

УДК 004.93

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11

## АЛГОРИТМ ПОИСКА УСТОЙЧИВЫХ СООТВЕТСТВИЙ ПАР КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ И КАРТАХ ГЛУБИНЫ

А. А. ДАШКЕВИЧ\*, Д. В. ВОРОНЦОВА, Н. В. СКОРОБОГАТЬКО

кафедра геометрического моделирования и компьютерной графики, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

\*e-mail: dashkewich.a@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Развитие эффективных методов компьютерного зрения постоянно находится в центре исследований многих учёных, так как они дают возможность повысить скорость и эффективность решения задач в различных отраслях промышленности: картография, робототехника, системы виртуальной и дополненной реальности, системы автоматизированного проектирования. Значительную перспективу имеют современные исследования, методы и алгоритмы решения задач стереозрения, распознавания образов, в том числе те, которые работают в режиме реального времени. Одной из важных задач стереозрения является задача сопоставления карт глубины для получения трёхмерной модели сцены, но есть некоторые нерешенные вопросы процесса сопоставления карт глубины для крупномасштабных сцен окружающей среды, полученных беспилотными летательными аппаратами, а именно: низкое разрешение по глубине из-за большого расстояния сцены от камеры, и проблема наличия шума вследствие дефектов камеры. Указанные проблемы затрудняют обнаружение ключевых точек на изображениях для их дальнейшего сопоставления. В представленной работе предлагается подход к определению ключевых точек на смежных картах глубин на основе поиска ключевых точек, находящихся в близких областях пространства параметров. Подход базируется на поиске множества ключевых точек в двух последовательных видеокдрах и нахождении среди них пар точек таких, что каждая точка пары соответствует одной и той же точке сцены на входном изображении. Соответствующие пары ключевых точек, которые локализованы детектором признаков, могут быть ложно-положительными. Предложенный алгоритм может устранить такие пары точек путём определения преобладающего направления движения ключевых точек в локальных участках изображения, а также алгоритм даёт возможность определения центра смещение точки обзора камеры, чем обеспечивает лучшую оценку положения съёмочного оборудования. Результаты работы реализованы в виде программного приложения и протестированы на видеоматериалах, полученных беспилотным летательным средством

**Ключевые слова:** компьютерное зрение; стереозрение; распознавание образов; карта глубины; трёхмерная модель сцены; сопоставление ключевых точек; детектор признаков; беспилотный летательный аппарат

## AN ALGORITHM OF SEARCH OF KEY POINT PAIRS STORNG CORRESPONDENCES IN IMAGES AND DEPTH MAPS

A. DASHKEVICH, D. VORONTSOVA, N. SKOROBOGATKO

Geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The development of effective computer vision methods resides at the center of many scholars, as they can increase the speed and efficiency of many tasks in various industries - cartography, robotics, in systems of virtual and additional reality, computer-aided design systems. Modern research, methods and algorithms of solving stereovision problems, image recognition, including those that work realtime, have significant perspective. One of the important tasks of the stereo vision is the task of depth maps matching into a three-dimensional model of the scene, but there are some unresolved issues regarding the process of mapping depth maps of large-scale environmental scenes obtained by unmanned aerial vehicles namely: low resolution in depth due to a large distance from the scene to the camera and the noise problem because of camera defects. Depicted problems make harder the search of key points in images for their further registration. The approach for the determination of key points on adjacent depth maps based on the search for key points, which locate in close-range areas of the parameter space. The approach is based on a search of key points set from two sequential video frames and a search from that set of pairs of points, that every point from each pair match to the same point in the scene. The corresponding pairs of key points that are localized by the feature detector may be false-positive. The above algorithm can eliminate these pairs of points by determining the preferred direction of movement of key points in the local areas of the image, and also the algorithm makes it possible to determine the displacement center of the camera's point of view, which provides a better estimate of the camera pose estimation. The method is implemented as a program application and tested on video materials, obtained by an unmanned aerial vehicle

**Keywords:** computer vision; stereovision; pattern recognition; depth map; three-dimensional model of scene; key point registration; feature detector; unmanned aerial vehicle

### Введение

Одной из ключевых задач в области компьютерного зрения является задача

восстановления трехмерной модели сцены по набору изображений. Важным этапом задачи восстановления является поиск и сопоставление ключевых точек на смежных изображениях для получения карт глубины,

и, на полученных картах глубины, для восстановления трехмерного облака точек. При этом, точность поиска и сопоставления ключевых точек оказывает существенное влияние на точность результирующего облака точек. Существующие подходы к решению проблемы точности сопоставления можно разделить на методы поиска ключевых точек на исходных изображениях на основе детекторов устойчивых признаков, таких как SIFT, SURF или ORB [1-3] и методы сопоставления карт глубин [4]. В свою очередь, для решения задачи сопоставления карт глубин используются вариации итеративного поиска ближайших точек (ICP) [5], алгоритмы сопоставления устойчивых точек [6], методы теории вероятностей и статистики [7,8], методы глубокого обучения на основе нейронных сетей [9].

В силу простоты реализации и наглядности наибольшее распространение для решения задачи восстановления точечных множеств из карт глубин получили алгоритмы на основе итеративного поиска ближайших точек [5,10,11]. В работе [12] приведен детальный сравнительный обзор методов ICP и пути повышения точности таких алгоритмов. В работе [13] рассматривается вопрос выбора точек для сопоставления в алгоритмах ICP.

Одним из недостатков предложенных подходов является необходимость поиска и сопоставления ключевых точек сначала в пространстве исходных изображений, а затем в пространстве карт глубин, что повышает стоимость вычислений для решения данной задачи. При этом, относительные положения ключевых точек на изображениях и соответствующих им картах глубины в существенной степени совпадают. В представленной работе предлагается подход к решению задачи поиска ключевых точек в пространстве изображений и переноса их на карты глубин.

### Цель работы

Разработка метода нахождения устойчивых пар ключевых точек на изображениях и картах глубин для решения задачи восстановления трёхмерной структуры сцены.

### Изложение основного материала

Пусть задан набор изображений  $F = \{f_1, \dots, f_N\}$  из  $N$  последовательных кадров. Предполагается, что ключевые точки в малой области двух смежных изображений  $f_i$  и  $f_{i+1}$  будут иметь близкие значения вектора  $V$  направления движения. Соответственно, угол наклона  $\Theta$  и модуль  $L = |V|$  данного вектора формируют двумерное пространство параметров. Таким образом, вектора движения близких ключевых точек будут иметь близкие значения  $\Theta$  и  $L$ , а

корректно найденные пары ключевых точек могут быть отобраны на основе весов  $w$ , назначаемых каждой точке в пространстве параметров  $\Theta-L$ .

В работе предлагается следующий метод определения устойчивых пар соответствий в пространстве признаков, который основан на методе пространственного хеширования и разбиения на регулярную сетку [14]:

1) для каждой пары изображений найдем множество ключевых точек  $K = \{k_1, \dots, k_M\}$ ;

2) для определения пар ключевых точек, соответствующей одной и той же точке сцены произведем начальное сопоставление ключевых точек  $k_j \in f_i$  и  $k_t \in f_{i+1}$ ,  $j \neq t$ ,  $(j, t) = 1 \dots M$ . При этом многие пары точек на данном этапе будут представлять собой ложно-положительные срабатывания;

3) для удаления ложно-положительных пар предлагается разбить пространство  $\Theta-L$  на регулярную сетку с размером ячейки  $(c_a, c_l)$  вдоль соответствующих осей, при этом каждой ячейке назначается весовой коэффициент  $w$ , для этого формируем двумерный массив-аккумулятор  $A$ , каждую ячейку которого инициализируем значением  $w = 0$ , также формируем хеш-таблицу  $H$ , в которой будут содержаться индексы точек, находящихся в ячейках пространства параметров;

4) для каждой пары  $(k_j, k_t)$  ключевых точек вычисляется вектор движения  $V = k_t - k_j$ ;

5) для каждого  $V$  вычисляются дискретизированные значение угла и модуля вектора

$$a = \Theta / c_a, \\ l = L / c_l.$$

6) в каждой ячейке  $\Theta-L$ -пространства с индексами  $(a, l)$  увеличиваем значение веса:

$$w = w + 1;$$

7) вычисляем значение ключа хеш-таблицы:

$$h = a \cdot c_l + l;$$

8) в ячейку хеш-таблицы  $H[h]$  вносим индексы точек, попавших в ячейку пространства  $\Theta-L$  с индексами  $(a, l)$ ;

9) после обработки всех пар точек в ячейка массива  $A$ , содержащая самое большое значение  $w$  будет отвечать главному направлению движения пар ключевых точек в данной локальной области изображения, а в соответствующей ячейке хеш-таблицы будут содержаться индексы пар ключевых точек, формирующих указанные вектора. При этом, ложно-положительные пары будут иметь направление и модуль вектора движения преимущественно отличный от главного направления, что дает возможность удалять такие пары из дальнейшего рассмотрения.

### Обсуждение результатов

В соответствии с предложенным подходом была проведена тестовая оценка на данных полученных аэрофотосъемкой с беспилотного летательного аппарата. На рис. 1 приведен результат начального сопоставления ключевых точек, найденных с помощью дескриптора ORB. Для начального сопоставления была применена библиотека приближительного поиска ближайших соседей FLANN [15].

После удаления некорректно сопоставленных пар точек по предложенному алгоритму большая часть ложно-положительных пар была удалена, итоговые пары ключевых точек приведены на рис. 2. Перенос полученных пар точек на карту глубин, построенную на основе пары исходных изображений возможен на основе пространственной близости точек одного изображения из пары (определяется методом построения карт глубин) и точек карты.



Рис. 1 – Результат начального сопоставления ключевых точек на изображениях



Рис. 2 – Результат работы алгоритма

Предложенный алгоритм реализован в виде программного приложения на языке программирования Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

### Выводы

В результате работы разработан метод нахождения устойчивых пар ключевых точек на смежных изображениях, полученных из видео.

Предложенный алгоритм может быть применен для нахождения ключевых точек в задаче восстановления трехмерных моделей сцен на основе двумерных изображений. Так как в результате работы выявляются наиболее точные сочетания ключевых точек, алгоритм позволяет повысить точность как при решении задачи

стереосопоставления изображений, так и при выборе точек для алгоритмов ICP.

К ограничениям подхода следует отнести то, что алгоритм способен находить только пары ключевых точек, полученные в результате относительного движения сцены между кадрами.

### Список литературы

1. Lowe, D. G. Object recognition from local scale-invariant features / D. G. Lowe // *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999. – 2. – P. 1150–1157.
2. Bay, H. SURF: Speeded Up Robust Features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A. (eds.). *Computer Vision – ECCV 2006*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006. – P. 404–417.
3. Rublee, E. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski // *2011 International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, 2011. – P. 2564–2571.
4. Romanoni, A. Multi-view Stereo with Single-View Semantic Mesh Refinement / A. Romanoni, M. Ciccone, F. Visin, M. Matteucci // *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, IEEE, Venice, 2017. – P. 706–715.
5. Bouaziz, S. Sparse Iterative Closest Point / S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, M. Pauly // *Computer Graphics Forum*. – 2013. – 32. – P. 113–123. – doi:10.1111/cgf.12178.
6. Gold, S. New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence / S. Gold, A. Rangarajan, C.-P. Lu, P. Suguna, E. Mjolsness // *Pattern Recognition*. – 1998. – 38 (8). – P. 1019–1031.
7. Lawin, F. J. Density Adaptive Point Set Registration / F. J. Lawin, M. Danelljan, F. S. Khan, P.-E. Forssen, M. Felsberg // *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018. – P. 3829–3837.
8. Evangelidis, G. D. Joint Alignment of Multiple Point Sets with Batch and Incremental Expectation-Maximization / G. D. Evangelidis, R. Horaud // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2018. – 40. – P. 1397–1410. – doi:10.1109/TPAMI.2017.2717829.
9. Riegler, G. OctNetFusion: Learning Depth Fusion from Data / G. Riegler, A. O. Ulusoy, H. Bischof, A. Geiger // *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*, IEEE, Qingdao, 2017. – P. 57–66.
10. Park, S.-Y. An accurate and fast point-to-plane registration technique / S.-Y. Park, M. Subbarao // *Pattern Recognition Letters*. – 2003. – 24. – P. 2967–2976. – doi:10.1016/S0167-8655(03)00157-0.
11. Chetverikov, D. The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm / D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, P. Krsek // *In International Conference on Pattern Recognition*. – 2002. – P. 545–548.
12. Rusinkiewicz, S. Efficient variants of the ICP algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, IEEE Comput. Soc, Quebec City, Que., Canada, 2001. – P. 145–152.

13. **Gelfand, N.** Geometrically stable sampling for the ICP algorithm / **N. Gelfand, L. Ikemoto, S. Rusinkiewicz, M. Levoy** // *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003. 3DIM 2003. Proceedings, IEEE, Banff, Alberta, Canada, 2003. – P. 260–267.
14. **Дашкевич, А. А.** Алгоритм пространственного хеширования для решения задач приближительного поиска ближайших соседей / **А. А. Дашкевич** // *Науковий вісник ТДАТУ*. – 2018. – Вип. 8. –Т. 1. – С. 79–86.
15. **Muja, M.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration / **M. Muja, D. G. Lowe** // *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09*, INSTICC Press, 2009. – P. 331–340.
7. **Lawin, F. J., Danelljan, M., Khan, F. S., Forssen, P.-E., Felsberg, M.** Density Adaptive Point Set Registration. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018, 3829–3837.
8. **Evangelidis, G. D., Horaud, R.** Joint Alignment of Multiple Point Sets with Batch and Incremental Expectation-Maximization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, **40**, 1397–1410, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2717829.
9. **Riegler, G., Ulusoy, A. O., Bischof, H., Geiger, A.** OctNetFusion: Learning Depth Fusion from Data. *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*, IEEE, Qingdao, 2017, 57–66.
10. **Park, S.-Y., Subbarao, M.** An accurate and fast point-to-plane registration technique. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**, 2967–2976, doi:10.1016/S0167-8655(03)00157-0.

#### References (transliterated)

1. **Lowe, D. G.** Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, **2**, 1150–1157.
2. **Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L.** SURF: Speeded Up Robust Features. *Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A. (eds.). Computer Vision – ECCV 2006*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006, 404–417.
3. **Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G.** ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *2011 International Conference on Computer Vision*, IEEE, Barcelona, Spain, 2011, 2564–2571.
4. **Romanoni, A., Ciccone, M., Visin, F., Matteucci, M.** Multi-view Stereo with Single-View Semantic Mesh Refinement. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, IEEE, Venice, 2017, 706–715.
5. **Bouaziz, S., Tagliasacchi, A., Pauly, M.** Sparse Iterative Closest Point. *Computer Graphics Forum*, 2013, **32**, 113–123, doi:10.1111/cgf.12178.
6. **Gold, S., Rangarajan, A., Lu, C.-P., Suguna, P., Mjolsness, E.** New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence. *Pattern Recognition*, 1998, **38** (8), 1019–1031.
11. **Chetverikov, D., Svirko, D., Stepanov, D., Krsek, P.** The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm. *In International Conference on Pattern Recognition*, 2002, 545–548.
12. **Rusinkiewicz, S., Levoy, M.** Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, IEEE Comput. Soc, Quebec City, Que., Canada, 2001, 145–152.
13. **Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., Levoy, M.** Geometrically stable sampling for the ICP algorithm. *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003. 3DIM 2003. Proceedings, IEEE, Banff, Alberta, Canada, 2003, 260–267.
14. **Dashkevich, A.** Algorithm prostranstvennogo heshirovaniya dlya resheniya zadach priblizitel'nogo poiska blizhayshih sosedey. *Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university*, 2018, **8**, 1, 79–86.
15. **Muja, M., Lowe, D. G.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09*, INSTICC Press, 2009, 331–340.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Дашкевич Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», докторант кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-9963-0998; e-mail: dashkevich.a@gmail.com.

**Andrey Dashkevich** – Ph. D., docent, doctoral student of geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9963-0998; e-mail: dashkevich.a@gmail.com.

**Воронцова Дарья Владимировна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-7868-0067; e-mail: davorontso@gmail.com.

**Darya Vorontsova** – Ph. D., docent of geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7868-0067; e-mail: davorontso@gmail.com.

**Скоробогатько Никита Валентинович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-5189-7637; e-mail: drskorik@gmail.com.

**Nikita Skorobogatko** – Ph. D. student, geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5189-7637; e-mail: drskorik@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Дашкевич, А. А.** Алгоритм поиска устойчивых соответствий пар ключевых точек на изображениях и картах глубины / **А. А. Дашкевич, Д. В. Воронцова, Н. В. Скоробогатко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 86-90. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

*Please cite this article as:*

**Dashkevich, A., Vorontsova, D., Skorobogatko, N.** An algorithm of search of key point pairs strong correspondences in images and depth maps. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 86-90, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Дашкевич, А. О.** Алгоритм пошуку стійких відповідностей пар ключових точок на зображеннях та картах глибини / **А. О. Дашкевич, Д. В. Воронцова, М. В. Скоробогатко** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 86-90. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

**АНОТАЦІЯ** Розвиток ефективних методів комп'ютерного зору постійно перебуває у центрі багатьох науковців, адже вони можуть підвищити швидкість і ефективність багатьох задач у різних галузях промисловості - картографія, робототехніка, системи віртуальної і доповненої реальності, системи автоматизованого проектування. Значну перспективу мають сучасні дослідження, методи і алгоритми вирішення задач стереозору, розпізнавання образів, в тому числі ті, які працюють в режимі реального часу. Однією з важливих задач стереозору є задача поєднання карт глибини у тривимірну модель сцени, але є деякі не вирішені питання процесу зіставлення карт глибин для великомасштабних сцен зовнішнього середовища, які отримані безпілотними літаками а саме: низька роздільна здатність по глибині завдяки великій відстані від сцени до камери та проблема наявності шуму внаслідок дефектів камери. Зазначені проблеми створюють труднощі в процесі пошуку ключових точок на зображеннях для їх подальшого зіставлення. В представленій роботі пропонується підхід до визначення ключових точок на суміжних картах глибини на основі пошуку ключових точок, що знаходяться в близьких областях простору параметрів. Підхід базується на пошуку множини ключових точок в двох послідовних відеокадрах та знаходженні серед них пар точок таких, що кожна точка пари відповідає одному й тому ж об'єкту на вхідному зображенні. Відповідні пари ключових точок, які локалізовані детектором ознак, можуть бути хибно-позитивними. Вищезазначений алгоритм може усунути такі пари точок шляхом визначення переважного напрямку руху ключових точок в локальних ділянках зображення, також алгоритм надає змогу визначення центру зміщення точки огляду камери, що забезпечує кращу оцінку положення для знімального оснащення. Результати роботи реалізовано у вигляді програмного додатку та протестовано на відео-матеріалах, що отримано безпілотним літаком

**Ключові слова:** комп'ютерний зір; стереозір; розпізнавання образів; карта глибини; тривимірна модель сцени; зіставлення ключових точок; детектор ознак; безпілотний літак

Поступила (received) 14.02.2019