Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2020, № 1 (3)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.932 **DOI: 10.20998/2411-0558.2020.01.07**

А. О. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., кафедра геометричного моделювання та комп'ютерної графіки, НТУ "ХПІ",
Д. В. ВОРОНЦОВА, канд. техн. наук, доц., кафедра геометричного моделювання та комп'ютерної графіки, НТУ "ХПІ"

МЕТОД ЗІСТАВЛЕННЯ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК НА ПОСЛІДОВНОСТЯХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В роботі запропоновано підхід до розв'язання задачі зіставлення ключових точок на двох послідовних зображеннях сцени на основі розбиття зображень на регулярну сітку та визначення характерних точок в її чарунках. Метод, що розроблено дозволяє проводити щільне покриття цифрових зображень ключовими точками для розв'язання таких задач, як побудова карт глибини методами стереозору та відновлення воксельної геометричної моделі сцени з карт глибини. Проведено експериментальне оцінювання методу, за результатами якого показано придатність підходу для розв'язання задачі зіставлення цифрових зображень. Метод реалізовано в вигляді програмної утілити. Іл.: 3. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: ключова точка; регулярна сітка; зіставлення цифрових зображень; стереозір; карта глибини; воксельна геометрична модель.

Постановка проблеми. В даний час велику роль відіграє застосування безпілотних літальних апаратів (UAV, дрон) для багатьох задач: моніторинг цивільної інфраструктури, сільськогосподарських посадок, використання в задачах цивільного захисту тощо. Основною перевагою використання дронів є економія часу та здатність здійснювати моніторинг на значних територіях при розв'язанні практичних задач [1]. Однією із невирішених проблем є відновлення геометричних моделей місцевості за результатами аерофотозйомки, що проводиться з використанням дронів. Складовими вказаної проблеми є невисока роздільна здатність отриманих карт глибини внаслідок великої відносної відстані до об'єкту зйомки, а також відсутність ефективних способів стійкого зіставлення карт глибини для формування єдиної геометричної моделі сцени. Основним шляхом підвищення якості геометричних моделей є більш точне відновлення карт глибини та їх об'єднання у воксельну сітку, для чого необхідний розвиток алгоритмів пошуку відповідностей пар ключових точок на послідовних кадрах зображень, отже необхідний розвиток алгоритмів пошуку стійких відповідностей на зображеннях та картах глибин.

Аналіз останніх досліджень. Одним із найпоширеніших алгоритмів пошуку відповідностей на цифрових зображеннях є алгоритм

© А.О. Дашкевич, Д.В. Воронцова, 2020

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

ітеративного пошуку найближчих точок (ICP) [2 – 5]. Інші методи включають алгоритм Robust point matching [6], підходи з використанням теорії ймовірностей [7, 8], метод Coherent point drift [9], метод сортування простору відповідностей [10]. Внаслідок простоти реалізації та невисокої обчислювальної складності широкого застосування набули різні варіації алгоритму ICP [3], але цей алгоритм являє жадний алгоритм пошуку, тому, для підвищення збіжності алгоритму, важливим є початкове зіставлення двох зображень [4, 5]. Коректне початкове наближення може бути недосяжним в умовах відеозйомки з великої відстані, при якій згладжуються перепади висот ландшафту і поверхні стають більш однорідними, тому виникає необхідність більш точної локалізації однакових точок на послідовних зображеннях однієї сцени. Також велике значення для подальшого зіставлення мають і алгоритми отримання самих ключових точок на суміжних зображеннях, основними з яких є алгоритми Scale-invariant feature transform (SIFT) [11], Speeded up robust features (SURF) [12], ORB [13] та ін. Важливим недоліком вказаних методів з точки зору зіставлення зображень є нерівномірність покриття площини зображення ключовими точками.

Мета роботи. Розробка методу пошуку стійких відповідностей пар ключових точок на послідовник зображеннях для задачі відновлення геометричних моделей місцевості за результатами відеозйомки з дронів.

Основна частина. В роботі [1] було представлено метод пошуку початкового наближення для алгоритмів сім'ї ICP, який полягає в побудові параметричного простору на основі модуля та кута нахилу вектору відносного руху ключової точки між сусідніми кадрами відео, дискретизації такого простору на прямокутну сітку і пошуку чарунки сітки з максимальною кількістю точок. Ключові точки запропоновано знаходити за алгоритмом ORB. Недоліком зазначеного підходу є необхідність проведення початкового зіставлення ключових точок перед процесом параметризації вектору руху, яке проводилось з використанням бібліотеки FLANN [14]. Іншим недоліком є нерегулярність знайдених ключових точок на зображеннях (рис. 1), що унеможливлює подальше щільне зіставлення зображень, в ідеальному випадку кожному пікселю першого зображення необхідно поставити у відповідність один піксель наступного зображення з послідовності кадрів.

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Рис. 1. Ілюстрація нерівномірності покриття зображення ключовими точками, що знайдено за алгоритмом ORB

В представленій роботі пропонується наступний підхід до розв'язання вказаних проблем:

1. Послідовність кадрів відео $F = \{f_1, .., f_N\}$ розбивається на пари суміжних зображень $P = \{f_i, f_{i+1}\}$, $i = 1 \ldots N–1$; N – загальна кількість кадрів.

2. Усі $f_i \in F$ переводяться у зображення у відтінках сірого кольору.

3. До кожного зображення $f_i \in F$ застосовується операція згортки (1) для виділення перепадів яскравостей:

$$\forall f_i \in F : f_i = f_i \otimes L, \tag{1}$$

де $\otimes$ – операція згортки,

L – ядро згортки, що представляє варіацію ядра Лапласіану (2):

$$L = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \tag{2}$$

4. Для рівномірного покриття зображень ключовими точками проводиться розбиття кожного з зображень пари $P = \{f_i, f_{i+1}\}$ на регулярну

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

сітку з квадратних чарунок p_j, $j = 1,\ldots, t$, де t – загальна кількість чарунок сітки, розмір чарунок c. Розбиття проводиться за алгоритмом [1].

5. Для першого зображення пари f_i проводиться процес знаходження множини ключових точок K_i, $|K_i| = t$ – загальна кількість знайдених ключових точок на зображенні. Ключові точки визначаються за алгоритмом детекції кутів Харріса [15], який обрано внаслідок його низької обчислювальної складності, по одній точці k_j^i для кожної чарунки p_j (3):

$$\forall k_j^i \in K_i : k_j^i = (x, y)_j^i, \tag{3}$$

де $(x, y)_j^i$ – координати знайденої j-ї ключової точки на i-му зображенні.

6. Для кожної ключової точки $k_j^i \in K_i$ на другому зображенні пари f_{i+1} проводиться процес пошуку (зіставлення) відповідної ключової точки k_j^{i+1} таким чином, що:

$$k_j^{i+1} = (x, y)_j^{i+1} = \arg\max(c_j^i \cdot c_j^{i+1}), \tag{4}$$

де c_j^i та c_j^{i+1} – вектори, сформовані із значень яскравостей пікселів, що знаходяться у квадратному вікні S розміром s_f, при цьому для c_j^i S відцентровано в точці k_j^i на зображенні f_i, а для c_j^{i+1} S відцентровано на зображенні f_{i+1} в деякій точці, яка знаходиться всередині квадратного пошукового блоку W з розміром s_w, що відцентровано в точці з координатами k_j^i, при цьому конкретне положення цієї точки визначається методом перебору усіх пікселів всередині W таким чином, щоб виконувалась умова (4). Усі точки k_j^{i+1} формують множину ключових точок K_{i+1}, що попарно відповідні точкам з K_i.

Для оцінювання якості роботи запропонованого підходу було створено синтетичний набір зображень, який містить результати симуляцій руху точок на поверхні, приклад симуляції наведено на рис. 2. Оцінювання відбувалось за середньоквадратичним відхиленням положення Y знайденої за запропонованим методом точки від її реального положення X на синтетичному зображенні (5):

$$E = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}(X_i - Y_i)^2 . \tag{5}$$

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

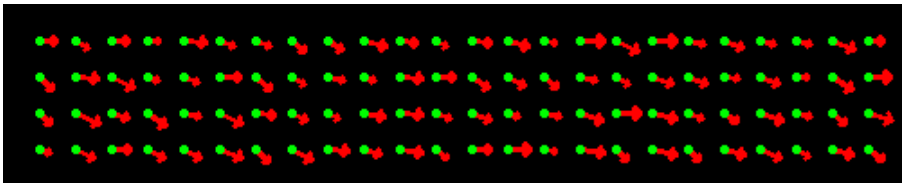

Рис. 2. Приклад згенерованого синтетичного зображення

Було проведено ряд експериментів для визначення впливу ключових параметрів методу s_f та s_w, один з прикладів отриманої оцінки наведено на рис. 3. Експерименти показали, що збільшення як s_f, так і s_w призводить до зменшення помилки, при цьому найменша помилка E = 1.17 була досягнута при s_f = 21 та s_w = 17, але це зниження помилки відбувалось на фоні зменшення кількості знайдених відповідних точок, а раціональні значення параметрів s_f та s_w з точки зору кількості знайдених відповідностей і забезпечення щільного покриття обидвох зображень пари ключовими точками, знаходяться в діапазоні 5 – 13 пікселів.

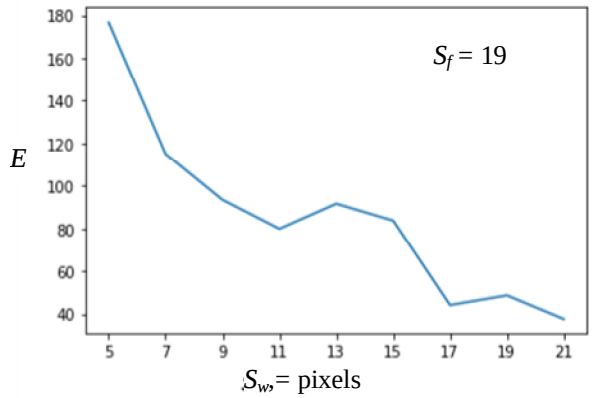

Рис. 3. Оцінка точності методу на синтетичних даних

Висновки і перспективи подальших досліджень. В результаті роботи розроблено метод пошуку відповідностей ключових точок на послідовних кадрах відео. Метод реалізовано у вигляді програмної утілити на мові програмування Python.

Запропонований метод дозволяє знаходити однакові точки на різних зображеннях однієї й тієї ж сцени і забезпечує щільність покриття зображень ключовими точками.

До недоліків методу слід віднести необхідність попереднього визначення оптимальних значень параметрів алгоритму і необхідність перебору положення потенційних ключових точок на другому зображенні.

Подальші дослідження будуть спрямовані на автоматизацію пошуку параметрів методу та зниженню обчислювальної складності за рахунок видалення етапу перебору під час пошуку відповідностей.

Список літератури:

1. *Dashkevich A.* Finding a strong keypoints correspondences in large-scale images and depth maps / *A. Dashkevich, D. Vorontsova, S. Rosokha.* – Kherson State University, Kherson, Ukraine: 2019. – P. 519-524.
2. *Bouaziz S.* Sparse iterative closest point / *S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, M. Pauly* // Computer Graphics Forum. – 2013. – Vol. 32. – № 5. – P. 113-123.
3. *Park S.-Y.* An accurate and fast point-to-plane registration technique / *S.-Y. Park, M. Subbarao* // Pattern Recognition Letters. – 2003. – Vol. 24. – № 16. – P. 2967-2976.
4. *Rusinkiewicz S.* Efficient variants of the icp algorithm / *S. Rusinkiewicz, M. Levoy*. – Quebec City, Que., Canada : IEEE Comput. Soc, 2001. – P. 145-152.
5. *Gelfand N.* Geometrically stable sampling for the icp algorithm / *N. Gelfand, L. Ikemoto, S. Rusinkiewicz, M. Levoy.* – Banff, Alberta, Canada: IEEE, 2003. – P. 260-267.
6. *Gold S.* New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence. / *S. Gold, C.-P. Lu, A. Rangarajan*, [et al.]. – 1994. – P. 957-964.
7. *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. – Vol. 40. – № 6. – P. 1397-1410.
8. *Zhang S.* Point set registration with global-local correspondence and transformation estimation / *S. Zhang, Y. Yang, K. Yang*, [et al.]. – Venice: IEEE, 2017. – P. 2688-2696.
9. *Myronenko A.* Point-set registration: coherent point drift / *A. Myronenko, X. Song* // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 32. – №. 12. – P. 2262-2275.
10. *Assalih H.* 3D reconstruction and motion estimation using forward looking sonar / *H. Assalih* // Doctoral dissertation, Heriot-Watt University, 2013. – 208 p.
11. *Lowe D.G.* Object recognition from local scale-invariant features / *D.G. Lowe*. – Kerkyra, Greece: IEEE, 1999. – Vol. 2. – P. 1150-1157.
12. *Bay H.* SURF: speeded up robust features / *H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool* // Computer Vision – ECCV 2006 / *A. Leonardis, H. Bischof, A. Pinz.* – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 404-417.
13. *Rublee E.* ORB: an efficient alternative to sift or surf / *E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski.* – Barcelona, Spain: IEEE, 2011. – P. 2564-2571.
14. *Muja M.* Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration / *M. Muja, D.G. Lowe*. – INSTICC Press, 2009. – P. 331-340.
15. *Harris C.* A combined corner and edge detector / *C. Harris, M. Stephens*. – Manchester: Alvey Vision Club, 1988. – P. 23.1-23.6.

References:

1. Dashkevich, A., Vorontsova, D., and Rosokha, S. (2019), "Finding a strong keypoints correspondences in large-scale images and depth maps", *in: Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications, Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI-2019),* Main Conference, Kherson State University, Kherson, Ukraine, pp. 519-524.
2. Bouaziz, S., Tagliasacchi, A., and Pauly, M. (2013), "Sparse Iterative Closest Point", *Computer Graphics Forum*, Vol. 32, No. 5, pp. 113-123.
3. Park, S.-Y., and Subbarao, M. (2003), "An accurate and fast point-to-plane registration technique", *Pattern Recognition Letters,* Vol. 24, No. 16, pp. 2967-2976.

4. Rusinkiewicz, S., and Levoy, M. (2001), "Efficient variants of the ICP algorithm", *In: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Presented at the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, IEEE Comput. Soc*, Quebec City, Que., Canada, pp. 145-152.
5. Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., and Levoy, M. (2003), "Geometrically stable sampling for the ICP algorithm", *In: Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Presented at the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003., IEEE, Banff, Alberta*, Canada, pp. 260-267.
6. Gold, S., Lu, C.-P., Rangarajan, A., Pappu, S., and Mjolsness, E. (1994), "New Algorithms for 2D and 3D Point Matching: Pose Estimation and Correspondence", *In: Pattern Recognition - PR*, pp. 957-964.
7. Evangelidis, G.D., and Horaud, R. (2018), "Joint Alignment of Multiple Point Sets with Batch and Incremental Expectation-Maximization", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 40, No. 6, pp. 1397-1410.
8. Zhang, S., Yang, Y., Yang, K., Luo, Y., and Ong, S.H. (2017), "Point Set Registration with Global-Local Correspondence and Transformation Estimation", *In: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Presented at the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE*, Venice, pp. 2688-2696.
9. Myronenko, A., and Song, X. (2010), "Point-Set Registration: Coherent Point Drift", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 12, pp. 2262-2275.
10. Assalih, H. (2013), "3D Reconstruction and Motion Estimation Using Forward Looking Sonar", (Doctoral dissertation). Heriot-Watt University, Vol. 32, No. 12, 208 p.
11. Lowe, D.G. (1999), "Object recognition from local scale-invariant features", *In: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Presented at the Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, Kerkyra, Greece*, Vol. 2, pp. 1150-1157.
12. Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006), "SURF: Speeded Up Robust Features", *In: Leonardis, A., Bischof, H., Pinz, A. (Eds.), Computer Vision – ECCV 2006. Springer*, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 404-417.
13. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., and Bradski, G. (2011), "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF", *In: 2011 International Conference on Computer Vision. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE*, Barcelona, Spain, pp. 2564-2571.
14. Muja, M., and Lowe, D.G. (2009), "Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration", *In: International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09). INSTICC Press*, pp. 331-340.
15. Harris, C., and Stephens, M. (1988), "A Combined Corner and Edge Detector", *In: Procedings of the Alvey Vision Conference 1988. Presented at the Alvey Vision Conference 1988*, Alvey Vision Club, Manchester, pp. 23.1-23.6.

Статтю представила д-р. техн. наук, проф., зав. каф. геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Шоман Ольга Вікторівна

Поступила (received) 28.04.2020

Dashkevich Andrey, Cand. Tech, Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (095) 388-04-56, e-mail: dashkewich.a@gmail.com
ORCID ID:0000-0002-9963-0998

Vorontsova Darya, Cand. Tech, Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (067) 739-07-07, e-mail: dvorontso@gmail.com
ORCID ID:0000-0001-7868-0067

УДК 004.932

Метод зіставлення ключових точок на послідовностях цифрових зображень / Дашкевич А.О., Воронцова Д.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 79 – 87.

В роботі запропоновано підхід до розв'язання задачі зіставлення ключових точок на двох послідовних зображеннях сцени на основі розбиття зображень на регулярну сітку та визначення характерних точок в її чарунках. Метод, що розроблено дозволяє проводити щільне покриття цифрових зображень ключовими точками для розв'язання таких задач, як побудова карт глибини методами стереозору та відновлення воксельної геометричної моделі сцени з карт глибини. Проведено експериментальне оцінювання методу, за результатами якого показано придатність підходу для розв'язання задачі зіставлення цифрових зображень. Метод реалізовано в вигляді програмної утілити. Іл.: 3. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: ключова точка; регулярна сітка; зіставлення цифрових зображень; стереозір; карта глибини; воксельна геометрична модель.

УДК 004.932

Метод сопоставления ключевых точек на последовательностях цифровых изображений / Дашкевич А.О., Воронцова Д.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 1 (3). – С. 79 – 87.

В работе предложен подход к решению задачи сопоставления ключевых точек на двух последовательных изображениях сцены на основе разбиения изображений на регулярную сетку и определения характерных точек в ее ячейках. Разработанный метод позволяет проводить плотное покрытие цифровых изображений ключевыми точками для решения таких задач, как построение карт глубины методами стереозрения и восстановления воксельной геометрической модели сцены из карт глубины. Проведено экспериментальное оценивания метода, по результатам которого показана пригодность подхода для решения задачи сопоставления цифровых изображений. Метод реализован в виде программной утилиты. Ил.: 3. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: ключевая точка; регулярная сетка; сопоставление цифровых изображений; стереозир; карта глубины; воксельной геометрическая модель

UDC 004.932

Method of the key point correspondence search in the sequences of digital images / Dashkevich A., Vorontsova D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 1 (3). – P. 79 – 87.

The approach to solving the problem of key point correspondence search on two consecutive scene images, based on dividing the images into a regular grid and identifying the characteristic points in its cells. The developed method allows the digital images to be densely covered by key points for solving such problems as the construction of depth maps by stereovision methods and the reconstruction of a voxel geometric model of a scene from depth maps. An experimental evaluation of a method that demonstrates the suitability of an approach for solving the digital image matching problem was performed. The method is implemented as a software utility. Figs.: 3. Refs.: 15 titles.

Keywords: key point; regular grid; image matching; stereovision; depth map; voxel geometrical model.