

# НАУЧНЫЙ ВОПРОС

Дата поступления рукописи в редакцию: 04.03.2026 г.

Дата принятия рукописи в печать: 07.04.2026 г.

DOI: 10.24412/3034-4042-2026-1-95-101

**МУСТАЕВ Ленар Маратович,**

студент,

Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: lenarmustaev@yandex.ru

**АГАПОВ Михаил Юрьевич,**

студент,

Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: agapov.m2004186@gmail.com

**РУСАКОВ Артур Витальевич,**

студент,

Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: arturleonoff@gmail.com

**ГЛУЩЕНКО Валерий Андреевич,**

аспирант,

Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: val\_g\_2001@bk.ru

**МИНАСОВ Шамиль Маратович,**

доцент, кандидат технических наук,

Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: minasov@ufanet.ru

## АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ И УТОЧНЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ЗАКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

**Аннотация.** В рамках данной работы рассматривается использование комбинации инерциальных датчиков смартфона для определения местоположения и перемещения в закрытых пространствах со сложной геометрией. Технология основана на комплексном использовании встроенных датчиков мобильных устройств (акселерометра и гироскопа) и системы визуальных маркеров в виде QR-кодов; методология предполагает непрерывный сбор и обработку данных инерциальной навигации с последующей коррекцией позиционирования при помощи сканирования QR-кодов, размещенных в ключевых точках пространства.

**Ключевые слова:** акселерометр, гироскоп, сканирование QR-кодов, web-приложение, узел графа, indoor navigation.

**MUSTAEV Lenar Maratovich,**

student,

Ufa University of Science and Technology

**AGAPOV Mihail Yurievich,**

student,

Ufa University of Science and Technology

**RUSAKOV Artur Vitalievich,**

student,

Ufa University of Science and Technology

## **ALGORITHMS AND METHODS FOR TRACKING AND CLARIFYING LOCATIONS IN ENCLOSED SPACES OF COMPLEX GEOMETRY**

**Annotation.** *This paper examines the use of a combination of inertial sensors on a smartphone to determine location and movement in enclosed spaces with complex geometries. The technology is based on the integrated use of built-in sensors of mobile devices (accelerometer and gyroscope) and a system of visual markers in the form of QR codes; the methodology involves the continuous collection and processing of inertial navigation data, followed by positioning correction by scanning QR codes placed at key points in space.*

**Key words:** *accelerometer, gyroscope, QR code scanning, web application, graph node.*

### **Введение**

В современном мире в каждом крупном здании возникает потребность в документировании инженерных систем для их своевременного обслуживания. К примеру, крупные торговые центры включают в себя сложные инженерные системы, состоящие из множества взаимосвязанных элементов безопасности, таких как системы пожаротушения, вентиляции, электроснабжения, видеонаблюдения, аварийного оповещения и т.д. Оперативный мониторинг состояния этих систем осложняется значительными площадями помещений, сложной планировкой и постоянной ротацией персонала. Особую проблему представляет ситуация, когда технический специалист, особенно недавно приступивший к обязанностям, не обладает полным знанием инфраструктуры объекта и не может оперативно определить местоположение конкретного элемента системы безопасности для устранения потенциальной угрозы. Традиционные методы контроля, основанные на периодических обходах для обслуживания инженерных систем, не обеспечивают необходимой оперативности реагирования в случае возникновения экстренных ситуаций, к примеру срабатывание датчика задымления. Перед активацией сценария эвакуации всего здания существует небольшое временное окно для того, чтобы персонал добрался до места срабатывания датчика и подтвердил или опроверг наличие угрозы. В условиях чрезвычайных происшествий, таких как задымление или отключение электроэнергии, проблема усугубляется отсутствием четких визуальных ориентиров, что делает навигацию по объекту крайне затруднительной [1]. В связи с этим возникает необходимость внедрения современных технологических решений, позволяющих персоналу оперативно получать точную информацию о местоположении элементов систем безопасности, обеспечивающих надежную

навигацию в сложных закрытых пространствах, где традиционные подходы демонстрируют существенные ограничения [2]. Реализация таких систем позволит существенно повысить уровень безопасности, сократить время реагирования на инциденты и минимизировать потенциальные риски для людей и имущества.

### **Актуальность, цель и задачи проекта**

Основной целью настоящей работы является повышение эффективности обслуживания инженерных систем крупных торгово-развлекательных комплексов за счет повышения эффективности навигации внутри здания и сокращения времени на поиск обслуживаемого оборудования. Реализация данной цели позволит улучшить показатели бесперебойной работы критически важных систем, такие как системы водоснабжения, вентиляции, пожаротушения, электроснабжения и т.д., что приведет к повышению уровня безопасности посетителей и снижению затрат на обслуживание оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать алгоритм определения местоположения внутри помещений, позволяющий отслеживать перемещение пользователя в режиме реального времени;
- разработать алгоритм коррекции местоположения, компенсирующий возможные погрешности системы определения местоположения за счет использования дополнительных источников пространственной информации;
- разработать алгоритм визуализации направляющей стрелки в видеопотоке, применяемый для динамического определения и визуализации направляющего вектора, указывающего на целевую точку в пространстве видеопотока;
- создать прототип веб-приложения, предназначенный для навигации пользователя внутри

помещения.

### Алгоритм определения местоположения внутри помещений

Для навигации внутри помещений применяются различные методы позиционирования, основанные на радиочастотных (Wi-Fi, BLE), инерциальных (акселерометры, гироскопы) и магнитометрических принципах [3; 4; 5]. Выбор метода определяется балансом между точностью, затратами и условиями эксплуатации.

Разрабатываемая система отслеживания перемещений пользователя основана на комплексном использовании встроенных датчиков мобильных устройств, где акселерометр и гироскоп выступают в качестве основных источников пространственных данных.

### Алгоритм коррекции местоположения

Техническая реализация системы сталкивается с рядом существенных ограничений, включая недостаточную точность акселерометра при равномерном движении, приводящую к снижению точности позиционирования, а также постепенное накопление погрешности из-за ошибок интегрирования сигналов и электромагнитных помех [6].

Для устранения этих недостатков разработан алгоритм коррекции местоположения, использующий систему контрольных меток в ключевых узлах графа пространства, представленного в виде навигационной модели, что соответствует современным подходам построения маршрутов внутри зданий [7; 8]. Метки содержат закодированные координаты, позволяющие при сканировании камерой выполнять точную привязку текущего положения к известной точке. Коррекция осуществляется автоматическим перемещением индикатора позиции к координатам метки, что снижает накопленную погрешность.

По мере перемещения карта обновляется, отображая текущее местоположение пользователя. Решение обеспечивает не только наглядное представление позиции, но и анализ перемещений с контролем точности работы системы. Такой подход позволяет эффективно работать в сложных закрытых пространствах, где традиционные методы навигации недостаточно точны или неприменимы.

### Алгоритм визуализации направляющей стрелки в видеопотоке

#### Вычисление угла до цели

Основная математическая обработка начинается с создания точек текущего положения пользователя (userPoint) и последней цели в списке (targetPoint). Для расчета направления используется разница координат по осям X и Y, причем ось Y инвертируется для соответствия математической системе координат (1). С помощью *math*.

$\text{acos2}$  вычисляется угол в радианах между направлением на восток и вектором к цели (2), который затем преобразуется в градусы с поворотом системы отсчета таким образом, чтобы  $0^\circ$  соответствовал направлению на север (3).

Евклидово расстояние:

$$\text{dist}(x, y) = \sqrt{(x_{\text{target}} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{user}} - y_{\text{target}})^2} \quad (1)$$

Угол в радианах:

$$\theta_{\text{rad}} = \text{acos2}(\Delta y, \Delta x) \quad (2)$$

Преобразование в навигационные градусы:

$$\theta_{\text{deg}} = (90 - \theta_{\text{rad}} * \frac{180}{\pi} + 360) \bmod 360 \quad (3)$$

Расчет относительного угла с учетом направления камеры

Полученный угол корректируется с учетом текущего курса (heading) (4), переведенного из радиан в градусы, с добавлением  $540^\circ$  для компенсации особенностей отображения и приведения результата к диапазону  $0-360^\circ$ . Для использования в графическом контексте угол конвертируется обратно в радианы с отрицательным знаком, что учитывает особенности системы координат Canvas (5).

Компенсация ориентации камеры:

$$\phi = (\theta_{\text{deg}} + h * \frac{180}{\pi} + 540) \bmod 360 \quad (4)$$

Преобразование для системы координат canvas:

$$\phi_{\text{rad}} = -\phi * \frac{\pi}{180} \quad (5)$$

Трансформация системы координат:

Система координат переносится в центр кадра (6), масштабируется по оси Y с инверсией (для правильного отображения математических координат) (7) и поворачивается на расчетный угол (8).

Перенос начала координат в центр кадра:

$$T_{\text{translate}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Инверсия вертикальной оси:

$$M_{\text{scale}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

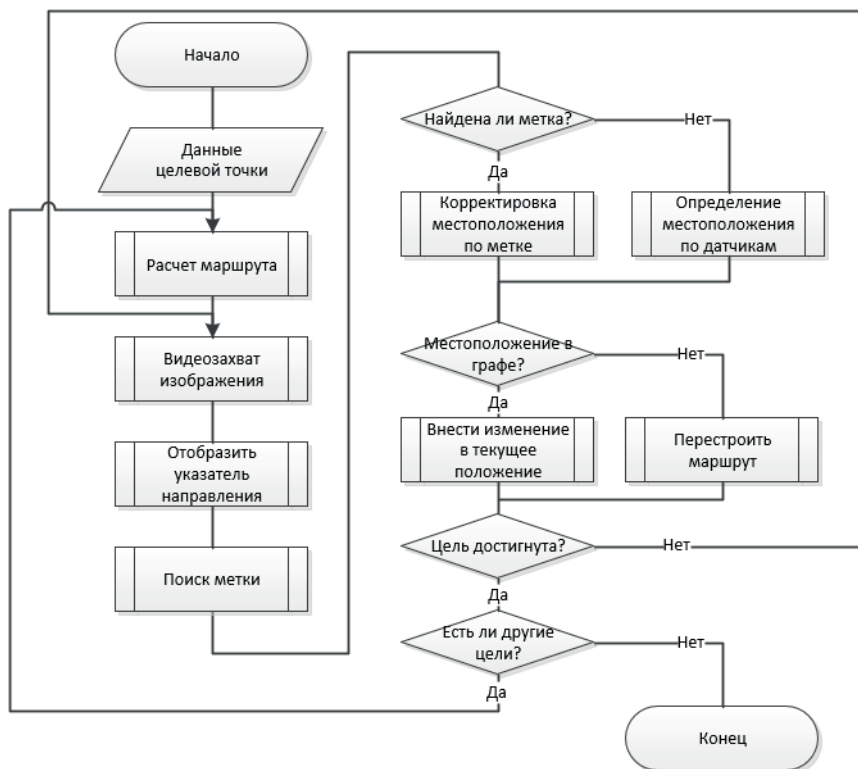
Поворот на рассчитанный угол:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### Блок-схема работы системы

Для наглядного представления работы системы разработана блок-схема, показывающая, как взаимодействуют друг с другом алгоритмы пространственного трекинга и коррекции местоположения (рис. 1).

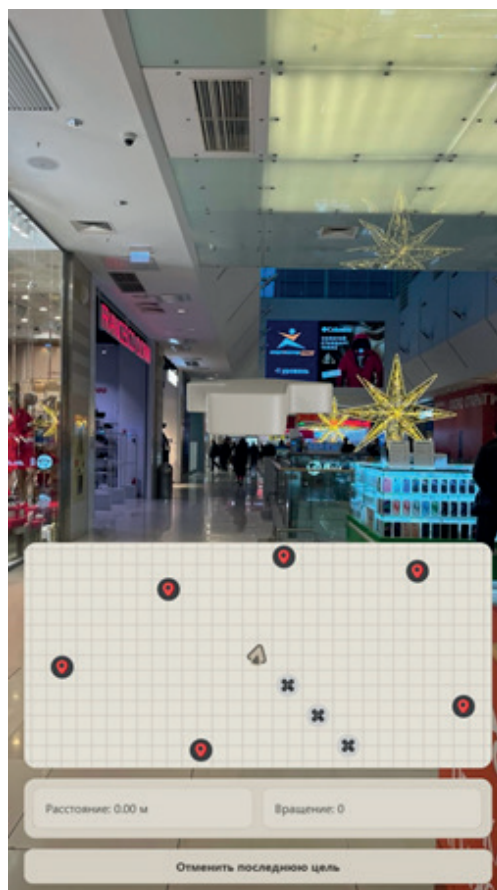
Рисунок 1. Блок-схема алгоритма.



### Прототип web-приложения

Прототип разработанного web-приложения представлен на (рис. 2).

Рисунок 2. Разработанное приложение.



Разработанное web-приложение представляет собой навигационное решение, обеспечивающее интуитивно понятное перемещение пользователя по территории пространства со сложной геометрией. Система в реальном времени отображает оптимальный маршрут от текущего местоположения пользователя до выбранной им целевой точки, используя заранее заданную последовательность контрольных точек. Навигация осуществляется с помощью визуальных подсказок, основанных на данных позиционирования. В перспективе в данное решение предполагается интегрировать распознавание образов, а не QR-кодов [9; 10] для интегрирования меток в интерьер помещений.

Ключевой особенностью приложения является использование технологии дополненной реальности – направление движения отображается непосредственно на изображении с камеры мобильного устройства, что позволяет пользователю интуитивно ориентироваться в пространстве. При достижении целевой точки приложение помечает её как посещённую и отображает следующую контрольную точку маршрута.

Для обеспечения максимальной информативности реализована логика оповещений – при успешном достижении целевой точки пользователю отображается диалоговое окно с подтверждением завершения текущего этапа маршрута. Данный функционал может помочь техническому персоналу, поскольку обеспечивает пошаговое выполнение обслуживающих работ и контроль движения по заданному маршруту.

Приложение поддерживает работу в различных условиях освещённости и архитектурной

сложности помещений, обеспечивая стабильную навигацию независимо от внешних факторов. Интеграция с существующими системами управления торговым центром позволяет оперативно обновлять данные о расположении инженерных узлов и изменении планировки пространства.

### Экспериментальная часть

Для оценки точности и устойчивости разработанного алгоритма коррекции местоположения было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого выполнялось прохождение маршрута с использованием коррекции местоположения и без нее. В качестве тестового маршрута был выбран путь квадратной траектории, включающий три поворота на 90° и завершающийся возвращением пользователя в исходную точку.

Эксперимент проводился с использованием мобильного устройства, оснащённого камерой и стандартными инерциальными датчиками (акселерометром и гироскопом). Перед каждым проходом траектории начальное положение пользователя определялось сканированием метки в стартовой точке. Во время движения по заданному маршруту выполнялась промежуточная коррекция координат посредством сканирования меток, размещённых в узловых точках (на каждом повороте).

В качестве основной метрики использовалась линейная ошибка позиционирования (е), определяемая как евклидово расстояние между фактическими координатами пользователя и координатами, вычисленными системой навигации.

Количественные результаты эксперимента:

Таблица 1. Результаты эксперимента при прохождении квадратного маршрута.

| № | Длина маршрута, м | е на участке 1, м | е на участке 2, м | е на участке 3, м | е на участке 4, м | Суммарная накопленная ошибка, м |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 32                | 2,84              | 2,95              | 2,3               | 3,04              | 11,68                           |
| 2 | 32                | 3,46              | 2,66              | 3,16              | 2,62              | 11,9                            |
| 3 | 32                | 1,43              | 2,16              | 2,41              | 2,35              | 8,35                            |

### Анализ полученных результатов

Результаты эксперимента показывают, что при прохождении маршрута с несколькими поворотами использование исключительно инерциальных датчиков приводит к заметному накоплению погрешности позиционирования. Наибольшее значение ошибки наблюдается в эксперименте №2, что может быть связано с накоплением дрейфа акселерометра и ошибками интегрирования сигналов при изменении направления движения.

Применение алгоритма коррекции местоположения позволило снизить ошибку позиционирования во всех экспериментальных проходах в среднем более чем в 3,8 раз. Это подтверждает эффективность предлагаемого подхода и его устойчивость к накоплению инерциальных ошибок при движении по маршрутам сложной формы.

### Заключение

Разработанное приложение позволяет осуществлять навигацию внутри помещений без не-

обходимости в использовании стороннего оборудования, такого как Bluetooth-маяки или Wi-Fi роутеры, что позволит существенно снизить затраты на интеграцию данной системы, а также уменьшить сложность интеграции данного решения. Комбинация инерциальной навигации и визуальных маркеров делает систему простой и интуитивной для пользователя, а использование web-технологий обеспечивает кросс-платформенную совместимость.

В ходе экспериментального исследования была продемонстрирована эффективность алгоритма коррекции местоположения, который позволил повысить точность позиционирования при прохождении маршрутов сложной геометрии.

Данное решение может послужить основой для системы навигации внутри торговых центров для технического персонала, обслуживающего инженерное оборудование здания, что позволит повысить эффективность работы инженерных служб даже в условиях текучки кадров.

### Список литературы:

- [1] Dasler P., Malik S., Mauriello M.L. *Just Follow the Lights: A Ubiquitous Framework for Low-Cost, Mixed Fidelity Navigation in Indoor Built Environments* // *International Journal of Human-Computer Studies*. – 2021. – №. 155.
- [2] Fallah N., Apostolopoulos I., Bekris K., Folmer E. *Indoor Human Navigation Systems: A Survey* // *Interacting with Computers*. — 2013. – №. 25. – С. 21-33.
- [3] Щипанова Д.Е., Саламонов А.А. Разработка комплекса indoor-навигации «NaviHelp: инклюзивный навигатор в помещениях» // *Инновации в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании: материалы 27-й Международной научно-практической конференции*. – Екатеринбург : Издательство РГППУ, 2022. – С. 260-262.
- [4] Желамский М.В. Навигация в закрытом пространстве методом активного магнитного позиционирования // *Датчики и системы*. – 2014. – №. 7. – С. 12-17.
- [5] El-Sheimy N., Li Y. *Indoor navigation: state of the art and future* // *Satellite Navigation*. – 2021. – №. 2. – С. 1-23.
- [6] Cheng L., Fu Z. *An adaptive Kalman filter loosely coupled indoor fusion positioning system based on inertial navigation system and ultra-wide band* // *Measurement*. – 2025. – №. 244. – С. 116412.
- [7] Мауленов К.С., Жарлыкасов Б.Ж. Распознавание образов для задач поиска и идентификации // *Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы XI международной научно-практической конференции*. – Екатеринбург : Издательство РГППУ, 2018. – С. 538-543.
- [8] Taneja S., Akinci B., Garrett J.H., Soibelman L. *Algorithms for automated generation of navigation models from building information models to support indoor map-matching* // *Automation in Construction*. – 2016. – №. 61. – С. 24-41.
- [9] Минасов Ш.М., Мустаев Л.М. Модели и алгоритмы ориентации в закрытых пространствах в условиях неустойчивого сигнала систем глобального позиционирования // *Невский форум молодых исследований: материалы международной научной конференции (Санкт-Петербург, май 2024 г.)*. – СПб.: МИПИ им. Ломоносова, 2024. – С. 51-57.
- [10] Минасов Ш.М., Мустаев Л.М. Модели и алгоритмы идентификации текущего местоположения для решения задач навигации в закрытых пространствах сложной геометрии // *Глобальные научные тренды: междисциплинарные исследования: сборник статей VII Международной научно-практической конференции*. – Саратов: НОП «Цифровая наука», 2024. – С. 49-55.

### References:

- [1] Dasler P., Malik S., Mauriello M.L. *Just Follow the Lights: A Ubiquitous Framework for Low-Cost, Mixed Fidelity Navigation in Indoor Built Environments* // *International Journal of Human-Computer Studies*. – 2021. – No. 155.
- [2] Fallah N., Apostolopoulos I., Bekris K., Folmer E. *Indoor Human Navigation Systems: A Survey* //

*Interacting with Computers.* — 2013. — No. 25. — P. 21-33.

[3] Shchipanova D.E., Salamonov A.A. Development of the indoor navigation system “NaviHelp: an inclusive indoor navigator” // *Innovations in professional and professional-pedagogical education: Proceedings of the 27th International Scientific and Practical Conference.* – Ekaterinburg: Publishing house of RSPPU, 2022. – P. 260-262.

[4] Zhelamskiy M.V. Navigation in closed spaces by the method of active magnetic positioning // *Sensors and systems.* – 2014. – No. 7. – P. 12-17.

[5] El-Sheimy N., Li Y. Indoor navigation: state of the art and future // *Satellite Navigation.* – 2021. – No. 2. – P. 1-23.

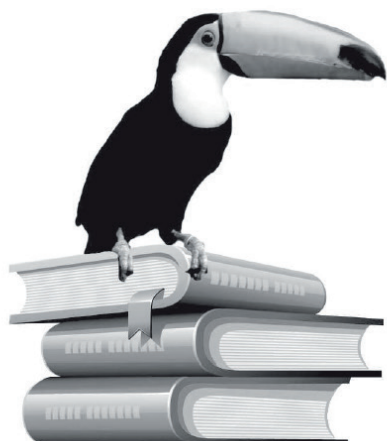
[6] Cheng L., Fu Z. An adaptive Kalman filter loosely coupled indoor fusion positioning system based on inertial navigation system and ultra-wide band // *Measurement.* – 2025. – No. 244. – P. 116-12.

[7] Maulenov K.S., Zharlykasov B.Zh. Pattern recognition for search and identification tasks // *Science. Informatization. Technologies. Education: Proceedings of the XI international scientific and practical conference.* – Ekaterinburg: Publishing house of RSPPU, 2018. – Pp. 538-543.

[8] Taneja S., Akinci B., Garrett J.H., Soibelman L. Algorithms for automated generation of navigation models from building information models to support indoor map-matching // *Automation in Construction.* – 2016. – No. 61. – Pp. 24-41.

[9] Minasov Sh.M., Mustaev L.M. Models and algorithms for orientation in closed spaces under conditions of an unstable signal from global positioning systems // *Nevsky Forum for Youth Research: Proceedings of the international scientific conference (St. Petersburg, May 2024).* – SPb.: MIPI im. Lomonosov, 2024. – P. 51-57.

[10] Minasov Sh. M., Mustaev L. M. Models and algorithms for identifying the current location for solving navigation problems in closed spaces with complex geometry // *Global scientific trends: interdisciplinary research: collection of articles from the VII International scientific and practical conference.* – Saratov: NOP «Digital Science», 2024. – P. 49-55.



**ЮРКОМПАНИ**

[www.law-books.ru](http://www.law-books.ru)

Юридическое издательство  
**«ЮРКОМПАНИ»**

Издание учебников,  
учебных и методических  
пособий, монографий,  
научных статей.

Профессионально.

В максимально  
короткие сроки.

Размещаем  
в РИНЦ, Е-Library.