

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.397:004.946

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).647-657

ГРНТИ 47.49.43+28.17.33

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЗАИМНО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИСПАРАНТНОСТИ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Гареев В. М., Гареев М. В., Кондратьева С. И., Корнышев Н. П., Родионов Д. И.,
Серебряков Д. А., Карачинов В. А.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация В настоящей статье рассмотрены методы вычисления взаимно корреляционной функции при определении диспарантности по изображениям стереопары, формируемым стереоскопической системой технического зрения. В процессе определения диспарантности необходимо найти точку на втором изображении стереопары по заданной точке первого изображения, что может быть сделано путем нахождения максимума взаимно корреляционной функции. Рассматривается возможность уменьшения объема вычислений во временной области при использовании непозиционной системы исчисления, называемой также системой остаточных классов. В результате моделирования на основе системы позиционного исчисления и системы остаточных классов с использованием сходных по форме функций, смещенных по оси X относительно друг друга, а также при использовании реальных стереоизображений показано совпадение главных максимумов взаимно корреляционной функции при существенном уменьшении объема вычислений.

Ключевые слова: стереоскопическая система технического зрения, вычисление взаимно корреляционной функции, система остаточных классов

Для цитирования: Гареев В. М., Гареев М. В., Кондратьева С. И., Корнышев Н. П., Родионов Д. И., Серебряков Д. А., Карачинов В. А. Особенности вычисления взаимно корреляционной функции при определении диспарантности в стереоскопической системе технического зрения // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 647-657. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).647-657

Research Article

FEATURES OF THE CALCULATION OF THE CROSS-CORRELATION FUNCTION IN DETERMINING THE DISPARITY IN A STEREO VISION SYSTEM

Gareev V. M., Gareev M. V., Kondrat'eva S. I., Kornyshev N. P., Rodionov D. I.,
Serebriakov D. A., Karachinov V. A.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract This article considers the methods of calculating the cross-correlation function in determining the disparity from the images of a stereo pair formed by a stereo vision system. When determining the disparity, it is necessary to find a point on the second image of the stereo pair at a given point of the first image, which can be done by finding the maximum of the cross-correlation function. The possibility of reducing the amount of calculations in the time domain when using a non-positional calculus system, also called a residue number system, is considered. As a result of modeling based on a system of positional calculus and a residue number system using similar-shaped functions shifted along the X axis relative to each other, as well as using real stereo images, the coincidence of the main maxima of the cross-correlation function is shown with a significant reduction in the amount of calculations.

Keywords: stereo vision system, calculation of the cross-correlation function, residue number system

For citation: Gareev V. M., Gareev M. V., Kondrat'eva S. I., Kornyshev N. P., Rodionov D. I., Serebriakov D. A., Karachinov V. A. Features of the calculation of the cross-correlation function in determining the disparity in a stereo vision system // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 647-657. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).647-657

Введение

Существует два метода получения 3D информации о наблюдаемой сцене. Первый метод реализуется при помощи лазерного локатора – лидара. Второй метод реализуется при помощи системы стереоскопической системы технического зрения путем вычисления диспаратности (линейного параллакса). Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Лидарные системы имеют высокую точность представления координат по дальности, но облако точек имеет плохое разрешение в 2D плоскости. Стереоскопические системы по сравнению с лидарами, наоборот, имеют меньшую точность определения дальности, однако, более высокое разрешение в 2D плоскости [1-11].

В настоящей статье рассматриваются особенности определения диспаратности в стереоскопических системах технического зрения и, в частности, вопросы нахождения соответствующей точки на втором изображении стереопары при ее указании на первом изображении стереопары на основе вычисления взаимно корреляционной функции.

Для определения диспаратности объекта по стереоизображению требуется найти разность координат объекта в плоскостях первого и второго изображений стереопары. При этом по заданным координатам объекта на первом изображении определяются координаты соответствующей точки на втором изображении. В процессе определения координат выполняется сканирование строки первого изображения относительно той же строки второго изображения и находится максимальное значение взаимно корреляционной функции (ВКФ).

Для непрерывных функций $x(t)$ и $y(t)$ ВКФ определяется как

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt \quad (1)$$

Если в строке j пикселей, то для каждого пиксела строки $j1$ первого изображения находится номер пиксела той же строки $j2$ второго изображения, для которого ВКФ будет иметь максимальное значение: $j2 = \max(R_{x,y})$. Тогда диспаратность в пикселах будет равна: $\Delta p = j1 - j2$ [12].

Вычисление ВКФ возможно, как в пространственной области, так и в частотной области [13]. Вычисление ВКФ в пространственной области, по сравнению с вычислением ВКФ в частотной области является более простым с точки зрения технической реализации, однако, менее быстродействующим способом. Вычисление ВКФ в частотной области связано с прямым и обратным преобразованием Фурье, что требует специализированного Фурье-процессора при аппаратной реализации, однако, обеспечивает более высокую скорость вычисления.

Вычисление ВКФ в пространственной области

Вычисление ВКФ в пространственной области производится путем двумерной свертки изображения со скользящим окном, являющимся эталонным фрагментом изображения, по которому и осуществляется поиск максимума ВКФ [13]. Фактически, в каждой точке зоны анализа изображения размером $M \times N$ элементов для скользящего окна размером $m \times n$ элементов производится $m \times n$ операций умножения с плавающей запятой, а также $m \times n - 1$ операция сложения. Время вычисления, зависящее при этом, как от размера зоны анализа изображения, так и от размера эталона оказывается весьма существенным, а именно: $M \times N \times (m \times n \times t_{\text{умн.}} + (m \times n - 1) \times t_{\text{сл.}})$, где $t_{\text{умн.}}$ и $t_{\text{сл.}}$ время выполнения операции умножения и сложения, соответственно.

Время вычисления ВКФ в пространственной области, а, следовательно, и дисперантности можно уменьшить путем:

- 1) распараллеливание процедуры вычисления по строкам,
- 2) упрощения процедуры вычисления ВКФ,
- 3) вычисление ВКФ в непозиционной системе счисления.

Непозиционная система счисления или система остаточных классов является альтернативой двоичному представлению чисел [14]. В системе остаточных классов целое число представляется в виде набора чисел, являющихся остатками от деления исходного числа на выбранные модули. Операции сложения, вычитания и умножения с каждым остатком выполняются параллельно без переносов, что позволяет реализовать высокоскоростную арифметику для высокопроизводительных вычислений. Для восстановления результата вычислений по остаткам существует простой алгоритм, описанный в [15].

Функция $f(x)$ в системе остаточных классов может быть представлена набором функций по отдельному основанию:

$$f_{\text{сок}}(x) = \text{mod}(f(x), p_i), \quad (5)$$

где p_i – i -ое основание СОК.

Если функции $x(t)$ и $y(t)$ определены на интервале T , то ВКФ может быть представлена в виде:

$$R(\tau) = \int_{-T/2}^{+T/2} x(t)y(t - \tau)dt. \quad (6)$$

Подставив выражение (5) в выражение (6), получим:

$$R_i(\tau) = \int_{-T/2}^{+T/2} [\text{mod}(x(t), p_i)][\text{mod}(y(t - \tau), p_i)]dt \quad (7)$$

или

$$R_i(\tau) = \int_{-T/2}^{+T/2} [\text{mod}(x(t)y(t - \tau), p_i)]dt. \quad (8)$$

Откуда видно, что $R_i(\tau) = \text{mod}(R(\tau), p_i)$ (9).

ВКФ в системе остаточных классов характеризуется несколькими интервалами корреляции по основаниям p_i .

Методика и результаты эксперимента по вычислению ВКФ в пространственной области

Моделирование производилось с использованием сходных по форме функций, смещенных по оси X относительно друг друга (рисунок 1).

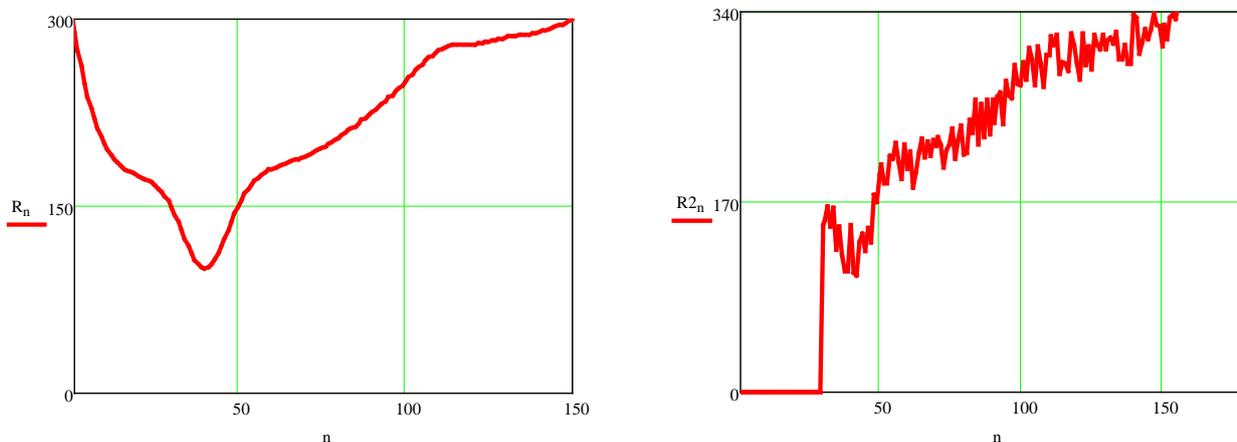


Рисунок 1. Функции, использованные при моделировании

На рисунке 2 показаны результаты вычисления ВКФ в системе позиционного исчисления (рисунок 2 а) и в системе остаточных (рисунок 2 б) для модулей $p_1=16$ и $p_2=17$ при $n=5$.

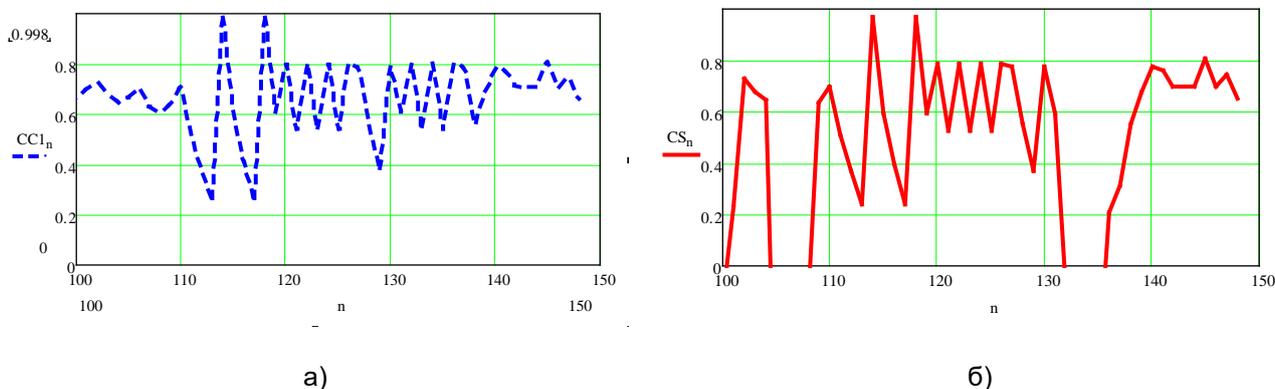


Рисунок 2. Результат вычисления ВКФ: а) ВКФ в системе позиционного исчисления, б) ВКФ в системе остаточных классов

На рисунке 3 показано наложение ВКФ, вычисленные в различных системах счисления. Как видно на рисунке, главные максимумы ВКФ совпадают, а метод вычисления ВКФ в системе остаточных классов обладает более высокой помехоустойчивостью.

При вычислении ВКФ использовались реальные стереоизображения, приведенные на рисунке 4. Процедура вычисления ВКФ состояла из следующих

этапов:

- 1) на стереоизображениях выделялась строка,
- 2) для строки вычислялась ВКФ двумя способами,
- 3) после вычисления ВКФ строка смещалась по кадру для новой процедуры вычисления ВКФ.

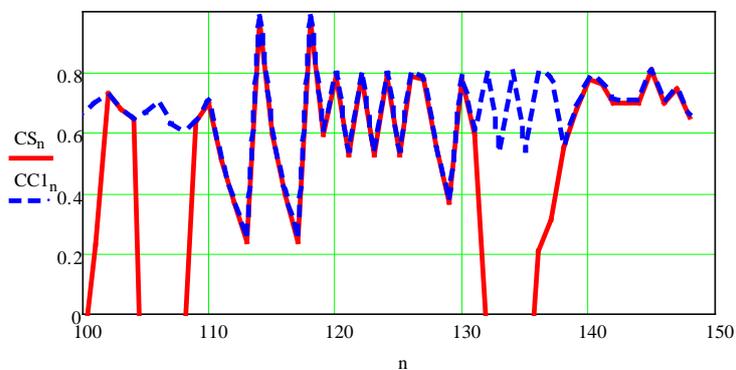


Рисунок 3. Наложение ВКФ, которые вычислены в различных системах счисления



Рисунок 4. Тестовая стереопара изображений

Для примера, на рисунке 5 показан вид строки стереоизображения. На рисунке 4 выделенная строка показана горизонтальной линией.

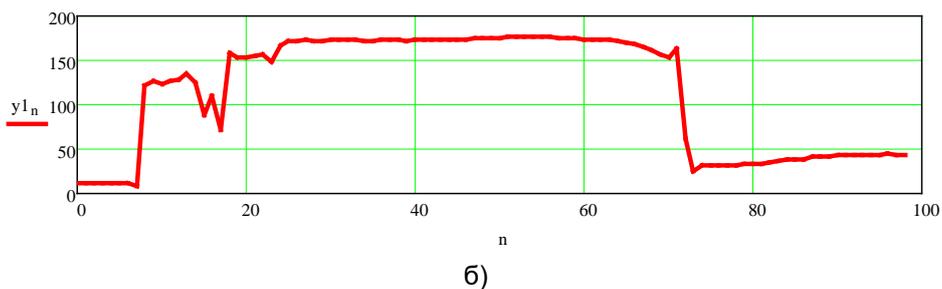
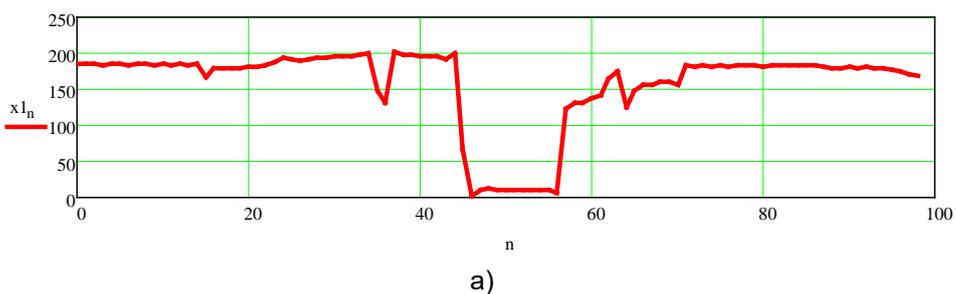


Рисунок 5. Строка видеокadra а) левого стереоизображения, б) правого стереоизображения

Результат вычисления ВКФ в пространственной области для двух систем счисления показан на рисунке 6.

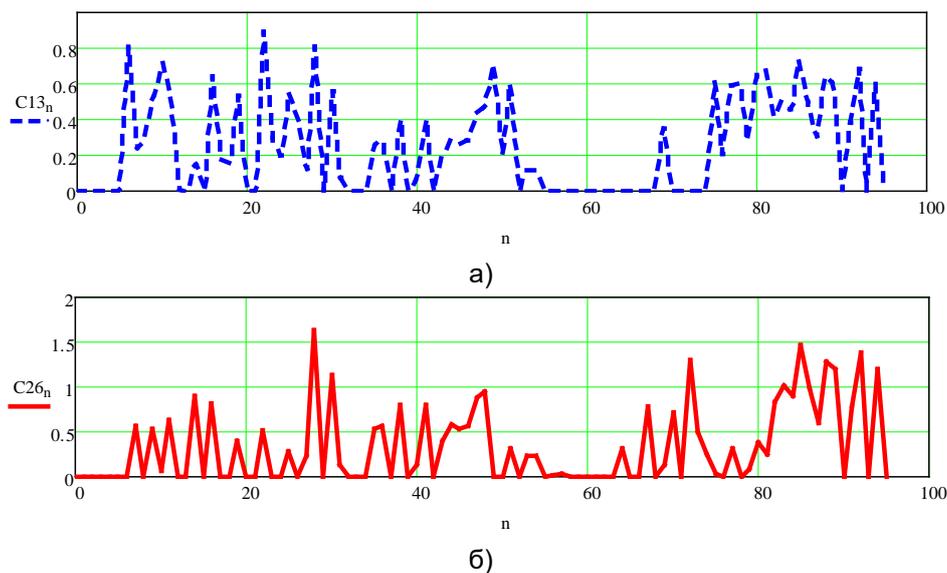


Рисунок 6. Результат вычисления ВКФ: а) ВКФ в системе позиционного счисления; б) ВКФ в системе остаточных классов

При наложении результатов вычислений на один график, рисунок 7, видно совпадение максимумов ВКФ. Аналогичная картина наблюдается для всех строк кадра.

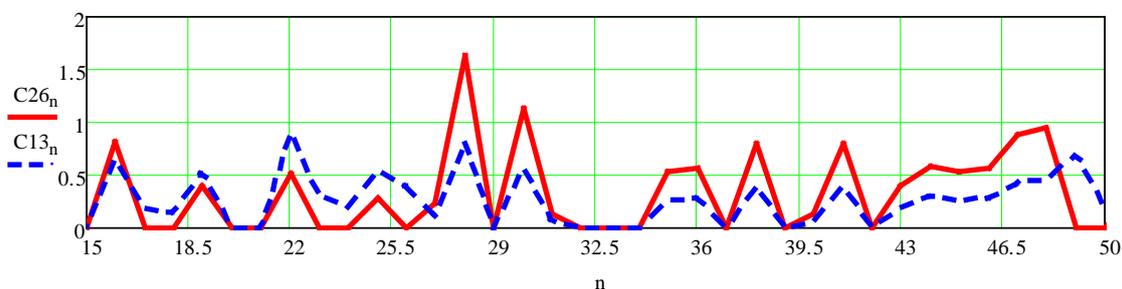


Рисунок 7. Наложение ВКФ, которые вычислены в различных системах счисления

Вычисление ВКФ в частотной области

Вычисление ВКФ в частотной области производится путем перемножения результатов прямого преобразования Фурье матрицы изображения и матрицы эталона, дополненной нулями до размера матрицы изображения, с последующим обратным преобразованием Фурье получаемого результата перемножения [13]. Фактически, основное время вычисления затрачивается на прямое и обратное преобразование Фурье, в то время как непосредственно на перемножение матриц затрачивается всего $M \times N$ операций умножения. Время вычисления в этом случае, как и при вычислении в пространственной области зависит, как от размера зоны анализа изображения, так и от размера эталона. Тем не менее, при данном способе

вычисления выигрыш в быстродействии оказывается весьма существенным по сравнению с пространственной обработкой.

Методика и результаты эксперимента по вычислению ВКФ в частотной области

Моделирование в среде MATLAB [16-17] алгоритма определения координат точки на втором изображении стереопары при указании соответствующей точки на первом изображении стереопары с использованием процедуры вычисления ВКФ в частотной области показывает высокую эффективность данного метода. На рисунке 8 приведены изображения, иллюстрирующие процесс моделирования. Перекрестием отмечена точка, указанная на первом (правом) изображении стереопары.



Рисунок 8. Указание точки на первом (правом) изображении стереопары

На совмещенном изображении (рисунок 9), содержащем первое (правое) и второе (левое) изображение стереопары отмечены маркерами указанная на первом изображении точка и точка, найденная на втором изображении по максимуму ВКФ, вычисленной в частотной области.

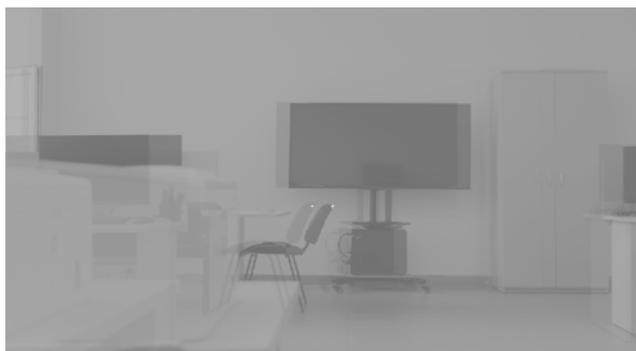


Рисунок 9. Совмещенное изображение стереопары с маркерами точки, указанной на правом изображении и соответствующей точки, найденной на втором изображении по максимуму ВКФ

На рисунке 10 приведен график ВКФ и ее максимум для анализируемой строки изображения. Для повышения эффективности распознавания по ВКФ использовались контурные препараты изображения и эталона. При этом зоной анализа являлась указанная строка изображения с ограничением по строке с учетом значения предполагаемой диспаратности. Размер эталона в свою очередь

задавался в пределах 20% от размера зоны анализа. Кроме повышения эффективности распознавания, указанные меры позволяют сократить объем вычислений и повысить быстродействие.

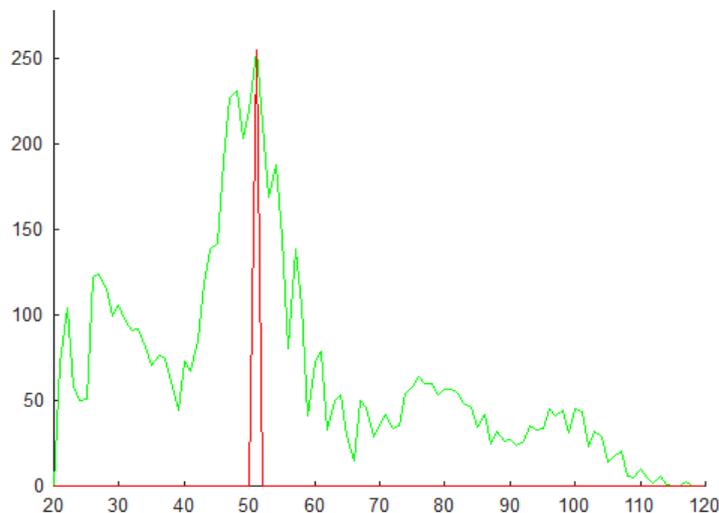


Рисунок 10. График ВКФ и ее максимум, соответствующий координате найденной точки

Выводы

1. Нахождение точек стереопар для вычисления диспаратности наиболее просто решается путем вычисления взаимно корреляционной функции в пространственной области и нахождения ее максимума.
2. Вычисление взаимно корреляционной функции в пространственной области следует осуществлять с использованием системы остаточных классов.
3. При наличии Фурье-процессора предпочтение следует отдавать методу вычисления взаимно корреляционной функции в частотной области.

Список литературы

1. Baltasvias E. P. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning // ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing. 1999. 54(2/3). 83-94. DOI: 10.1016/s0924-2716(99)00014-3
2. Rzonca A. Review of Methods of Combined Orientation of Photogrammetric and Laser Scanning Data // Measurement Automation Monitoring. 2018. 64(3). 57-62.
3. Rönholm P., Haggrén H. Registration of Laser Scanning Point Clouds and Aerial Images Using Either Artificial or Natural Tie Features // ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. 1-3(3). 63-68. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-63-2012
4. Parmehr E. G., Fraser C. S., Zhang C., Leach J. Automatic Registration of Optical Imagery with 3d Lidar Data Using Local Combined Mutual Information // ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. II-5-W2. P. 229-234. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-229-2013
5. Mitishita E., Costa F., Centeno J. Lidar and Photogrammetric Datasets Integration Using Sub-Block of Images // ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote

Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. 1. 101-107. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-101-2020

6. Habib A., Bang Ki-In, Kersting A. P. Impact of Lidar System Calibration on the Relative and Absolute Accuracy of Derived Point Cloud // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives). 2010. 38. 17532854. URL: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2013/08/Kersting_1.pdf (Дата обращения: 05.10.2023).

7. Li J., Yang B., Chen C., Habib A. NRLI-UAV: Non-Rigid Registration of Sequential Raw Laser Scans and Images for Low-Cost UAV LiDAR Point Cloud Quality Improvement // ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing. 2019. 158. 123-145. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.009

8. Zhang J., Singh S. Low-Drift and Real-Time Lidar Odometry and Mapping // Autonomous Robots. 2017. 41(2). 401-416. DOI: 10.1007/s10514-016-9548-2

9. Valbuena R., Mauro F., Arjonilla F. J., Manzanera J. A. Comparing Airborne Laser Scanning-Imagery Fusion Methods Based on Geometric Accuracy in Forested Areas // Remote Sensing of Environment. 2011. 115. 1942-1954. DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.017

10. Fragkos P., Ioannidis C. Assessment of Lidargrammetry for Spatial Data Extraction // Proceedings of the Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment, Paphos, Cyprus, 4–8 April 2016. Paphos, Cyprus, 2016. Vol. 9688. P. 96881L-1. DOI: 10.1117/12.2240653

11. Teo T.-A., Shih T.-Y., Lin Y.-T., Huang C.-M. The Generation of Inferred Stereo Images from Lidar Data // Proceedings of the 31st Asian Conference on Remote Sensing 2010 ACRS, Hanoi, Vietnam, 1–5 November 2010: in 2 vols. Hanoi, Vietnam, 2010. Vol. 1. P. 459-464.

12. Козлов В. Л., Кузьмичев И. Р. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. 2011. 1. 33-38.

13. Волкова М. А., Луцив В. Р. Методы обработки и распознавания изображений: учебно-методическое пособие по лабораторному практикуму. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. 40 с. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1979.pdf> (Дата обращения: 05.10.2023).

14. Исупов К. С. Высокопроизводительные вычисления с использованием системы остаточных классов // Программные системы: теория и приложения. 2021. 12(2). 137-192. DOI: 10.25209/2079-3316-2021-12-2-137-192

15. Кукушкин С. С. Конечные поля и информатика: в 2-х т. Т.1: Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. Москва: МО России, 2003. 281 с.

16. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / перевод с английского В. В. Чепыжова. Москва: Техносфера, 2006. 615 с.+ 1 CD-ROM.

17. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2-х кн. Кн. 2 / перевод с английского, под редакцией Д. С. Лебедева. Москва: Мир, 1982. 480 с.

References

1. Baltsavias E. P. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning // ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing. 1999. 54(2/3). 83-94. DOI: 10.1016/s0924-2716(99)00014-3

2. Rzonca A. Review of Methods of Combined Orientation of Photogrammetric and Laser Scanning Data // Measurement Automation Monitoring. 2018. 64(3). 57-62.

3. Rönholm P., Haggrén H. Registration of Laser Scanning Point Clouds and Aerial Images Using Either Artificial or Natural Tie Features // *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. 1-3(3). 63-68. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-63-2012
4. Parmehr E. G., Fraser C. S., Zhang C., Leach J. Automatic Registration of Optical Imagery with 3d Lidar Data Using Local Combined Mutual Information // *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013. Vol. II-5-W2. P. 229-234. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-229-2013
5. Mitishita E., Costa F., Centeno J. Lidar and Photogrammetric Datasets Integration Using Sub-Block of Images // *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. 1. 101-107. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-101-2020
6. Habib A., Bang Ki-In, Kersting A. P. Impact of Lidar System Calibration on the Relative and Absolute Accuracy of Derived Point Cloud // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)*. 2010. 38. 17532854. URL: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2013/08/Kersting_1.pdf (Дата обращения: 05.10.2023).
7. Li J., Yang B., Chen C., Habib A. NRLI-UAV: Non-Rigid Registration of Sequential Raw Laser Scans and Images for Low-Cost UAV LiDAR Point Cloud Quality Improvement // *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*. 2019. 158. 123-145. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.009
8. Zhang J., Singh S. Low-Drift and Real-Time Lidar Odometry and Mapping // *Autonomous Robots*. 2017. 41(2). 401-416. DOI: 10.1007/s10514-016-9548-2
9. Valbuena R., Mauro F., Arjonilla F. J., Manzanera J. A. Comparing Airborne Laser Scanning-Imagery Fusion Methods Based on Geometric Accuracy in Forested Areas // *Remote Sensing of Environment*. 2011. 115. 1942-1954. DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.017
10. Fragkos P., Ioannidis C. Assessment of Lidargrammetry for Spatial Data Extraction // *Proceedings of the Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment, Paphos, Cyprus, 4–8 April 2016*. Paphos, Cyprus, 2016. Vol. 9688. P. 96881L-1. DOI: 10.1117/12.2240653
11. Teo T.-A., Shih T.-Y., Lin Y.-T., Huang C.-M. The Generation of Inferred Stereo Images from Lidar Data // *Proceedings of the 31st Asian Conference on Remote Sensing 2010 ACRS, Hanoi, Vietnam, 1–5 November 2010: in 2 vols*. Hanoi, Vietnam, 2010. Vol. 1. P. 459-464.
12. Kozlov V. L., Kuz'michev I. R. Izmeritel' dal'nosti i razmerykh parametrov ob"ektov na osnove tsifrovoi fotokamery [Equipment for distance and size measurements of different objects based on analysis of the digital photographic images] // *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*, 2011. 1. 33-38.
13. Volkova M. A., Lutsiv V. R. Metody obrabotki i raspoznavaniia izobrazhenii [Methods for image processing and recognition]. Saint Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 40 p. Available at: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1979.pdf> (Accessed: 05.10.2023).
14. Isupov K. S. Vysokoproizvoditel'nye vychisleniia s ispol'zovaniem sistemy ostatochnykh klassov [An overview of high-performance computing using the residue number system] // *Program Systems: Theory and Applications*. 2021. 12(2). 137-192. DOI: 10.25209/2079-3316-2021-12-2-137-192
15. Kukushkin S. S. Konechnye polia i informatika [Finite fields and information science]. In 2 vols. Vol. 1. Metody i algoritmy, klassicheskie i netraditsionnye, osnovannye

na ispol'zovanii konstruktivnoi teoremy ob ostatkakh [Classic and nontraditional methods and techniques based on the remainder theorem]. Moscow, MO Rossii Publ., 2003. 281 p.

16. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital image processing using MATLAB. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2004. 620 p. (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R., Eddins S. Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii v srede MATLAB. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 615 p.)

17. Pratt W. K. Digital Image Processing. Wiley-Interscience, New York, 1978. 720 p. (Russ. ed.: Prett U. Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii. V 2-kh kn. Kn. 2. Moscow, Mir Publ., 1982. 480 p.)

Информация об авторах

Гареев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0003-1585-6792, Vladimir.Gareev@novsu.ru

Гареев Михаил Владимирович – ведущий инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID 0009-0007-1392-2169, Mikhail.Gareev@novsu.ru

Кондратьева Светлана Ильинична – студент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-1728-3273, s249697@std.novsu.ru

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

Родионов Дмитрий Игоревич – студент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-1579-618X, s249699@std.novsu.ru

Серебряков Дмитрий Александрович – инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5994-5090, s231099@std.novsu.ru

Карачинов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru