

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ПРОСТРАНСТВЕ

Е.И. Баженов, С.А. Мокрушин, С.И. Охалкин

*Разработан алгоритм действия системы управления мобильного робота для реализации задачи определения ориентации мобильного робота в пространстве. По результатам практических испытаний выделены несовершенства исполнения микро-электромеханических датчиков, сделан вывод о необходимости их предварительной калибровки с целью устранения систематической погрешности. Достоверность полученных результатов подтверждена аналитически, методом экспертных оценок, а также натурным исполнением разработанного устройства. Практическую ценность работы подтверждают практические испытания, результаты которых говорят о соответствии системы ориентации требованиям, предъявляемым к системам ориентации.*

*Ключевые слова: мобильный робот, система ориентации, инерциальная навигационная система, микроэлектромеханические системы датчиков, акселерометр, гироскоп, магнитометр.*

Одной из основных проблем в разработке автономного мобильного робота является навигация, в частности – точное определение ориентации робота в пространстве. Точное определение ориентации робота необходимо для: краткосрочного и долгосрочного планирования маршрута; прокладывания траектории движения; точной отработки запланированных действий; адекватной реакции на внешние воздействия. Поэтому системы определения ориентации в пространстве должны присутствовать в большинстве мобильных роботов.

Объектом исследования является мобильный робот, предназначенный для работы в складских помещениях пищевой промышленности площадью от 30 до 200 м<sup>2</sup> с известной (заданной) планировкой. Управление мобильным роботом имеет двухуровневый характер. Верхний уровень представлен программой удаленного сервера, которая отвечает за формирование задания. На нижнем уровне реализована программа, которая реализует алгоритм выполнения задания, полученного от удаленного сервера. Связь между верхним и нижним уровнем осуществляется посредством сообщений, передаваемых через локальную Wi-Fi сеть. Удаленный ПК-сервер формирует команду, в которой содержится требуемое значение скорости двигателей робота. Робот-клиент получает команду и поддерживает данную скорость. В свою очередь клиент отправляет серверу текущую скорость, что обеспечивает контроль положения робототехнической платформы.

Обработка траектории движения осуществляется за счет энкодеров, расположенных на валах двигателей, по сигналам с которых определяется как текущая скорость платформы, так и ее пространственное положение. Существующий способ позиционирования неточен, так как в процессе численного интегрирования показаний энкодеров накапливается ошибка, что обуславливает необходимость введение в систему управления мобильного робота дополнительного измерительного комплекса, создающего возможность определения углов ориентации мобильного робота: угла курса, крена и тангажа.

Для разработки дополнительного программно-аппаратного комплекса системы ориентации мобильного робота необходимо провести анализ существующих решений.

Выделяют три типа систем [1]:

глобальная – определение абсолютных координат устройства;

локальная – определение координат устройства при движении относительно какой-либо точки;

персональная – определение координат подвижных составных частей устройства относительно условно неподвижного основания (характерно для манипуляторов).

Также системы ориентации делятся на:

пассивные – прием информации о собственных координатах и характеристиках движения. осуществляется от внешних источников;

активные – определение координат и характеристик движения осуществляется без использования внешних источников средствами, установленными на мобильном роботе.

Как правило, глобальные системы являются пассивными, персональные являются активными, а локальные могут быть и теми, и другими, или смешанными [2].

В нашем конкретном случае не имеет смысла рассматривать персональные системы определения ориентации, так как объект проектирования – мобильный робот, не имеет актуаторов, которые могли бы использовать методы персональной навигации. Рассмотрим более подробно принципы, на которых основаны существующие решения в области определения ориентации мобильных роботов.

К системе глобальной пассивной относится спутниковая навигация [3]. К системе локальной пассивной можно отнести маркерную навигацию [4], маячковую навигацию [5]. К системе локальной активной относят навигацию на основе технического зрения [6], одометрию [7], инерциальные навигационные системы [8], визуальную одометрию [9], навигацию на основе генераторов радио- или каких-либо других сигналов (ультразвуковых, инфракрасных) [1].

На основании анализа различных способов построения систем ориентации мобильного робота в пространстве был произведен выбор итогового принципа, на котором должна быть основана разрабатываемая система. Выбор производился с помощью метода экспертных оценок на основании таблицы весовых коэффициентов. Анализ проводился по критериям: точность, универсальность, устойчивость к помехам, простота реализации, стоимость. По результатам оценки большее количество баллов набрали инерциальные навигационные системы.

В инерциальных навигационных системах для объединения показаний различных датчиков используется техника «Sensor fusion», когда показания разных датчиков объединяются определенным образом с целью получить один параметр [10-12]. В рассматриваемом случае этими параметрами являются углы Эйлера в трехмерном пространстве. В отличие от гироскопа, акселерометр и магнитометр позволяют определить ориентацию робота в глобальной системе координат. Измерительный модуль получает значения вектора магнитной индукции, ускорения свободного падения и угловой скорости в собственной системе координат. Для определения ориентации робота в глобальной системе координат, нужно выполнить дополнительные математические расчеты [8], чтобы вычислить угол курса (проекция вектора магнитного поля Земли в системе координат робота), угол крена (проекция вектора ускорения свободного падения в системе координат устройства) и угол тангажа,

На практике необработанные показания акселерометра и магнитометра будут иметь шумы и ошибки измерения, что приведет к неустойчивому результату, даже если устройство будет находиться в покое [10-15]. Для решения этой проблемы получаемые показания акселерометра и магнитометра пропускают через низкочастотный фильтр. Этот фильтр убирает высокочастотный шум, но увеличивает отклик на изменение ориентации в пространстве. Для компенсации этой инертности используются показания гироскопа. Комплементарный фильтр объединяет в себе высокочастотный фильтр для гироскопа и низкочастотный фильтр для акселерометра и магнитометра.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы управления мобильного робота, которая показывает её основной состав и связи между элементами, что позволяет понять принцип её работы.

От источника питания (GB1) подается напряжение на все функциональные блоки устройства. На двигатели (A1 и A2) подается напряжение через управляющий элемент – драйвер двигателя (A4). На микрокомпьютер (A7) напряжение подается че-

рез понижающий преобразователь напряжения постоянного тока (A9) в соответствии с характеристиками питания вычислительной платформы. Wi-Fi адаптер (A8), инерциальные МЭМС датчики (A6), устройство согласования (A3), энкодеры питаются от вычислительной платформы.

В памяти микрокомпьютера (A7) хранятся операционная система и разработанная программа системы ориентации. Память и ЦПУ активно взаимодействуют. Согласно управляющей программе ЦПУ управляет GPIO. Управляющие сигналы от GPIO управляют драйвером двигателя, который коммутирует силовые цепи электродвигателей в зависимости от управляющих сигналов, генерируемых вычислительной платформой. Также на GPIO поступают сигналы от энкодеров и инерциальных МЭМС датчиков (A6). Управляющая программа обрабатывает полученную информацию, вычисляет значение ориентации и передает её через Wi-Fi сеть на удаленный сервер с помощью Wi-Fi приемника (A8). В свою очередь удаленный сервер (ПК) передает вычислительной платформе скорость и направление вращения двигателей.

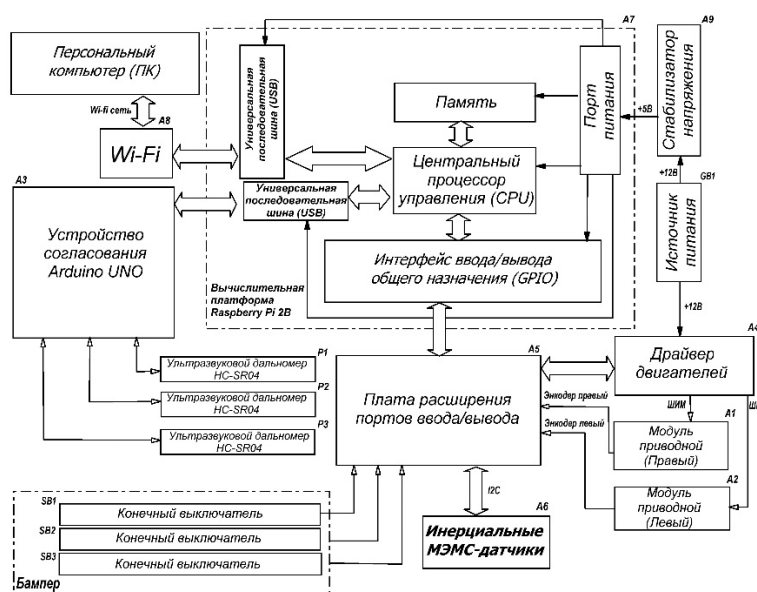


Рис. 1. Система управления робота

В качестве инерциальных МЭМС датчиков (A6) в системе используется единый измерительный модуль Тройка IMU 10 DOF, включающий в себя 3 необходимых сенсора: трех осевой акселерометр, гироскоп, магнитометр. Расположение модуля инерциальных МЭМС датчиков (A6) на мобильном роботе характеризуется тем, что измерительный модуль размещен на верхней поверхности мобильного робота, по центру колесной оси. Такое размещение обусловлено необходимостью удаления магнитометра от источников магнитного поля – двигателей постоянного тока и аккумуляторной батареи.

Для реализации задачи определения ориентации мобильного робота предлагается алгоритм, представленный на рис. 2.

Алгоритм разбит на отдельные участки кода, реализующие принцип определения ориентации в пространстве с помощью инерциальных датчиков. Данный алгоритм определения ориентации внедрён в качестве параллельного процесса в основной алгоритм работы мобильного робота, что позволяет без потерь производительности реализовать необходимый дополнительный функционал. Результатом работы алгоритма работы системы ориентации является строка, содержащая актуальную информацию о трех углах ориентации объекта. Углы ориентации представлены в радианах. Данная строка отправляется на сервер, который может использовать её по своему усмотрению.

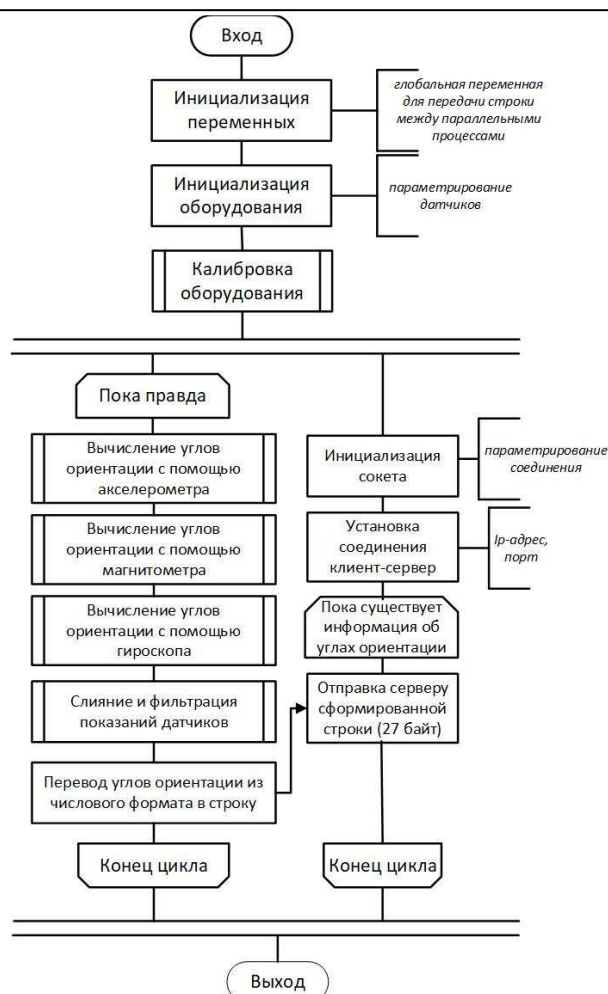


Рис. 2. Алгоритм работы системы ориентации мобильного робота

Вследствие несовершенства исполнения МЭМС датчиков, они нуждаются в калибровке и устранении систематической погрешности.

МЭМС гироскоп подвержен дрейфу нуля. Для его корректировки необходимо произвести некоторое количество замеров показаний гироскопа и вычислить среднее арифметическое. Результат является величиной дрейфа нуля. Также МЭМС гироскоп показывает не значение угла поворота, а угловую скорость, вследствие чего отсутствует информация о начальном положении. Для получения начального положения необходимо произвести некоторое количество вычислений углов ориентации с помощью акселерометра и магнитометра, вычислить средние арифметические значения. Полученные результаты будут являться начальными углами гироскопа.

На магнитометр действуют два типа искажений: искажения, создаваемые источниками магнитного поля (двигатели, динамики, аккумуляторы) и искажения, вносимые посторонними предметами, искажающими уже имеющееся магнитное поле (металлический каркас, крепеж). Для корректировки показаний магнитометра необходимо найти значения смещения магнитного поля по трем осям магнитометра и матрицу масштабирования и ортогонализации.

Учитывая, описанные выше, недостатки каждого из датчиков, решено во время движения использовать преимущественно гироскоп с корректировкой на референсную систему из акселерометра и магнитометра в состоянии покоя. Определение движения осуществляется с помощью нахождения среднеквадратичного отклонения выборок значений углов ориентации, найденных с помощью акселерометра и магнитометра. Размер выборки – 100 элементов. В случае, если среднеквадратичное отклонение превышает 0,1 – объект вращается, иначе – находится в состоянии покоя.

В ходе исследований были получены следующие основные результаты: описан объект проектирования, разработаны требования к системе ориентации мобильного робота, произведен анализ существующих принципов построения систем ориентации, отмечены их достоинства и недостатки, выбран наиболее эффективный из них, разработан принцип определения ориентации на основе слияния показаний инерциальных МЭМС датчиков, разработана структура аппаратного комплекса ориентации мобильного робота, предложен алгоритм работы системы ориентации мобильного робота, проведены практические испытания системы ориентации, сделаны выводы.

### Список литературы

1. Бобровский С. Навигация мобильных роботов (в 3 ч.). Ч. 2 // PC Week/Re. 2004. № 10. С. 53.
2. Бобровский С. Навигация мобильных роботов (в 3 ч.). Ч. 1 // PC Week/Re. 2004. № 9. С. 52.
3. Принципы навигации [Электронный ресурс] URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/navfaq.php> (дата обращения: 07.04.2017).
4. Робототехника: пер. с англ. / Ред. М.Б. Игнатьев. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 300 с.
5. Kalman Filter with indoor GPS [Электронный ресурс] URL: [http://www.convict.lu/htm/rob/ir\\_us.htm#Kalman\\_2](http://www.convict.lu/htm/rob/ir_us.htm#Kalman_2) (дата обращения: 07.04.2017).
6. Осваиваем техническое зрение на примере Bioloid STEM и HaViMo2.0 [Электронный ресурс] URL: <https://habrahabr.ru/company/robotgeeks/blog/251781/> (дата обращения: 07.04.2017).
7. Энкодер [Электронный ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/technology/734.html> (дата обращения: 21.10.2016).
8. Углов А.С. Разработка метода одометрии на основе МЭМС сенсоров и анализа видеопотока: дисс ... Томск, 2014. 68 с.
9. Визуальная одометрия [Электронный ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/738.html> (дата обращения: 07.04.2017).
10. Андрющенко М.С., Степанов В.В. Обработка информации в мультисенсорных системах высокоточного оружия // Вооружение и экономика. 2015. № 4 (33). С. 41-47.
11. Калибровка компаса [Электронный ресурс] URL: [http://wiki.amperka.ru/%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B:troyka-compass\\_calibration](http://wiki.amperka.ru/%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B:troyka-compass_calibration) (дата обращения: 17.05.2017).
12. Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Горбачев Д.В., Антонов М.А. О приближении потока событий к пуассоновскому в цифровых системах управления роботами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9. Ч. 1. С. 3-13.
13. Будков С.А., Ларкин Е.В. Определение пространственного положения рабочего органа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 10. С. 197-202.
14. Акименко Т.А., Аршакян А.А., Будков С.А., Ларкин Е.В. Промышленный робот с информационной системой управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 4. С. 133-138.
15. Акименко Т.А., Аршакян А.А., Рудианов Н.А. Управление группами роботизированных платформ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 200-208.
16. Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Антонов М.А. Буферизация данных в системах управления роботами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9. Ч. 1. С. 117-127.

Баженов Евгений Иванович, магистрант, [evgeniibajenov@yandex.ru](mailto:evgeniibajenov@yandex.ru), Россия, Москва, Московский государственный университет пищевых производств,

Мокрушин Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, [mokrushin@mgupp.ru](mailto:mokrushin@mgupp.ru), Россия, Москва, Московский государственный университет пищевых производств,

Охапкин Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, [ohapkin@vyatsu.ru](mailto:ohapkin@vyatsu.ru), Россия, Киров, Вятский государственный университет

*DEVELOPMENT OF A MOBILE ROBOT  
ORIENTATION SYSTEM IN SPACE*

*E.I. Bazhenov, S.A. Mokrushin, S.I. Okhapkin*

*An algorithm for the operation of the control system of a mobile robot for the implementation of the task of determining the orientation of a mobile robot in space has been developed. Based on the results of practical tests, imperfections in the performance of microelectromechanical sensors were identified, and a conclusion was made about the need for their preliminary calibration in order to eliminate the systematic error. The reliability of the results obtained is confirmed analytically, by the method of expert assessments, as well as by the full-scale execution of the developed device. The practical value of the work is confirmed by practical tests, the results of which indicate that the attitude control system meets the requirements for attitude control systems.*

*Key words: mobile robot, attitude control system, inertial navigation system, microelectromechanical sensor systems, accelerometer, gyroscope, magnetometer.*

*Bazhenov Evgeny Ivanovich, master, [evgeniibajenov@yandex.ru](mailto:evgeniibajenov@yandex.ru), Russia, Moscow, Moscow State University of Food Production,*

*Mokrushin Sergey Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, [mokrushin@mgupp.ru](mailto:mokrushin@mgupp.ru), Russia, Moscow, Moscow State University of Food Production,*

*Okhapkin Sergey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, [ohapkin@vyatsu.ru](mailto:ohapkin@vyatsu.ru), Russia, Kirov, Vyatka State University*