

УДК [528.48:624]:004.8

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-14-21>

Позиционирование подвижных элементов строительной техники посредством компьютерного зрения

Н. А. Жилинский^{1✉}, И. Е. Дорогова¹

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: nik.zil@yandex.ru

Аннотация. На примере автогрейдера рассмотрен альтернативный подход к задаче позиционирования подвижных узлов строительной техники, направленный на снижение зависимости стабильной работы системы позиционирования от износа и отказов физических датчиков под воздействием вибрации, пыли и механических нагрузок. Целью работы является разработка способов определения трёхмерных координат крайних точек отвала без непосредственного монтажа сенсоров на рабочий орган. Предложен программно-аппаратный комплекс на базе стереокамеры и визирных маркеров: алгоритм SIFT выполняет сопоставление ключевых точек стереопар, нейросеть YOLO – сегментацию области маркеров на снимках, а навигационные и инерциальные данные – преобразование локальных 3D-координат в глобальную систему координат. Представлен пошаговый алгоритм расчета целевых координат крайних отметок лезвия отвала автогрейдера. Предварительные моделирование и расчёты подтверждают возможность применения альтернативных подходов позиционирования подвижных узлов строительной техники посредством компьютерного зрения.

Ключевые слова: ГНСС-позиционирование, навигация, строительная техника, автогрейдер, компьютерное зрение, искусственный интеллект, стереокамера, системы нивелирования строительной техникой, позиционирование рабочего органа

Для цитирования:

Жилинский Н. А., Дорогова И. Е., Позиционирование подвижных элементов строительной техники посредством компьютерного зрения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 14–21. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-14-21>

Computer vision-based positioning of mobile construction equipment components

N. A. Zhilinskiy^{1✉}, I. E. Dorogova¹

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: nik.zil@yandex.ru

Abstract. The study presents an alternative approach to positioning the mobile nodes of construction machinery, exemplified by a motor grader, aimed at reducing the system's reliance on physical sensors, which are prone to wear and failure under vibration, dust, and mechanical loads. The objective of the work is to develop methods for determining the 3D coordinates of the blade's extreme points without direct sensor mounting on the working node. A software-hardware solution based on a stereo camera and sight markers is proposed: the SIFT algorithm matches key points in the stereo pair; the YOLO neural network segments marker regions in images; navigation and inertial data transform local 3D coordinates into a global reference frame. A step-by-step algorithm for calculating the target coordinates of the grader blade's extreme marks is described. Preliminary simulations and

calculations confirm the feasibility of computer vision-based alternatives for positioning mobile nodes in construction machinery.

Keywords: GNSS positioning, navigation, construction machinery, motor grader, computer vision, artificial intelligence, stereo camera, construction-machinery leveling systems, positioning of working equipment

For citation:

Zhilinskiy N. A., Dorogova I. E. (2026). Computer vision-based positioning of mobile construction equipment components. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 14–21. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-2-14-21>

Введение

Для обеспечения современных высоких стандартов при строительстве все чаще используют системы нивелирования строительной техники, которые требуют высокой точности определения положения подвижных элементов техники, таких, как лезвие отвала грейдера или бульдозера [1]. Точное позиционирование этих элементов в пространстве позволяет повысить эффективность земляных работ, минимизировать строительные ошибки и обеспечить безопасность на строительной площадке. Однако существующие способы определения положения рабочего органа связаны с использованием датчиков, размещенных на частях техники, которые подвержены вибрации и механическому воздействию [2]. Это снижает надежность и долговечность датчиков.

На данный момент преимущественно используются датчики угла наклона, устанавливаемые непосредственно на рабочем органе, как описано в работах [3, 4]. Данный способ, хотя и обеспечивает приемлемую точность, имеет недостатки, связанные с воздействием вибраций, пыли и других внешних факторов на датчики. Поэтому существует необходимость частого обслуживания и калибровки датчиков. В качестве альтернативы в настоящей статье предлагается способ позиционирования подвижных элементов строительной техники с использованием компьютерного зрения [5], основанная на применении стереокамеры и маркеров, размещенных на том же подвижном элементе рабочего органа, что и целевые точки позиционирования.

Предлагаемый подход исключает необходимость установки датчиков на рабочем органе, что повышает надежность системы за счет уменьшения внешних воздействий. Использование стереокамеры позволяет опреде-

лить трехмерные координаты маркеров в локальной системе координат с последующим преобразованием в глобальную систему (например, WGS-84), что обеспечивает высокую точность позиционирования.

Целью данной статьи является разработка и описание способа позиционирования левого и правого краев лезвия отвала автогрейдера с использованием компьютерного зрения. В работе рассматриваются предложения по использованию описываемого способа, алгоритмы обработки изображений и математическое обеспечение, позволяющие достичь поставленной цели. Особое внимание уделяется сравнению предлагаемого подхода с существующими решениями и анализу его преимуществ и ограничений.

**Существующие способы
позиционирования рабочих органов
строительной техники**

Задача позиционирования подвижных элементов строительной техники активно обсуждается в научной и инженерной литературе [6, 7, 8, 9, 10], поскольку она напрямую связана с повышением производительности и автоматизации строительных процессов. Традиционные способы, основанные на использовании датчиков, установленных на рабочем органе, описаны в ряде работ, включая [3]. В статье [2] описывается система позиционирования ковша экскаватора, основанная на применении датчиков угла наклона, а также, при необходимости, тросовом энкодере. Однако такие решения имеют ограничения, связанные с воздействием вибрации и механических нагрузок, что снижает их надежность и требует технического обслуживания, а также частой замены датчиков. В связи с тем, что данный подход является общепринятым, он используется как в отечественных системах позиционирования подвижных узлов техники [11, 12], так и в зарубежных [13, 14, 15].

Альтернативные подходы, использующие технологии компьютерного зрения, становятся все более популярными благодаря развитию вычислительных систем и алгоритмов обработки изображений. Например, в работе [16] рассматривается применение компьютерного зрения, посредством видеogramметрической установки, для определения положения координат кузова, относительно визирных маяков на местности с известными координатами, согласно принципиальной схеме размещения визирных целей на строительном участке (рис. 1).

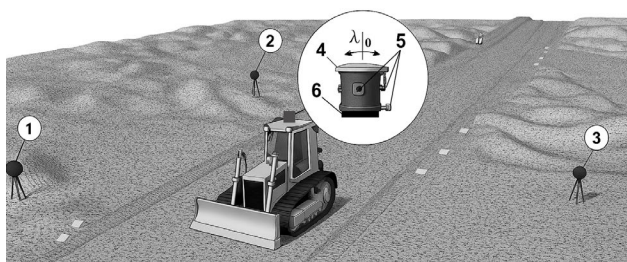


Рис. 1. Принципиальная схема размещения визирных целей на строительном участке:

- 1, 2, 3 – визирные цели; 4 – видеogramметрическая система; 5 – видеокамера; 6 – трегер

Предлагаемый способ позиционирования

Ключевыми технологиями для реализации предлагаемого подхода являются алгоритмы сопоставления изображений (image matching) при определении облака точек и сегментации объектов. В работе [17] описаны способы сопоставления изображений на основе алгоритма SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [18], которые позволяют эффективно определять ключевые точки на стереопаре. Для сегментации маркеров активно применяются нейросетевые модели, такие как YOLO (You Only Look Once), описанные в [19], которые обеспечивают высокую скорость и точность обнаружения объектов в реальном времени. Кроме того, для преобразования координат в глобальную систему координат (WGS-84) используются данные инерциальных измерительных модулей (IMU) и ГНСС-модуля.

Предлагаемый в данной статье способ сочетает преимущества стереокамер, нейросетевой сегментации и точной навигации, устраняя недостатки подходов, основанных на использовании физических датчиков, устанавли-

ваемых на рабочем органе. В отличие от способа, описанного в [3, 16], предлагаемый подход минимизирует количество датчиков, подверженных внешним воздействиям, а также обеспечивает высокую точность за счет использования компьютерного зрения, в совокупности с промышленным оборудованием.

Для реализации предлагаемого способа рассматривается состав оборудования, архитектура взаимодействия которого представлена на рис. 2.

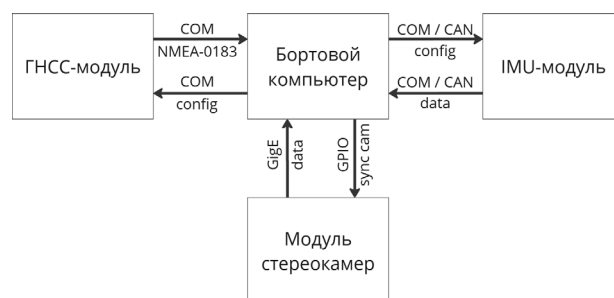


Рис. 2. Архитектура аппаратных модулей

Также предлагается определенная схема установки оборудования на автогрейдер (рис. 3).

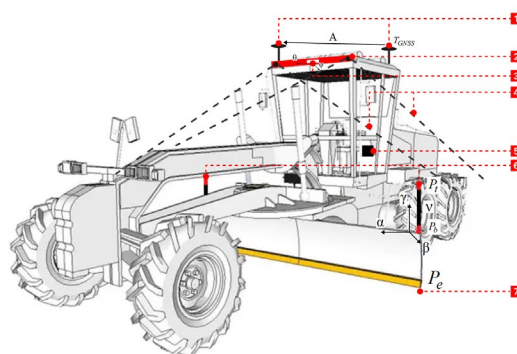


Рис. 3. Схема установки оборудования на автогрейдер:

- 1 – ГНСС-антенны; 2 – стереокамера; 3 – угол обзора стереокамеры; 4 – инерциальный модуль; 5 – бортовой компьютер; 6 – визирные маркеры; 7 – целевая точка позиционирования (кромка отвала)

Для работы программного комплекса необходим соответствующий набор исходных данных:

- параметры калибровки инерциального модуля;
- приращения координат маркеров до краев отвала;
- параметры калибровки стереокамеры (для исключения искажений при съемке);

- координаты техники, получаемые с помощью ГНСС-модуля;
- стереопара снимков с камеры;
- положение камер в пространстве.

Блок-схема алгоритма работы рассматриваемого программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма

Алгоритм расчета координат кромки отвала состоит из описанных ниже действий:

Сопоставляем стереопары по алгоритму SIFT [18] и получаем ключевые точки маркеров, верхней $x_{l,t}, y_{l,t}, x_{r,t}, y_{r,t}$ и нижней $x_{l,b}, y_{l,b}, x_{r,b}, y_{r,b}$ границы обоих снимков.

Вычисляем диспаратности [20] нижнего d_b и верхнего d_t края маркера:

$$d_b = x_{l,b} - x_{r,b}; \quad (1)$$

$$d_t = x_{l,t} - x_{r,t}. \quad (2)$$

Определяем глубины точек нижнего Z_b и верхнего Z_t края маркера, ориентируясь на фокусное f и базовое B расстояния:

$$Z_b = \frac{f * B}{d_b}; \quad (3)$$

$$Z_t = \frac{f * B}{d_t}. \quad (4)$$

При известной внутренней калибровке камеры (матрице K), реконструируем точки с трехмерными координатами в локальной системе координат для верхнего P_t и нижнего P_b края маркера:

$$P_b = Z_b K^{-1} \begin{pmatrix} x_{l,b} \\ y_{l,b} \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$P_t = Z_t K^{-1} \begin{pmatrix} x_{l,t} \\ y_{l,t} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Находим вектор оси маркера v :

$$v = P_t - P_b = (v_x, v_y, v_z). \quad (7)$$

Определяем крен маркера α вокруг оси X , для однозначного определения угла в диапазоне $[-\pi; \pi]$ использовалась функция $\arctan 2(y, x)$, учитывающая знаки обоих аргументов:

$$\alpha = \arctan 2(v_x, v_y). \quad (8)$$

Определяем тангаж маркера β вокруг оси Y :

$$\beta = \arctan 2(v_x, v_z). \quad (9)$$

Для дальнейшего расчета значения угла рысканья маркера γ определяем горизонтальный вектор по двум маркерам L и R , на одном уровне:

$$h = R - L = (h_x, h_y, 0). \quad (10)$$

Определяем рысканье маркера γ вокруг оси Z

$$\gamma = \arctan 2(h_x, h_y). \quad (11)$$

Составляем матрицы поворота маркера, по полученным углам тангажа $R_x(\alpha)$, крена $R_y(\beta)$ и рысканья $R_z(\gamma)$:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Общая наклонная матрица R_m определяется формулой:

$$R_m = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma). \quad (15)$$

Рассчитываем координаты кромки отвала с учетом наклона маркера $P_e^{\text{лок}}$, в локальной системе координат техники:

$$P_e^{\text{лок}} = P_b + R_m \Delta, \quad (16)$$

где $\Delta = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ – фиксированная величина смещения маркера, относительно кромки отвала, м.

$$\sigma_Z^2 = \left(-\frac{fB}{d^2} \sigma_d \right)^2 + \left(\frac{B}{d} \sigma_f \right)^2 + \left(\frac{f}{d} \sigma_B \right)^2 = 0,0171^2, \quad (19)$$

где σ_Z – погрешность глубины, м;
 $f = 800$ – фокусное расстояние, пиксель;
 $B = 0,2$ – базового расстояния между камерами, м;
 $d = 58$ – диспаратность, пиксель;
 $\sigma_d = 0,2$ – погрешность диспаратности, пиксель;
 $\sigma_f = 1$ – погрешность фокусного расстояния, пиксель;
 $\sigma_B = 0,001$ – погрешность определения базового расстояния между камерами, м.

Далее определим точность определения ориентирования маркера в пространстве:

$$\sigma_m^2 = (\|\Delta\| \sigma_Z)^2 = 0,0049^2, \quad (20)$$

где σ_m – погрешность ориентирования маркера в пространстве, м;

Рассчитываем координаты кромки отвала с учетом наклона маркера, в глобальной системе координат:

$$P_e^{\text{глоб}} = P_e^{\text{лок}} R_{\text{кам}} + T_{GNSS}, \quad (17)$$

где T_{GNSS} – глобальные координаты, получаемые из навигационного модуля, м, $R_{\text{кам}}$ – матрица поворота камеры, на основе данных с инерциального модуля:

$$R_{\text{кам}} = R_x(\varphi)R_y(\theta)R_z(A), \quad (18)$$

где $R_x(\varphi)$ – матрица поворота камеры по полученному углу тангажа с инерциального модуля;

$R_y(\theta)$ – матрица поворота камеры по полученному углу крена с инерциального модуля;

$R_z(A)$ – матрица поворота камеры по полученному углу азимута техники с навигационного модуля.

По результатам расчета получаем координаты кромки отвала в глобальной системе координат WGS-84.

Результаты

Оценим точность определения вычисляемых значения, начиная с погрешности глубины:

$\Delta = 0,2$ – фиксированная величина смещения маркера, относительно кромки отвала, м;
 $\sigma_Z = 0,0246$ – суммарная угловая погрешность маркера, рад.

В результате определяем погрешность вычисляемых координат кромки отвала, учитывая три независимых источника ошибок:

$$\sigma_{P_e^{\text{глоб}}}^2 = \sigma_Z^2 + \sigma_m^2 + \sigma_{T_{GNSS}}^2 \approx 0,0204^2, \quad (21)$$

где $\sigma_{P_e^{\text{глоб}}}$ – погрешность вычисляемых координат кромки отвала, м;

$\sigma_{T_{GNSS}} = 0,01$ – погрешность определения координат навигационным модулем в режиме RTK (в зависимости от условий может колебаться от 0,01 до 0,04), м.

Исходя из результатов, можно сделать вывод о том, что получаемая точность определения координат подвижных узлов строительной техники посредством компьютерного

зрения сопоставима с точностью позиционирования, величина которых составляет ± 2 см по высоте, достигаемой общепринятыми способами позиционирования [11, 12, 13, 14, 15], при которых применяется установка датчиков непосредственно на подвижный рабочий орган строительной техники.

Обсуждение

Описанный модуль позиционирования является частью комплекса многих систем нивелирования строительной техники, таких как [10, 11, 12, 13, 14].

В сравнении со стандартным подходом позиционирования подвижных узлов строительной техники, при непосредственной установке датчиков на рабочий орган, применение компьютерного зрения имеет соизмеримые показатели: точности позиционирования; частоты расчета целевых координат; себестоимости оборудования; доступности технологий, необходимых для комплексной реализации предлагаемого способа (в связи с использованием открытого программного обеспечения).

Применение компьютерного зрения может иметь определенные ограничения для работы, такие как наличие слепых зон, при отслеживании визирных маркеров, требования к освещенности, погодные условия и т. д. Данные ограничения могут быть минимизированы в пределах радиуса работы техники посредством разработки требований к установке оборудования на технике, эксплуатации программно-аппаратного комплекса и его периодического обслуживания.

Необходимо дополнительно подчеркнуть, что применение компьютерного зрения также позволяет обеспечить реализацию дополни-

тельных функций системы, таких, например, как предотвращение столкновений с объектами, без необходимости применения дополнительных аппаратных модулей.

Заключение

В статье описаны преимущества альтернативного подхода к позиционированию крайних точек отвала автогрейдера, способ позволяет исключить необходимость монтажа физических датчиков на рабочий орган автогрейдера, что минимизирует проблемы износа и отказов датчиков под воздействием вибрации, пыли и механических нагрузок. Предложенный программно-аппаратный комплекс на базе стереокамеры, визирных маркеров и навигационно-инерциальных данных обеспечивает возможность получения точных локальных 3D-координат и их преобразования в глобальную систему координат без применения дополнительных датчиков угла наклона, а также энкодеров, опционально. Представленный пошаговый математический алгоритм вычислений, от сопоставления ключевых точек способом SIFT и сегментации нейросетью YOLO до построения матриц поворота и расчёта итоговых координат, обеспечивает получение трехмерных координат целевых точек и упрощает сопровождение системы. Предварительные расчеты и моделирование подтвердили работоспособность предложенного решения и снижение уязвимости системы позиционирования. Дальнейшие исследования будут посвящены экспериментальной валидации способа в полевых условиях, адаптации алгоритмов компьютерного зрения к изменяющейся освещенности и внедрению автоматизированного контроля качества съёмки для повышения надёжности системы нивелирования строительной техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демиденко А. И., Летопольский А. Б., Семкин Д. С. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2016. 393 с. EDN WDXYJD.
2. Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P. D., Hashtrudi-Zaad K. An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, 11–15 May 2002. 2002. Vol. 2. P. 1771–1776.
3. Sun D., Ji C., Jang S., Lee S., No J., Han C., Han J., Kang M. Analysis of the Position Recognition of the Bucket Tip According to the Motion Measurement Method of Excavator Boom, Stick and Bucket. Sensors. 2020. № 20. P. 2881. DOI 10.3390/s20102881.
4. Haga M., Watanabe H., Fujishima K. Digging control system for hydraulic excavator. Mechatronics. 2001. № 11. P. 665–676. DOI: 10.1016/S0957-4158(00)00043-X.
5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение : учебное пособие. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с. EDN: NEWUVN.

6. Марковнина А. И., Кривов А. В., Макаров В. С., Беляков В. В. Системы позиционирования для экскаваторной техники. Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2020. № 1. С. 37–46.
7. Хвалев П. С., Сатюков А. Б., Орехов С. А. Информационные технологии автоматического нивелирования в дорожно-строительной технике. Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2017. № 31-05. С. 11–15. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-11.
8. Букреев И. А. Комбинация достоинств 3D-системы управления техникой. Строительная техника и технологии. 2010. № 6. С. 54–56.
9. Букреев И. А. Взгляд изнутри. Современные системы автоматического нивелирования для строительных машин. Строительная техника и технологии. 2011. № 8. С. 78–81.
10. Кнышов А. В., Колесниченко И. Е., Ничипров А. А. Системы управления строительной техникой. Современные прикладные исследования : материалы третьей национальной научно-практической конференции, Шахты, 16–19 апреля 2019 года. Шахты: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2019. С. 25–27. EDN: LPOWWZ.
11. Hem-Nav. URL: <https://hem-nav.ru/resheniya> (дата обращения: 19.05.2025).
12. Cube-3D. URL: <https://cube-3d.ru/> (дата обращения: 19.05.2025).
13. Trimble Heavy Industry – Machine Control. URL: <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/civil-construction/machine-control> (дата обращения: 19.05.2025).
14. FJDynamics. URL: <https://www.fjdynamics.com/> (дата обращения: 19.05.2025).
15. Topcon Earthmoving Solutions. URL: <https://www.topconpositioning.com/gb/en/solutions/infrastructure/earthmoving> (дата обращения: 19.05.2025).
16. Рощин Д. А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники. Измерительная техника. 2022. № 3. С. 29–35. DOI 10.32446/0368-1025. EDN JZXKBN.
17. Гук А. П., Арбузов С. А. Исследование точности автоматического измерения координат точек снимков с помощью масштабно-инвариантного преобразования SIFT. ГЕО-Сибирь-2010. VI Международный научный конгресс : сборник материалов в 6 томах (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 года). Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. С. 35–38. EDN PFOMFD.
18. Лопатин Д. В. Анализ дескриптора особых точек изображений SIFT. Молодежь. Наука. Общество – 2021 : сборник студенческих работ Всероссийской студенческой научно-практической междисциплинарной конференции, Тольятти, 20–24 декабря 2021 года / отв. за выпуск С. Х. Петерайтис. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. С. 221–224. EDN YLEUPG.
19. Ultralytics GitHub Repository. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 19.05.2025).
20. Волкович А. Н. Комбинированный метод вычисления значения диспаратности на стереоизображениях в задачах стереодальнометрии. Информационные технологии и нанотехнологии. 2017. С. 720–726. EDN YQLPPD.

REFERENCES

1. Demidenko A. I., Letopolsky A. B., Semkin D. S. (2016). *Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny: uchebnoe posobie [Road, Construction, and Lifting-Transport Machines: Textbook]*. Omsk: SibADI. 393 p. EDN: WDXYJD. [in Russian].
2. Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P. D., Hashtrudi-Zaad K. (2002). An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, 11–15 May 2002*. Vol. 2. P. 1771–1776.
3. Sun D., Ji C., Jang S., Lee S., No J., Han C., Han J., Kang M. (2020). Analysis of the position recognition of the bucket tip according to the motion measurement method of excavator boom, stick and bucket. *Sensors*, 20, 2881. DOI: 10.3390/s20102881.
4. Haga M., Watanabe H., Fujishima K. Digging control system for hydraulic excavator. *Mechatronics*. 2001. № 11. P. 665–676. DOI 10.1016/S0957-4158(00)00043-X.
5. Shapiro L., Stockman G. (2006). *Komp'yuternoe zrenie: uchebnoe posobie [Computer Vision: Textbook]*. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge. 752 p. EDN: NEWUVN. [in Russian].
6. Markovkina A. I., Krivov A. V., Makarov V. S., Belyakov V. V. (2020). Positioning systems for excavation equipment. *Innovatsionnoe razvitie pod'emno-transportnoy tekhniki: materialy*

Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative Development of Lifting and Transport Equipment: Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conf.], 1, 37–46. [in Russian].

7. Khvalev P. S., Satyukov A. B., Orekhov S. A. (2017). Information technologies of automatic leveling in road construction machinery. *Innovatsionnoe razvitie pod'emno-transportnoy tekhniki: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative development of lifting and transport equipment: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]*, 31-05, 11–15. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-11 [in Russian].

8. Bukreev I. A. (2010). Combination of advantages of 3D machine control system. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii [Construction Equipment and Technologies]*, 6, 54–56 [in Russian].

9. Bukreev I. A. (2011). An insider's view: Modern automatic leveling systems for construction machinery. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii [Construction machinery and technology]*, 8, 78–81. [in Russian].

10. Knyshev A. V., Kolesnichenko I. E., Nichiprov A. A. (2019). Control systems for construction equipment. *Sovremennye prikladnye issledovaniya: materialy tret'ey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Shakhty, 16–19 aprelya 2019 goda [Modern Applied Research: Proc. of the Third National Sci.-Pract. Conf., Shakhty, April 16–19, 2019]*. Shakhty: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekh. un-t (NPI) im. M.I. Platova. P. 25–27. EDN: LPOWWZ. [in Russian].

11. Hem-Nav. Retrieved from: <https://hem-nav.ru/resheniya> (accessed: 19.05.2025).

12. Cube-3D. Retrieved from: <https://cube-3d.ru/> (accessed: 19.05.2025).

13. Trimble Heavy Industry – Machine Control. Retrieved from: <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/civil-construction/machine-control> (accessed: 19.05.2025).

14. FJDynamics. Retrieved from: <https://www.fjdynamics.com/> (accessed: 19.05.2025).

15. Topcon Earthmoving Solutions. Retrieved from: <https://www.topconpositioning.com/gb/en/solutions/infrastructure/earthmoving> (accessed: 19.05.2025).

16. Roshchin D. A. (2022). Application of machine vision system for spatial position control of construction machinery. *Izmeritel'naya tekhnika [Measurement Techniques]*, 3, 29–35. DOI: 10.32446/0368-1025. EDN: JZXKBN. [in Russian].

17. Guk A. P., Arbuzov S. A. (2010). Accuracy study of automatic measurement of image point coordinates using SIFT. *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. Vol. 4, Part 1, 35–38. EDN: PFOMFD. [in Russian].

18. Lopatin D. V. (2023). Analysis of SIFT keypoint descriptor of images. *Molodezh'. Nauka. Obshchestvo – 2021: sbornik studencheskikh rabot Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy mezhdistsiplinarnoy konferentsii, Tolyatti, 20–24 dekabrya 2021 goda [Youth. Science. Society – 2021: Proc. of the All-Russian Student Sci.-Pract. Interdisciplinary Conf., Tolyatti, Dec. 20–24, 2021]*. Tolyatti: Tolyattinskiy gosudarstvennyy universitet. P. 221–224. EDN: YLEUPG. [in Russian].

19. Ultralytics GitHub Repository. Retrieved from: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (accessed: 19.05.2025).

20. Volkovich A. N. (2017). Combined method for calculating disparity value on stereo images in stereo rangefinding tasks. *Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii [Information Technologies and Nanotechnologies]*, 720–726. EDN: YQLPPD. [in Russian].

Об авторах

Никита Александрович Жилинский – аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Инна Евгеньевна Дорогова – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Author details

Nikita A. Zhilinskiy – PhD Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Inna E. Dorogova – PhD, Department of Space and Physical Geodesy.

Получено / Received 26.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 27.11.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025