Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.83:681.5.015 © С.А. Кизилов✉, М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов, 2025

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии» СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), 650065, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: sergkizilov@gmail.com

UDC 622.83:681.5.015 © S.A. Kizilov✉, M.S. Nikitenko, D.Yu. Khudonogov, 2025

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 650065, Kemerovo, Russian Federation
✉ e-mail: sergkizilov@gmail.com

Методы автоматического контроля пространственного положения горных машин в условиях угольных шахт*

Methods for automated spatial position monitoring of mining machinery in coal mine conditions

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-72-76

КИЗИЛОВ С.А.
Канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: sergkizilov@gmail.com

НИКИТЕНКО М.С.
Канд. техн. наук, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: ltd.mseng@gmail.com

ХУДОНОГОВ Д.Ю.
Научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: admolv@gmail.com

В статье приведены результаты обзора современных методов, применяемых для автоматического контроля пространственного положения горных машин в подземных горных выработках угольных шахт. Показана проблема измерения углов наклона горных машин относительно их продольных и поперечных осей, а также расположенных вокруг элементов горнотехнических систем, машин и оборудования при автоматизации проходческих и очистных работ. Описана классификация методов определения положения на основе физических принципов работы измеряющих устройств, выделены две основных группы методов – оптические и неоптические. Проведен анализ наиболее распространенных методов и применяемого оборудования, входящих в каждую из групп. Выделены проблематика использования LiDAR-сканеров и положительный опыт использования машинного зрения для определения положения горных машин в условиях угольных шахт. Показаны наиболее распространенные неоптические методы и технические решения, применяемые для измерения наклона. Освещена применимость указанных методов определения наклона горных машин в условиях угольных шахт. Сделан вывод о перспективности устройств, произведенных по технологии MEMS, и технологий машинного зрения для отслеживания положения горных машин в подземных выработках угольных шахт.

Ключевые слова: *датчик, сенсор, наклон оборудования, угольная шахта, автоматизация, оптический метод, неоптический метод, инклинометр, гироскоп, лидар.*

** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» 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: Кизилов С.А., Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю. Методы автоматического контроля пространственного положения горных машин в условиях угольных шахт // Уголь. 2025;(12):72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-72-76.

Abstract

This article provides a review of modern methods used for the automated monitoring of the spatial position of mining machines in coal mines. It highlights the challenges associated with measuring the tilt angles of mining machines relative to their longitudinal and transverse axes, as well as relative to other adjacent machines, during the automation of development and face operations. The methods are classified based on the physical principles of the measuring devices, dividing them into two main categories: optical and non-optical. Descriptions of the most common methods and equipment used in each category are provided. The paper addresses the challenges of using LiDAR devices and the positive experience with machine vision for determining the position of mining machines in coal mine environments. It also outlines the most prevalent non-optical methods and technical solutions used for tilt measurement. The applicability of these methods for determining mining machine inclination in coal mines is briefly discussed. The conclusion is drawn that methods based on MEMS technology and machine vision hold the greatest promise for tracking the position of mining machines in coal mines.

Keywords

Sensor, equipment inclination, coal mine, automation, optical method, non-optical method, inclinometer, gyroscope, LiDAR.

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the RAS, 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

Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu. Methods for automated spatial position monitoring of mining machinery in coal mine conditions. *Ugol'*. 2025;(12):72-76. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-72-76.

ВВЕДЕНИЕ

После начала активного внедрение функций автоматизации и дистанционного управления в горные машины, в середине 2010 годов появились попытки создания автономных подземных очистных комплексов [1], которые вскрыли проблему контроля положения в пространстве горных машин как относительно вектора направления силы гравитации и плоскости горизонта, так и относительно других горных машин, элементов очистных, проходческих комплексов, горнотехнических систем. Ранее данные параметры контролировались и корректировались обслуживающим персоналом на основе органолептики и с учетом личного опыта, что не требовало внедрения в оборудование дополнительных датчиков и устройств для обработки поступающих с них данных.

Целью работы являлось выявление основных тенденций в развитии методов контроля пространственного положения горных машин для угольных шахт, а также определение из них наиболее перспективных для решения задач автоматизации ведения технологических процессов проходческих и очистных работ.

ОБЗОР МЕТОДОВ

Методы определения положения оборудования в пространстве, как горных машин так и любого иного оборудования, можно классифицировать по физическим принципам работы устройств, на которые они опираются, – оптические и неоптические [2]. При выявлении других классифицирующих признаков каждую группу методов можно разделить еще на несколько подгрупп. Оптические методы можно разделить на использующие пассивные или активные маркеры и на безмаркерные методы [2], но все методы в данной группе требуют обязательного наличия внешнего объекта, за которым ведется наблюдение (специально спроектированный маркер или визуально наблюдаемые объекты окружающей среды). К неоптическим методам можно отнести: инерциальные, магнитные, акустические, механические, методы, использующие радио- и микроволновое излучение [2, 3].

Наиболее типичными представителями оптических безмаркерных методов являются LiDAR-сканеры (лидары) [4] и системы машинного зрения, использующие в качестве входного источника данных оцифрованное изображение с видео- или фотокамеры [5]. Лидары активно применяются на рудниках, однако вопросы разработки аналогичных сканеров для условий угольных шахт, их применения в горных машинах для данных условий слабо проработаны и плохо описаны в литературе. Причиной тому является комплекс из нескольких технических проблем. В первую очередь, 2D- и 3D-лидары содержат в своей конструкции электромоторы, вращающие один, или несколько лазерных излучателей, каждое из этих устройств выделяет значительное количество тепла, при этом конструкция корпуса должна быть выполнена во взрывобезопасном исполнении (т.е. изолирована от внешней атмосферы), что порождает проблему отвода выработанного тепла из корпуса [6]. Стандарты взрывобезопасности в свою очередь накладывают ограничения по электропитанию, что оказывает влияние на работу электромоторов и конструкцию корпуса, особенно его прозрачную часть. Из-за требования выдерживать взрыв газа в объеме корпуса без разрушения прозрачная часть должна иметь значительную толщину, что приводит к оптическим искажениям и переотражению лазерного луча [6]. Данные технические ограничения делают задачу разработки лидаров для применения во взрывоопасных условиях достаточно сложной. Известен и хорошо описан в литературе экспериментальный образец 3D-лидара ExScan, разработанный по гранту Australian Coal Association Research Program (ACARP) в 2020 г., пригодный для использования совместно с лавным механизированным очистным комплексом, но, несмотря на

вполне успешные испытания, серийным образцом он так и не стал [6]. При этом авторами отмечено, что для нормальной работы лидара в составе очистного комплекса эксплуатирующей организации пришлось его оснастить отдельной мощной системой омывания прозрачного колпака водой и задействовать ее с периодичностью не реже, чем один раз в 30 минут [6]. Стоит отметить, что на данном этапе лидары во взрывозащищенном исполнении серийно не выпускаются. В шахтах они используются в основном для создания 3D-моделей выработок и отдельных участков в ручном режиме.

В отличие от LiDAR-сканеров машинное зрение на основе видеокамер успешно используется при автоматизации механизированных очистных и проходческих комплексов, например, для определения прямолинейности расположения секций механизированной крепи при их передвижке в автоматическом режиме с 2017 г. [1], оценки прямолинейности движения проходческих комплексов [7]. Известны несколько моделей сертифицированных видеокамер для использования в угольных шахтах, проблема отложения пыли на прозрачных частях в них решается с помощью щеток, закрепленных на корпусе и очищающих прозрачный колпак его поворотом с помощью специального привода [8].

Описанные оптические методы применяются, когда требуется выявить изменение положения объекта, за которым ведется наблюдение, относительно объекта, на котором установлено следящее оборудование, положения других объектов в зоне видимости следящего устройства либо относительно стационарно расположенных маркеров.

В отличие от оптических, некоторым из неоптических методов, таким как механические и инерциальные, не требуется для работы наблюдение или взаимодействие с внешними физическими объектами [3, 9] для определения угла наклона измерительного устройства, использующего данный метод.

При этом в задачах автоматизации при выемке угля подземным способом чаще требуется определение наклона оборудования или его частей относительно продольных и поперечных осей с целью предупреждения повреждения [10]. К таким задачам относится определение наклона: очистного комбайна [10], секций механизированной крепи [11], проходческого оборудования [12].

Для задачи контроля положения (наклона относительно продольной и поперечных осей), навигации (определения положения относительно точки запуска или других реперных точек) подземного горно-шахтного оборудования применяются встроенные навигационные системы, использующие: гироскопы, инклинометры и электронный компас [13]. Все описанные в [13] методы определения положения оборудования относятся к механическим, позволяющим определять положение объекта, на котором расположено данное оборудование. Все описанные выше методы: гироскопические измерения, инклинометрия и измерения направления на магнитный полюс электронными датчиками являются значительными по объему группами методов, выстроенными вокруг принципа работы датчиков, определяющих наклон или поворот [2, 3].

Из современных неоптических методов измерения наклона оборудования можно выделить для гироскопов и акселерометров, как наиболее широко распространенные, методы, использующие устройства, выполненные по технологии microelectromechanical systems (MEMS), или микроэлектромеханические системы – миниатюрные механические устройства, имеющие подвижные части, электронику, изготовленную по технологиям, применяемым при производстве микроэлектроники [14, 15]. Отдельно можно выделить волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), объединяющие механику и оптику, получившие свое название из-за применения в конструкции длинного волоконно-оптического световода, позволяющего выявить разность во времени обхода светом, направленным в противоположных направлениях оптического контура, при этом если оптический контур находится в покое, то разность времени его обхода светом будет равна нолю [16, 17]. Данный вид гироскопов точен, надежен и не имеет подвижных деталей, но имеет значительно более высокую стоимость относительно устройств, сделанных по MEMS-технологии.

Для инклинометров также используются устройства, использующие MEMS-технологию [18], но так как в инклинометрии периодически требуется измерение угла наклона в сложных внешних условиях (перепады температуры, давления, нестабильность, магнитные аномалии, значительные перегрузки), то используются устройства, построенные на комбинации механических методов с другими. Например, емкостные датчики угла наклона объединяют химические и физические свойства материи, что позволяет связать изменение угла наклона с изменением электрической емкости чувствительного элемента в зависимости от покрытия проводящей жидкостью электродов, которая в свою очередь перемещается при наклоне корпуса [19]. Или измерение изменения магнитного поля при изменении положения ферофлюидного раствора в колбе позволило разработать датчики наклона на основе ферофлюидных растворов [20]. На стыке механики и оптики находятся оптико-механические системы, использующие свойства оптоволокна, такие как fiber Bragg grating (FBG) – оптоволоконная решетка Брэгга (измерение угла наклона производится за счет механической деформации оптоволокна с решеткой Брэгга, вследствие чего происходит изменение длины волны отраженного от решетки света) [21]. Еще большую связь оптических маркерных и неоптических механических методов имеют видеоинклинометры, для определения угла наклона в них машинным зрением отслеживается положение специальной светоотражающей жидкости в капсуле относительно градуированной шкалы [22].

В результате проведенного обзора сделан вывод, что современное состояние развития методов определения положения оборудования (наклон, ускорение и т.д.) можно охарактеризовать как наличие значительного количества методов, каждый из которых, несмотря на ряд преимуществ, имеет существенный недостаток или недостатки, не позволяющие сделать его универсальным решением, подходящим для большинства задач и сред применения. Например, для устройств MEMS характе-

рен значительный дрифт показаний в зависимости от температуры [23], лидары сложно адаптируемы к условиям взрывоопасной среды, машинное зрение требует наличия внешнего объекта для привязки измерения, оптоволоконные методы работают зачастую со слишком дорогими устройствами.

При этом очевидно, что в задачах контроля пространственного положения горных машин в угольных шахтах применение некоторых методов является избыточным, а сложность их интеграции в оборудование неоправданной. Примером данного тезиса является проект шахтового лидара ExScan: несмотря на разработанную действующую конструкцию, данный прибор оказался невостребованным из-за сложности эксплуатации (необходимость постоянного омывания прозрачного колпака водой) и малой зоны обзора (около трех секций механизированной крепи вправо и влево от устройства [6]). При этом лидар не давал особых преимуществ для задач автоматизации механизированного очистного комплекса перед комбинацией инклинометров и камеры машинного зрения, описанных в [1]. Однако неоспоримо, что лидар предоставлял значительно больший объем данных о положении горных машин в лаве, но в задачах автоматизации он востребован не был.

Волоконно-оптические устройства определения наклона при отличных показателях точности, магнитной и электронной совместимости и надежности имеют значительную стоимость, которая делает их установку, например на каждую секцию механизированной крепи или в виде массива из нескольких устройств на одну горную машину, неоправданно дорогой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на значительное количество технологий изготовления сенсоров и методов измерения наклона, построенных вокруг них, благодаря разумной достаточности в точности, надежности размеров наиболее часто применимыми в горных машинах и другом оборудовании становятся методы измерения положения в пространстве, основанные на устройствах, изготовленных по MEMS-технологии [14, 15]. Этой тенденции в последние годы способствует развитие современных технологий миниатюризации вычислительных устройств со значительным ростом их вычислительной мощности. Рост вычислительной мощности микроЭВМ позволил успешно бороться с известной проблемой всех датчиков, изготовленных по технологии MEMS, – влиянием температуры окружающей среды на результат измерения за счет возможности выполнения более сложной программной обработки получаемого сигнала на миниатюрных вычислительных устройствах [23].

Тенденции в применении методов и устройств отслеживания положения в пространстве горных машин:

– 3D-лидары во взрывозащищенном исполнении остаются на стадии экспериментальных устройств и требуют применения сложных систем очистки прозрачной части от угольной пыли;

– методы измерения угла наклона, основанные на устройствах, использующих волоконно-оптические технологии, несмотря на существенные преимущества над другими методами, из-за высокой стоимости не находят широкого применения;

– в ближайшей перспективе ожидается увеличение количества требуемых данных для системы управления и самодиагностики, в частности данных о пространственном положении (углах наклона) отдельных элементов горных машин;

– наибольшие перспективы по массовому применению в задачах определения пространственного положения горных машин имеют методы, использующие машинное зрение и датчики наклона, изготовленные по технологии MEMS.

Список литературы • References

1. Роботизация очистного забоя – полностью автоматизированная высокопроизводительная лава с системой управления «MARCO» «ROBOTIC MINING» (Шахта «Полысаевская») / М. Ройтер, М. Крах, У. Кисслинг и др. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. Т. 4. № 2. С. 263-269.
   Reuter M., Krach M., Kiessling U., Veksler Ju. Face robotics – fully automated highly productive face with the MARCO ROBOTIC MINING system (Polysaevskaya Mine). *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk*. 2017;4(2):263-269. (In Russ.).
2. Захаров А.А., Тужилкин А.Ю., Веденин А.С. Алгоритм определения положения и ориентации трехмерных объектов по видеоизображениям на основе вероятностного подхода // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-8. С. 1683-1687.
   Zakharov A.A., Tuzhilkin A.Yu., Vedenin A.S. The algorithm for determining the position and orientation of three-dimensional objects from video images on the basis of a probabilistic approach. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014;11-8:1683-1687. (In Russ.).
3. Welch G.F., Foxlin E. Motion Tracking: No Silver Bullet, but a Respectable Arsenal. Computer Graphics and Applications. *IEEE*. 2002;(22):24-38. DOI: 10.1109/MCG.2002.1046626.
4. Mehendale N., Neoge S. Review on Lidar Technology. 2020. DOI: 2139/ssrn.3604309.
5. Kwon K., Ready S. Practical Guide to Machine Vision Software. An Introduction with LabVIEW. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2015. P. 278.
6. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a Protective Enclosure for Remote Sensing Applications – Case Study: Laser Scanning in Underground Coal Mines. *Resources. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020;9(5):56. DOI: 10.3390/resources9050056.
7. 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. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317048.
8. Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH. URL: https://www.marco-systems.com/ (accessed 15.11.2025).
9. Кострин Д.К. Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2024. Т. 17. № 6. С. 5-23. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23.
   Kostrin D.K. Modern Electronic Tilt Angle Sensors: an Overview of the Basic Physical Principles of Operation and Prospective Developments. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2024;17(6):5-23. (In Russ.). DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-5-23.

10. Wang Shibo, Wang Shijia. Longwall mining automation horizon control: Coal seam gradient identification using piecewise linear fitting. International Journal of Mining Science and Technology. 2022;32(4):821-829. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.02.003.
11. Liang M., Li K., Fang X., Zheng D., Lu X., Wu G., Lu H. Development of FBG Inclination Sensor: A Study on Attitude Monitoring of Hydraulic Supports in Coal Mines. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3429. DOI: 10.3390/app15073429.
12. Long M., Schafrik S., Kolapo P., Agioutantis Z., Sottile J. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review. *Machines.* 2024;12(10):713. DOI: 10.3390/machines12100713.
13. Xu X., Lai J., Lv P., Lu J., Bai S., Hu H. High-Precision Positioning Method of Coal Shearer in the Underground Environment Based on Rail Kinematics Model. *IEEE Access.* 2021;(9):151198-151208. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125501.
14. Jin Y., Ma Z., Ye Z., Li M., Zheng X., Jin Z. A self-centering and stiffness-controlled MEMS accelerometer. *Microsystems & nanoengineering*. 2024;10(11). DOI: 10.1038/s41378-023-00647-4.
15. Farago D., Maczak B., Gingl Z. Enhancing accuracy in actigraphic measurements: A lightweight calibration method for triaxial accelerometers. *IEEE access: practical innovations, open solutions*. 2024;(12):38102-38111. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3374652.
16. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Волоконно-оптический гироскоп с фазовым информационным сигналом // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2021. № 2. С. 23-35. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-23-35.
Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Fiber-optic gyroscope with a phase information signal. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2021;(2):23-35. (In Russ.). DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-23-35.
17. Спиридонов Д.М., Вадивасова Т.Е., Обухович Д.В. Волоконно-оптический гироскоп с системой снижения шума в выходном сигнале: влияние параметров системы на шумоподавление // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33. № 4. С. 497-512. DOI: 10.18500/0869-6632-003168.
Spiridonov D.M., Vadivasova T.E., Obukhovich D.V. Fiber optic gyroscope with output signal noise reduction system: effect of system parameters on noise reduction. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025;33(4):497-512. (In Russ.). DOI: 10.18500/0869-6632-003168.
18. Проценко Д.Е. Метод электронной юстировки MEMS-инклинометра / 80-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2024. Т. 1. № 79. С. 343-346.
19. Васильев С.И., Лапушова Л.А. Датчики систем автоматизации технологических процессов бурения нефтяных и газовых скважин. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 138 с.
20. Yao J., Liu S., Li Z., Li D. A Novel Ferrofluid Inclinometer Exploiting a Hall Element. *IEEE Sensors Journal.* 2016;16(22):7986-7991. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2606108.
21. Guo Y., Xiong L., Wu H., Zhou W., Zhou X., Liu H. A FBG Inclinometer for Simultaneous Measurement of Horizontal Deformation and Sudden Deformation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021;(70):1-10. DOI: 10.1109/TIM.2021.3116295.
22. Исследование устойчивости прототипа малобюджетного цифрового видеоинклинометра к изменению температуры / А.В. Мареев, М.А. Попков, В.Р. Янгалышев и др. // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29. № 6. С. 23-31. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-23-31.
Mareev A.V., Popkov M.A., Yangalishev V.R., Tatarenko V.I. Study of the stability of a low-budget digital video inclinometer prototype to temperature changes. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy*. 2024;29(6):23-31. (In Russ.). DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-23-31.
23. Guo Y., Zhang Z., Chang L., Yu J., Ren Y., Chen K., Cao H., Xie H. Temperature Compensation for MEMS Accelerometer Based on a Fusion Algorithm. *Micromachines.* 2024;15(7):835. DOI: 10.3390/mi15070835.

Authors Information
Kizilov S.A. – PhD (Engineering), Scientific Fellow, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: sergkizilov@gmail.com

Nikitenko M.S. – PhD (Engineering), Head of laboratory, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Khudonogov D.Yu. – Scientific fellow, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: admolv@gmail.com

Информация о статье
Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info
Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025