

Денисов Александр Анатольевич

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПИСАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЯ**

*В статье проведено сравнение известных алгоритмов обнаружения и описания ключевых точек изображения. Целью работы является выявление сильных и слабых сторон каждого из алгоритмов. В экспериментах сравнивались следующие алгоритмы детектирования и описания ключевых точек: SIFT, SURF, FAST/FREAK, BRISK, KAZE и ORB. Сравнение детекторов ключевых точек проводилось по критериям быстродействия и количества найденных ключевых точек. Deskрипторы сравнивались по показателю точности при сопоставлении двух изображений и затраченного времени на описании ключевых точек.*

*Ключевая точка, дескриптор, детектор, SIFT, SURF, FAST, FREAK, BRISK, KAZE, ORB.*

Denisov Aleksandr Anatolyevich

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF IMAGE KEYPOINT DETECTION AND DESCRIPTION ALGORITHMS EFFICIENCY**

*The paper compares known algorithms for detecting and describing image keypoints. The goal of the study is to identify the advantages and disadvantages of each algorithm. The following algorithms for detecting and describing keypoints were compared in the experiments: SIFT, SURF, FAST/FREAK, BRISK, KAZE and ORB. The comparison of keypoint detectors was carried out according to the criteria of performance and the number of keypoints found. The descriptors were compared in terms of accuracy in matching two images and computational time of describing keypoints.*

*Keypoint, descriptor, detector, SIFT, SURF, FAST, FREAK, BRISK, KAZE, ORB.*

### **Введение**

Сопоставление изображений лежит в основе многих задач компьютерного зрения, включая восстановление 3D-структур, одновременную локализацию и картографирование (SLAM) и обнаружение изменений [1], совмещение изображений [2,3], робототехнику, системы автоматического пилотирования и системы

безопасности, системы распознавания лиц и т. д. Задачу сопоставления изображений можно решить с помощью, так называемых ключевых точек.

Ключевые точки или точки интереса — это такие точки (пиксели), по которым можно классифицировать изображение, распознать его, некая особенность изображения, уникальность [4]. Ключевая точка (пиксель) обладает характерной окрестностью, то есть отличной от окрестности всех соседних точек. Уникальность ключевой точки характеризуется вектором признаков, рассчитываемых на основе направлений и модулей векторов градиентов или других характеристик окрестностей точек. С помощью ключевых точек можно проанализировать как изображение в целом, так и объекты в них [5]. После обнаружения и описания ключевых точек эти данные могут быть использованы для сопоставления с ключевыми точками других изображений. Особенно эффективен данный подход в случаях ограничения вычислительных возможностей и необходимости производить поиск объектов в реальном времени.

#### **Детекторы и дескрипторы ключевых точек**

Существует множество алгоритмов обнаружения и описания ключевых точек, использующих различные методы вычисления и записи ключевых точек. Они отличаются по корректности детектирования ключевых точек, по затратам времени на вычисления и обработку изображений, подверженных различным искажениям, таким как поворот, масштабирование, изменение угла съемки, размытие, изменение освещения и наличие шумов. С учетом этих особенностей, целесообразным представляется сравнительный анализ наиболее известных и широко применяемых алгоритмов для выявления их сильных и слабых сторон.

#### **Экспериментальная часть**

Сравнение исследуемых алгоритмов проводилось на основе данных, полученных экспериментальным путем с использованием платформы программирования и числовых вычислений MATLAB (версия 23.2.0.2485118 (R2023b) Update 6) и расширения Computer Vision Toolbox. Вычисления проводились на компьютере Apple MacBook Pro с процессором Apple M1 Max и 32ГБ общей оперативной и видеопамяти. Операционная система – macOS Sonoma версии 14.4.1 (23E224).

В исследовании использовался открытый набор данных Oxford [6], в состав которого входит 8 групп изображений, каждая из которых подвержены одному из типов преобразований, среди которых: поворот,

масштабирование, изменение угла съемки, размытие, изменение освещения и сжатие. Каждая группа содержит по 6 изображений с разной степенью искажений. В табл. 1 приведены соответствия названий групп и типов преобразований, которым подвержены изображения в них.

Таблица 1

Группы набора дынных Oxford

Название группы	Тип преобразования
graff	изменение угла съемки
wall	изменение угла съемки
boat	масштабирование и вращение
bark	масштабирование и вращение
bikes	размытие
trees	размытие
ubc	сжатие (наличие шумов)
leuven	изменение освещения

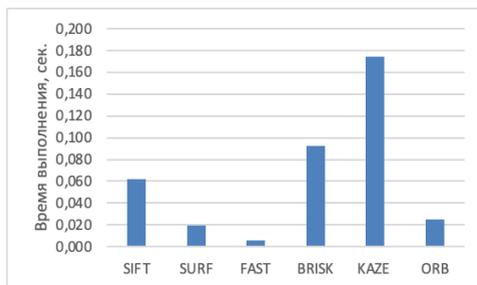
В данной работе рассматриваются следующие детекторы и дескрипторы ключевых точек: SIFT, SURF, FAST/FREAK, BRISK, KAZE и ORB [7-12]. Все сравниваемые алгоритмы входят в состав расширения Computer Vision Toolbox в виде отдельных функций, и их вызов происходил с настройками по умолчанию.

Таблица 2

Среднее количество обнаруженных ключевых точек

Название группы	SIFT	SURF	FAST	BRISK	KAZE	ORB
graff	3247	1775	1123	3249	8084	13868
wall	8961	2308	3051	4742	13682	47618
boat	5360	1907	2768	5389	8593	27397
bark	5708	1817	1322	2580	8660	26150
bikes	1197	610	150	545	4962	4543
trees	7922	3355	4563	7873	14486	44549
ubc	4848	1610	2220	3937	8460	25946
leuven	1605	639	756	1335	4486	7276

Поскольку скорость обработки изображений не зависит от типа изображения, то результаты по этому показателю можно сравнивать по среднему значению без разбивки на группы (рис. 1).

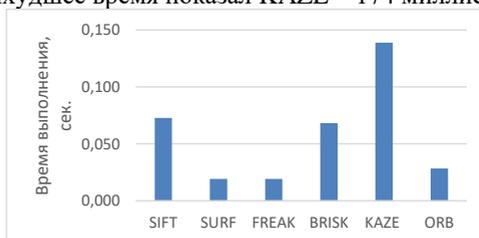


*Рис. 1. Среднее время работы алгоритмов обнаружения ключевых точек для обработки одного изображения*

Оценка результатов работы алгоритмов обнаружения ключевых точек проводилась по показателю количества найденных точек и времени обработки одного изображения. В табл. 2 представлены усредненные результаты по количеству обнаруженных ключевых точек с разбивкой по группам изображений.

Из табл. 2 видно, что алгоритмы SURF и FAST в среднем обнаружили меньше ключевых точек, чем остальные алгоритмы. При этом алгоритмы SIFT и BRISK выделили примерно в два раза больше ключевых точек. Заметно большее количество (в среднем в 3–10 раз) ключевых точек обнаружено алгоритмом ORB.

При этом время работы алгоритмов значительно отличается, и здесь можно объективно выделить лидера. Метод FAST показал наилучшие результаты, в среднем потратив на обработку одного изображения 6 миллисекунд. Хорошие результаты также продемонстрировали алгоритмы SURF и ORB со средним временем 20 и 25 миллисекунд соответственно. Остальные алгоритмы затратили значительно больше времени на вычисления, и наихудшее время показал KAZE – 174 миллисекунды.

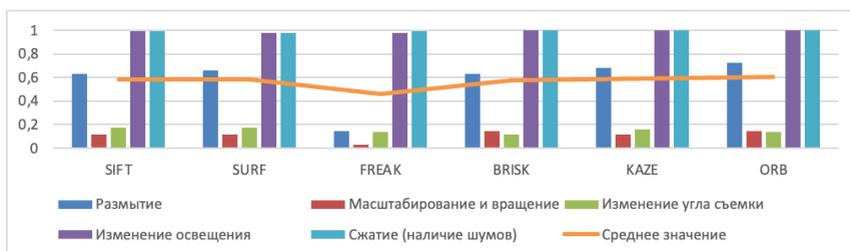


*Рис. 2. Среднее время работы алгоритмов описания ключевых точек для обработки одного изображения*

Для оценки эффективности дескрипторов также использовалось время работы алгоритма (рис. 2) и показатель корректности сопоставления «Inlier Ratio» (Рис. 3).

Из рис. 2 следует, что распределение времени работы алгоритмов-дескрипторов аналогично распределению времени работы детекторов. KAZE снова выполняется дольше остальных алгоритмов, а FREAK (дескриптор для точек, обнаруженных методом FAST), SURF и ORB демонстрируют максимальную скорость выполнения.

С точки зрения времени сопоставления лучшие результаты показали SURF, FREAK и BRISK. Их время сопоставления заняло 12, 13 и 24 миллисекунды соответственно.



*Рис. 3. Средние значения параметра Inlier Ratio, сгруппированные по типам преобразований изображений*

Для определения качества обнаруженных и описанных ключевых точек использовался параметр Inlier Ratio, алгоритм определения которого заключается в следующих шагах:

1. Вычисление фундаментальной матрицы с использованием сопоставленных точек.
2. Вычисление эпполярных линий для каждого из двух изображений.
3. Поиск ближайших точек на эпполярных линиях к точкам изображения.
4. Оценка расстояния между рассчитанными ближайшими точками и изначальными парами точек на изображениях.
5. Определение порогового расстояния, меньше которого можно считать сопоставление точек верным.

6. Подсчет количества «inliers» - пар точек, расстояние между которыми меньше порога.

7. Вычисление соотношения количества «inliers» к общему числу пар точек.

Чем ближе значение Inlier Ratio к единице, тем более точным является сопоставление.

Из рис. 3 видно, что все алгоритмы корректно справились с задачами обработки изображений, подверженных сжатию и изменению угла освещения. Также наблюдается высокое значение корректности обработки изображений с размытием. При этом стоит заметить, что все алгоритмы, кроме FREAK справились с размытыми изображениями на высоком уровне, испытывая сложности только с максимальным уровнем размытия. Тогда как FREAK смог корректно сопоставить только изображения с минимальным размытием.

Аналогичное отставание алгоритма FREAK наблюдается и при работе с изображениями, подверженными масштабированию и вращению. Остальные алгоритмы продемонстрировали результат на стабильно равном уровне.

### **Заключение**

Рассмотрены алгоритмы обнаружения и описания ключевых точек, являющиеся стандартом в области компьютерного зрения при решении задач сопоставления изображений. Проанализированы и обобщены преимущества и недостатки рассмотренных методов обнаружения и описания ключевых точек, что позволяет учитывать их при выборе метода для реальных приложений.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Nancy Xu, Giannis Nikolentzos, Michalis Vazirgiannis, and Henrik Boström*, “Image Keypoint Matching using Graph Neural Networks”, *Complex Networks & Their Applications X* (pp.441-451). DOI:10.1007/978-3-030-93413-2\_37.

2. *Anatoly I. Novikov, Victoria A. Sablina, Aleksey I. Efimov, Michael B. Nikiforov*. Contour Analysis in the tasks of real and virtual images superimposition// *Journal Coupled Systems and Multiscale Dynamics*, vol 4(4), 2016. – Pp. 251-259. (Doi: 10.1166/jcsmd. 2016.1112 J. Coupled Syst. Multiscale Dyn. vol 4(4)/2330-152X/2016/251/009).

3. *Новиков А.И., Пронькин А.В.* Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности. – М.: Горячая линия- Телеком, 2023. – 224 с.

4. *Ивашечкин А. П., Василенко А. Ю., Гончаров Б. Д.*, “Методы нахождения особых точек изображения и их дескрипторов”, *Международный научный журнал “Молодой учёный” № 15 (119) / 2016.*

5. *Mikhaylov A.V., Kovalenko P.O., Kataev A.V., Rozaliev V.L.*, “Methods for Searching Key Points in Images”, IV International research conference "Information technologies in Science, Management, Social sphere and Medicine". DOI:10.2991/itsmssm-17.2017.47.

6. Oxford Image Matching Dataset. – URL: [https://cvssp.org/featurespace/web/related\\_papers/graffiti.html](https://cvssp.org/featurespace/web/related_papers/graffiti.html) (дата обращения: 22.04.2024).

7. *A. Alahi, O. Raphael, and V. Pierre*, “FREAK: fast Retina keypoint,” in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 510–517, IEEE, Providence, RI, USA, June 2012. DOI:10.1155/2021/8509164.

8. *Lowe D.G.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.

9. *H. Bay, T. Tinne, and V. G. Luc*, “SURF: speeded up robust features,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346–359, 2008. DOI:10.1007/11744023\_32.

10. *P. F. Alcantarilla, A. Bartoli and A. J. Davison*, KAZE Features,” *ECCV 2012*, Springer, vol. 7577, London, UK, 2012. DOI:10.1007/978-3-642-33783-3\_16.

11. *Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R. Y.* “BRISK: binary robust invariant scalable keypoints,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 2548–2555, IEEE, Barcelona, Spain, November 2011. DOI:10.1109/ICCV.2011.6126542.

12. *E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski*, “ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF,” in Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, pp. 2564–2571, IEEE, Barcelona, Spain, November 2011. DOI:10.1109/ICCV.2011.6126544.

**Денисов Александр Анатольевич**, аспирант, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Россия, город Рязань, улица Гагарина, 59, 390005, email: denal777@gmail.com.

**Denisov Aleksandr Anatolyevich**, PhD student, Ryazan State Radio Engineering University named after Utkin V.F., Ryazan, 59 Gagarina Street, 390005, Russia, email: denal777@gmail.com.