели сенсора:

$$p(Z|m) \tag{2}$$

Картирование на основе обратной модели сенсора

Допущения метода:

- ▶ Клетки карты m_i - независимые случайные величины. Каждая ячейка карты m хранит вероятность занятости m_i , с учётом наблюдений Z :

$$p(m|Z) = \prod_i p(m_i|Z) \quad (3)$$



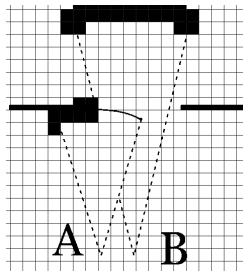
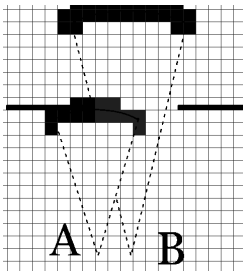
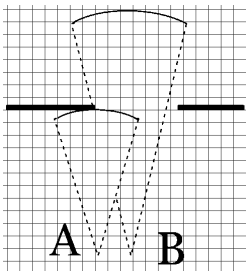
$$p(z_t|m, z_{1:t-1}) = p(z_t|m) \quad (4)$$

Значения в клетках обновляются по формуле:

$$\frac{p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})}{1 - p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})} = \frac{p(m_i|z_t, x_t)}{1 - p(m_i|z_t, x_t)} \cdot \frac{p(m_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{1 - p(m_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})} \cdot \frac{1 - p(m_i)}{p(m_i)} \quad (5)$$

Картирование на основе обратной модели сенсора

- ▶ Работает в режиме реального времени.
- ▶ Подходит для работы с датчиками, неопределенность в показаниях которых меньше размера ячейки карты.



Когда допущения описанного метода неверны, карта проходимости, построенная с его помощью, может содержать грубые ошибки.

Картирование на основе прямой модели сенсора

Основная идея методов, основанных на прямой модели:

- ▶ Каждая клетка может принимать только два значения занятости: 0 - свободная от препятствий ячейка, 1 - занята каким либо препятствием.
- ▶ Прямая модель $p(Z|m)$ показывает, на сколько хорошо некоторая карта m объясняет показания сонаров Z .
- ▶ Таким образом, задача картирования сводится к поиску такой карты m^* , которая максимизирует значение $p(Z|m)$:

$$m^*(Z) = \underset{m}{\operatorname{argmax}} p(Z|m) \quad (6)$$

Картирование на основе прямой модели сенсора

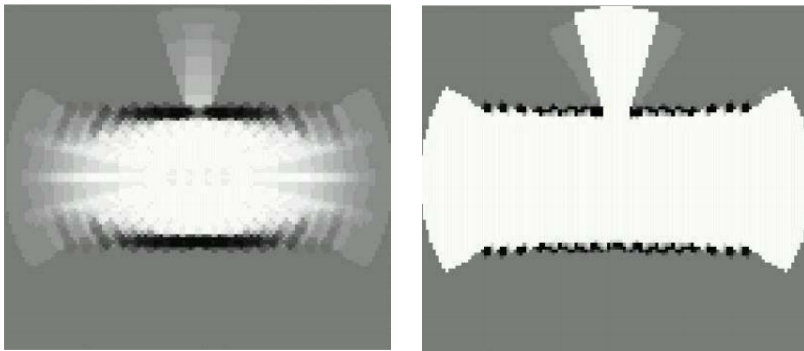


Рис. 1 : Результаты картирования двери, используя наблюдения сонаров. (а) - результаты алгоритма на основе обратной модели, (б) - на основе ЕМ-алгоритма с прямой моделью, предложенной в работе Себастьяна Труна.

Картирование на основе прямой модели сенсора

Проблема большинства алгоритмов, основанных на прямой модели, заключается в невозможности их имплементации для работы в режиме реального времени, а также необходимости больших вычислительных ресурсов для поиска оптимальной конфигурации карты. Требование работы в режиме реального времени к эффективному алгоритму построения карты проходимости является достаточно важным, так как часто такие модули являются неотъемлемой частью систем навигации робота.

Цель работы

Разработка методов восстановления карты проходимости, используя наблюдения сонаров, которые могут быть имплементированы для работы в режиме реального времени, и картирующие лучше традиционного метода, основанного на обратной модели.

Предложенные в работе методы картирования

В данной работе предложены два новых метода построения карты проходимости:

- ▶ Первый основан на прямой модели, предложенной в работе Себастьяна Труна. В этом методе карта проходимости находится с помощью метода стохастического градиента.
- ▶ Во втором методе предложена новая прямая модель сонара, с помощью которой задачу картирования можно свести к задаче минимизации непрерывной невязки.

Описание прямой модели, использованной в алгоритме картирования методом стохастического градиента

Пусть внутри области видимости сонара находятся K препятствий, отсортированных в порядке возрастания дистанции d_k . Через $\{c_*, c_0, c_{1,K}\}$ будем обозначать множество различных сценариев работы сонара, через c_* - случайный выброс, c_0 - измерение R_{max} .

1. Пусть реализовался случай, когда измерение было порождено событием c_k , $k \in \{0, \dots, K\}$

$$p(z|m, c_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(z-d_k)^2}{\sigma^2}} \quad (7)$$

2. Если реализовался случай c_* , то

$$p(z|m, c_*) = \frac{1}{R_{max}} \quad (8)$$

Описание прямой модели, использованной в алгоритме картирования методом стохастического градиента

Окончательная формула для описанной прямой модели:

$$\begin{aligned} p(z|m) = & \frac{1}{R_{max}} p_{rand} \\ & + \sum_{i \in \{1, \dots, K\}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(z-d_k)^2}{\sigma^2}} (1 - p_{rand})(1 - p_{hit})^{k-1} p_{hit} \quad (9) \\ & + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(z-R_{max})^2}{\sigma^2}} (1 - p_{rand})(1 - p_{hit})^K \end{aligned}$$

Картирование методом стохастического градиента

Вводится следующая функция от m при заданных наблюдениях Z :

$$\Phi(m, Z) = \phi_{sonars}(m, Z) + \phi_{occupancy}(m) + \phi_{borders}(m), \quad (10)$$

Задача картирования сводится к поиску карты m^* , которая максимизирует 10:

$$m^*(Z) = \operatorname{argmax}_m \left(\phi_{sonars}(m, Z) + \phi_{occupancy}(m) + \phi_{borders}(m) \right) \quad (11)$$

Картирование методом стохастического градиента

Рассмотрим составляющие части функции $\Phi(m, Z)$:

1. ϕ_{sonars} - распределение наблюдений сонаров z_t при заданной карте проходимости m .

$$\phi_{sonars}(m, Z) = p(z_1, \dots, z_T | m) = \prod_t p(z_t | m) \quad (12)$$

2. $\phi_{occupancy}(m)$ отвечает за априорные знания о проходимости карты

$$\phi_{occupancy}(m) = \sum_{m_i} w_o o(m_i) \quad (13)$$

При $w_o < 0$ карта m штрафует за каждую занятую клетку m_i .

3. $\phi_{borders}(m)$ представляет собой следующую сумму

$$\phi_{borders}(m) = \sum_{m_i} w_b n^2(m_i) \quad (14)$$

где $n(m_i)$ - число таких соседей клетки m_i , состояние которых не совпадает с состоянием m_i . При $w_b < 0$ клетка штрафует за каждого соседа, состояние которого не совпадает со состоянием клетки.

Картирование методом стохастического градиента

Оптимизационная задача (11) решается методом стохастического градиента. Каждый оптимизационный шаг состоит из следующих действий:

1. Случайным образом выбирается клетка m_i и значение проходимости $o(m_i)$ инвертируется

$$o^*(m_i) = 1 - o(m_i)$$

2. Для нового состояния клетки m_i пересчитываются $\phi_{sonars}(m, Z)$, $\phi_{occupancy}(m)$ и $\phi_{borders}(m)$.
3. При $\Phi^*(m, Z) > \Phi(m, Z)$ или с вероятностью p_{random_factor} сохраняется $o^*(m_i)$ и $\Phi^*(m, Z)$, $\phi_{sonars}^*(m, Z)$, $\phi_{occupancy}^*(m)$, $\phi_{borders}^*(m)$; иначе возвращаемся в предыдущее состояние.

Картирование методом градиентного спуска

Представим клетки карты проходимости m как переменные x_i , которые принимают значения от 0 до 1 и характеризуют степень занятости ячеек. Как и раньше будем искать такую карту m^* , которая наилучшим образом объясняет наблюдения сонаров, и для этого введем функцию, которая показывает, насколько хорошо карта m объясняет наблюдения Z .

Описание прямой модели, использованной в алгоритме картирования методом градиентного спуска

Измерение сонара r несёт в себе не только информацию о том, что на расстоянии r скорее всего находится препятствие, но и о том, что на расстоянии меньше r препятствия маловероятны. На основании этом основании вводится невязка $\psi(m, z)$, которая показывает, насколько хорошо карта m объясняет показание сонара z :

$$\psi^t = \psi_{free}^t + \psi_{occ}^t \quad (15)$$