

## Методы 3D картографирования окружения

Денис Шепелев

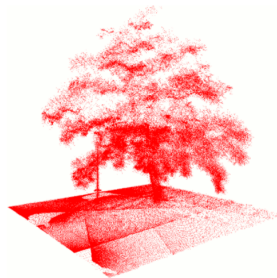
073a

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ | ≡ ≡ ↺ 🔍 ↻

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ | ≡ ↺ 🔍 ↻

## Достоинства

- ▶ Естественный формат выходных данных некоторых сенсоров (Kinect, 3D Lidars).
- ▶ В отличие 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 3D карт

Виды карт

**Point Clouds**

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation Map

MLS Map

MLS Map  
Создание MLS Map  
Обновление MLS Map  
MLS Map  
Пример MLS Map

OctoMap

Octree  
OctoMap  
Обновление и сокращение OctoMap  
Примеры OctoMap

## Методы 3D картографирования окружения

point types.hpp

## Роботы и 3D окружение

## Область применения 3D карт

## Point Clouds

## Voxel Grids

### Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation  
Map

[MLS Map](#)[MLS Map](#)

Создание MLS  
Мар  
Обновление M  
Мар

[MLS Map](#)

### Пример MLS Map

## OctoMap

## Octree

## OctoMap

## Обновление и сокращение

## OctoMap

## Примеры OctoMap

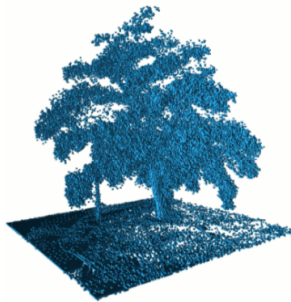
С одного скана Kinect получается  $640 \times 480$  точек, т.е.:

$$640 \times 480 \times 8 \times \text{sizeof(float)} = 9830400B = 9.83MB$$

Учитывая, что каждую секунду у нас появляется, предположим, 30 сканов, то **294.9 MB !!!**

## Достоинства

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



## Недостатки

- ▶ Требует много памяти.
- ▶ Ошибки дискретизации.

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

Виды карт

Point Clouds

**Voxel Grids**

Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation Map

MLS Map

MLS Map  
Создание MLS Map  
Обновление MLS Map  
MLS Map  
Пример MLS Map

OctoMap

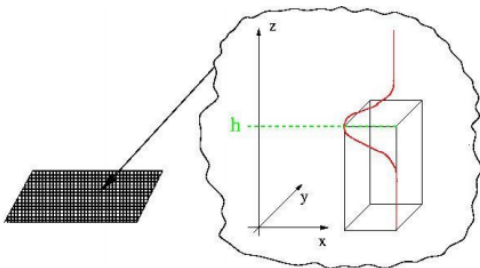
Octree  
OctoMap  
Обновление и сокращение OctoMap  
Примеры OctoMap

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



# Elevation Map

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

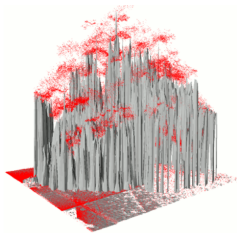


## Достоинства

- ▶ 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  
окружение

Область  
применения 3D  
карт

Виды карт

Point Clouds

Voxel Grids

Elevation Map

**Elevation Map**

Пример Elevation  
Map

MLS Map

MLS Map

Создание MLS  
Map

Обновление MLS  
Map

MLS Map

Пример MLS  
Map

OctoMap

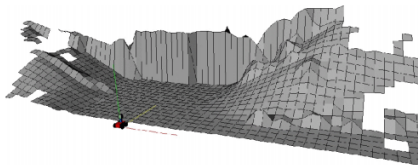
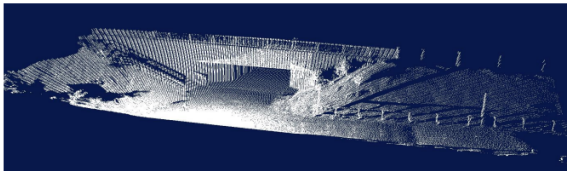
Octree

OctoMap

Обновление и  
сокращение  
OctoMap

Примеры  
OctoMap

# Пример Elevation Map



Методы 3D картографирования  
окружения

Денис Шепелев

Роботы и 3D  
окружение

Область  
применения 3D  
карт

Виды карт

Point Clouds

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map

**Пример Elevation  
Map**

MLS Map

MLS Map

Создание MLS  
Map

Обновление MLS  
Map

MLS Map

Пример MLS  
Map

OctoMap

Octree

OctoMap

Обновление и  
сокращение  
OctoMap

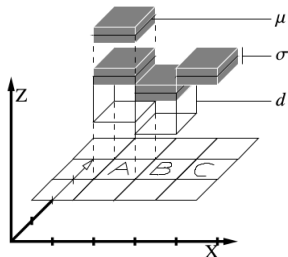
Примеры  
OctoMap

# MLS Map

MLS Map - улучшение Elevation Map.

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

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



- ▶ 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  $p$ .
- ▶ Затем в каждой клетке формируется множество **высотных интервалов**. Если разность двух высот не превосходит величины  $\gamma$ , то эти высоты будут лежать в одном интервале.
- ▶ Затем интервалы классифицируются на **горизонтальные и вертикальные** по длине интервала. Если она превышает  $\tau = 10\text{см}$ , то интервал классифицируется как вертикальный, иначе горизонтальный.

- ▶ 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

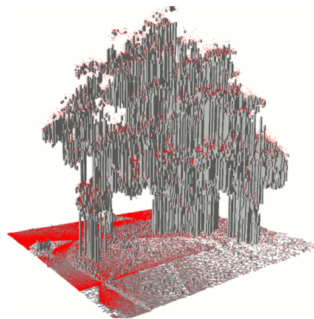
- ▶ При добавлении новой точки  $p = (x, y, z, \sigma)$ , находим клетку, в которой эта точка лежит.
- ▶ Затем находим ближайшую по высоте точку.
  - ▶ Если оказывается, что новая точка достаточно близка, то происходит процесс обновления  $\mu$  и  $\sigma$ .
  - ▶ Если она лежит внутри интервала - ничего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

## Достоинства

- ▶ В одной клетке может храниться несколько уровней

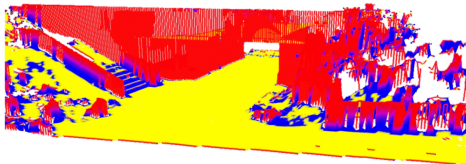
## Недостатки

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





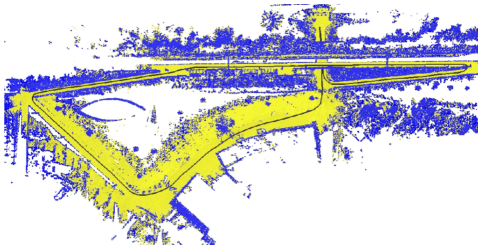
# Пример MLS Map



Размер клеток  $10\text{см} \times 10\text{см}$

За 172 скана было собрано 45,139,000 точек, размер территории  $299\text{м} \times 147\text{м}$

Объем занятой памяти 73.33 MB.



Методы 3D картографирования окружения

Денис Шепелев

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

Виды карт

Point Clouds

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation Map

MLS Map

MLS Map

Создание MLS Map

Обновление MLS Map

MLS Map

Пример MLS Map

OctoMap

Octree

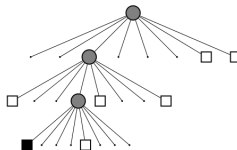
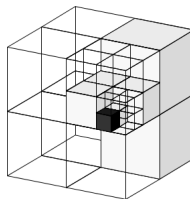
OctoMap

Обновление и сокращение OctoMap

Примеры

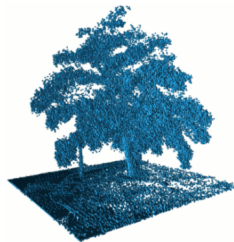
OctoMap

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



## Достоинства

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



## Недостатки

- ▶ Ошибки дискретизации.

Роботы и 3D окружение

Область применения 3D карт

Виды карт

Point Clouds

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation Map

MLS Map

MLS Map  
Создание MLS Map  
Обновление MLS Map  
MLS Map  
Пример MLS Map

OctoMap

Octree  
**OctoMap**  
Обновление и сокращение OctoMap  
Примеры OctoMap

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

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

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

$$P(m|z_{1:t}, x_{1:t}) = \prod_i P(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$$

$$\begin{aligned} P(m_i | z_{1:t}, x_{1:t}) &= \frac{P(z_t | m_i, z_{1:t-1}, x_{1:t}) P(m_i | z_{1:t-1}, x_{1:t})}{P(z_t | z_{1:t-1}, x_{1:t})} = \\ &= \frac{P(z_t | m_i, x_t) P(m_i | z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{P(z_t | z_{1:t-1}, x_{1:t})} = \\ &= \frac{P(m_i | z_t, x_t) P(z_t | x_t) P(m_i | z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{P(m_i | x_t) P(z_t | z_{1:t-1}, x_{1:t})} \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} P(\tilde{m}_i|z_{1:t}, x_{1:t}) &= \frac{P(z_t|\tilde{m}_i, z_{1:t-1}, x_{1:t})P(\tilde{m}_i|z_{1:t-1}, x_{1:t})}{P(z_t|z_{1:t-1}, x_{1:t})} = \\ &= \frac{P(z_t|\tilde{m}_i, x_t)P(\tilde{m}_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{P(z_t|z_{1:t-1}, x_{1:t})} = \\ &= \frac{P(\tilde{m}_i|z_t, x_t)P(z_t|x_t)P(\tilde{m}_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{P(\tilde{m}_i|x_t)P(z_t|z_{1:t-1}, x_{1:t})} \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

$$\frac{P(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})}{1 - P(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})} = \frac{P(m_i|z_t, x_t)}{1 - P(m_i|z_t, x_t)} \cdot \frac{P(m_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})}{1 - P(m_i|z_{1:t-1}, x_{1:t-1})} \quad (3)$$
$$\frac{1 - P(m_i)}{P(m_i)}$$



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

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

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

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

Таким образом

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

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

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

Можно динамически менять точность карты

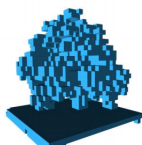
$$L(m^{cell} | z_{1..t}) = \max_i L(m_i^{cell} | z_{1..t})$$

или

$$L(m^{cell} | z_{1..t}) = \frac{1}{8} \sum_i L(m_i^{cell} | z_{1..t})$$



0.08 m



0.64 m



1.28 m

Роботы и 3D  
окружение

Область  
применения 3D  
карт

Виды карт

Point Clouds

Voxel Grids

Elevation Map

Elevation Map  
Пример Elevation  
Map

MLS Map

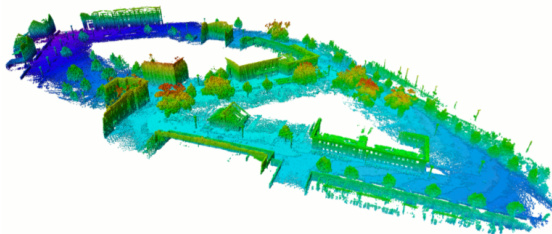
MLS Map  
Создание MLS  
Map  
Обновление MLS  
Map  
MLS Map  
Пример MLS  
Map

OctoMap

Octree  
OctoMap  
Обновление и  
сокращение  
OctoMap  
Примеры  
OctoMap

# Примеры OctoMap

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





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)*