

Подходы к определению положения механизированной шагающей крепи в горной выработке

М.С. Никитенко ✉, Д.Ю. Худоногов, С.А. Кизилев

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация
✉ ltd.mseng@gmail.com

Резюме: Механизированная шагающая крепь, рассматриваемая как мобильный шагающий робот, требует автономного определения своего положения в подземной горной выработке. Однако существующие средства (лазерные дальномеры, лидары, ультразвуковые сенсоры) имеют ограничения: чувствительность к пыли и влаге, температуре окружающей среды. Системные решения по определению положения крепи относительно забоя, почвы и элементов проходческого/очистного комплекса, адаптированные к условиям угольных шахт, отсутствуют. Цель работы заключалась в исследовании эффективности предложенных способов определения положения механизированной шагающей крепи на основе технологий машинного зрения с низкими требованиями к вычислительным ресурсам. Разработан ряд специализированных методик, в частности: 1) определения расстояния до забоя по углу проекции светового маркера; 2) оценки рельефа почвы через выделение пикселей с ярким свечением (алгоритм Ши–Томаси) и построения матрицы высот; 3) детектирования пересечений линий безопасности при помощи построения технической карты положения крепи относительно комбайна с виртуальными границами (функции Clamp/Rake). В результате 1) получены трёхмерные профили высот в пикселях; 2) реализовано детектирование пересечения линии безопасности комбайном слева и справа; 3) представлена обобщённая структурная схема способов определения положения крепи. Совокупность разработанных способов и методов машинного зрения позволяет автоматической системе управления механизированной шагающей крепью осуществлять движение и маневрирование в забое с учётом ситуационной осведомленности. Эффективность достигается за счёт оптимизации алгоритмов, которые нетребовательны к вычислительным ресурсам бортовых ЭВМ.

Ключевые слова: механизированная крепь, шагающая крепь, проходческие работы, автономность работы, автоматизированное управление, машинное зрение, распознавание образов, световой маркер, лазерная сетка

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий (продление)».

Для цитирования: Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Кизилев С.А. Подходы к определению положения механизированной шагающей крепи в горной выработке. *Горная промышленность*. 2026;(4):147–152. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-147-152>

Approaches to position determination of powered walking support in a mine working

M.S. Nikitenko ✉, D.Yu. Khudonogov, S.A. Kizilov

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation
✉ ltd.mseng@gmail.com

Abstract: The walking roof support, viewed as a mobile walking robot, requires autonomous identification of its position in an underground mine working. However, existing means (laser rangefinders, lidars, ultrasonic sensors) have limitations, e.g. their sensitivity to dust, moisture, and ambient temperature. There are no systematic solutions for determining the position of the walking roof support relative to the face, floor, and components of the mining machines adapted to the conditions of coal mines. The aim of this work was to study efficiency of the proposed methods for determining position of the walking roof support based on machine vision technologies with low requirements for computational resources. A number of specialized techniques have been developed, in particular: (1) determining the distance to the face by the projection angle of a light marker; (2) assessing the floor terrain by extracting pixels with bright luminescence (the Shi–Tomasi algorithm) and constructing a height matrix; (3) detecting the safety line intersections by constructing a technical position map of the support relative to the roadheader with virtual boundaries (the Clamp/Rake functions). As a result, (1) 3D height profiles in pixels were obtained; (2) detection of the

roadheader crossing the safety line from left and right was implemented; (3) a generalized structural diagram of the methods for determining the walking roof support position was presented. A combination of the developed machine vision techniques and methods enables the automatic control system of the walking roof support to move and maneuver at the face taking into account the current situation. The efficiency is achieved through optimization of algorithms that have relatively low demand for computational resources of the onboard computers.

Keywords: roof support, walking roof support, development workings, autonomy, automated control, machine vision, pattern recognition, light marker, laser grid

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project FWEZ-2024-0025 "Development of scientific foundations for the creation of autonomous and automated mining machines, equipment, technical and control systems based on promising digital and robotic technologies (prolongation)".

For citation: Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Kizilov S.A. Approaches to position determination of powered walking support in a mine working. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):147–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-147-152>

Введение

В Федеральном исследовательском центре угля и углехимии СО РАН разрабатывается ряд технологических и технических решений для горнодобывающей промышленности, требующих оснащения системами и средствами управления. В частности, разрабатываемая механизированная шагающая крепь (МШК), которая является универсальной подвижной кинематической основой, предназначенной для поддержания кровли при скоростной проходке, отработке короткими забоями сложноизвлекаемых запасов полезного ископаемого, отработке подэтажами мощных крутонаклонных пластовых месторождений, в качестве крепи сопряжения в составе очистного лавного комплекса и при отработке трудноизвлекаемых запасов пологих угольных пластов, а также выемке заваленного под землёй оборудования. Для каждого назначения МШК предполагает не только наличие характерных особенностей конструкции, но и разработку соответствующих алгоритмов управления, способов обеспечения обратной связи на основе контроля и анализа параметров горной выработки и горного массива. При этом характер взаимодействия МШК с горным массивом отличается обеспечением постоянной (неснижаемой) поддержки кровли при перемещении.

Стоит отметить, что согласно классификации роботов, приведённой в ГОСТ Р 60.0.0.4–2023 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» МШК соответствует всем классификационным признакам мобильного шагающего робота. Исходя из этого МШК должна уметь определять своё текущее состояние и воспринимать внешнюю среду без вмешательства человека – в автоматическом режиме. А автономное перемещение шагающего робота в подземной горной выработке с обеспечением постоянного контроля касания кровли, положения относительно почвы и механизмов очистного комплекса в условиях запылённости, с учетом кинематической схемы МШК, определяет требования и ограничения в отношении применяемых технологий по набору измеряемых величин автоматической системой управления МШК для движения и маневрирования, которые ранее не определены, и в результате проведения работ будут получены впервые.

Автономное перемещение МШК в подземной горной выработке связано с обеспечением постоянного контроля её положения относительно забоя, почвы и элементов проходческого или очистного комплекса, которые, в свою очередь, определяют требования и ограничения в отношении применяемых технологий. Известен способ применения рудничных лазерных дальномеров в горной выработке [1], который эффективно работает в задачах определения

дальности до объектов, расположение которых находится вне зоны забоя. Для определения расстояний между объектами часто применяются времяпролётные камеры (Time of Flight) [2], а также ультразвуковые сенсоры, которые просты по конструкции, имеют низкую стоимость и высокую скорость работы, не требуют сложного программного обеспечения, однако работают только на коротких дистанциях [3]. На подземных рудниках также показывают свою эффективность лидар-сканеры, которые имеют высокую разрешающую способность, работают на малой и большой дальности, но при этом чувствительны к пыли, влажности, а также не работают с объектами, имеющими низкую отражающую способность [4]. Однако о разработке лидаров для использования в угольных шахтах и в условиях, требующих взрывобезопасного исполнения, достоверной информации практически нет. Информации о выходе опытного образца 3D-сканера (лидара) ExScan для угольных шахт [5] в открытых источниках с 2022 г. не найдено.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что средства определения положения объектов для подземного применения существуют, но получают основное развитие для рудников, что объясняется отсутствием систем, пригодных для применения в условиях горной выработки, в части обеспечения стандартов взрывозащищённости, технических решений защиты от запылённости. Это связано с тем, что оптическая линза, в случае лазерного дальномера или фотодетектора лидара приёмного устройства имеет защиту стеклом или пластиком, что требует своевременной очистки от пыли и грязи. При этом необходимо контролировать температурный режим работы таких устройств, который влияет на точность обработки принятого отражённого сигнала.

В настоящее время ключевым направлением решения задач определения положения объектов в горной выработке является применение технологий машинного зрения (МЗ). Известны решения навигации беспилотных горных машин в условиях слабой освещённости и низкой контрастности изображения [6]. Активно используется построение карт маршрута на основе алгоритма SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [7], в том числе и в условиях плохой видимости [8]. Существуют решения обработки изображений в условиях повышенной запылённости [9] на основе комбинации физических моделей рассеивания света и обучения нейронных сетей [10].

Исходя из вышесказанного можно сформулировать общие и известные подходы к применению систем МЗ в пространственной ориентации объектов. Так, например, определение положения МШК относительно забоя сводится

к задачам, которые связаны с определением расстояния от точки расположения фиксирующего электронного устройства до объекта. Одним из основных способов определения расстояния до объекта на основе МЗ является применение методов триангуляции [11; 12], нейронных сетей [13], оценки расстояния при помощи известных метрик объектов [14], а также стереозрения [15].

Однако основным недостатком таких решений является сложная реализация алгоритмов машинного зрения, требовательных к аппаратным и вычислительным устройствам, осуществляющим их функционирование, что влияет на повышенное энергопотребление электронных устройств автоматизации горношахтного оборудования, которое, в свою очередь, будет проявляться повышенным выделением тепла.

Таким образом, задачей являлось исследование эффективности предложенных способов определения положения МШК относительно забоя, почвы и элементов проходческого комбайна в горной выработке.

Результаты и обсуждение

Способ определения положения МШК относительно забоя заключается в измерении алгоритмом МЗ угла проекции светового маркера на грудь забоя относительно передовой секции МШК.

Для практической реализации способа была разработана специализированная установка для проецирования светового маркера на условную грудь забоя. Внешний вид интерфейса программного модуля определения дистанции до условной груди забоя представлен на рис. 1.

Эффективность и основное отличие способа достигаются за счёт расположения излучателя светового маркера на известном расстоянии от оптического центра цифровой видеокамеры. Таким образом, для определения расстояния до точки проекции светового маркера достаточно измерить её угол, который вычисляется между двумя линиями с общей вершиной.

Рельеф почвы в рабочей зоне горной выработки не идеален и может иметь уступы и ямы различной высоты. Под способом определения положения МШК относительно почвы понимается оценка высот неравномерности рельефа в местах касания опор почвы.

В результате проведённых ранее научно-исследовательских работ был предложен способ измерения высот



Рис. 2
Экспериментальный участок
ровного рельефа почвы

Fig. 2
A simulation section with flat
floor terrain of the mine
working

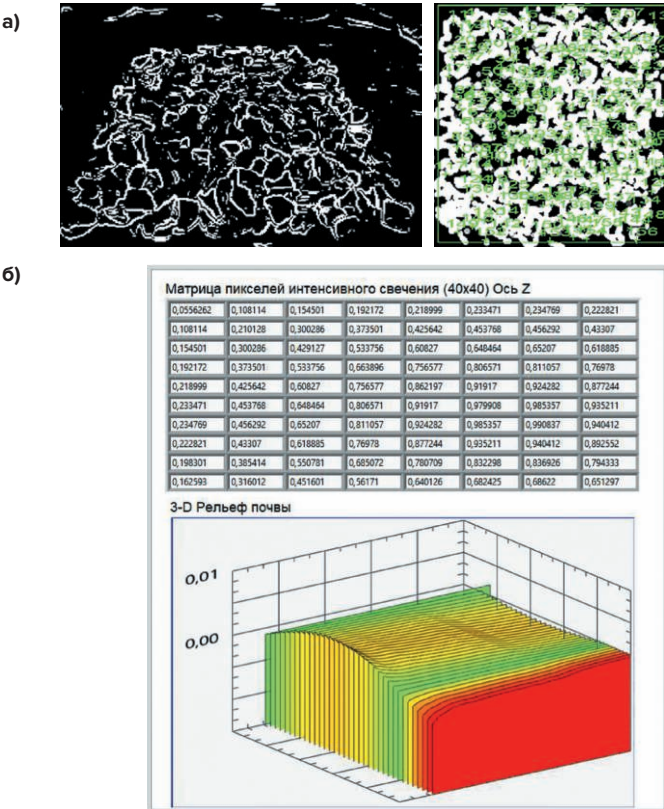


Рис. 3
Последовательность шагов
формирования трёхмерного
профиля рельефа почвы
горной выработки:
а – выделение пикселей с яр-
ким свечением; б – формиро-
вание матрицы пикселей

Fig. 3
Stepwise procedure
to create a 3D model
of a mine floor terrain:
(a) extraction of the bright
luminescence pixels;
(б) construction of the pixel
matrix

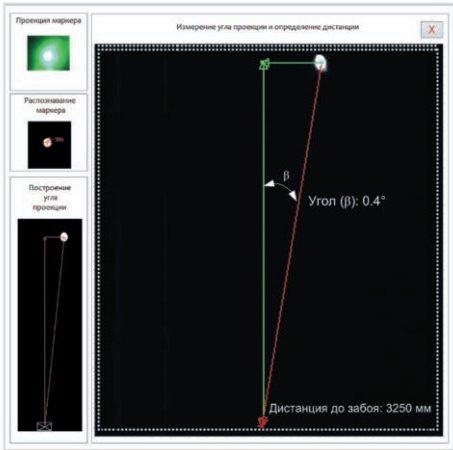


Рис. 1
Внешний вид интерфейса
способа определения
дистанции до условной груди
забоя

Fig. 1
The graphical user interface
of the method for determining
the distance to the reference
face model

машинным зрением [16; 17]. При помощи алгоритма Ши-Томаси [18, 19] были выделены пиксели с наиболее ярким свечением, по значениям которых сформирована матрица значений высот поверхности и стало возможным выполнить построение трёхмерного графа рельефа почвы.

Для формирования экспериментального рельефа на горизонтальной площадке размером 1000×1000 мм ровным слоем была размещена смесь мелко гранулированного угля и породы (рис. 2), при этом на поверхности допускалось наличие выступов, высота которых не превышала 50 мм. На высоте 1500 мм в центр поверхности была на-



Рис. 4
Экспериментальный участок
неравномерного рельефа
почвы

Fig. 4.
A simulation section
with uneven floor terrain
of the mine working

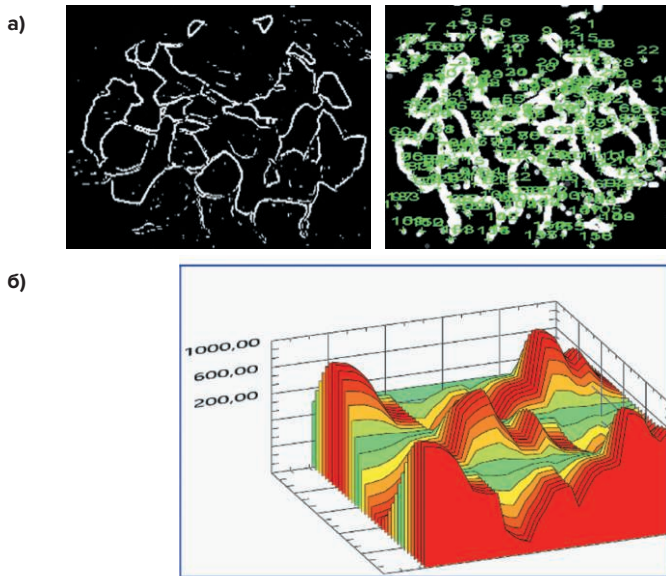


Рис. 5
Моделирование опытного
участка неравномерного
рельефа почвы:
а – значения высот в пикселях;
б – трёхмерный профиль

Fig. 5
Modeling of an experimental
plot with uneven floor terrain:
(a) pixel elevation values;
(б) a 3D profile

правлена цифровая видеокамера. На рис. 3 представлена реализованная последовательность шагов формирования трёхмерного профиля рельефа почвы. Далее было выполнено моделирование рельефа почвы с добавлением кусков породы и угля, размер которых варьировался от 100 до 200 мм. Опытный участок такого рельефа представлен на рис. 4, а его трёхмерный профиль на рис. 5.

Определение положения МШК относительно элементов проходческого или очистного комплекса обусловлено прежде всего обеспечением безопасности его маневрирования и проводится с целью исключения столкновения комбайна с опорами секций МШК. Таким образом, основными контролируемыми параметрами перед началом выполнения движения МШК становится определение допустимых и безопасных дистанций между опорами секций и бортами комбайна.

Методика способа заключается в построении технической карты положения крепи относительно комбайна, которая формируется за счёт полученных изображений с цифровых видеокамер опор крепи и проекции лазерных линий вдоль правого и левого борта комбайна.

Для детектирования пересечения линий безопасности левого и правого борта комбайна выполняется вычисле-

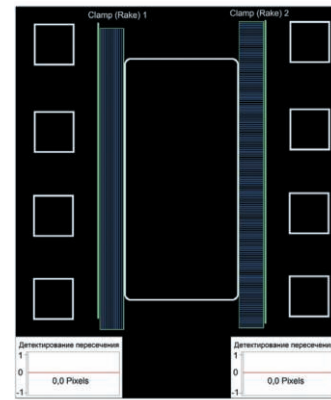


Рис. 6
Построение технической карты
положения МШК относительно
комбайна

Fig. 6
Technical chart of the walking
roof support positioning
relative to the roadheader

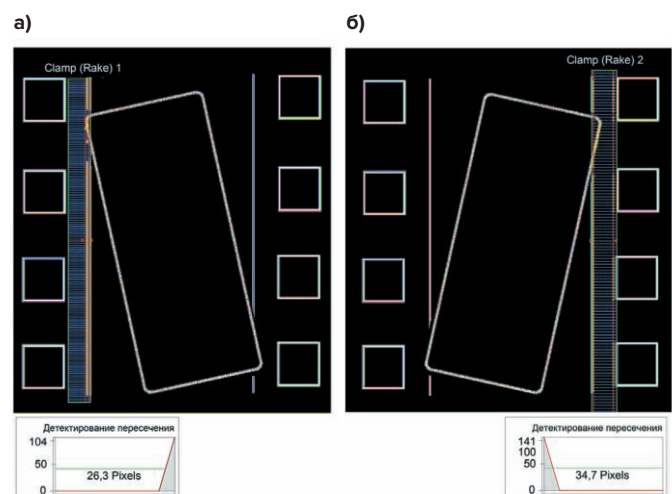


Рис. 7
Пересечение комбайном линии
безопасности (а) слева и
(б) справа

Fig. 7
Intersection of the safety line
by the roadheader (a) from the
left side and (б) from the right
side

ние метрик в пикселях на основе измерений выделенных прямоугольных регионов между объектами. Методика, реализующая способ, включала в себя следующие шаги: установить между контурами опор и проекциями лазерных линий правого и левого борта комбайна виртуальные линии, обозначающие границы безопасных зон. Пространства, образованные справа левой границы безопасности и слева правой границы безопасности, являются контролируемыми регионами, которые выделены наложением прямоугольной области функциями Clamp (Rake) 1 и Clamp (Rake) 2. Расположение технической карты положения МШК относительно комбайна показано на рис. 6.

Принято, что начальное положение МШК определяется параллельным расположением бортов комбайна относительно линий безопасности, при которых значения пикселей функций Clamp (Rake) 1 и Clamp (Rake) 2 равны нулю и приняты значениями безопасного детектирования положения МШК относительно комбайна. Любое пересечение линий безопасности левым или правым бортом комбайна детектируется изменением прямоугольного региона, установленного функциями Clamp (Rake) 1 и Clamp (Rake) 2. На рис. 7 приводятся фрагменты моделирования положения МШК относительно комбайна.

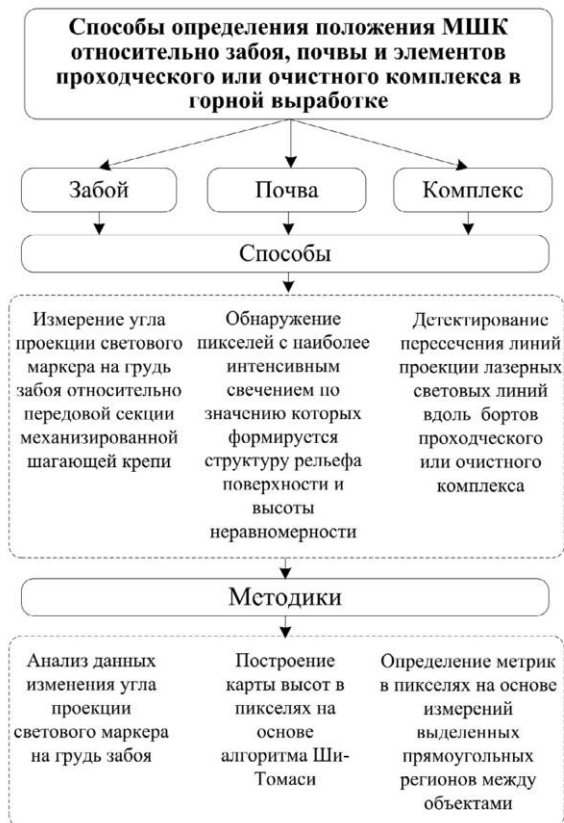


Рис. 8
Обобщённая структурная схема способов и методов определения положения механизированной шагающей крепи относительно забоя, почвы и элементов проходческого или очистного комплекса

Fig. 8
A generalized structural diagram of techniques and methods for determining position of the walking roof support relative to the face, floor, and components of mining equipment

Так, например, в случае пересечения левой или правой безопасной границы функции Clamp (Rake) 1 и Clamp (Rake) 2 фиксируют изменение прямоугольного региона, выраженное в пикселях, которое отлично от нулевого значения.

Разработанные способы и методики определения положения МШК относительно забоя, почвы и элементов проходческого или очистного комплекса на основе анализа данных изменения геометрических параметров проекций световых маркеров представлены в виде обобщенной структурной схемы на рис. 8. Эффективность способов и методик достигается за счёт оптимизации технических средств и алгоритмов МЗ, не требовательных к вычислительным ресурсам системы бортовых ЭВМ проходческих или очистных комплексов.

Заключение

Определение положения МШК относительно забоя реализовано посредством измерения угла между оптической осью и расположением проекции светового маркера. Положение МШК относительно элементов проходческого или очистного комплекса определяется за счёт детектирования пересечения линий проекции лазерных световых маркеров бортами комбайна. Положение относительно почвы определяется на основе карты высот, построенной по значениям интенсивности свечения пикселей на изображении. Такой подход обеспечивает прежде всего определение как безопасных мест рельефа для касания опор почвы, так и для оценки дистанции между опорными пятнами МШК и поверхностью почвы горной выработки.

В совокупности разработанных способов и методов их реализации может быть получен состав контролируемых и измеряемых величин алгоритмами МЗ, который позволит автоматической системой управления осуществлять движение и маневрирование МШК в горной выработке призабойной зоны с учётом её текущего положения.

Список литературы / References

1. Pu Y. An analysis of laser distance measuring by different laser rangefinders. *Theoretical and Natural Science*. 2024;38:235–239. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/38/20240585>
2. Bui X.-N., Drebenstedt C., Nguyen H., Duc N.V., Hieu T.Q., Long N.Q., Ninh L.N. Smart mining - opportunities and challenges for Vietnam's mining industry. In: Hai T.T. (ed.) *Proceedings of the International Workshop on Advances in Surface Mining for Environmental Protection and Sustainable Development-2025 (ASMES-2025), Hanoi, Vietnam, October 17, 2025*. Hanoi: Transport Publishing House; 2025, pp. 24–41.
3. Yu X., Marinov M. A Study on recent developments and issues with obstacle detection systems for automated vehicles. *Sustainability*. 2020;12(8):3281. <https://doi.org/10.3390/su12083281>
4. Sonawane M.G., Patel N.S. Review of obstacle detection by ultrasonic and laser sensor for automated guided vehicles. In: Pawar P.M. et al. (eds) *Techno-societal 2022: Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Technologies for Societal Applications*. Cham: Springer; 2024. Vol. 1, pp. 985–992. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34644-6_101
5. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications – case study: laser scanning in underground coal mines. *Resources*. 2020;9(5):56. <https://doi.org/10.3390/resources9050056>
6. Tampier C., Mascaró M., Ruiz-del-Solar J. Autonomous loading system for load-haul-dump (LHD) machines used in underground mining. *Applied Sciences*. 2021;11(18):8718. <https://doi.org/10.3390/app11188718>
7. Ren Z., Wang L., Bi L. Robust GICP-Based 3D LiDAR SLAM for underground mining environment. *Sensors*. 2019;19(13):2915. <https://doi.org/10.3390/s19132915>
8. Богданова К.А. Применение алгоритмов SLAM при построении трехмерной модели подземных горных выработок. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021;(2):134–140. Bogdanova K.A. Application of SLAM algorithms for three-dimensional modelling of mine workings. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2021;(2):134–140. (In Russ.)
9. Memon S., Arain R.H., Mallah G.A., Rehman S., Barkat J., Siddiqui M.A. A review on deep learning-based approaches for image dehazing. *Spectrum of Engineering Sciences*. 2024;2(3):310–328.

10. Su Y., Bu W., Chen J., Li S., Liu M. Design of the autonomous path planning system for mining robots based on stereo vision. In: Liu XJ., Nie Z., Yu J., Xie F., Song R. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2021), Yantai, China, October 22–25, 2021*. Cham: Springer; 2021. Part 4, pp. 596–605. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89092-6_54
11. Храмов В.В. Способ описания объектов сцены системы технического зрения робота средствами нечеткой триангуляции Делоне с использованием адаптивной сетки. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2020;16(4):833–840. <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202004.833-840>
Khramov V.V. A method of describing objects in a scene of a robot vision system by means of fuzzy Delaunay triangulation using an adaptive mesh. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2020;16(4):833–840. (In Russ.) <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202004.833-840>
12. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Темкин И.О., Храмов В.В. Методология интеллектуальной навигации для управления автономными подвижными объектами на основе триангуляции Делоне. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):87–98. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98>
Kramarov S.O., Mityasova O.Yu., Temkin I.O., Khramov V.V. Delaunay triangulation-based methodology of intelligent navigation and control of mobile objects. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):87–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98>
13. Лупенко Н.Л., Богуш Р.П., Чен Х. Анализ методов определения абсолютного расстояния до объекта по изображению с одной видеокамеры с использованием нейронных сетей. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2024;(2):24–33. <https://doi.org/10.52928/2070-1624-2024-43-2-24-33>
Lupenko N., Bohush R., Chen H. Analysis of methods for distance estimation to an object from a single video camera image using neural networks. *Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*. 2024;(2):24–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.52928/2070-1624-2024-43-2-24-33>
14. Дугинов Д.Е. Идентификация размеров объекта с использованием эталонного объекта. *Вестник науки*. 2021;2(1): 52–54. Режим доступа: <https://www.vestnik-nauki.pf/article/3993> (дата обращения: 28.03.2026).
Duginov D.E. Identification of object dimensions using a reference object. *Science Bulletin*. 2021;2(1):52–54. (In Russ.) Available at: <https://www.vestnik-nauki.pf/article/3993> (accessed: 28.03.2026).
15. Mustafah Y.M., Azman A.W., Ani M.H. Object distance and size measurement using stereo vision system. *Advanced Materials Research*. 2012;622-623:1373–1377. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.622-623.1373>
16. Du Y., Zhang H., Liang L., Zhang J., Song B. Applications of machine vision in coal mine fully mechanized tunneling faces: a review. *IEEE Access*. 2023;11:102871–102898. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3317048>
17. Черкасов П.В., Никитенко М.С., Кизилев С.А. Обоснование параметров стенда для измерения объема выпускаемой горной массы с использованием машинного зрения и проецирования сетки лазерных линий. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2024;(10):120–126.
Cherkasov P.V., Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Substantiation of the parameters of the stand for measuring the volume of produced rock mass using machine vision and projection of a grid of laser lines. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov*. 2024;(10):120–126. (In Russ.)
18. Shi J., Tomasi Good features to track. In: 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, June 1–23, 1994. IEEE; 1994, pp. 593–600. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323794>
19. Mu Z., Li Z. A novel shi-tomasi corner detection algorithm based on progressive probabilistic Hough transform. In: 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, November 30 – December 2, 2018. IEEE; 2018, pp. 2918–2922. <https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623648>

Информация об авторах

Никитенко Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией перспективных методов управления горнотехническими системами, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Худонов Данила Юрьевич – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0208-790X>; e-mail: admolv@gmail.com

Кизилев Сергей Александрович – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2554-1383>; e-mail: sergkizilov@gmail.com

Information about the authors

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Laboratory for Advanced Control Methods of Mining Engineering Systems, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Danila Yu. Khudonogov – Scientific Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0208-790X>; e-mail: admolv@gmail.com

Sergey A. Kizilov – Scientific Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2554-1383>; e-mail: sergkizilov@gmail.com

Article info

Received: 19.03.2026

Revised: 21.05.2026

Accepted: 08.06.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.03.2026

Поступила после рецензирования: 21.05.2026

Принята к публикации: 08.06.2026