

Научная статья

УДК 621.865.8-182.3

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-2>



Синтезирование методов локализации и одометрии для задач позиционирования мобильных роботов в закрытом пространстве

Анна Алексеевна Гордова[✉], *Алексей Сергеевич Прутский*
Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация. Позиционирование робототехнических систем является ключевым аспектом разработки и функционирования автономных роботов. Эта тема охватывает множество аспектов, таких как навигация, восприятие среды, обработка данных и планирование движения. Решение задачи определения местоположения робота в пространстве представляется обязательным этапом в создании любой мобильной робототехнической системы. Эффективное позиционирование позволяет роботам точно определять свое местоположение в пространстве и относительно окружающих предметов, что критически важно для выполнения ими различных манипуляций. Современные подходы к позиционированию включают использование многих видов сенсоров и технологий, таких как инерциальные измерительные устройства, камеры и лазерные дальномеры. Интеграция различных источников данных позволяет не только повысить точность, но и обеспечить надежность систем позиционирования в условиях, где один из видов датчиков может давать сбой. В данной статье анализируются наиболее распространенные методы локального позиционирования объекта без применения технологии глобального позиционирования. Рассматриваются способы их комбинирования и интеграции с целью получения более точных и надежных результатов локализации в окружающем пространстве. В частности, приведено решение задачи оптимальной нелинейной фильтрации с использованием расширенного фильтра Калмана. Выполнен сравнительный анализ достоинств и недостатков наиболее распространенных подходов к локализации местоположения робота, определен рекомендуемый механизм достижения максимальной точности решения задачи позиционирования.

Ключевые слова: робототехника, позиционирование, одометрия, инерциальное измерительное устройство (IMU), лазерное сканирование, лазерный дальномер (LiDAR), итеративный алгоритм ближайших точек (ICP), фильтр Калмана, комплексирование

Для цитирования: Гордова А. А., Прутский А. С. Синтезирование методов локализации и одометрии для задач позиционирования мобильных роботов в закрытом пространстве // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 13–20. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-2>.

Original article

Synthesis of localization and odometry for positioning mobile robots in enclosed space

Anna A. Gordova[✉], *Alexei S. Prutskii*
Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. The positioning of robotic systems is a key aspect of the development and operation of autonomous robots. This topic covers many points, such as navigation, perception of the environment, data processing, and motion planning. The determination of the robot's position in space is an essential step in the creation of any mobile robotic system. Effective positioning allows robots to identify their exact location in space and relative to surrounding objects, which is crucial for performing various procedures. Modern positioning approaches include the use of many kinds of sensors and technologies, such as inertial measurement units, cameras, and laser rangefinders. The integration of diverse data sources allows not only to increase accuracy but also to ensure the reliability of positioning systems in conditions where one type of sensor may malfunction. This article analyzes common approaches to local object positioning, omitting global positioning technology. The process of combining and in-

tegrating the specified methods is assessed to enhance the accuracy and dependability of localization results within the surrounding area. Specifically, a solution is provided for the optimal non-linear filtration problem, which employs an extended Kalman filtering approach. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the most common approaches in defining the robot's location is performed, and a recommended mechanism for achieving maximum accuracy in carrying out the positioning task is determined.

Keywords: robotics, positioning, odometry, inertial measurement unit (IMU), laser scanning, light detection and ranging (LiDAR), iterative closest point (ICP), Kalman filtering, sensor fusion

For citation: Gordova A. A., Prutskii A. S. Synthesis of localization and odometry for positioning mobile robots in enclosed space. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):13–20. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2>.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием информационных технологий позиционирования объектов их применение в мобильных системах стало одной из основных задач робототехники. Позиционирование робототехнических систем является ключевым аспектом функционирования автономных роботов. Мобильные системы широко используются в любой сфере производства, промышленности, сфере услуг и многих других. Мобильные роботы могут заменить людей при выполнении сложных задач в опасных условиях, снизить производственные риски для человека и обеспечить его безопасность [1]. Способность робота точно определять свое местоположение, в том числе относительно окружающих предметов, является обязательным условием выполнения подобных задач. Большое значение имеет выбор алгоритмов для определения местоположения робота. Современные подходы к позиционированию включают в себя использование различных технологий, например одометрию, а также применение разнообразных типов сенсоров, таких как инерциальное измерительное устройство (IMU), камера и лазерный дальномер (LiDAR).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одометрия, задачи и методы позиционирования. Для того чтобы раскрыть понятие одометрии, рассмотрим пример. Пусть определенный робот, оснащенный двумя парами колес одинакового диаметра, переместился вперед на некоторое расстояние. Зная радиус колеса и число его оборотов, несложно вычислить длину пройденного пути. Для того чтобы вычислить число оборотов, необходим фиксирующий датчик. Таким образом, мы имеем модель

процесса, использующего показания датчиков движения для расчета изменения положения в пространстве. Использование этих данных с целью дальнейших подсчетов пройденного расстояния называется одометрией [2].

Данные одометрии робота необходимы для решения задачи локализации (позиционирования) робота в пространстве, то есть определения координат его местоположения в некоторой системе отсчета.

Методы позиционирования делятся на три группы [3]:

- 1) методы счисления пути;
- 2) позиционные;
- 3) обзорно-сравнительные.

Счислением пути называется метод определения текущего местоположения (координат) объекта, основанный на вычислении пройденного пути относительно известного начального положения объекта и направления движения. К системам, реализующим методы счисления пути, относятся, например, инерциальные навигационные системы, одометры, гироскопы. Позиционные методы основаны на определении местоположения объекта путем засечек, представляющих собой точку пересечения двух или более линий (поверхностей) положения относительно известных ориентиров. Такие методы требуют наличие инфраструктуры в виде радиомаяков или иных средств информационного обеспечения позиционирования (примером могут послужить системы GPS, Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС)). Обзорно-сравнительные методы основаны на определении структуры какого-либо физического поля. Необходимо выполнить

сравнение параметров этого поля с параметрами, введенными в запоминающие устройства навигационных систем [3].

Применяемые методы позиционирования объекта определяются набором датчиков робота. На первый взгляд может показаться, что одометрии с использованием системы GPS будет достаточно, чтобы решить задачу локализации, однако значение минимальной погрешности в этом случае будет порядка одного метра [4]. Ею можно пренебречь на открытых пространствах, однако в условиях помещений (закрытого пространства) данная погрешность является существенной. Отсюда следует невозможность применения систем, подобных GPS или ГЛОНАСС. Решением этой проблемы является применение методов позиционирования и одометрии, в основе которых лежат другие датчики входной информации. Наиболее часто используются IMU и LiDAR, речь о которых пойдет далее.

Колесная одометрия. Приведем пример расчетных формул колесной одометрии, которая лежит в основе методов позиционирования, основанных на счислении пути. Будем считать, что робот оснащен датчиком IMU. Информация с него включает в себя данные с акселерометров (измерения линейного ускорения по каждой оси) и гироскопов (измерения частоты вращения объекта или угловой скорости

вокруг каждой оси). Кроме этого, измеряется скорость вращения колес, углы крена, тангажа и рыскания. Будем считать, что конструкция ходовой составляющей робота представляет собой двухколесный дифференциальный привод (рис. 1). Для расчета положения робота в пространстве с использованием информации о движении колес необходимо определить две системы координат: глобальную неподвижную с центром в точке нахождения робота в начальный момент времени и относительную (подвижную) систему координат, центр которой связан с самим роботом [5]. В рамках модели будем считать робота материальной точкой.

Определим необходимые данные с IMU и энкодеров на колесах:

- 1) v_L – скорость вращения левого колеса;
- 2) v_R – скорость вращения правого колеса;
- 3) yaw – угол рыскания.

Также считаем известными интервал времени dt , с которым производятся два последовательных измерения IMU-датчиком, и координаты робота x_{prev} , y_{prev} в глобальной системе координат, высчитанные на предыдущей итерации. В начальный момент времени они равны нулю.

Тогда новые координаты x_{new} , y_{new} положения робота в пространстве считаются по формулам (1), где v – усредненное значение скоростей на левом и правом колесе [6, 7]:

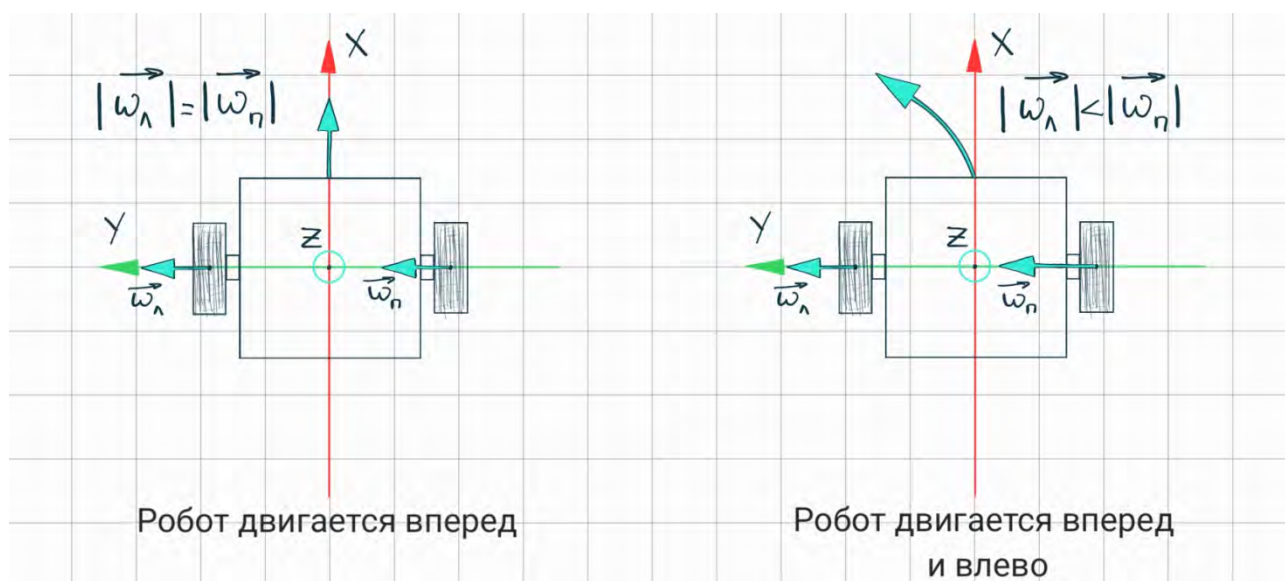


Рис. 1. Двухколесный дифференциальный привод (ω_L – угловая скорость вращения левого колеса, ω_R – угловая скорость вращения правого колеса)

Примечание: составлено авторами.

$$v = \frac{v_L + v_R}{2};$$
$$x_{new} = x_{prev} + v \cos(\text{yaw})dt; \quad (1)$$
$$y_{new} = y_{prev} + v \sin(\text{yaw})dt.$$

Обратив внимание на формулы (1), можно заметить, что методы счисления пути обладают существенным недостатком – накоплением ошибки с течением времени. Эти ошибки могут быть компенсированы при помощи специальных маркеров, точной калибровки параметров в формулах (1), нейросетевых алгоритмов компенсации ошибок [8, 9].

Лазерная одометрия. Поступающая с LiDAR-а информация представляет собой группу точек на плоскости в виде совокупности пар евклидовых норм и полярных углов радиус-векторов. Преимущество его использования заключается в простой обработке входной информации по следующей схеме: LiDAR посылает поток излучения, с этого момента ведется отсчет времени возвращения отраженного от препятствия на пути луча. Используя элементарный физический принцип распространения потока частиц в среде, можно вычислить расстояние до объекта. Полученный набор данных носит название «Облако точек» [10]. Пример его визуализации для помещения П-образной формы приведен на рис. 2.

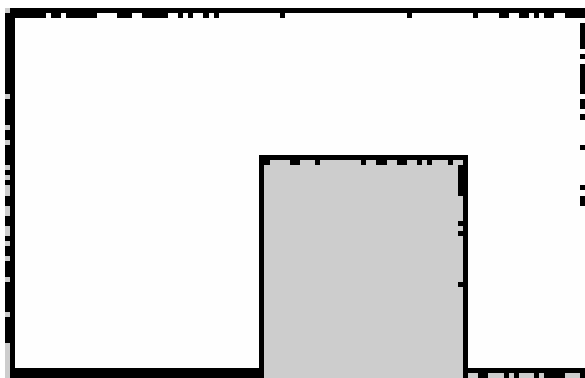


Рис. 2. Визуализация данных с LiDAR в П-образном помещении (белый цвет – свободное пространство, черный – препятствие, серый – неизвестная область)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Алгоритмы локализации, в основе которых лежит лазерная одометрия, относятся к об-

зорно-сравнительным методам позиционирования. В основе самых популярных методов лазерной одометрии лежит итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative Closest Point – ICP). Впервые он был представлен в 1992 г. [11] и с тех пор получил множество модификаций [12, 13].

ICP алгоритм сравнивает два облака точек, полученных в последовательные моменты времени. Цель этого алгоритма – найти такие матрицу поворота и вектор сдвига, чтобы совместить первое облако точек со вторым. Для этого необходимо найти соответствия между точками двух облаков решить оптимизационную задачу. Накопление получаемых векторов смещения и матриц вращения для ряда облаков точек, полученных в последовательные моменты времени, содержат информацию о перемещении робота в пространстве. На рис. 3 тройкой векторов обозначен робот, синие точки определяют контур помещения, в котором он расположен. Данный рисунок иллюстрирует отслеживание перемещения робота в замкнутом пространстве.

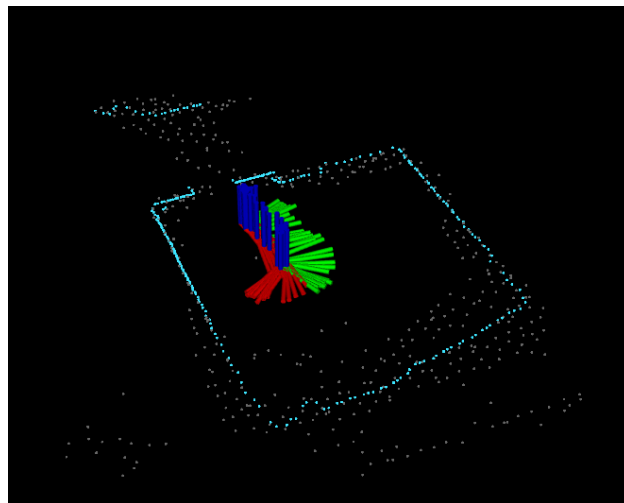


Рис. 3. Отслеживание перемещения робота по комнате при помощи лазерной одометрии
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Методы позиционирования, основанные на лазерной одометрии, довольно точны, но все же обладают некоторыми недостатками. Например, требуется дополнительная модификация этих методов в условиях динамической

среды. В качестве примера динамической составляющей может являться движение человека в помещении, в котором функционирует робот.

В таблице приведены достоинства и недостатки рассмотренных алгоритмов одометрии.

Таблица

Сравнительный анализ колесной и лазерной одометрии

Критерий оценки	Колесная одометрия	Лазерная одометрия
Точность	Имеет место накопление ошибки с течением времени	Высокая
Влияние проскальзывания	Критично	Не имеет значения
Инфраструктура пространства	Не имеет значения	Не работает в открытых пространствах без ориентиров
Динамичность среды	Не имеет значения	Требуется дополнительная обработка динамических объектов
Нагрузка на вычислители	Слабая	Высокая
Стоимость	Низкая	Высокая

Примечание: составлено авторами.

Из проведенного выше сравнительного анализа следует логичный вывод: наибольшую эффективность принесет совместная обработка информации с обоих датчиков. Этой задаче посвящен следующий раздел.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексирование (sensor fusion). Вернемся к задаче локализации – нахождения координат положения робота в пространстве. Выше были рассмотрены два способа их получения: при помощи колесной и лазерной одометрии. Однако не стоит забывать, что любой датчик обладает абсолютной погрешностью измерения, никакой алгоритм локализации не застрахован от вычислительной погрешности и т. д. На практике вся входная информация с датчиков об окружающем мире включает в себя некоторый шум, а следовательно, и вычисленные значения координат положения робота в пространстве содержат в себе некоторую неточность и несут вероятностный характер [14]. Чтобы вернее понять обозначенную выше проблему, обратимся к рис. 4.

Синими метками отмечены ожидаемые положения робота, рассчитанные при помощи различных алгоритмов позиционирования. Например, для первого датчика координаты в условных единицах составляют (2, 1), для второго – (3, 2), для третьего – (1, 3). Фактическое положение робота (отмечено красной меткой) является некоторым средним между

тремя оценочными положениями и характеризуется координатами (2, 2) на плоскости. Отсюда возникает следующая задача: как можно точнее оценить реальное местоположение робота в пространстве исходя из данных, полученных с датчиков входной информации. Эта задача также называется комплексированием, или sensor fusion [15]. Для ее решения применяются различные фильтры, наиболее распространенным из них является фильтр Калмана.

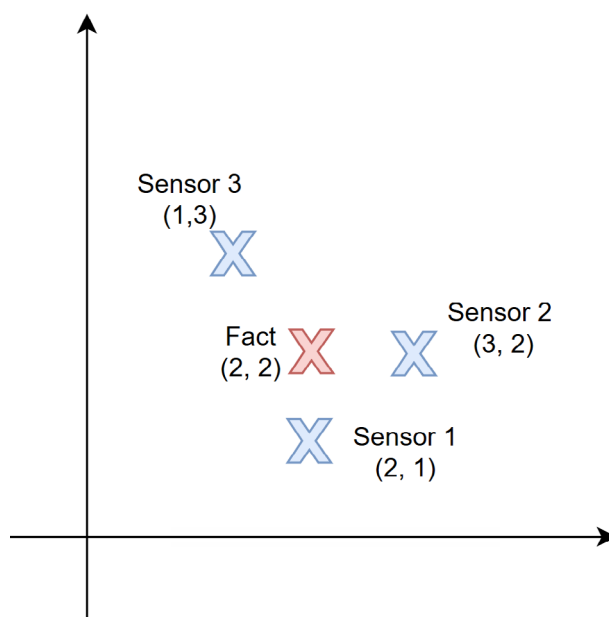


Рис. 4. Фактическое положение робота в пространстве по сравнению с рассчитанным

Примечание: составлено авторами.

Фильтрация – это выделение полезного сигнала из смеси сигнала с шумом. Основными составляющими фильтра Калмана являются вектор состояния, модель наблюдения и модель динамики. Модель наблюдения описывает, как связаны измерения с вектором состояния системы, а модель динамики описывает, как изменяется вектор состояния с течением времени. Однако классический фильтр Калмана позволяет решить задачу оптимальной линейной фильтрации, в то время как на практике мы гораздо чаще сталкиваемся с нелинейными системами. Для решения задачи оптимальной нелинейной фильтрации используется расширенный фильтр Калмана [16].

Рассмотрим визуализацию результатов работы фильтра Калмана. На рис. 5 изображены три траектории. В реальности робот описывал окружность. Слева синяя окружность представляет собой расчет траектории, полученной при помощи методов колесной одометрии. По центру красная окружность представляет собой расчет траектории, полученной при помощи лазерной одометрии. Оба набора вычислений неточны. RMSE (квадратный корень из средней квадратичной ошибки) для первой траектории составил 0,0694, для второй – 0,0298. Справа на рис. 5 изображена более точная отфильтрованная траектория, RMSE которой составил 0,0217.

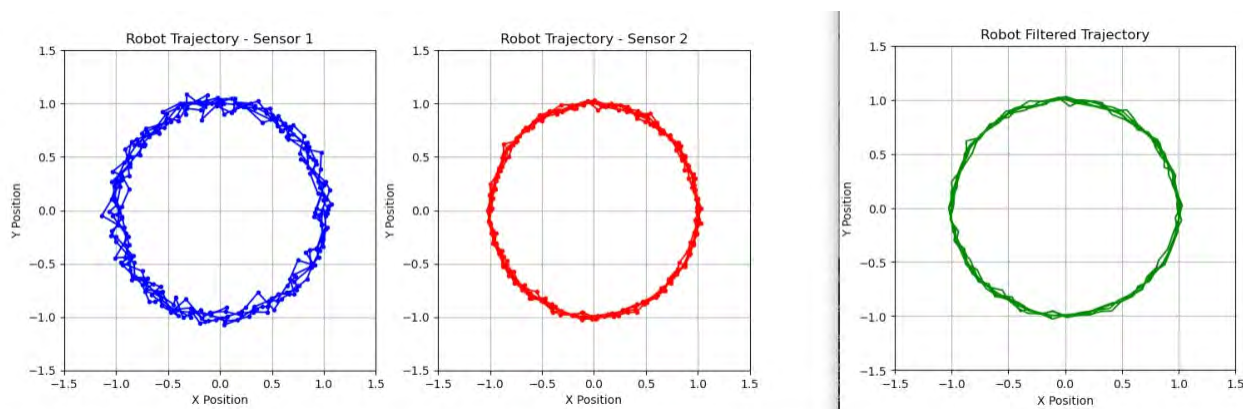


Рис. 5. Фильтрация двух траекторий при помощи фильтра Калмана

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Таким образом, комплексирование вычислений от разных сенсоров является последним этапом решения задачи позиционирования с использованием датчиков различного типа.

Задачу sensor fusion можно решать и другими методами. На данный момент активно изучаются, разрабатываются и внедряются методы нейросетевого комплексирования [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи позиционирования робота в пространстве может быть получено разными способами. Например, можно произвести подсчет одометрии с использованием одного лишь датчика, однако достичь высокой точности в шумной среде не удастся.

В современных робототехнических системах производится комплексирование вычислений, полученных различными алгоритмами позиционирования и одометрии. Выбор методов локализации и фильтрации во многом зависит от свойств среды. Непрерывное развитие и улучшение алгоритмов и сенсорных технологий открывает новые возможности для автоматизации и повышения эффективности использования робототехнических систем в самых разных областях: от промышленности до услуг сервиса и логистики. В дальнейшем пересечение методов, таких как компьютерное зрение, машинное обучение и сенсорные технологии, предоставляет новые горизонты в повышении точности и надежности навигации.

Список источников

1. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E. et al. Advanced applications of industrial robotics: New trends and possibilities // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 12, no. 1. 135 p.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT press, 2011. 453 p.
3. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. Michigan: The University of Michigan, 1996. 282 p.
4. Drawil N. M., Amar H. M., Basir O. A. GPS localization accuracy classification: A context-based approach // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013. Vol. 14, no. 1. P. 262–273.
5. De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview // *RAMSETE: Articulated and Mobile Robotics for Services and Technology*. 2002. P. 181–226.
6. Britting K. Unified error analysis of terrestrial inertial navigation systems // *Guidance, Control and Flight Mechanics Conference*, August 16–18, 1971. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1971. 265 p.
7. Chong K. S., Kleeman L. Accurate odometry and error modelling for a mobile robot // *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 20–25, 1997. Albuquerque: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997. Vol. 4. p. 2783–2788.
8. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996. Vol. 12, no. 6. P. 869–880.
9. Kelly A. Linearized error propagation in odometry // *The International Journal of Robotics Research*. 2004. Vol. 23, no. 2. P. 179–218.
10. Weitkamp C. *LiDAR: Introduction* // Laser remote sensing. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 19–54.
11. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. Vol. 14, no. 2. P. 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>.
12. Vizzo I., Chen X., Chebrolu N. et al. Poisson surface reconstruction for LiDAR odometry and mapping // *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 30–June 05, 2021, Xi'an, China. Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562069>.
13. Dellenbach P., Deschaud J. E., Jacquet B. et al. CT-ICP: Real-time elastic LiDAR odometry with loop closure // *2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 23–27, 2022, Philadelphia, USA. Philadelphia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811849>.

References

1. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E. et al. Advanced applications of industrial robotics: New trends and possibilities. *Applied Sciences*. 2021;12(1):135.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT press; 2011. 453 p.
3. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*. *University of Michigan*. 1996;119(120):27.
4. Drawil N. M., Amar H. M., Basir O. A. GPS localization accuracy classification: A context-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013;14(1):262–273.
5. De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview. *RAMSETE Articulated and Mobile Robotics for Services and Technology*. 2002;181–226.
6. Britting K. Unified error analysis of terrestrial inertial navigation systems. In: *Guidance, Control and Flight Mechanics Conference*, August 16–18, 1971. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1971. 265 p.
7. Chong K. S., Kleeman L. Accurate odometry and error modelling for a mobile robot. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 20–25, 1997. Albuquerque: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1997. Vol. 4. p. 2783–2788.
8. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996;12(6):869–880.
9. Kelly A. Linearized error propagation in odometry. *The International Journal of Robotics Research*. 2004;23(2):179–218.
10. Weitkamp C. *LiDAR: Introduction*. In: Laser remote sensing. Boca Raton: CRC Press; 2005. P. 19–54.
11. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992;14(2):239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>.
12. Vizzo I., Chen X., Chebrolu N. et al. Poisson surface reconstruction for LiDAR odometry and mapping. In: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 30–June 05, 2021, Xi'an, China. Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562069>.
13. Dellenbach P., Deschaud J. E., Jacquet B. et al. CT-ICP: Real-time elastic LiDAR odometry with loop closure. In: *2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 23–27, 2022, Philadelphia, USA. Philadelphia: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811849>.

14. Thrun S. Probabilistic robotics // *Communications of the ACM*. 2002. Vol. 45, no. 3. P. 52–57.
15. Yeong D. J., Velasco-Hernandez G., Barry J. et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 2140.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82. P. 35–45.
17. Chitta K., Prakash A., Jaeger B. et al. TransFuser: Imitation with transformer-based sensor fusion for autonomous driving // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 45, no. 11. P. 12878–12895.
14. Thrun S. Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*. 2002;45(3):52–57.
15. Yeong D. J., Velasco-Hernandez G., Barry J. et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*. 2021;21:2140.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*. 1960;82:35–45.
17. Chitta K., Prakash A., Jaeger B. et al. TransFuser: Imitation with transformer-based sensor fusion for autonomous driving. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022;45(11):12878–12895.

Информация об авторах

А. А. Гордова – магистрант;
<https://orcid.org/0009-0005-6482-3668>,
a.gordova@inbox.ru✉

А. С. Прутский – заведующий лабораторией робототехники и мехатроники;
<https://orcid.org/0000-0001-8476-2915>,
prutskiyalex@gmail.com

About the authors

A. A. Gordova – Master’s Degree Student;
<https://orcid.org/0009-0005-6482-3668>,
a.gordova@inbox.ru✉

A. S. Prutskii – Lecturer, Head of Robotics and Mechatronics Laboratory;
<https://orcid.org/0000-0001-8476-2915>,
prutskiyalex@gmail.com