Реализация библиотеки с поддержкой октодеревьев для SLAM

Киселёв Михаил Николаевич, группа 21.Б07-мм

***Научный руководитель**: Старший преподаватель кафедры СП, к.т.н. Ю. В. Литвинов*

***Консультант**: Инженер-исследователь Mobile Robotics Lab, Skoltech, А. В. Корнилова*

СПбГУ 2024

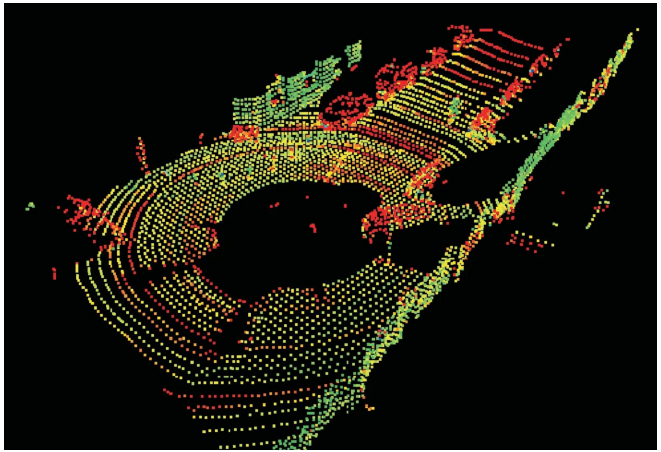
SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)

- Ключевой компонент автономных систем
- Решают взаимосвязанные задачи: **локализацию** и **построение карты**
- Используют для работы примитивы, извлекаемые из входных данных

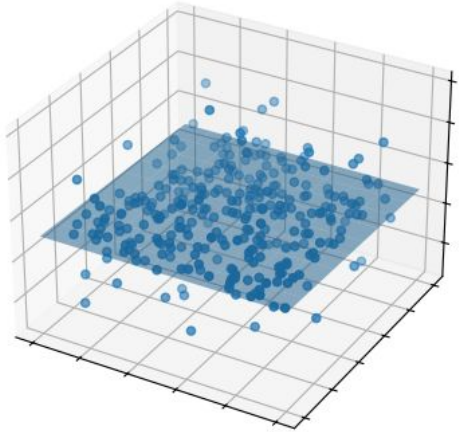
Принцип работы SLAM-алгоритма

Облака точек. Извлекаемые примитивы

- Облака точек — тип входных данных, получаемых с помощью LiDAR сенсоров
- Плоскости — тип извлекаемого примитива, распространенный в рукотворных средах
- Алгоритм RANSAC — эффективный способ выделения плоскостей



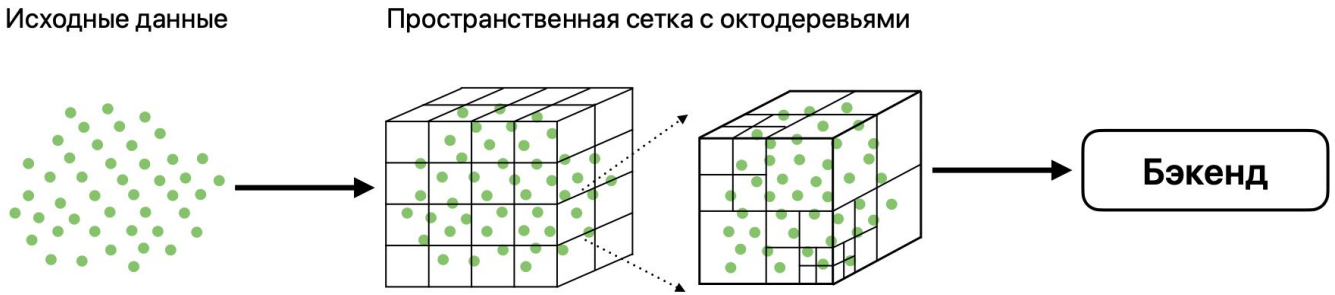
Likhita et al. – Obstacle Detection in Autonomous Vehicles Using 3D LiDAR Point Cloud Data



RANSAC для выделения плоскостей

Октодеревья в воксельном подходе

- Воксельный подход к SLAM обеспечивает качественные результаты при низких вычислительных затратах
- Октодеревья поддерживают **динамическое добавление и обработку** новых данных
- Пространственная сетка с октодеревьями позволяет **эффективно адаптироваться** к разным масштабам окружающей среды



Октодеревья в рамках воксельного подхода к SLAM-задаче

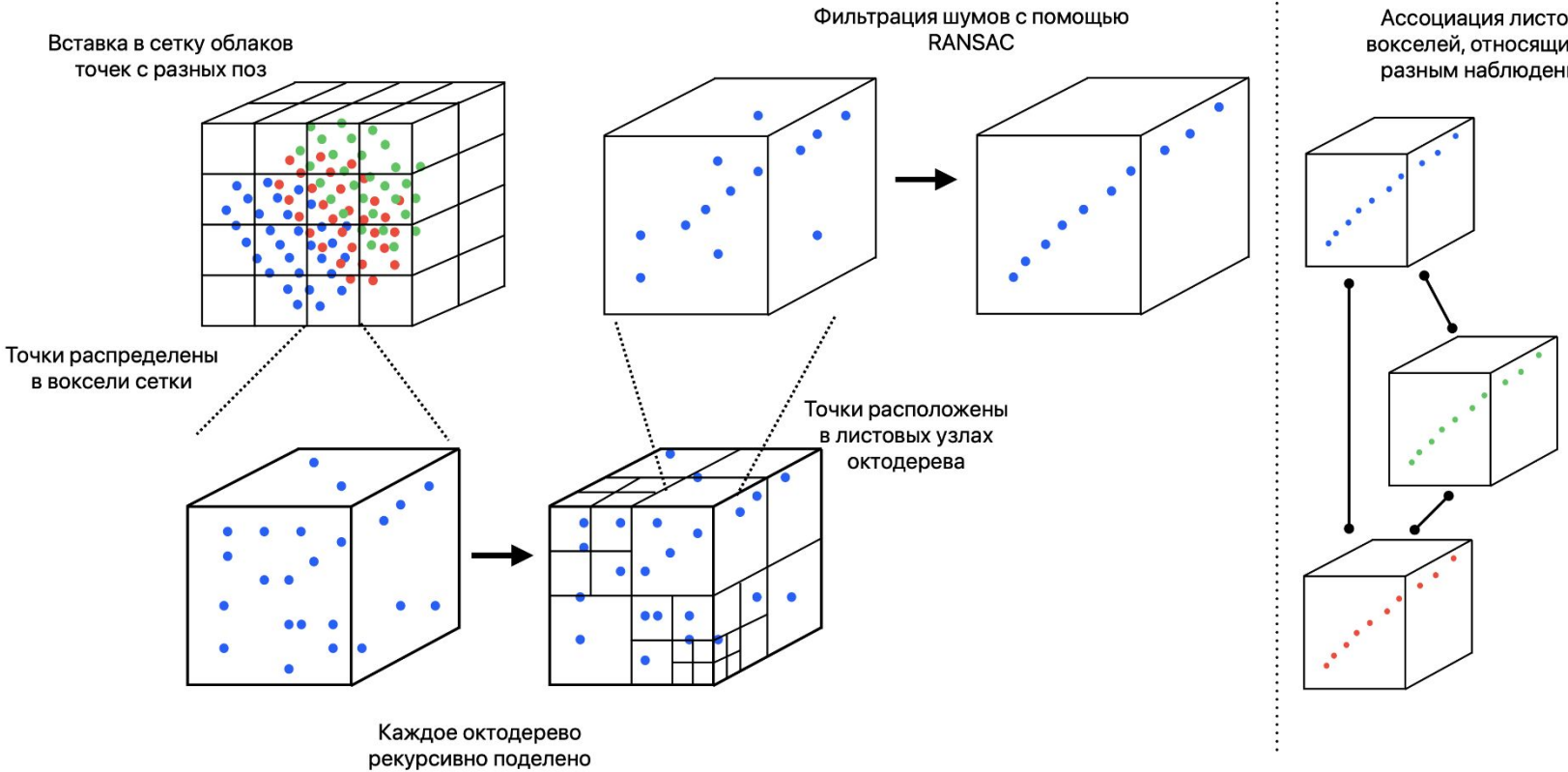
Цель и задачи

Цель работы: реализация библиотеки для работы с октодеревьями в рамках воксельных SLAM-алгоритмов

Задачи:

- Сформировать список функциональных требований к библиотеке
- Провести обзор существующих решений и провести анализ существующих решений относительно необходимой функциональности, реализующих работу с октодеревьями
- Спроектировать и реализовать библиотеку для работы с октодеревьями в соответствии с функциональными требованиями
- Провести экспериментальное исследование производительности разработанного решения

Принцип работы воксельного подхода

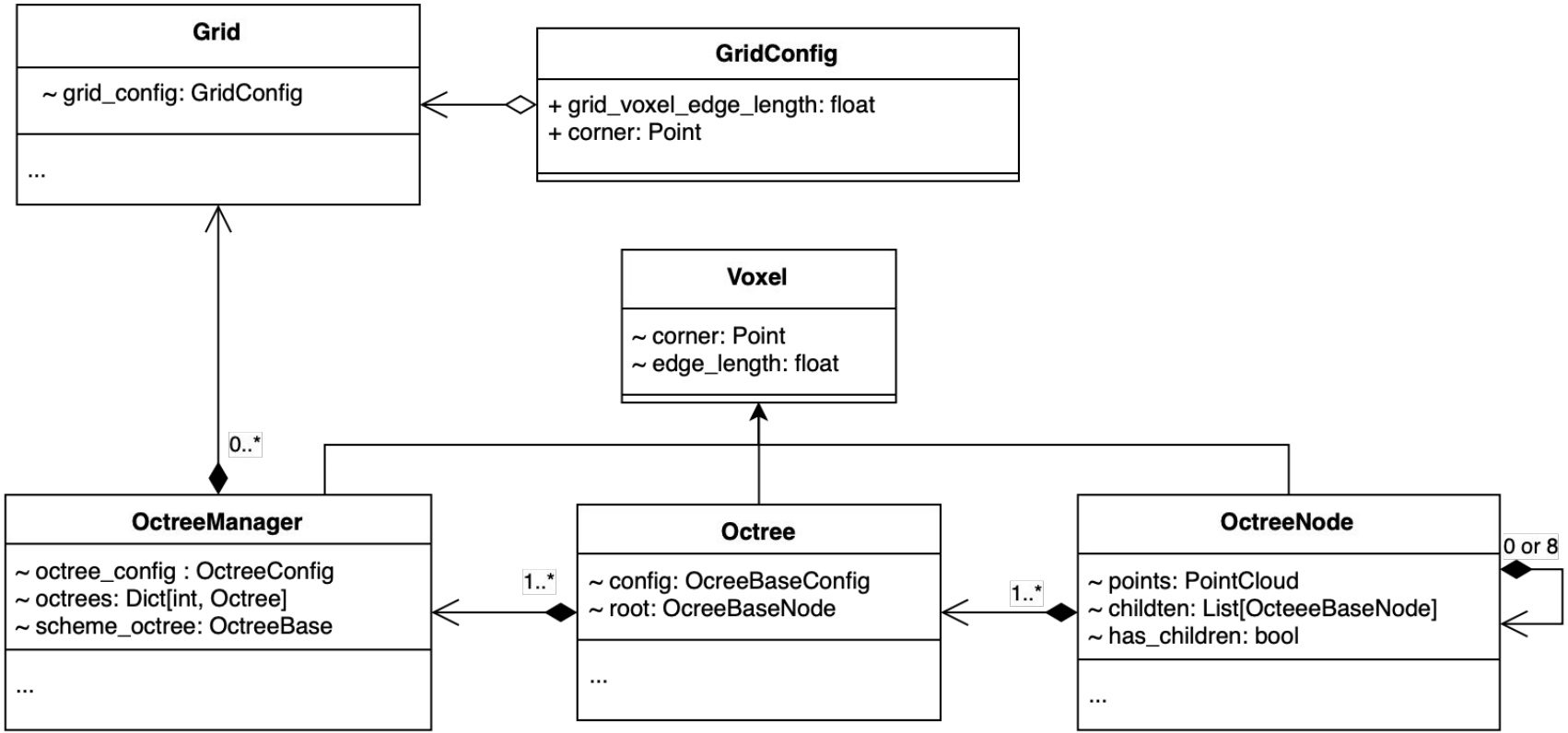


Требования. Существующие решения

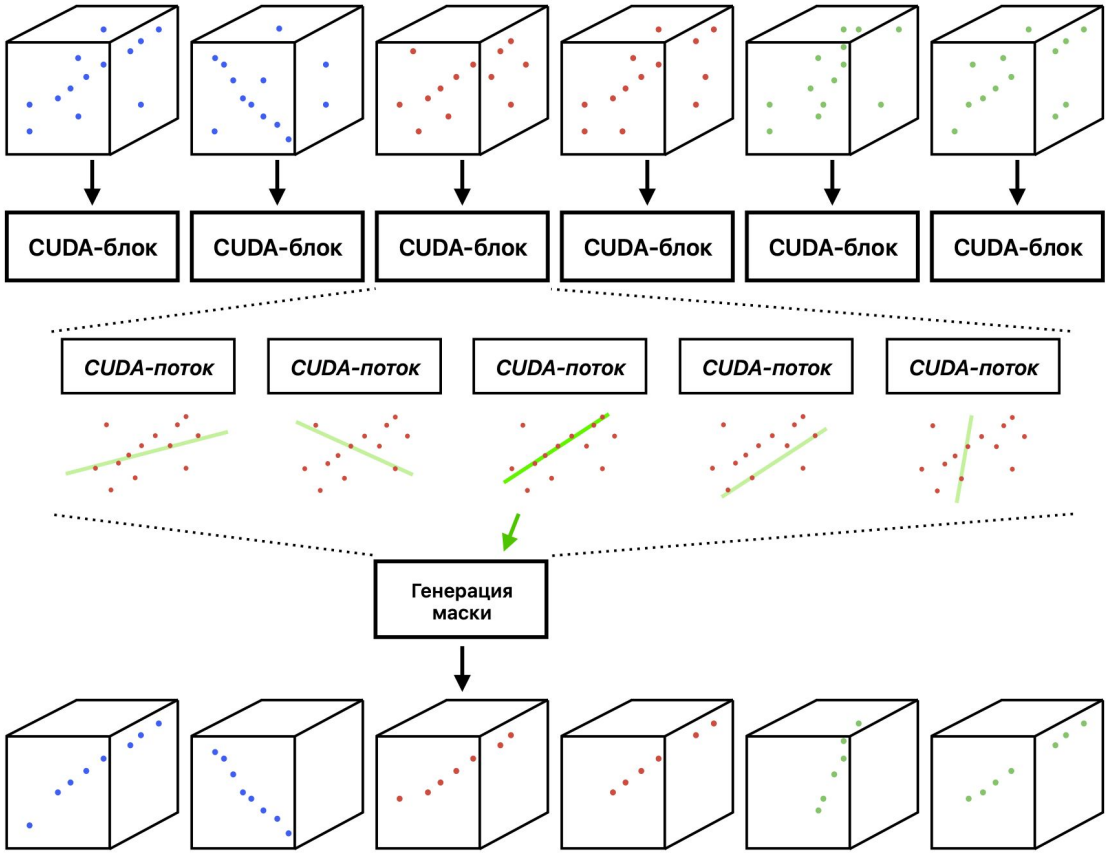
Критерий (библиотека)	Open3D	PCL	OctoMap	MIDFusion	OctoNet	pyotree	octrees	SVOR
Контейнер для облака точек	–	+	–	–	–	–	+	–
Рекурсивное деление по критерию	–	+	+	+	+	–	+	–
Модификация точек в дереве	–	–	–	–	–	–	+	–
Пространственная сетка	+	–	–	–	+	–	–	–
Синхронизация наблюдений	–	–	–	–	–	–	–	–
Визуализация	+	+	+	+	+	–	–	+

Критерий (RANSAC)	Open3D	CGAL	RansacLib	ROS	SkLearn	RTL	PCL	Kornia
Выделение плоскостей	+	+	+	–	+	–	+	–
Обработка с использованием GPU	–	–	–	–	–	–	+	+
Параллелизация по наборам данных	–	–	–	–	–	–	–	–

Архитектура библиотеки



Архитектура параллельного RANSAC на NVidia CUDA



- Один воксель соответствует CUDA-блоку
- Одна гипотеза соответствует CUDA-потоку

- Параллельная обработка вокселей и гипотез
- Синхронизация всех гипотез одного вокселя

Реализация библиотеки

K3D-Jupyter

GitHub Actions

pytest

Black

flake8

Poetry

Эксперименты. Цель и условия

Исследовательские вопросы:

- RQ1. Каковы **объем затрачиваемой памяти** и **время обработки** разного числа облаков точек с помощью библиотеки?
- RQ2. Каковы **объем затрачиваемой памяти VRAM** реализованного RANSAC? Каково **время работы** реализованного RANSAC по сравнению реализациями Open3D и SkLearn?

Характеристики системы:

- Intel i5-8300H (8) @ 4.000GHz
- Nvidia GeForce GTX 1050 Mobile, 4GiB VRAM
- 8 GiB RAM
- Ubuntu Server 22.04

Эксперименты. Набор данных, параметры запуска

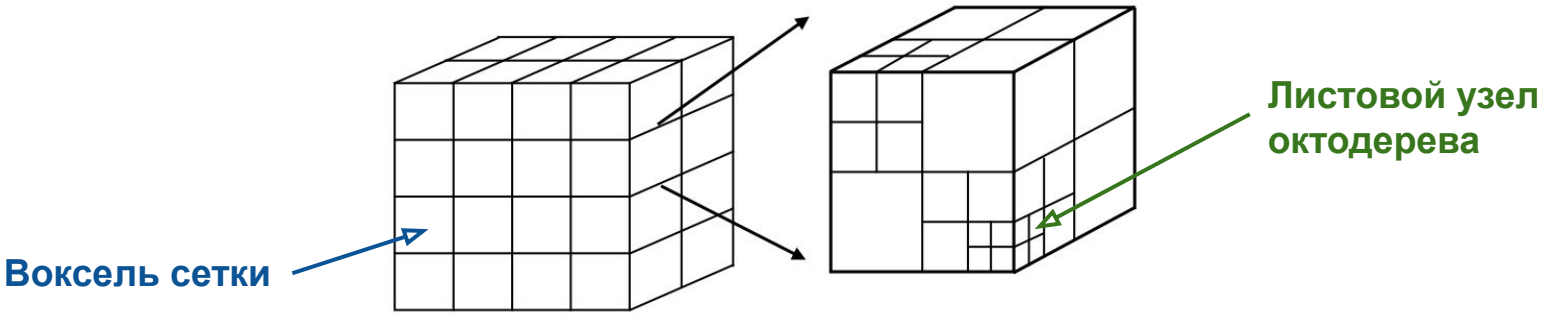
Наборы данных: KITTI, Hilti – облака точек, полученные с LiDAR-сенсора

Метрики:

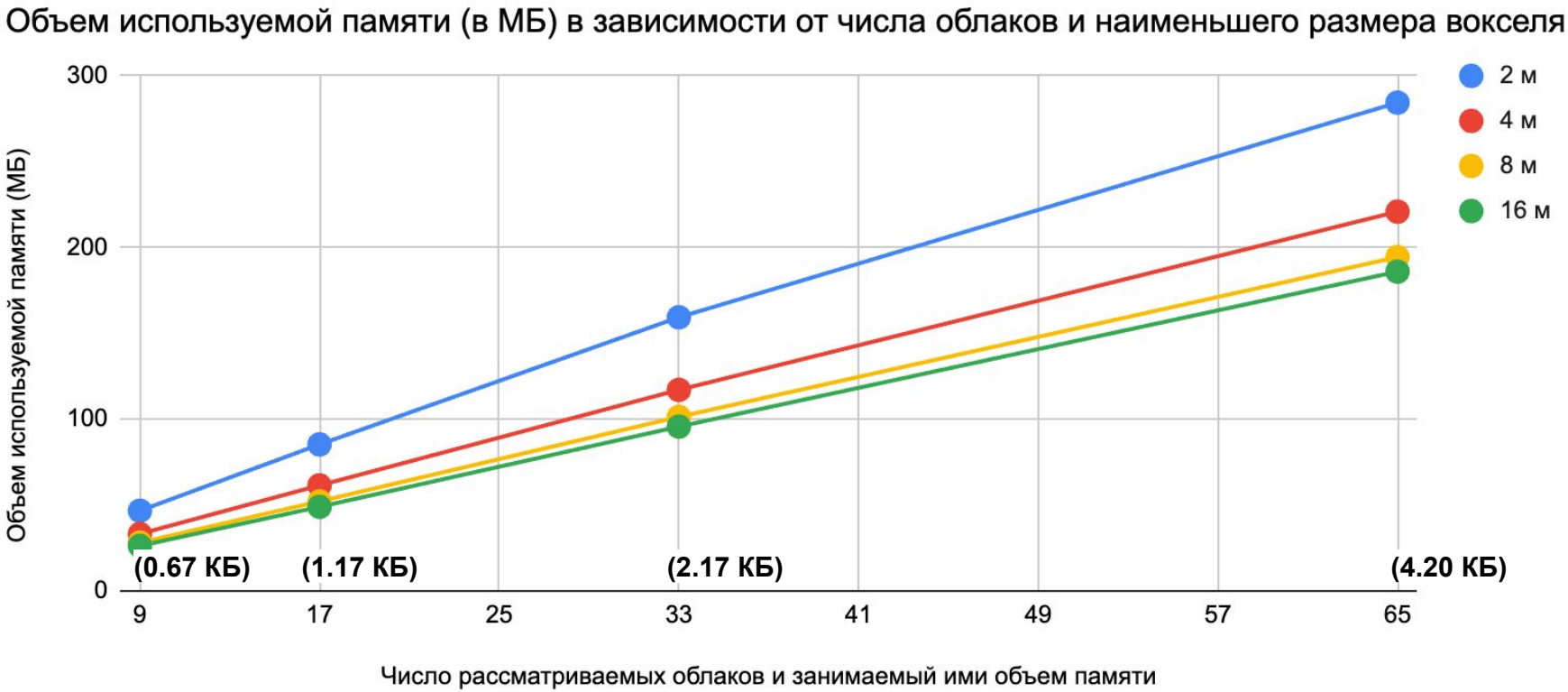
- Время выполнения
- Используемая память

Параметры запуска:

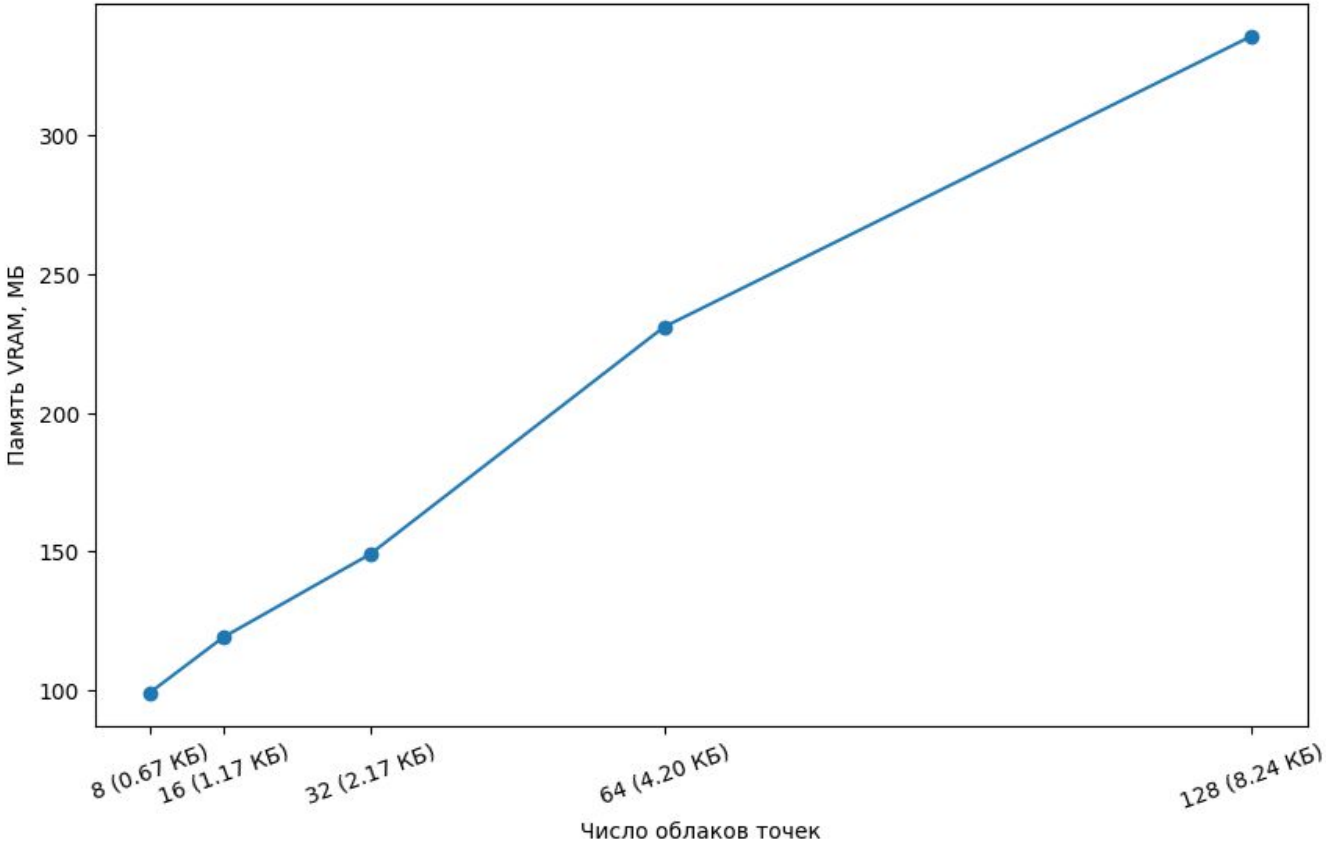
- Число рассматриваемых облаков: 9, 17, 33, 65
- Размер вокселя сетки: 2, 4, 8, 16
- Наименьший возможный размер листового узла: 2, 4, 8, 16



Эксперименты 1/4. Память



Эксперименты 2/4. Память (RANSAC)



Эксперименты 3/4. Пропускная способность

Число **облаков в секунду**, обрабатываемых библиотекой при разных значениях параметров

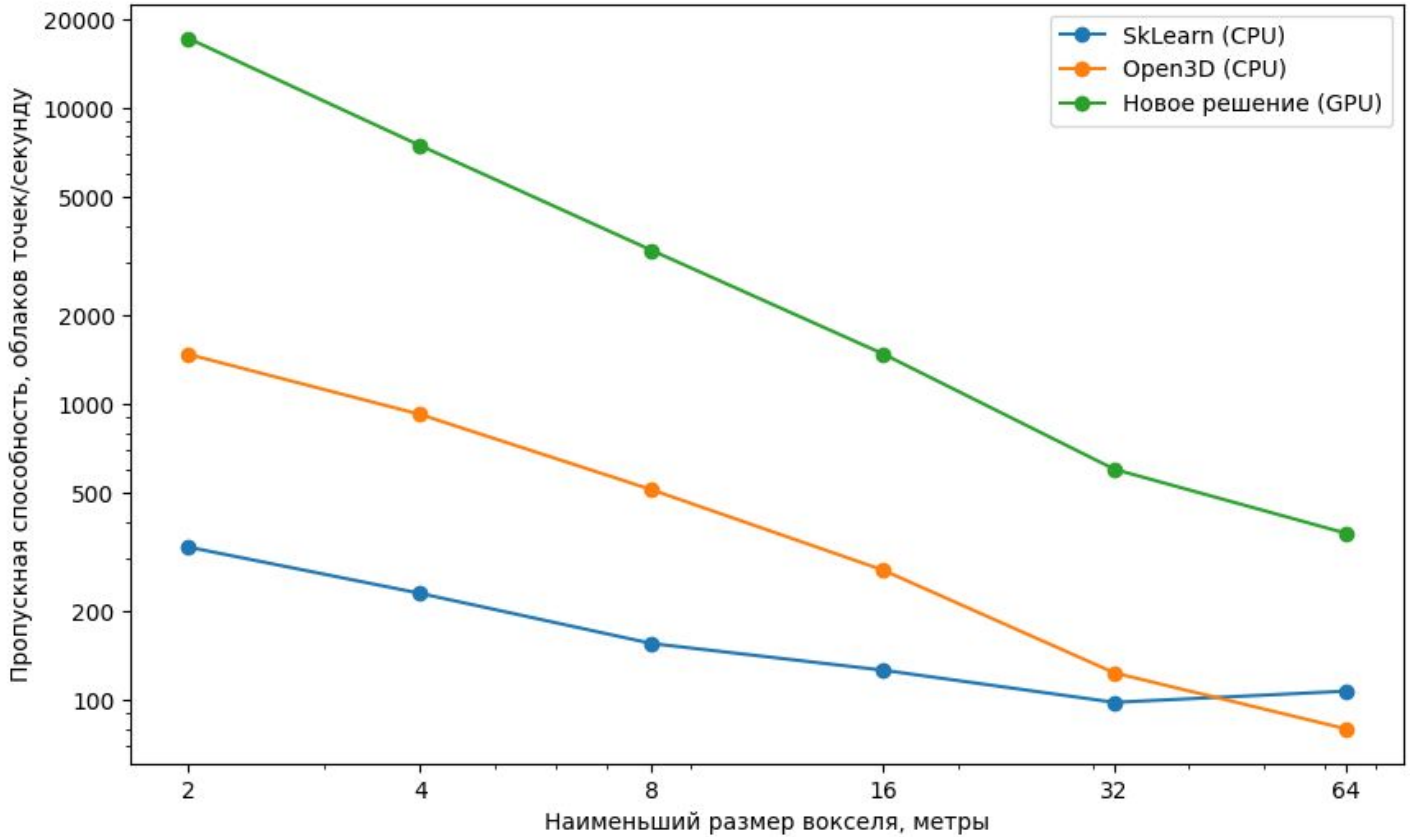
9 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)			
		2	**4**	**8**	**16**
Изна-чальный размер вокселя (м)	**2**	5.714			
	4	3.594	7.347		
	8	2.626	4.319	7.979	
	16	2.101	3.064	4.527	8.326

17 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)			
		2	**4**	**8**	**16**
Изна-чальный размер вокселя (м)	**2**	5.484			
	4	3.504	6.959		
	8	2.529	4.100	7.572	
	16	2.006	2.941	4.340	7.970

33 облака		Наименьший размер вокселя октодерева (м)			
		2	**4**	**8**	**16**
Изна-чальный размер вокселя (м)	**2**	5.375			
	4	3.480	6.746		
	8	2.538	4.077	7.317	
	16	1.982	2.846	4.180	7.602

65 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)			
		2	**4**	**8**	**16**
Изна-чальный размер вокселя (м)	**2**	5.450			
	4	3.665	6.682		
	8	2.671	4.107	7.255	
	16	2.073	2.884	4.185	7.503

Эксперименты 4/4. Пропускная способность (RANSAC)



Выводы

- RQ1
  - Использование **ме́ньшего минимально возможного размера** листового узла октодерева влечет **бо́льший объем используемой памяти**
  - Объем используемой памяти **растет линейно**, что может повлечь трудности при использовании библиотеки с большим числом облаков точек
  - Использование **ме́ньшего минимально возможного размера** листового узла и **бо́льшего изначального размера** вокселя влечет **бо́льшее время работы**
  - При заданной конфигурации библиотека способна обрабатывать **> 2 облаков в секунду**
- RQ2
  - Объем используемой памяти VRAM **растет линейно**, что может ограничить возможности параллелизации при обработке большого числа облаков.
  - Параллельная обработка на GPU обеспечивает **существенное сокращение времени** обработки по сравнению с реализациями на CPU.

Заключение

Выполнены следующие задачи:

- Сформирован список функциональных требований к библиотеке
- Проведен анализ существующих решений относительно необходимой функциональности, реализующих работу с октодеревьями
- Спроектирована и реализована библиотека для работы с октодеревьями
- Проведено экспериментальное исследование производительности разработанного решения

Решение опубликовано на GitHub[1] и PyPi[2]

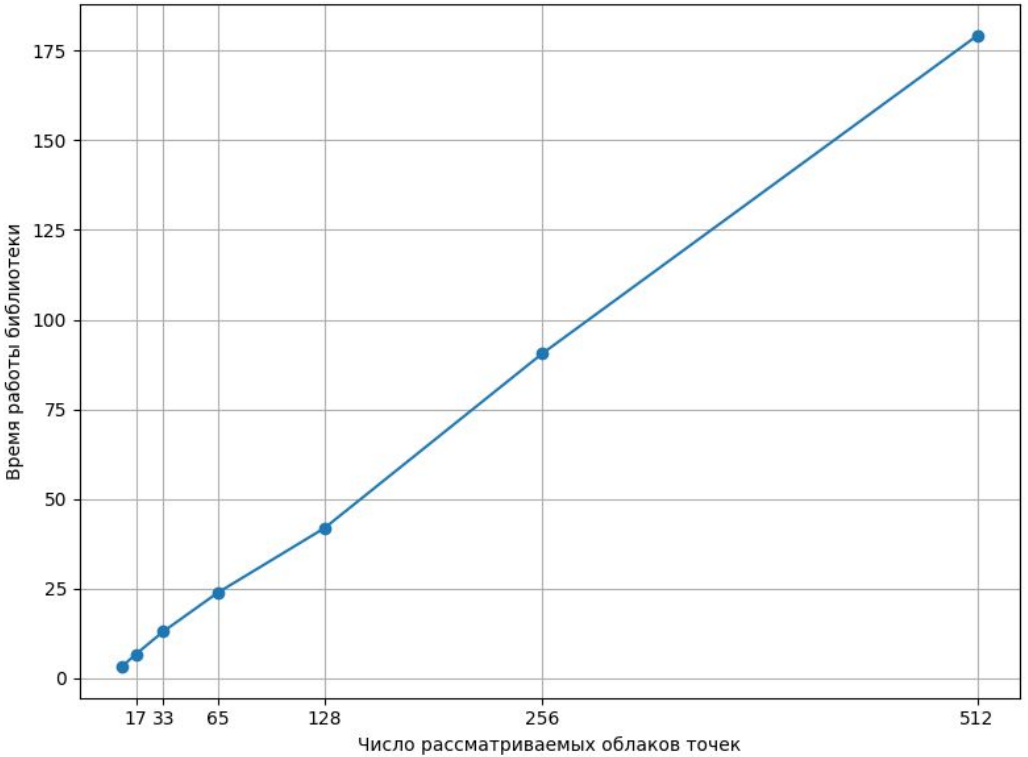
[1] https://github.com/prime-slam/octreelib

[2] https://pypi.org/project/octreelib/

Дополнительные материалы

Эксперимент. Результаты 3/3. Время работы

Время обработки разного числа облаков точек **в секундах**



Эксперимент. Результаты. Память

9 облаков (0.67 КБ)		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	40.89					
	4	42.84	30.84				
	8	45.47	32.19	27.53			
	16	46.71	33.23	28.13	26.24		
	32	47.46	33.92	28.65	26.44	25.50	
	64	47.90	34.32	29.01	26.68	25.96	25.64
	128	48.17	34.58	29.28	26.95	26.22	25.28

17 облаков (1.17 КБ)		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	74.32					
	4	78.35	57				
	8	83.01	59.54	51.17			
	16	85.32	61.47	52.15	48.98		
	32	86.5	62.59	53	49.33	48.18	
	64	87.23	63.26	53.52	49.69	48.46	47.89
	128	87.77	63.73	53.99	50.17	48.94	47.78

33 облаков (2.17 КБ)		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	141.19					
	4	146.32	110.35				
	8	154.36	113.82	99.74			
	16	159.38	117.10	101.39	95.70		
	32	162.57	119.20	102.77	96.50	94.14	
	64	166.16	121.46	104.13	97.26	94.67	93.58
	128	167.47	122.68	105.25	98.18	95.59	93.41

65 облаков (4.20КБ)		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	264.56					
	4	265.33	211.47				
	8	276.28	215.47	193.13			
	16	284.41	220.91	194.46	185.97		
	32	289.63	224.44	196.96	187.62	183.22	
	64	296.82	228.95	199.71	189.68	183.87	182.28
	128	298.93	231.06	201.49	191.45	185.11	182.47

Объем используемой памяти (МБ)
Для измерения использовалась библиотека **objsize**

Эксперимент. Результаты. Throughput

9 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изна-чальный размер вокселя (м)	2	5.714					
	4	3.594	7.347				
	8	2.626	4.319	7.979			
	16	2.101	3.064	4.527	8.326		
	32	1.746	2.349	3.157	4.611	8.419	
	64	1.486	1.914	2.422	3.206	4.661	8.475
	128	1.304	1.605	1.964	2.459	3.219	8.483

17 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изна-чальный размер вокселя (м)	2	5.484					
	4	3.504	6.959				
	8	2.529	4.100	7.572			
	16	2.006	2.941	4.340	7.970		
	32	1.654	2.227	2.992	4.374	8.118	
	64	1.409	1.810	2.278	3.034	4.416	8.201
	128	1.235	1.530	1.854	2.315	3.034	8.201

33 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изна-чальный размер вокселя (м)	2	5.375					
	4	3.480	6.746				
	8	2.538	4.077	7.317			
	16	1.982	2.846	4.180	7.602		
	32	1.631	2.176	2.881	4.185	7.824	
	64	1.374	1.750	2.190	2.875	4.192	7.867
	128	1.191	1.471	1.766	2.195	2.888	7.895

65 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изна-чальный размер вокселя (м)	2	5.450					
	4	3.665	6.682				
	8	2.671	4.107	7.255			
	16	2.073	2.884	4.185	7.503		
	32	1.683	2.180	2.873	4.129	7.674	
	64	1.408	1.743	2.165	2.819	4.209	7.739
	128	1.215	1.460	1.744	2.143	2.902	5.267

Число **облаков в секунду**, обрабатываемых библиотекой при разных значениях параметров

Эксперимент. Результаты. Время распределения

9 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	1.575					
	4	2.504	1.225				
	8	3.427	2.084	1.128			
	16	4.284	2.937	1.988	1.081		
	32	5.155	3.831	2.851	1.952	1.069	
	64	6.058	4.702	3.716	2.807	1.931	1.062
	128	6.904	5.606	4.582	3.660	2.796	1.061

17 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	3.100					
	4	4.851	2.443				
	8	6.722	4.146	2.245			
	16	8.473	5.780	3.917	2.133		
	32	10.280	7.635	5.682	3.887	2.094	
	64	12.066	9.390	7.462	5.603	3.850	2.073
	128	13.769	11.112	9.168	7.342	5.603	2.073

33 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	6.139					
	4	9.482	4.892				
	8	13.002	8.094	4.510			
	16	16.651	11.597	7.894	4.341		
	32	20.229	15.168	11.455	7.886	4.218	
	64	24.019	18.860	15.066	11.477	7.872	4.195
	128	27.699	22.438	18.691	15.036	11.425	4.180

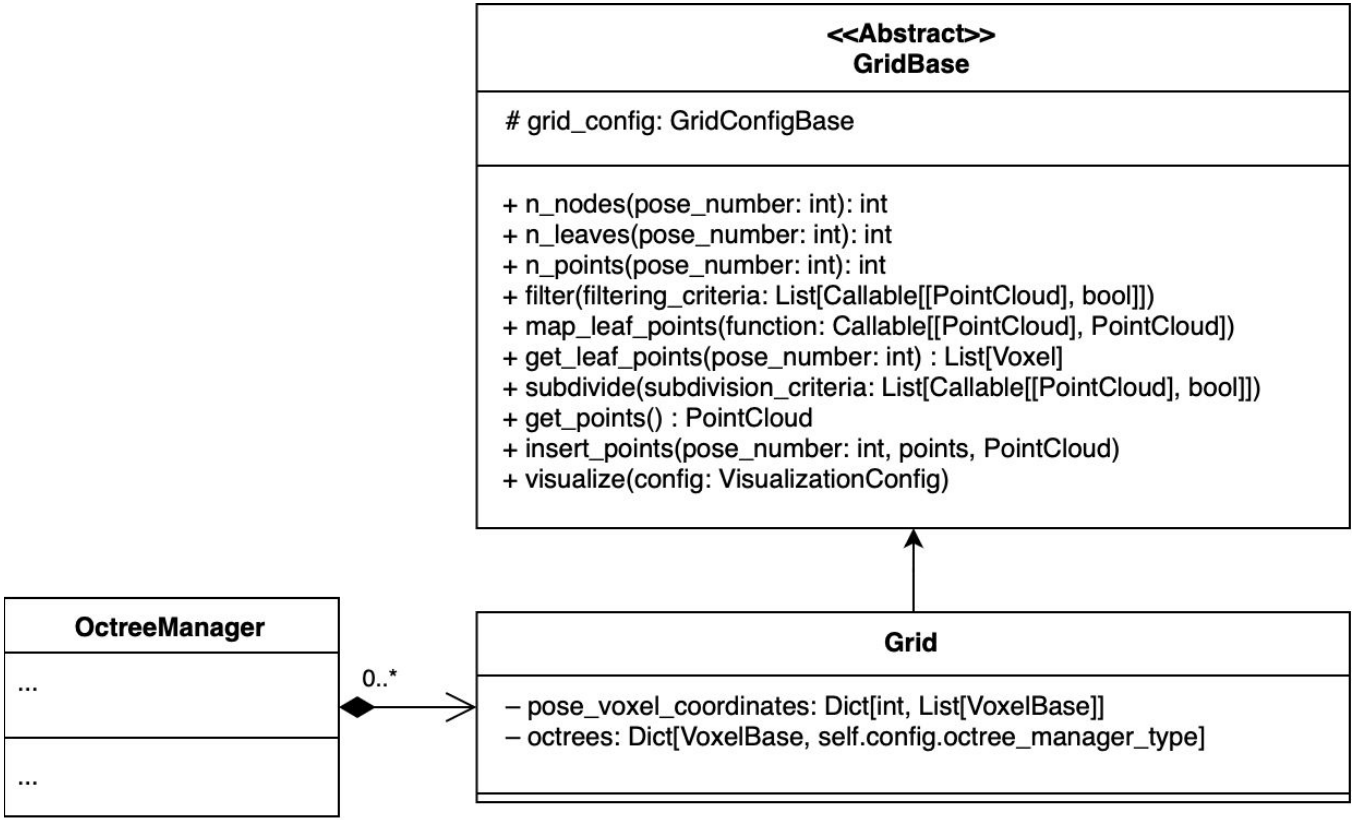
65 облаков		Наименьший размер вокселя октодерева (м)					
		2	4	8	16	32	64
Изначальный размер вокселя (м)	2	11.744					
	4	17.463	9.578				
	8	23.959	15.585	8.822			
	16	30.868	22.188	15.293	8.530		
	32	38.027	29.359	22.277	15.499	8.340	
	64	45.450	36.711	29.555	22.707	15.205	8.270
	128	52.663	43.850	36.691	29.866	22.050	12.152

Время выполнения (в секундах)

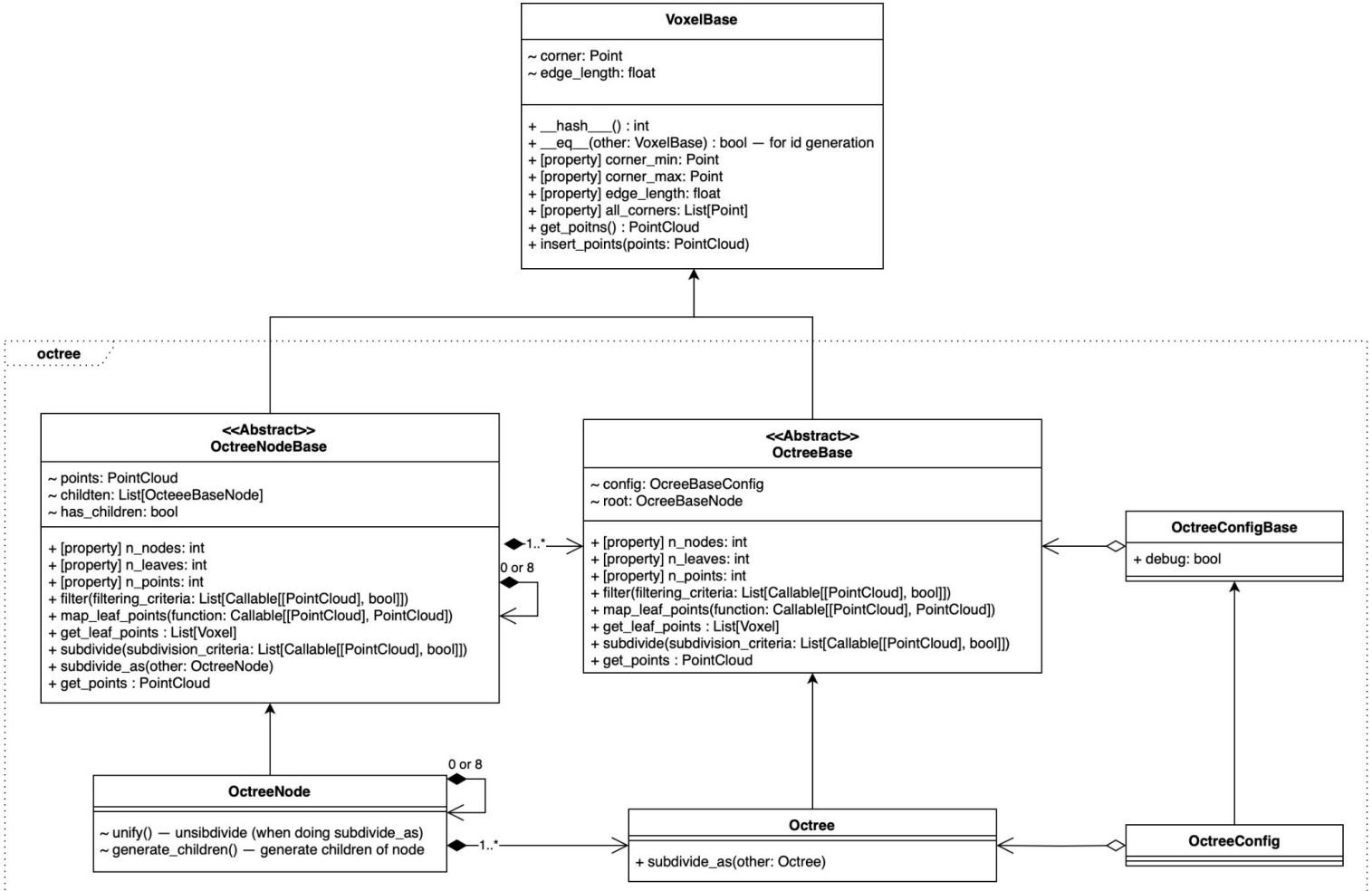
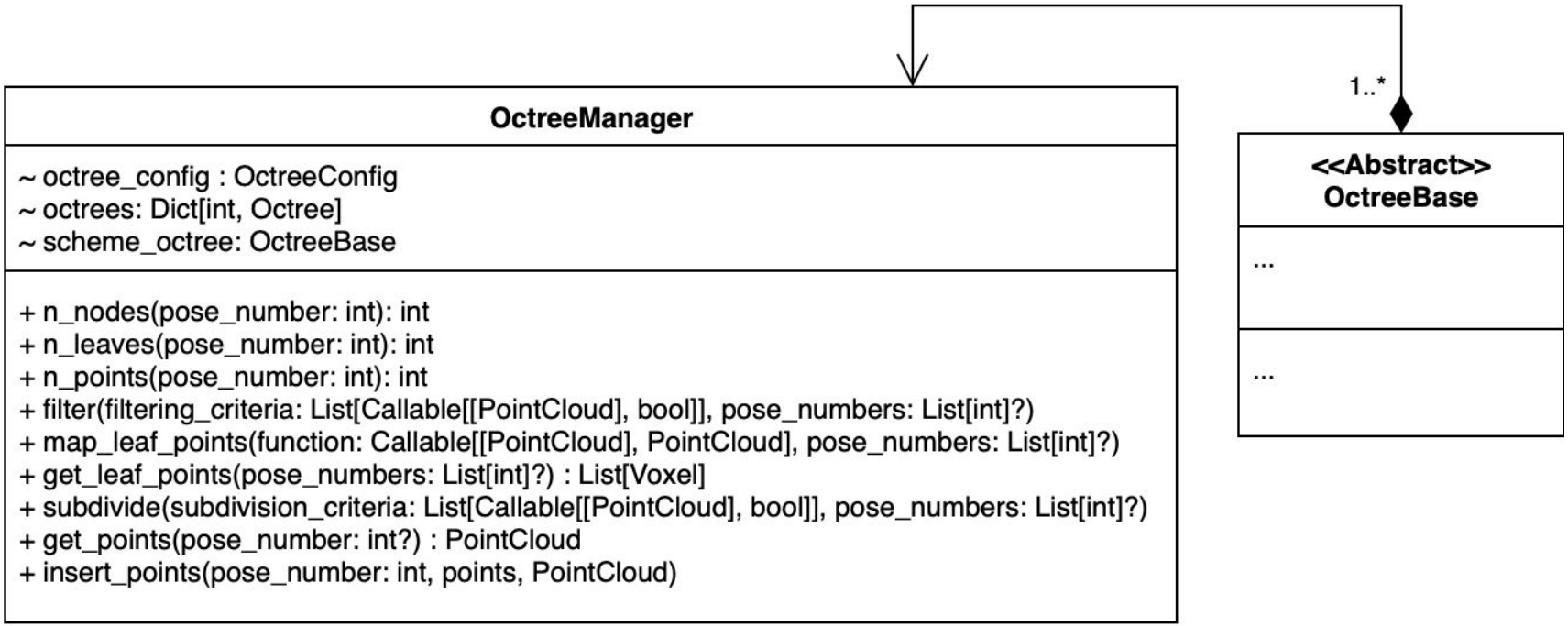
Эксперимент. Результаты. Деление деревьев

		Наименьший размер облака в вокселе					
		2	4	8	16	32	64
Изна-чальный размер вокселя	2	0.063					
	4	0.378	0.023				
	8	0.616	0.258	0.011			
	16	0.86	0.504	0.23	0.005		
	32	1.061	0.722	0.464	0.222	0.004	
	64	1.281	0.941	0.676	0.441	0.222	0.003
	128	1.526	1.162	0.893	0.656	0.439	0.003

Архитектура решения. Модуль `grid`



Архитектура решения. Модуль `octree`



Архитектура решения. Модуль `octree_manager`