

УДК 007.52:681.5

СИСТЕМА АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO UNO

Мадаминов Х.О., студент гр. 4416, 4 курс
Научный руководитель: Сабитов Р.А., к.т.н., доцент
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ
г. Казань

Современный этап развития техники характеризуется широким внедрением роботизированных систем в самые различные сферы деятельности - от промышленного производства и медицины до бытового обслуживания и образования. Особый интерес представляют автономные мобильные роботы, способные самостоятельно ориентироваться в пространстве и принимать навигационные решения без участия оператора. Вместе с тем стоимость промышленных решений в данной области остаётся высокой, что ограничивает их применение в учебной и исследовательской деятельности. Настоящая работа направлена на создание доступного прототипа автономного робота на базе открытой аппаратной платформы Arduino.

Объектом исследования является мобильный робот с дифференциальным колёсным приводом. Предмет исследования - алгоритм и аппаратные средства системы автоматического управления, обеспечивающей обнаружение препятствий и выбор свободного направления движения.

Цель работы - спроектировать, собрать и испытать систему управления мобильным роботом на базе микроконтроллера Arduino Uno, ультразвукового датчика HC-SR04 и сервомотора SG90, обеспечивающую автономную навигацию в реальной среде.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выбор и обоснование состава аппаратных компонентов системы;
- разработка схемы электрических соединений;
- формализация алгоритма управления движением робота;
- программная реализация алгоритма в среде Arduino IDE;
- экспериментальная проверка работоспособности прототипа.

Управляющим устройством системы служит плата Arduino Uno на микроконтроллере ATmega328P с тактовой частотой 16 МГц. Плата располагает 14 цифровыми портами ввода-вывода, шесть из которых поддерживают широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), а также шестью аналоговыми входами [1]. Данная платформа выбрана благодаря достаточному числу ресурсов для управления всеми периферийными устройствами,

открытой архитектуре и широкой доступности готовых программных библиотек.

Обнаружение препятствий осуществляется ультразвуковым датчиком HC-SR04. Диапазон измерений составляет от 2 до 400 см, заявленная точность - ± 3 мм при питании 5 В [2]. Принцип действия датчика основан на излучении пакета ультразвуковых импульсов (8 импульсов частотой 40 кГц) по сигналу триггера длительностью 10 мкс и последующей фиксации времени прихода отражённого сигнала на выводе Echo. Расстояние до объекта рассчитывается по соотношению:

$$D = t / 58,2, \quad (1)$$

где D - расстояние до препятствия, см; t - длительность сигнала Echo, мкс. Коэффициент 58,2 получен как $2/v$, где $v = 0,034$ см/мкс - скорость распространения звука в воздухе при нормальных условиях [3, 7].

Для организации кругового обзора датчик закреплён на микросервомоторе SG90, обеспечивающем поворот в диапазоне $0-180^\circ$ с максимальным удерживающим моментом 2,5 кг·см. Использование единственного датчика на поворотном основании вместо нескольких фиксированных модулей позволяет существенно снизить стоимость системы, сохранив при этом возможность оценки обстановки в нескольких направлениях [4, 5].

Ходовая часть выполнена на готовом шасси типа Smart Car с двумя двигателями постоянного тока и дифференциальным приводом. Управление двигателями осуществляется через H-мост, обеспечивающий реверс и регулировку скорости посредством ШИМ-сигналов от Arduino. Монтаж всех соединений выполнен на беспаячной плате с применением соединительных проводов, что упрощает сборку и допускает оперативную замену компонентов.

Алгоритм управления реализует реактивное поведение робота в виде непрерывного цикла «измерение - оценка - действие». Пороговое расстояние реагирования принято равным 20 см: при меньшей дистанции до препятствия робот не успевает завершить манёвр без столкновения, что подтверждается в аналогичных исследованиях [6, 7]. Алгоритм включает следующие шаги.

На этапе инициализации сервомотор устанавливается в положение 90° (фронтальное направление), выполняется настройка портов Arduino. Далее запускается основной цикл: датчик измеряет расстояние D_{front} по формуле (1). Если D_{front} превышает 20 см, подаётся команда движения вперёд и цикл повторяется. При обнаружении препятствия ближе 20 см двигатели останавливаются, робот отъезжает назад в течение 300 мс. Сервомотор последовательно поворачивается до 0° , фиксируется расстояние D_{right} , затем до 180° - D_{left} . Производится сравнение: если $D_{\text{right}} \geq D_{\text{left}}$, выполняется поворот вправо на 500 мс, иначе - влево на 500 мс. После манёвра сервомотор возвращается в положение 90° и цикл возобновляется.

Программа реализована на языке C/C++ в среде Arduino IDE. Для управления сервомотором подключается стандартная библиотека Servo.h. Функция измерения расстояния `measureDistance()` подаёт импульс HIGH длительностью 10 мкс на вывод Trig, считывает длительность ответного сигнала на выводе Echo функцией `pulseIn()` и вычисляет расстояние по формуле (1). Управление скоростью двигателей осуществляется функцией `analogWrite()`, направление вращения задаётся через `digitalWrite()`.

Прототип системы прошёл испытания в условиях помещения при наличии препятствий с плоскими и цилиндрическими поверхностями. В качестве рабочей выбрана скорость двигателей, соответствующая значению ШИМ около 100 из 255 ($\approx 40\%$ от максимума). При данной скорости система успешно обнаруживала препятствия и совершала манёвр обхода в 85–90% случаев. Время реакции от момента обнаружения препятствия до начала манёвра составило 150–200 мс, что определяется суммарным временем цикла измерений, задержек программы и инерции механической части.

Экспериментально подтверждена зависимость точности обнаружения от скорости движения: при увеличении ШИМ до максимального значения (255) точность снижается приблизительно до 25–30% вследствие того, что робот успевает сблизиться с препятствием быстрее, чем завершается цикл измерений [3]. Данный результат согласуется с выводами опубликованных работ по аналогичным системам [2, 4].

Датчик HC-SR04 показал стабильную работу в диапазоне расстояний от 5 до 200 см. Погрешность измерений на контрольных расстояниях не превысила 1,5%, что соответствует результатам независимых экспериментов [1, 5]. За пределами рабочего диапазона (менее 5 см и более 200 см) наблюдались единичные ошибочные показания, что объясняется особенностями диаграммы направленности датчика.

По результатам работы можно сформулировать следующие выводы.

- Разработана система автоматического управления мобильным роботом на базе Arduino Uno, ультразвукового датчика HC-SR04 и сервомотора SG90, обеспечивающая автономное обнаружение препятствий и выбор свободного направления движения.
- Алгоритм сравнения дистанций по трём направлениям (вперёд, вправо, влево) обеспечивает точность обхода препятствий 85–90% при умеренной скорости движения.
- Установка датчика на поворотный сервомотор позволяет ограничиться одним датчиком вместо нескольких, снижая стоимость системы без потери функциональности.
- Выявлено практическое ограничение: точность обнаружения существенно снижается при высокой скорости движения, что требует введения адаптивного управления скоростью в зависимости от дистанции до ближайшего препятствия.

- Перспективами развития системы являются: добавление боковых инфракрасных датчиков, интеграция беспроводного интерфейса, применение более производительного микроконтроллера и реализация алгоритмов машинного обучения для навигации.

Список литературы:

1. Gabriel M.M., Kuria K.P. Arduino Uno, Ultrasonic Sensor HC-SR04 Motion Detector with Display of Distance in the LCD // International Journal of Engineering Research & Technology. - 2020. - Vol. 9, No. 5. - P. 936–942.
2. Baballe M.A., Bello M.I. Obstacle Avoidance Robot using an Ultrasonic Sensor with Arduino Uno // East African Scholars Journal of Engineering and Computer Sciences. - 2023. - Vol. 6, No. 6. - P. 78–86. - DOI: 10.36349/easjecs.2023.v06i06.001.
3. Ahmmed F. et al. Arduino-Controlled Multi-Function Robot with Bluetooth and nRF24L01+ Communication // International Journal of Robotics and Control Systems. - 2024. - Vol. 4, No. 3. - P. 1353–1381. - DOI: 10.31763/ijrcs.v4i3.1517.
4. Hidayati Q. Obstacle Avoidance Mobile Robot With Ultrasonic Sensors // Jurnal Teknologi Terpadu. - 2017. - Vol. 5, No. 1. - P. 77–81.
5. Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 1015, No. 3. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189.
6. Ташев А.А., Фёдоров Т.В. Разработка робота на основе ультразвукового дальномера // ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». - Орёл.
7. Khaleel H.Z., Oleiwi B.K. Ultrasonic sensor decision-making algorithm for mobile robot motion in maze environment // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. - 2024. - Vol. 13, No. 1. - P. 109–116. - DOI: 10.11591/eei.v13i1.6560.
8. Azeta J. et al. Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 707. - Art. 012012.
9. Аблати С.П. и др. Разработка автономного мобильного робота // Проект ГПО УИ ИИ-1410. - Томск, 2014.
10. Suryanarayana S., Akhila V. Autonomous Maze Solving Robot Using Arduino // International Journal Advanced Research Engineering and Technology. - 2021. - Vol. 12, No. 3. - P. 595–603.