



Санкт-Петербургский государственный университет
Кафедра системного программирования

Оптимизация алгоритма определения относительной позы многокамерной системы

Кирилл Андреевич Иванов, группа 19.Б11-мм

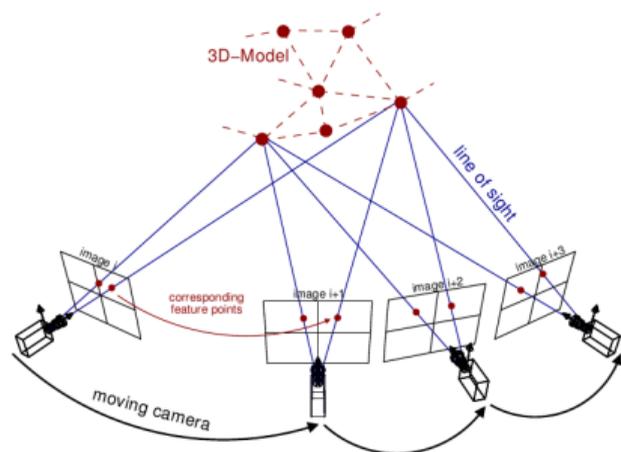
Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. каф. СП А.Н. Терехов

Консультант: М.А. Терехов

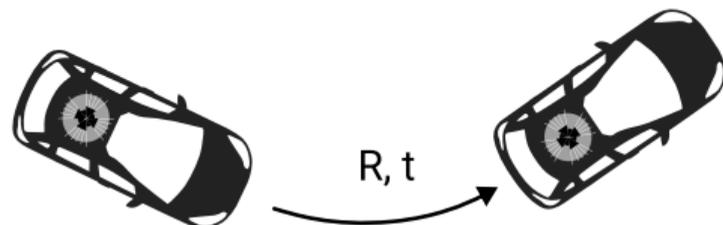
Санкт-Петербург
2022

Введение

- Относительная поза – позиция и ориентация одной точки обзора камеры по отношению к другой



(a) Структура по движению¹



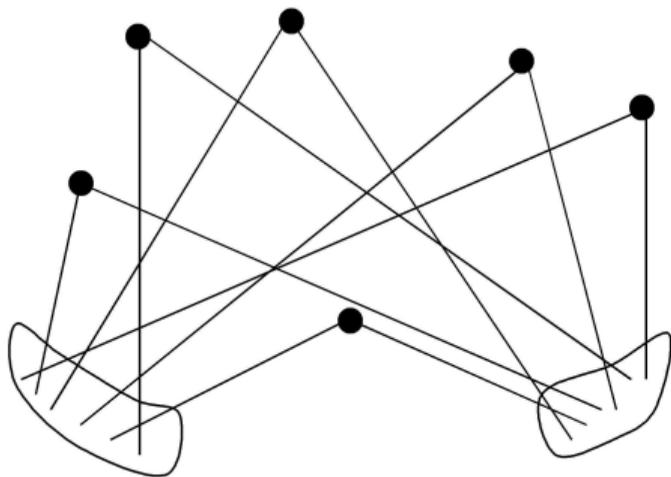
(b) Позиционирование

Рисунок: Задачи, требующие вычисления относительной позы

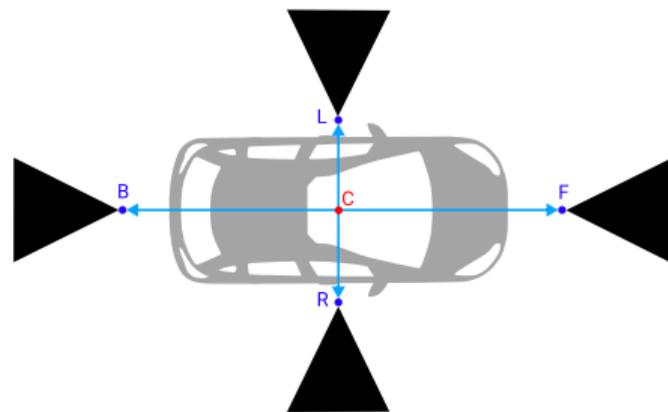
¹<http://theia-sfm.org/sfm.html>

Обобщенная относительная поза

- Обобщенная камера – устройство захвата изображений, имеющее произвольную форму



(a) Обобщенная относительная поза²



(b) Схема многокамерной системы

²Stewénius, H., Nistér, D., Oskarsson, M., & Åström, K. (2005). Solutions to minimal generalized relative pose problems. In Workshop on omnidirectional vision, Beijing, China, October 2005

RANSAC и минимальные решатели

- Минимальный решатель (minimal solver) – алгоритм, оценивающий относительную позу по минимальному набору соответствий
- RANSAC (Random Sample Consensus) – итеративный алгоритм для оценки параметров модели по зашумленному набору данных

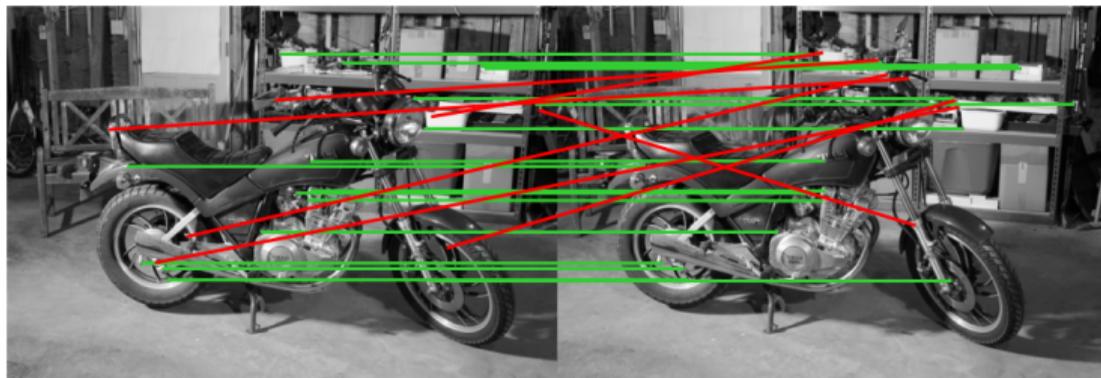


Рисунок: Набор соответствий точек на двух изображениях: зеленым цветом выделены действительные соответствия (inliers), красным – выбросы (outliers)

- На каждом шаге RANSAC строит модель при помощи минимальных решателей
- Вычисление относительной позы решателем зачастую занимает бóльшую часть времени итерации
- Большое количество итераций схемы RANSAC

Постановка цели и задач

Целью работы является ускорение вычисления обобщенной относительной позы многокамерной системы в схеме RANSAC путем оптимизации минимального решателя по времени исполнения

Задачи:

- Отобрать реализации минимальных решателей и произвести их сравнительный анализ по времени исполнения и точности определения позы с целью выявления алгоритма для дальнейшей оптимизации
- Произвести профилирование и определение узких мест выбранной реализации
- Реализовать оптимизированную версию минимального решателя, интегрировать её в схему RANSAC и достигнуть ускорения в вычислении относительной позы
- Провести апробацию и анализ полученных результатов

Исследовательские вопросы:

- Какова зависимость точности оценки позы от уровня зашумленности данных? Какие решатели менее остальных восприимчивы к уровню зашумленности?
- Какие решатели лидируют в скорости вычисления относительной позы?
- Какова производительность интегрированных в схему RANSAC решателей?

Характеристики системы:

- Intel(R) Core(TM) i5-11300H @ 3.10GHz (отключенный Turbo Boost), 16 Гб DDR4 2400 МГц
- Ubuntu 21.10, C++17, g++ 11.2.0
- Флаги компилятора `-O3 -march=native -ffast-math -fno-unsafe-math-optimizations -funroll-loops`

Исследуемые минимальные решатели

- Открытые реализации были найдены в библиотеках PoseLib³, COLMAP⁴, OpenGV⁵ и multi-camera-motion⁶

Название	Кол-во соответствий	Реализации	Замечание
6 точ.	6	PoseLib	Larsson et al. (CVPR 2017)
5+1 точ.	6	PoseLib	Центральная поза (5 соотв.) и масштаб (1 соотв.)
17 точ.	17	OpenGV	Li et al. (IEEE 2008)
8 точ.	8	OpenGV, COLMAP	Kneip et al. (CVPR 2014)
6 точ. (лин.)	6	multi-camera-motion	Ventura et al. (ICCV 2015)
3+3 точ.	6	Предоставлена авторами	Zhao et al. (2021)

Таблица: Исследуемые минимальные решатели

³Viktor Larsson. PoseLib - Minimal Solvers for Camera Pose Estimation. – URL: <https://github.com/vlarsson/PoseLib>

⁴Schonberger, Johannes L., and Jan-Michael Frahm. "Structure-from-motion revisited." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016.

⁵Kneip, Laurent, and Paul Furgale. "OpenGV: A unified and generalized approach to real-time calibrated geometric vision." 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014.

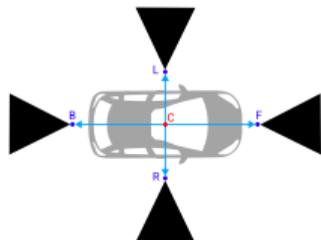
⁶Jonathan Ventura. Multi-camera Motion: Efficient minimal solvers for multi-camera motion. – URL: <https://github.com/jonathanventura/multi-camera-motion>

Метрики и наборы данных

Используемые метрики

- Абсолютная ошибка смещения (Absolute Translation Error, ATE)
- Абсолютная ошибка вращения (Absolute Rotation Error, ARE)
- Угловая (относительная) ошибка смещения (Relative Translation Error, RTE)

Наборы данных



(a) Синтетический



(b) AutoVision⁷



(c) HoloLens 2⁸



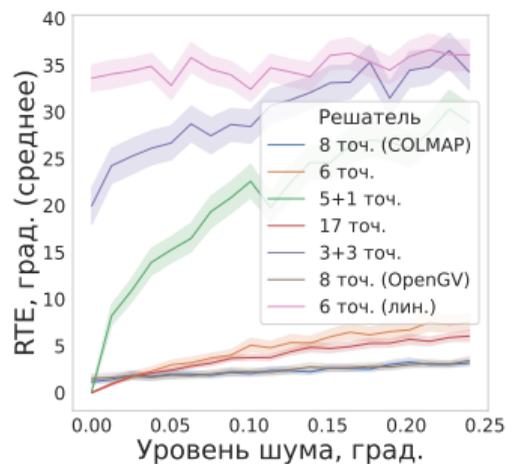
(d) Multi-FoV⁹

⁷Heng, Lionel, et al. "Project autovision: Localization and 3d scene perception for an autonomous vehicle with a multi-camera system." 2019 ICRA

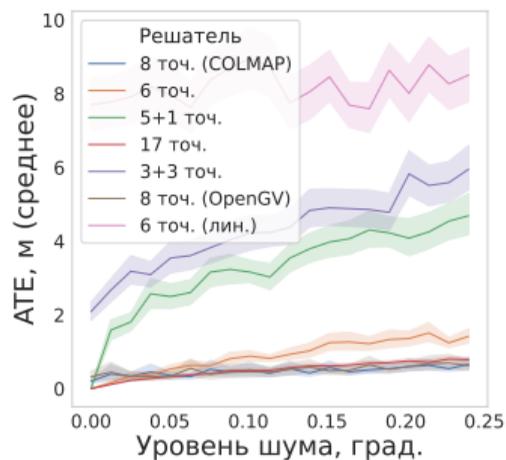
⁸ETH Zurich Computer Vision Group and Microsoft Mixed Reality & AI Lab Zurich. "The ETH-Microsoft Localization Dataset". – URL: <https://github.com/cvg/visloc-iccv2021>

⁹Zhang, Zichao, et al. "Benefit of large field-of-view cameras for visual odometry." 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016.

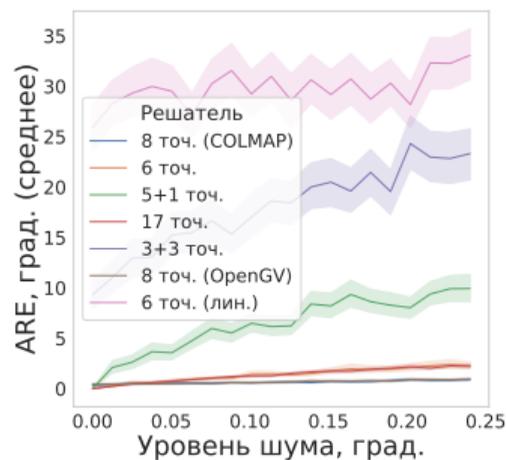
Экспериментальное исследование: стабильность



(e) Угл. ошибка смещения



(f) Абс. ошибка смещения



(g) Абс. ошибка вращения

Рисунок: Зависимость ошибок решателей от уровня зашумленности данных

Экспериментальное исследование: время исполнения

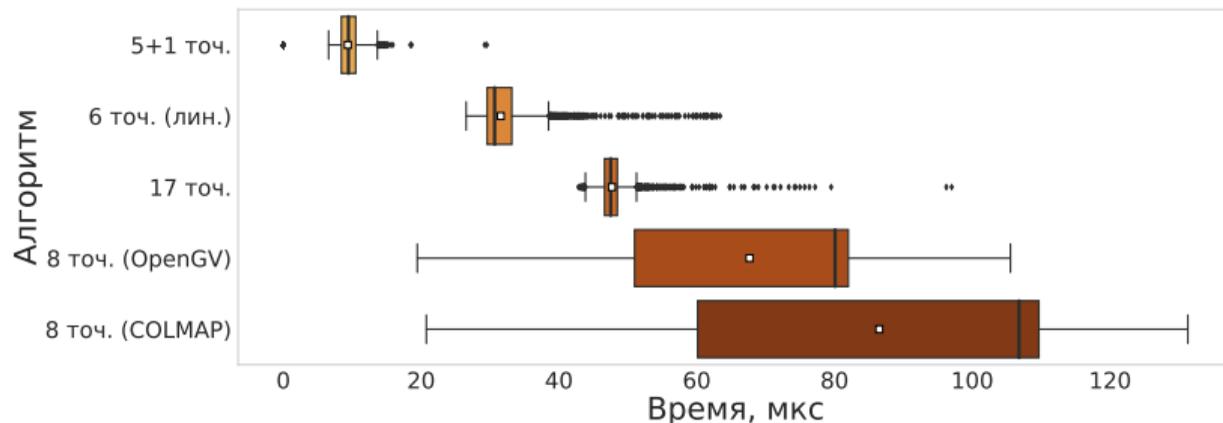


Рисунок: Время исполнения решателей: белому квадрату соответствует среднее время; 6 точ. и 3+3 точ. не отображены

Решатель	17 точ.	3+3 точ.	5+1 точ.	6 точ.	6 точ. (лин.)	8 точ. (COLMAP)	8 точ. (OpenGV)
Среднее, мкс	49	988	9	860	32	86	69
Медиана, мкс	48	989	9	859	31	106	81
Ст. отклонение, мкс	5	51	2	47	4	29	19

Таблица: Оценки времени работы минимальных решателей

Экспериментальное исследование: RANSAC

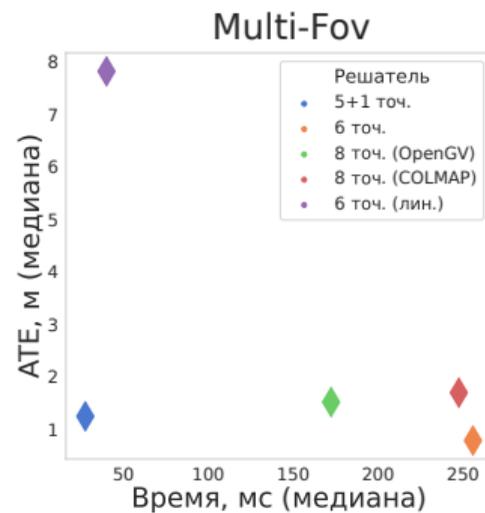
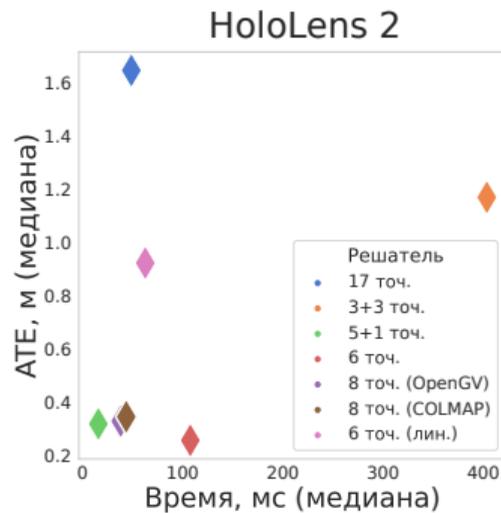
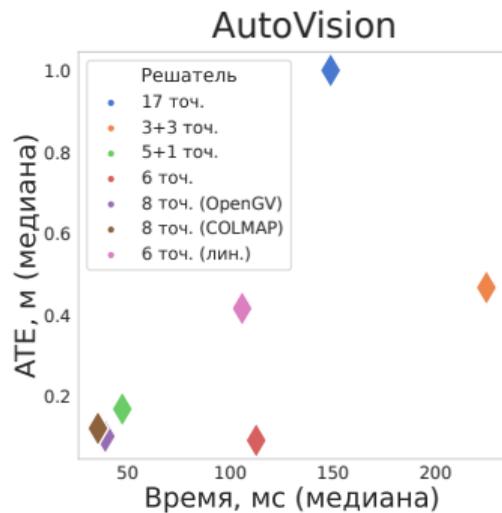


Рисунок: Сравнение минимальных решетелей: соотношения времени и абсолютной ошибки смещения; отсутствующие отметки соответствуют значительно более высоким показателям времени или ATE

Результаты профилирование 8 точ. решателя

- Функция `composeG` – узкое место алгоритма
- Пути оптимизации:
 - ▶ Ускорение работы `composeG`
 - ▶ Сокращение количества итераций минимизации

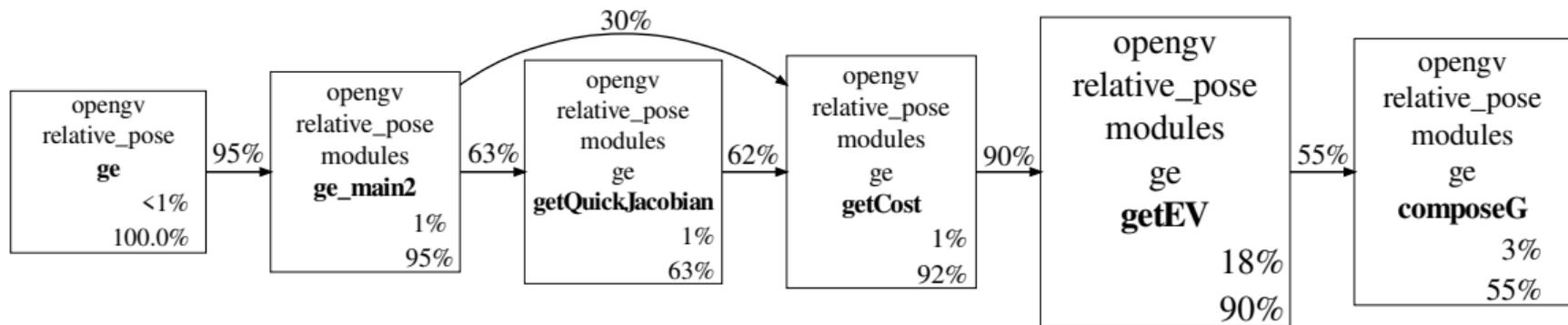


Рисунок: Граф вызовов 8 точ. (OpenGV): отображаются узлы с долей семплов большей, чем 0.1

Реализация

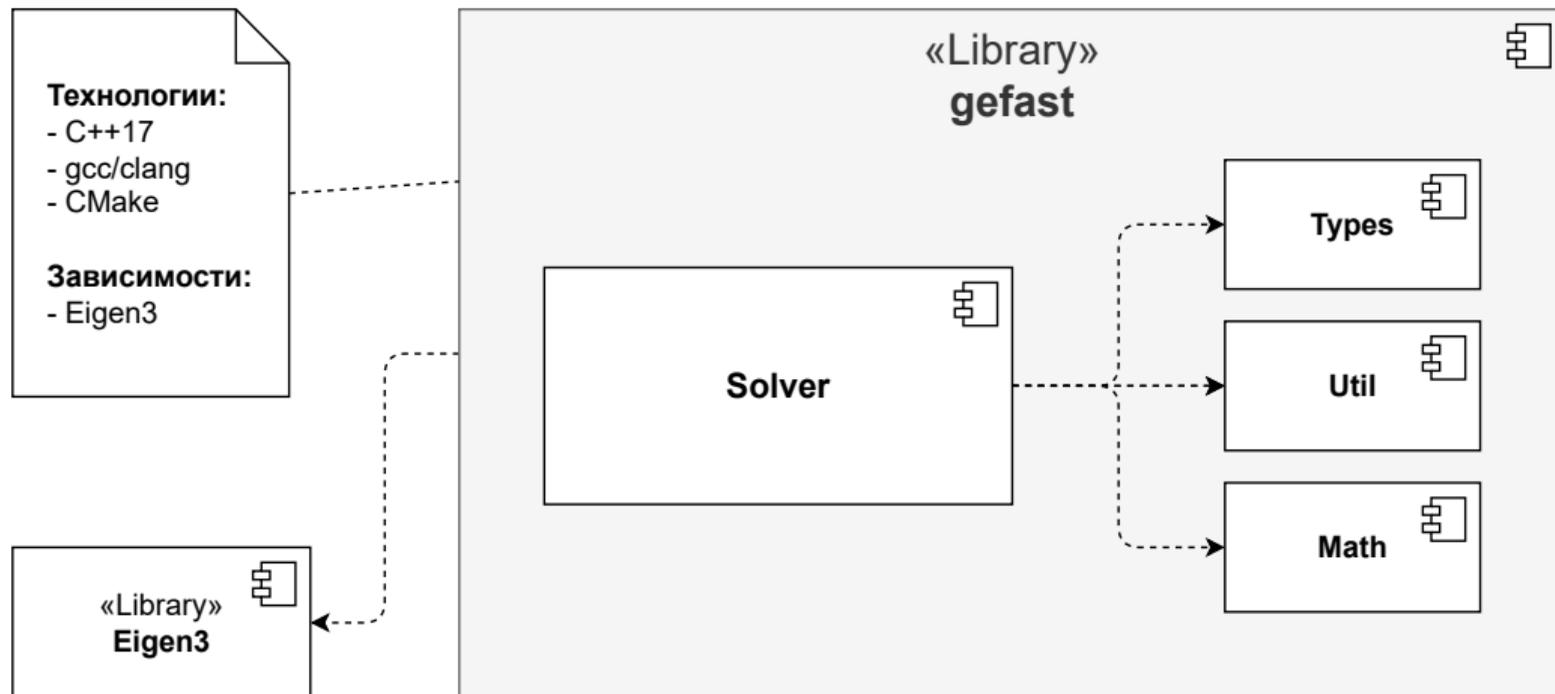


Рисунок: Диаграмма компонентов библиотеки

Реализация: оптимизация 8 точ. решателя

- Использование SIMD
 - ▶ AVX 2
 - ▶ Векторизация вычисления функции `composeG`
- Изменение схемы итеративной минимизации
 - ▶ Алгоритм Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS)
 - ▶ Среднее количество вызовов `composeG` функции сокращено с 188 ± 92 до 83 ± 27

Исследование полученной реализации: время исполнения

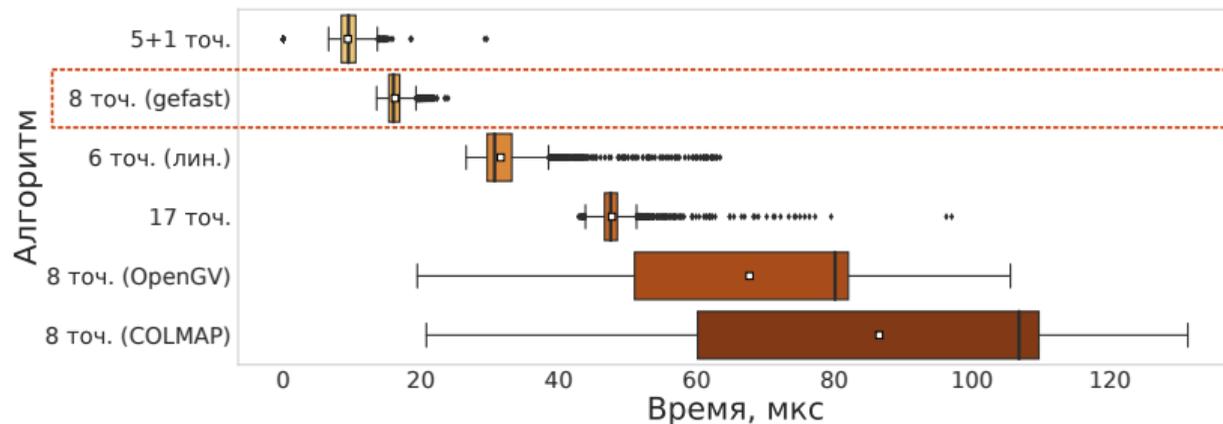
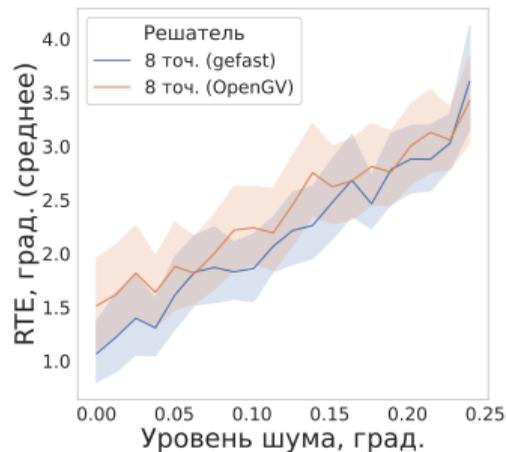


Рисунок: Время исполнения решателей: белому квадрату соответствует среднее время; 6 точ. и 3+3 точ. не отображены

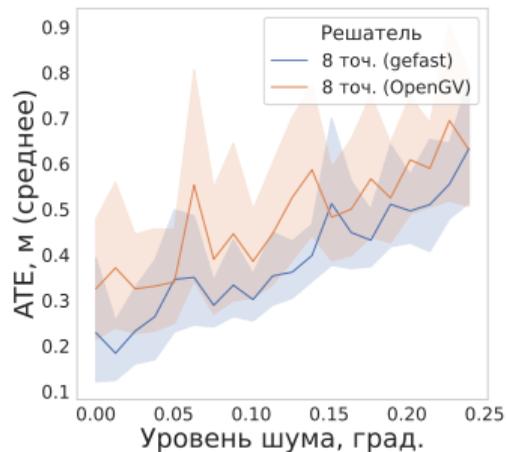
Решатель	17 точ.	3+3 точ.	5+1 точ.	6 точ.	6 точ. (лин.)	8 точ. (COLMAP)	8 точ. (OpenGV)	8 точ. (gefast)
Среднее, мкс	49	988	9	860	32	86	69	16
Медиана, мкс	48	989	9	859	31	106	81	16
Ст. отклонение, мкс	5	51	2	47	4	29	19	1

Таблица: Оценки времени работы минимальных решателей

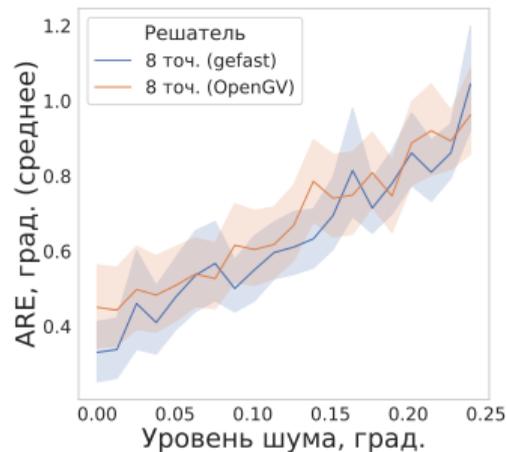
Исследование полученной реализации: стабильность



(a) Угл. ошибка смещения



(b) Абс. ошибка смещения



(c) Абс. ошибка вращения

Рисунок: Зависимости ошибок базовой и оптимизированной версий восьмиточечного решателя от уровня зашумленности данных

Исследование полученной реализации: RANSAC

Решатель	AutoVision					HoloLens 2					Multi-FoV				
	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}
6 точ.	0.90	0.54	0.80	109.95	132.23	0.57	0.31	0.63	110.19	413.49	<u>0.73</u>	0.97	0.49	314.25	545.28
6 точ. (лин.)	0.53	0.26	0.67	103.67	96.50	0.20	0.14	0.44	64.22	63.67	0.45	0.92	0.43	<u>42.06</u>	52.20
8 точ. (gefast)	<u>0.89</u>	0.54	0.80	28.98	47.17	0.52	<u>0.29</u>	0.63	14.75	23.39	0.57	0.95	<u>0.46</u>	50.23	<u>41.12</u>
8 точ. (COLMAP)	<u>0.89</u>	<u>0.52</u>	0.80	<u>35.46</u>	50.02	0.49	0.28	0.61	43.55	103.98	0.58	0.95	<u>0.46</u>	247.50	203.75
8 точ. (OpenGV)	<u>0.89</u>	<u>0.52</u>	0.80	36.12	<u>49.35</u>	0.49	0.28	<u>0.62</u>	39.11	86.92	0.57	0.95	<u>0.46</u>	193.31	158.07
17 точ.	0.49	0.24	0.49	148.81	123.81	0.27	0.19	0.34	48.59	68.07	0.16	0.91	0.07	143.02	125.22
5+1 точ.	0.85	0.41	<u>0.77</u>	45.41	76.18	<u>0.53</u>	0.28	0.60	<u>15.64</u>	<u>25.65</u>	0.76	<u>0.96</u>	0.49	26.89	35.06
3+3 точ.	0.77	0.35	0.71	137.66	158.62	0.39	0.25	0.55	152.68	735.64	0.68	0.91	0.44	677.46	1096.85

Таблица: Оценки работы минимальных решателей: $\epsilon_R = AreaUnderCurve$ для вращения с порогом 1° , $\epsilon_t = AreaUnderCurve$ для абсолютного смещения с порогом 0.3 м (AutoVision и HoloLens 2) и 1 м (Multi-FoV), t_{med} , t_{mean} – оценки медианного и среднего времени исполнения соответственно (мс), #inl – медианная доля найденных действительных соответствий, ограничение на количество итераций RANSAC – 3000

В рамках данной работы были получены следующие результаты:

- Отобраны реализации минимальных решателей и произведен их сравнительный анализ по времени исполнения и точности определения позы
- Произведено профилирование и определение узких мест восьмиточечного решателя
- Реализована оптимизированная версия восьмиточечного минимального решателя и достигнуто ускорение в вычислении относительной позы
- Проведена апробация и анализ полученных результатов

Реализация: <https://github.com/kirill-ivanov-a/gefast>

Анализ количества итераций

Конфигурация	AutoVision					HoloLens 2					Multi-FoV				
	ϵ_R	ϵ_t	$\#inl$	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	$\#inl$	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	$\#inl$	t_{med}	t_{mean}
11 итераций	0.89	0.54	0.80	28.98	47.17	0.52	0.29	0.63	14.75	23.39	0.57	0.95	0.46	50.23	41.12
12 итераций	0.89	0.55	0.80	26.74	40.13	0.52	0.29	0.63	13.85	23.23	0.59	0.96	0.46	51.22	42.26
14 итераций	0.89	0.55	0.81	27.21	41.29	0.53	0.30	0.63	14.33	24.71	0.60	0.96	0.47	56.32	47.00
16 итераций	0.90	0.56	0.81	27.15	40.79	0.54	0.31	0.63	14.89	26.66	0.60	0.97	0.47	59.78	51.32
18 итераций	0.90	0.55	0.81	27.90	41.43	0.54	0.31	0.64	15.66	28.58	0.61	0.97	0.47	63.43	55.61
20 итераций	0.90	0.56	0.81	27.80	41.68	0.54	0.31	0.64	16.13	30.42	0.61	0.97	0.47	66.94	59.25

Таблица: Анализ влияния ограничения количества итераций 8-точечного решателя на точность позы и время работы

Анализ количества требуемых соответствий

Конфигурация	AutoVision					HoloLens 2					Multi-FoV				
	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}	ϵ_R	ϵ_t	#inl	t_{med}	t_{mean}
8 точ., 16 ит.	0.90	0.56	0.81	<u>27.15</u>	<u>40.79</u>	0.54	0.31	0.63	<u>14.89</u>	26.66	<u>0.60</u>	0.96	0.47	59.78	51.32
7 точ., 20 ит.	<u>0.89</u>	<u>0.54</u>	<u>0.80</u>	27.48	40.95	<u>0.50</u>	<u>0.28</u>	<u>0.61</u>	15.13	29.33	0.61	<u>0.95</u>	<u>0.46</u>	<u>46.05</u>	<u>51.20</u>
6 точ., 20 ит.	0.87	0.47	0.79	25.08	39.04	0.42	0.25	0.58	14.16	<u>28.10</u>	0.55	0.94	0.43	37.54	45.01

Таблица: Анализ поведения обобщенного решателя на основе собственных чисел для 6, 7 и 8 требуемых соответствий