# Методы 3D картографирования окружения

Денис Шепелев

073a

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D

Область применения 3 карт

виды карт

Point Cloud

VOXEL GIIUS

evation Map

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

Лар II S Man

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map

Мар

OctoMap

OctoMap

Octree
OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры

#### Область применения 3D карт

Elevation Map Пример Elevation Man

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MIS Мар

MLS Map Пример MLS

Map

Примеры OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap

- Хотя и 2D карты успешно применяются на практике, во многих прикладных задачах их оказывается недостаточно.
- Для решения задач навигации мобильных роботов необходимо представление, с помощью которого можно определить какие объекты на карте являются препятствиями, какие области карты свободны для передвижения, а также определить положение робота на карте.

## Виды карт

### Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Область

Виды карт

Elevation Map Пример Elevation Map

MLS Map Создание MLS

Map Обновление MLS

Map

MLS Map Пример MLS

Map

Octree OctoMap Обновление и сокращение Примеры OctoMap

### ▶ Point Cloud

- Voxel Grid
- Elevation Map
- Multi-Level Surface Map (MLS Map)
- OctoMap

карт

#### Point Clouds

Elevation Map Пример Elevation

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MIS Мар

MLS Map Пример MLS Map

Octree OctoMap Обновление и сокращение Примеры OctoMap

### Достоинства

- Естественный формат выходных данных некоторых сенсоров (Kinect, 3D Lidars).
- ▶ В отличии от Voxel Grids и других представлений, не дискретизируют пространство.

## Недостатки

- Не подходят для представления больших территорий - занимают много памяти.
- Не подходят для задач планирования движения - нет явного представления свободных и занятых для движения областей.



```
Роботы и 3D окружение
```

Область применения 31 карт

Зиды ка

### Point Clouds

Voxel Gri

### Elevation M

Elevation Map Пример Elevation Map

LS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map

### Map OctoMap

OctoMap

Octree
OctoMap
Обновление и
сокращение
OctoMap
Примеры

```
point types.hpp
00204 struct PointXYZRGB
00205 {
        PCL_ADD_POINT4D; // This adds the members x,y,z
00206
    which can also be accessed using the point (which is
    float[4])
00207
        union
00208
00209
          struct
00210
00211
            float rgb;
00212
          };
00213
          float data_c[4];
00214
        };
00215
        Γ...
00216 } EIGEN_ALIGN16;
```

# Point Clouds Memory Usage

С одного скана Kinect получается  $640 \times 480$  точек, т.е.:  $640 \times 480 \times 8 \times$  sizeof(float) = 9830400B = 9.83MB Учитывая, что каждую секунду у нас появляется, предположим, 30 сканов, то 294.9 MB !!!

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D

Область применения 3E карт

Биды кар

#### Point Clouds

Voxel Gr

Elevation Map

Elevation Map Пример Elevation Map

I S Man

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар MLS Мар

Пример MLS Мар

#### OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap Примеры OctoMap

Методы 3D кар-

Виды карт

Point Cloud

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

Map OctoMap

Octree
OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры

OctoMap

### Достоинства

- Явное представление свободных, занятых и неизвестных областей.
- Быстрый доступ к элементам.
- Итеративное обновление, имеющее веротностную интерпретацию.

# Недостатки

- ▶ Требует много памяти.
- Ошибки дискретизации.



# Voxel Grids Memory Usage

Пусть есть некоторая аудитория размерами  $5m \times 5m \times 2m$ . Хочется построить Voxel Grid этой аудитории с точностью 1cm. Тогда  $500 \times 500 \times 200 \times 4 = 0.2$  GB

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3E карт

Dudoi Kabi

Point Cloud

### Voxel Grids

levation Map

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

/Iap ILS Map

MLS Map

Создание MLS Мар Обновление MLS

Map MLS Map

Пример MLS Мар

#### OctoMap

Octree
OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры
OctoMap

Область

Elevation Map Пример Elevation

Map

MLS Map

Создание MLS Map Обновление MLS

Map

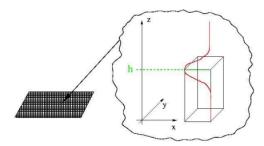
MLS Map Пример MLS Map

Octree

OctoMap

OctoMap Обновление и сокращение Примеры

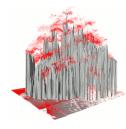
Elevation Map - двумерный массив, который в каждой клетке хранит среднее значение высоты и дисперсию. Для обновления карты используется фильтр Калмана.



- ► Кушает мало памяти. 2.5D представление окружения.
- ▶ Быстрый доступ к элементам.
- Вероятностная интерпретация.

### Недостатки

- Одноуровневая карта. Нет явного разделения на свободные, занятые и неизвестные области.
- Ошибки дискретизации. Не всегда адекватно представляет реальное окружение, что делает её применимой не во всех задачах.



Роботы и 3D

Область применения 3D карт

онды карт

oint Clouds

/oxel Grids

Elevation Map

Пример Elevation Мар

MLS Map

Создание MLS Мар Обновление MLS

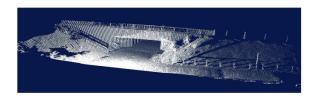
Map MLS Map Пример MLS

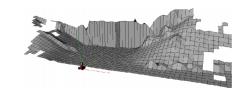
Map OctoMap

OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap Примеры

## Пример Elevation Map





Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 31

Область применения 31 карт

Биды кар

Point Clou

Voxel Grid

Elevation Map

Пример Elevation Мар

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Мар Пример MLS

Map

OctoMap

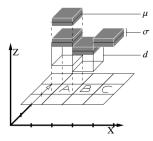
Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap Примеры OctoMap

# MLS Map

MLS Map - улучшение Elevation Мар.

В каждой клетке (i, j) хранится список патчей  $[P_{ii}^k]$ . Каждый патч состоит из

- ▶ Значение средней высоты  $\mu$ .
- ▶ Дисперсия  $\sigma^2$ .
- Глубина d.



Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Область

Elevation Map Пример Elevation

Map

### MLS Map

Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

Map

Octree OctoMap Обновление и сокращение Примеры OctoMap

# Создание MLS Мар состоит из следующих шагов:

- Для каждой точки  $p=(x,y,z,\sigma)$  находится клетка (i,j) такая, что  $si \leq x \leq s(i+1)$  и  $sj \leq y \leq s(j+1)$ , где s ширина клетки. В эту клетку сохраняются значения высоты z и дисперсии  $\sigma$  точки p.
- ightharpoonup Затем в каждой клетке формируется множество высотных интервалов. Если разность двух высот не превосходит величины  $\gamma$ , то эти высоты будут лежать в одном интервале.
- ightharpoonup Затем интервалы классифицируются на горизонтальные и вертикальные по длине интервала. Если она превышает au=10см, то интервал калссифицируется как вертикальный, иначе горизонтальный.

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

онды карт

Point Clouds

Voxel Grid

Elevation Map

Пример Elevation Мар

MLS Map

#### Создание MLS Мар

Обновление MLS Map MLS Map Пример MLS

### Map OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap Примеры OctoMap

Область применения 3D карт

Биды кар

Point Cloud

Voxel G

Elevation Map
Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS Мар

OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение OctoMap Примеры OctoMap

- Для вертикальных интервалов значениям  $\mu$  и  $\sigma$  присваивается самое высокое значение интервала, а величине d длина интервала. Остальные точки удаляются.
- ▶ Для горизонтальных интервалов  $\mu$  и  $\sigma$  вычисляются через фильтр Калмана, а величина d=0. Все остальное удаляется

Point Cloud

-1 - - - -

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар MLS Map

Пример MLS Мар

OctoMap

Octree
OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры
ОсtoMap

### Обновление состоит из следующих шагов:

- ightharpoonup При добавлении новой точки  $p=(x,y,z,\sigma)$ , находим клетку, в которой эта точка лежит.
- Затем находим ближайшую по высоте точку.
  - Если оказывается, что новая точка достаточно близка, то происходит процесс обновления  $\mu$  и  $\sigma$ .
  - Если она лежит внутри интервала ничего не делаем
  - Иначе добавляем новый патч.

Область применения 3D карт

виды карт

Point Cloud

Voxel Grids

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

#### MLS Map Пример MLS

Map

OctoMap

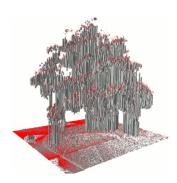
Octree
OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры
ОctoMap

### Достоинства

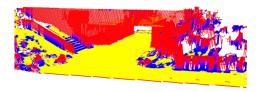
 В одной клетке может храниться несколько уровней

# Недостатки

- ▶ Ошибки дискретизации.
- Нет явного разделения на свободные, занятые и неизвестные области.
- Локализация на такой карте
   непростая задача.

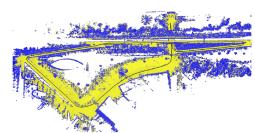


# Пример MLS Map



Размер клеток 10см $\times 10$ см 3а 172 скана было собрано 45,139,000 точек, размер территории 299м  $\times 147$ м

Объем занятой памяти 73.33 МВ.



Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Роботы и 3I окружение

Область применения 3E карт

виды карт

Point Cloud

oxel Grids

Elevation Map Elevation Map

Пример Elevation Мар

ILS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map

### Пример MLS Мар

OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение

OctoMap Примеры OctoMap

Роботы и 3Е

Область применения 3D карт

опды кар

Point Cloud

VOX.CI CITED

Elevation Map

Пример Elevation Мар

MLS Map

MLS Мар Создание MLS

Мар Обновление MLS

Мар

MLS Map

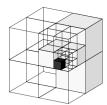
Пример MLS

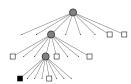
Map

Octree

OctoMap
Обновление и сокращение
OctoMap
Примеры
OctoMap

- Древовидная структура.
- Можно варьировать уровень дискретизации.
- Память выделяется только когда нужна.
- А когда нужно, можно дерево сокращать.





# OctoMap

### Достоинства

- Полноценное 3D представление окружения.
- Вероятностная интерпретация.
- Multi-Resolution.
- Эффективное использование памяти

### Недостатки

Ошибки дискретизации.



Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Роботы и 3Е

Область применения 3D карт

----

Point Cloud:

oxel Grids

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS Map

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap Примеры OctoMap

Каждая ячейка - это случайная величиная, которая может принимать 2 значения - свободна или занята. Поэтому для каждой ячейки карты хранится значение вероятности быть занятой. Пусть  $P(m) = P(m_1, m_2, ..., m_n)$  - вероятность карты m. Будем полагать, что каждая ячейка карты - независимая случайная величина. Тогда

$$P(m) = \prod_i P(m_i)$$

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Elevation Map Пример Elevation

Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MIS Map

MLS Map Пример MLS

Map

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap Примеры

OctoMap

Будем считать, что в каждый момент времени t мы знаем положение робота на карте  $x_{1:t}$  и наблюдения  $z_{1:t}$ 

$$P(m|z_{1:t},x_{1:t}) = \prod_{i} P(m_{i}|z_{1:t},x_{1:t})$$

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D

Область применения 3D карт

риды карт

Point Cloud

VOXCI GIIGS

Elevation Ma

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map

Пример MLS Мар

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Примеры OctoMap

$$P(m_{i}|z_{1:t},x_{1:t}) = \frac{P(z_{t}|m_{i},z_{1:t-1},x_{1:t})P(m_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t})}{P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})} = \frac{P(z_{t}|m_{i},x_{t})P(m_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t})}{P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})} = \frac{P(m_{i}|z_{t},x_{t})P(z_{t}|x_{t})P(m_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t-1})}{P(m_{i}|x_{t})P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})}$$

$$\frac{P(m_{i}|z_{t},x_{t})P(z_{t}|x_{t})P(m_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t})}{P(m_{i}|x_{t})P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})}$$

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D

Область применения 3D карт

омды карт

Point Cloud:

oxel Grid

levation Map

Elevation Map Пример Elevation Map

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

Мар

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Примеры OctoMap

Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

Биды кар

Point Cloud

roxer drius

levation Map

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

Мар

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Примеры OctoMap

Проделаем тоже самое для  $P(m_i = \mathit{free}|z_{1:t}, x_{1:t}) = P(\bar{m}_i|z_{1:t}, x_{1:t})$ 

$$P(\bar{m}_{i}|z_{1:t},x_{1:t}) = \frac{P(z_{t}|\bar{m}_{i},z_{1:t-1},x_{1:t})P(\bar{m}_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t})}{P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})} = \frac{P(z_{t}|\bar{m}_{i},x_{t})P(\bar{m}_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t-1})}{P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})} = \frac{P(\bar{m}_{i}|z_{t},x_{t})P(z_{t}|x_{t})P(\bar{m}_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t-1})}{P(\bar{m}_{i}|z_{t},x_{t})P(z_{t}|x_{t})P(\bar{m}_{i}|z_{1:t-1},x_{1:t})}$$

$$\frac{P(\bar{m}_{i}|x_{t})P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})}{P(\bar{m}_{i}|x_{t})P(z_{t}|z_{1:t-1},x_{1:t})}$$

Поделив (1) на (2) компоненты  $P(z_t|z_{1:t-1},x_{1:t})$  и  $P(z_t|x_t)$  сократятся

. He забудем, что  $P(m_i) = 1 - P(\bar{m}_i)$ 

$$\frac{P(m_{i}|z_{1:t}, x_{1:t})}{1 - P(m_{i}|z_{1:t}, x_{1:t})} = \frac{P(m_{i}|z_{t}, x_{t})}{1 - P(m_{i}|z_{t}, x_{t})} 
\frac{P(m_{i}|z_{1..t-1}, x_{1:t-1})}{1 - P(m_{i}|z_{1..t-1}, x_{1:t-1})} 
\frac{1 - P(m_{i})}{P(m_{i})}$$
(3)

Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

Биды карт

Point Cloud

/oxel Grids

levation Map

Elevation Map Пример Elevation Мар

ILS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map

Пример MLS

Map OctoMap

Octree OctoMap

OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Для обновления карты используется следующая формула

$$P(m_i|z_{1...t}) = \left(1 + \frac{1 - P(m_i|z_t)}{P(m_i|z_t)} \frac{P(m_i)}{1 - P(m_i)} \frac{1 - P(m_i|z_{1...t-1})}{P(m_i|z_{1...t-1})}\right)^{-1}$$

Обозначим

$$L(m_i) = \log \frac{P(m_i)}{1 - P(m_i)}$$

Тогда

$$L(m_i|z_{1..t}) = L(m_i|z_t) + L(m_i|z_{1..t-1}) - L(m_i)$$

Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Роботы и 3D

Область применения 3D карт

эиды карт

Point Clouds

/oxel Grids

levation Map

Elevation Map
Пример Elevation
Мар

MLS Map

MLS Мар Создание MLS

Мар

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

Map OctoMan

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Примеры OctoMap

## Динамическое окружение и сокращение OctoMap

Ограничие  $L(m^{cell}|z_{1...t})$  – для использования в динамическом окружении и для сокращения дерева

$$L(m^{cell}|z_{1..t}) = \max(\min(L(m^{cell}|z_{1..t}), I_{max}), I_{min})$$

Таким образом

$$L(m^{cell}|z_{1..t}) \in (I_{min}, I_{max})$$

Когда  $L(m^{cell}|z_{1..t})$  достигает нижней или верхней границы значений, клетка будет считаться стабильной.

Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Elevation Map

Пример Elevation Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MIS Map

MLS Map

Пример MLS Map

Octree OctoMap

OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap Примеры

# Динамическое окружение и сокращение OctoMap

Методы 3D картографирования окружения

#### Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

ongo kapi

Point Cloud

Voxel Grid

Elevation Map

Flevation Map

The Flevation Map

The Flevation Map

MLS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS Map

OctoMap

Octree OctoMap

Обновление и сокращение ОстоМар

OctoMap

Если окружение действительно статично, то при некотором выборе верхней и нижней границы, можно добиться того что через несколько измерений клетка станет стабильной.

Поэтому если все листья листья стабильны и свободны (заняты), то целый узел считается свободным (занятым), а листья удаляются.

### Точность OctoMap

Можно динамически менять точность карты

$$L(m^{cell}|z_{1..t}) = \max_{i} L(m_{i}^{cell}|z_{1..t})$$

или

$$L(m^{cell}|z_{1...t}) = \frac{1}{8} \sum_{i} L(m_{i}^{cell}|z_{1...t})$$







Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Область карт

Elevation Map

Пример Elevation Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар

MLS Map Пример MLS

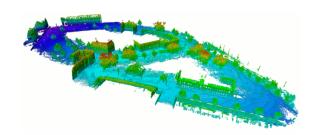
Map Octree

OctoMap Обновление и сокращение

OctoMap Примеры OctoMap

# Примеры OctoMap

Кампус Фрайбургского университета - 292 м  $\times$  167 м  $\times$  28 м Voxel Grids - 5162.90 MB OctoMap - 379.70 MB Lossy OctoMap - 13.82 MB



Методы 3D картографирования окружения

### Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

оиды карт

Point Cloud

oxel Grids

Elevation Map

Elevation Мар Пример Elevation Мар

LS Map

MLS Map Создание MLS Map

Обновление MLS Мар MLS Мар

MLS Мар Пример MLS Мар

OctoMap

Octree OctoMap Обновление и сокращение

Примеры ОсtoMap Wolfram Burgard, Diego Tipaldi

http://ais.informatik.uni-freiburg.de/teaching/ss15/robotics/slides/17-3dmapping.pdf

Материалы лекции Фрайбургского университета по курсу Introduction to Mobile Robotics - Techniques for 3D Mapping.

Armin Hornung, Kai M. Wurm, Maren Bennewitz, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard

OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees

Autonomous Robots April 2013, Volume 34, Issue 3, pp 189-206

Rudolph Triebel, Patrick Pfaff, Wolfram Burgard Multi-Level Surface Maps for Outdoor Terrain Mapping and Loop Closing

In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '06)