

А.А. ЕРАШОВ, К.В. КАМЫНИН, К.Д. КРЕСТОВНИКОВ, А.И. САВЕЛЬЕВ
**МЕТОД ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ ДВУМЯ РОБОТАМИ**

Ерашов А.А., Камынин К.В., Крестовников К.Д., Савельев А.И. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами.

Аннотация. Энергоемкость аккумуляторов, применяемых в качестве основного источника питания в мобильных робототехнических средствах, определяет время автономной работы робота. Для планирования выполнения группой робототехнических средств задач с точки зрения затрат времени актуально учитывать время, в течение которого заряжается аккумулятор каждого отдельного робота. При использовании беспроводной передачи энергии это время зависит от эффективности системы передачи энергии, а также от мощности передающей части системы, необходимой для пополнения энергоемкости. В настоящей работе предлагается метод оценки времени передачи энергетических ресурсов между двумя роботами с учетом данных параметров. Предлагаемый метод учитывает применение алгоритма конечного позиционирования роботов, оценку линейных смещений между роботами, включает вычисление эффективности, а также определение времени подзарядки с учетом параметров, полученных на предыдущих этапах метода. Алгоритм конечного позиционирования роботов использует алгоритмы обработки данных системы технического зрения робота для поиска реперных маркеров и определения их пространственных характеристик для обеспечения конечного позиционирования мобильных робототехнических платформ. Данные характеристики также применяются для определения линейных смещений между роботами, от которых зависит эффективность передачи энергии. Для ее определения в методе используется математическая модель энергетических характеристик системы беспроводной передачи энергии и полученные линейные смещения. На последнем этапе метода вычисляется время подзарядки аккумулятора мобильного робота с учетом данных с предыдущих этапов. Применение предложенного метода для моделирования позиционирования роботов в некотором наборе точек рабочего пространства позволит уменьшить временные затраты на зарядку аккумулятора робота при использовании беспроводной передачи энергии. В результате моделирования было определено, что передача энергетических ресурсов между роботами происходило с эффективностью в диапазоне от 58,11% до 68,22%, а также из 14 точек позиционирования были определены 3 с наименьшим временем передачи энергии.

Ключевые слова: мобильная робототехника, беспроводная передача энергии, оценка времени передачи энергии, позиционирование мобильных роботов, техническое зрение, ArUco-маркер.

1. Введение. Мобильные автономные роботы в настоящий момент широко применяются в быту (роботы-пылесосы), в задачах доставки, а также в роевой и модульной робототехнике. Зачастую в таких роботах устанавливаются аккумуляторные батареи, энергоемкость которых определяет время работы мобильной платформы. Для поддержания автономности группы робототехнических платформ актуальной является решение задачи

обеспечения достаточного уровня заряда аккумулятора для функционирования робота. Для решения данной проблемы в основном используются два подхода: передача энергии от зарядной станции контактным способом или беспроводным. Контактный способ требует высокой точности позиционирования, поскольку стыкуемые устройства необходимо сопрягать физически. Кроме того, открытые контакты могут быть повреждены при работе в среде с повышенным содержанием влаги или пыли. В связи с этим возможно применение специальных устройств сопряжения, однако их более сложная конструкция влечет за собой уменьшение надежности соединения и увеличение массогабаритных показателей робота. Отмеченных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ).

БСПЭ активно применяются в системах беспроводного заряда электротранспорта [1], в мобильных устройствах и пользовательской электронике [2], а также в мобильных роботах [3].

Как было показано в [4], эффективность передачи энергии беспроводным способом зависит от относительного положения и ориентации приемной и передающей катушек. Она определяется показателем отношения принятой мощности к передаваемой. Следовательно, взаимное расположение частей системы будет влиять на время передачи энергии, что, в свою очередь, зависит от алгоритма конечного позиционирования роботов. Если есть возможность заряда аккумулятора мобильного робота от нескольких роботов группы, то расположение данных роботов будет определять, сколько энергоресурса останется у роботов после сближения устройств, что также влияет на общее время заряда. Таким образом, учет расположения точек передачи энергии, алгоритма конечного позиционирования и положения робототехнических средств после сближения роботов позволит выбрать наилучший вариант с точки зрения энергопотребления и времени заряда, сокращая тем самым время подготовки робота к решению задач. Это обуславливает актуальность исследований в направлении методов оценки времени передачи энергии мобильному роботу.

2. Анализ способов конечного позиционирования мобильных роботов посредством различных сенсорных систем. Процесс позиционирования наземных робототехнических платформ подразумевает определение координат точки конечного позиционирования одной платформы относительно другой для построения траектории движения, либо корректированию направления движения, если не используется планировщик маршрута до цели.

Координаты точки позиционирования для стыковки и направления движения к ней зачастую определяют с помощью различных датчиков.

В работе [5] для стыковки двух модульных роботов используются ИК-сенсоры и ИК-передатчики. Алгоритм позиционирования для стыковки базируется на поиске ИК-сигнала с передатчика, расположенного на другом роботе. Аналогичные датчики использовались в [6] для стыковки мобильного робота с зарядной станцией. В работе не рассмотрена оценка времени заряда аккумулятора. Применяемые ИК-датчики не позволяют определять угловые смещения.

Для контактного заряда аккумулятора мобильного робота предложен алгоритм позиционирования для стыковки с применением лазерного дальномера [7]. Данный сенсор установлен на подвижном роботе и позволяет определять направление движения и расстояние до зарядной станции, однако с его помощью проблемно оценить угловое смещение. В работе также отсутствует оценка времени заряда.

В алгоритмах конечного позиционирования робототехнических платформ [8, 9] используются данные с лидара для поиска объекта специальной формы, которую имеет зарядная станция. Предложенные алгоритмы заключаются в следующем: система технического зрения робота определяет маркер зарядной станции, затем он перемещается к точке позиционирования, выравнивается относительно зарядной станции, после чего стыкуется. Применение подхода с поиском зарядной станции определенной формы не исключает ситуаций, когда объект или совокупность объектов схожей формы могут быть приняты за объект стыковки.

Для поиска точки конечного позиционирования мобильных роботов также возможно применение систем технического зрения. Определение положения зарядной станции с помощью системы технического зрения и реперных маркеров ArpiTag рассмотрено в [10]. Область позиционирования разделена на две области, в одной из которых робот перемещается с использованием алгоритма ORB-SLAM, во второй – с применением данных о положении маркера, полученных после обработки изображений. Предложенный подход не содержит оценку времени заряда. В работе [11] положение и ориентацию точки конечного позиционирования к паллету с реперными маркерами относительно робота Pioneer 3-AT предложено определять с применением стереокамеры. Представленный алгоритм не полностью автономен: в экспериментах оператор удаленно управлял роботом для приближения к цели, после чего робот автоматически стыковался. В [12] для определения положения

мобильного робота относительно целевого объекта стыковки используются данные с карты глубины, получаемой с помощью Microsoft Kinect. В экспериментах для распознавания объекта стыковки его передняя часть была двуцветной: красной снизу, зеленой сверху. Такой подход может вызвать некорректное определение станции стыковки.

Системы технического зрения применяются также для стыковки и конечного позиционирования космических, надводных и подводных аппаратов. Для стыковки спутников предложено решение [13], в котором используется система стерео- и монозрения для определения положения и ориентации объекта стыковки по опорным маркерам и характерным точкам объекта стыковки. Аналогичный подход рассмотрен в работе [14], в которой предложен алгоритм стыковки макета микроспутника. Для условий микрогравитации в [15] предложен алгоритм позиционирования модулей SuperBot. Данные модули оснащены камерами и маркерами AprilTag для определения пространственных характеристик поверхности контакта модуля и маркера. Подобные подходы к определению точки позиционирования представляют интерес, поскольку позволяют определять положение и ориентацию поверхности объекта стыковки, на которой установлен маркер.

Применение алгоритмов позиционирования подводных и надводных роботов накладывает ограничения на способы определения положения цели, определяемые условиями окружающей среды. Так, алгоритм конечного позиционирования по L-образному соединению световых излучателей [16] применим только в области подводной робототехники и, как отмечают авторы, в комплексной подводной среде предлагаемый алгоритм не идеален для позиционирования с большим продольным углом наклона. В [17] представлен алгоритм конечного позиционирования мобильного морского робота с надводной станцией обработки и сбора данных. Робот оснащен Microsoft Kinect и индукционными зарядными катушками для беспроводной передачи энергии. Верхняя крышка станции покрыта отражающей инфракрасное излучение пленкой для определения положения робота с помощью обработки изображений с камеры. Эксперименты показали, что возможно некорректное определение положения станции при появлении на изображении ярких участков. Также в работе не приведена оценка времени заряда. Система стыковки сферического робота-амфибии на базе бинокулярной камеры рассматривается в [18], с помощью которой получают два вида изображений – цветное и карта глубины. В системе технического зрения робота используется

распознавание стыковочного гнезда, после чего применяется алгоритм Kernelized Correlation Filters [19] для отслеживания положения целевого объекта. Далее робот перемещается так, чтобы положение объекта на изображении было по центру, при этом расстояние стыковки составляет не менее 200 мм. Эксперименты по стыковке на меньшей дистанции не проводились.

Комбинированное применение различных сенсоров позволит уточнять взаимное положение и ориентацию стыкуемых объектов, однако использование различных датчиков приводит к увеличению числа проводов и не всегда целесообразно по причине возможных ограничений массогабаритных показателей мобильных платформ. Комбинирование ИК-датчика и лидара рассмотрено в [20], где предложена система заряда аккумулятора мобильного робота от неподвижной зарядной станции. Комбинирование УЗ и ИК-датчиков для стыковки мобильного робота с зарядной станцией предложено в [21]. ИК-сенсоры предложено использовать для грубого позиционирования, для режима точного позиционирования используются УЗ-сенсоры и передатчики. В рассмотренных работах не обсуждались вопросы оценки времени заряда для различных положений точек позиционирования в пространстве. Для определения угловых смещений может потребоваться несколько таких датчиков. Помимо УЗ и ИК датчиков для определения направления движения мобильной платформы в условиях низких акустических шумов возможно применение алгоритмов обработки звуковых колебаний. Так, в [22] представлена система поиска и отслеживания направления зарядной станции на основе источника звука и данных с системы технического зрения. Данное решение имеет ограниченное применение, поскольку оно использует акустический подход для поиска направления движения робота и не позволяет оценить смещения стыкуемых объектов. Комбинирование технического зрения с ИК-датчиками рассмотрено в [23]. Для определения направления движения предложено использовать QR-коды в качестве маркеров. Алгоритм позиционирования заключается в движении робота так, чтобы центр QR-кода совпадал с центром изображения. В маркере кодируется лишь необходимая информация, чтобы робот позиционировался по маркерам с определенным идентификатором.

Для определения точки конечного позиционирования во многих исследованиях было использовано техническое зрение, что при достаточном уровне освещения представляется более предпочтительным вариантом по сравнению с УЗ и ИК-датчиками. Это обусловлено тем, что датчики имеют более ограниченный рабочий

диапазон по сравнению с диапазоном различных камер со специальными маркерами, ввиду чего, при условии подвижности стыкуемых объектов, необходимо использовать несколько датчиков для уменьшения зон нечувствительности сенсорной системы в рабочем пространстве мобильного робота. Кроме того, применение технического зрения также позволяет определять и ориентацию объектов относительно друг друга, что также является преимуществом перед УЗ и ИК-сенсорами. Применение подходов определения точки позиционирования с применением излучающих свет или звук источников затруднено из-за необходимости работы системы в специфических условиях (плохая освещенность, низкий уровень акустических шумов окружающего пространства). В системах технического зрения возможно использование свободного программного обеспечения для определения пространственных характеристик маркеров относительно камеры, а также для калибровки используемой камеры. Возможно применение таких систем технического зрения, как Microsoft Kinect, однако стоимость и массогабаритные показатели подобных систем могут быть сравнительно больше, чем те же параметры системы, состоящей из камеры и реперных маркеров. Таким образом, в настоящей работе для поиска точки конечного позиционирования предлагается использовать систему технического зрения на базе камеры и ArUco-маркеров, что позволит использовать сравнительно небольшое число сенсоров для определения положения и ориентации между роботами, а также направление движения. Выбор данных маркеров обусловлен тем, что их распознаваемость является одной из лучших по точности [24], возможностью использования на открытой местности, а также тем, что для разработки программного обеспечения можно использовать доступную библиотеку OpenCV с широким функционалом. Применение беспроводного способа передачи энергии [25, 26], как было отмечено ранее, не требует использования дополнительных датчиков для достижения высокой точности позиционирования.

Среди рассмотренных работ есть исследования, в которых рассматривалась оптимизация времени позиционирования или энергопотребления в процессе сближения роботов. Однако в большинстве работ не уделяется достаточного внимания к оценке времени заряда аккумулятора мобильного робота для различных положений точки конечного позиционирования в рабочем пространстве. Данная проблема является актуальной, поскольку ее решение позволит оптимизировать время выполнения задач за счет

выбора точек конечного позиционирования, в которых передача энергии будет происходить с наиболее высокой эффективностью.

3. Постановка задачи. Целью данной работы является разработка метода оценки времени передачи энергии посредством БСПЭ между двумя роботами для заряда аккумуляторной батареи одного из них. Задача проводимого исследования формулируется следующим образом. Даны два робота: заряжающий робот и робот-рабочий, который выполняет задачу. Оба робота имеют собственный автономный источник питания и БСПЭ. В процессе выполнения задачи у робота-рабочего уровень заряда батареи снижается. При достижении порогового значения необходимо восполнить заряд аккумуляторной батареи робота-рабочего для продолжения выполнения задачи. Для этого осуществляется позиционирование между роботом-рабочим и роботом-заряжающим и последующая передача энергии между ними посредством БСПЭ. Следует отметить, что процесс заряда батареи робота-рабочего может быть полным или частичным. В данной работе рассматривается частичное пополнение уровня заряда аккумулятора робота-рабочего за счет передачи энергии от заряжающего робота. В зависимости от сенсорной системы робота, исполнительных устройств, а также рельефа местности, при позиционировании для передачи энергии между роботами могут возникать отклонения от идеального взаимного положения. Данные смещения главным образом зависят от того, как алгоритм конечного позиционирования робототехнических средств выполняется в условиях локальных неровностей. Как отмечено выше, смещения между роботами при передаче энергии посредством БСПЭ влияют на эффективность ее работы и передаваемую мощность. Следовательно, для оценки времени передачи энергии необходимо определить эффективность и передаваемую мощность БСПЭ после окончания позиционирования на основе данных о достигнутом взаимном положении роботов.

4. Метод оценки времени передачи энергетических ресурсов между двумя роботами. Разработанный метод оценки времени заряда аккумулятора робототехнического средства беспроводным способом состоит из следующих этапов:

1. Выполнение алгоритма конечного позиционирования робототехнических платформ.
2. Оценка смещений между платформами.
3. Расчет эффективности передачи энергии на основе смещений, полученных в п.2.

4. Определение времени заряда с учетом п.3 и энергетических параметров БСПЭ заряжающего робота.

Для сближения роботов в окрестности точки конечного позиционирования и дальнейшей оценки смещений по результатам проведенного анализа разработан алгоритм, использующий планирование траектории, а также алгоритмы обработки изображений для поиска ArUco-маркеров и получения их положения и ориентации относительно системы отсчета камеры [27]. Планирование траектории до точки конечного позиционирования предлагается осуществлять на базе алгоритма LRLHD-A* [28]. Для увеличения точности определения относительной ориентации и положения роботов в окрестности точки конечного позиционирования предлагается использовать два ArUco-маркера на передней части робота-рабочего. Разработанный алгоритм начинает свою работу после того, как система технического зрения определяет маркеры, затем активируется процесс корректирования ориентации заряжающего робота относительно точки конечного позиционирования. При этом также возможно обновление глобальной траектории движения. После конечного позиционирования по пространственным характеристикам ArUco-маркеров определяются линейные смещения между роботами (второй этап), затем результат передается на третий этап предлагаемого метода.

Расчет эффективности передачи энергии производится с учетом полученных линейных смещений между приемной и передающей частями БСПЭ на основании модели энергетических характеристик БСПЭ [4].

На четвертом этапе метода вычисляется время передачи энергии на базе полученных ранее результатов, а также данных о мощности передачи энергии и необходимой для пополнения уровня заряда аккумулятора.

Следует отметить, что для ориентирования роботов в пространстве можно использовать удаленное вычислительное устройство, собирающее по беспроводному каналу связи все необходимые данные. На этом же устройстве возможен анализ этих данных и определение роботов, которых можно использовать для перераспределения энергии в группе роботов. Отмеченный вопрос является отдельной алгоритмической задачей, выходящей за рамки данной статьи.

Предложенный метод целесообразно применять для получения набора оценок времени заряда по разному количеству точек конечного позиционирования с помощью моделирования. В результате моделирования процесса позиционирования и применения метода

оценки времени передачи энергии можно получить набор данных из оценок времени, на основе которых возможен поиск точек конечного позиционирования, которые обеспечат сокращение времени процесса заряда аккумулятора робота-рабочего. Далее подробнее рассмотрены этапы предложенного метода.

4.1. Алгоритм конечного позиционирования мобильных автономных роботов. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ на основе ArUco-маркеров приведен на рисунке 1. Предлагаемый алгоритм предназначен для управления процессом позиционирования заряжающего робота относительно робота-рабочего на этапе движения, когда робототехнические средства находятся на расстоянии до 1 м при размере маркеров 45 мм × 45 мм.

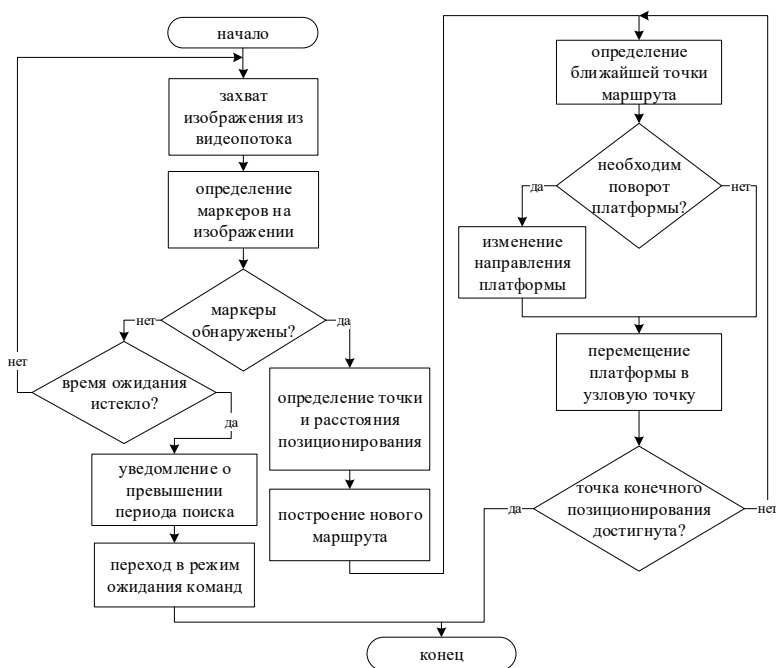


Рис. 1. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ на основе ArUco-маркеров

Полагается, что в самом начале процесса позиционирования роботы могут находиться на большем расстоянии, чем 1 м. Поэтому в настоящей работе допускается, что для определения положения можно воспользоваться внешней навигационной системой, которая основана,

например, на беспроводном взаимодействии роботов с удаленным вычислителем. Положения всех роботов считываются этим удаленным устройством, затем подвергаются дополнительному анализу, например, с участием карты высот.

Предлагаемый алгоритм, как часть метода оценки времени передачи энергоресурсов, начинает свою работу в тот момент времени, когда система технического зрения определяет маркеры. До этого момента заряжающий робот перемещается по глобальной траектории.

Если два ArUco-маркера с заранее известными идентификаторами не были определены на изображении, то поиск повторяется снова до тех пор, пока не будет превышено заданное время ожидания обнаружения маркеров. При этом алгоритм уведомляет о превышении времени обнаружения, после чего заряжающий робот входит в режим ожидания новых команд.

В случае успешного определения ArUco-маркеров вычисляются координаты точки конечного позиционирования в трехмерном пространстве. Для этого сперва необходимо определить векторы сдвига каждого маркера в пространстве относительно системы отсчета C , связанной с камерой, которая неподвижно закреплена на заряжающем роботе. На рисунке 2 показаны данные векторы ${}^C_{M1}P$ и ${}^C_{M2}P$, направленные в точки $M1$ и $M2$ соответственно, обозначающие геометрический центр каждого ArUco-маркера. Посредством библиотеки компьютерного зрения OpenCV по изображениям и параметрам камеры (коэффициенты дисторсии и др.) определяются координаты векторов сдвига ${}^C_{M1}P = (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1})^T$ и ${}^C_{M2}P = (x_{M2}, y_{M2}, z_{M2})^T$ относительно системы отсчета камеры C . Далее, чтобы найти координаты средней точки N между маркерами в системе отсчета камеры, можно вычислить половину от суммы координат векторов. Тогда полученный вектор ${}^C_N P = (x_N, y_N, z_N)^T$ (1) будет указывать на середину между центрами двух маркеров в пространстве.

$${}^C_N P = \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_{M1} + x_{M2} \\ y_{M1} + y_{M2} \\ z_{M1} + z_{M2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Для вычислений была введена прямоугольная система координат, поскольку именно в таком представлении используемая

библиотека OpenCV позволяет определить пространственные характеристики центров маркеров: ориентацию и положение.

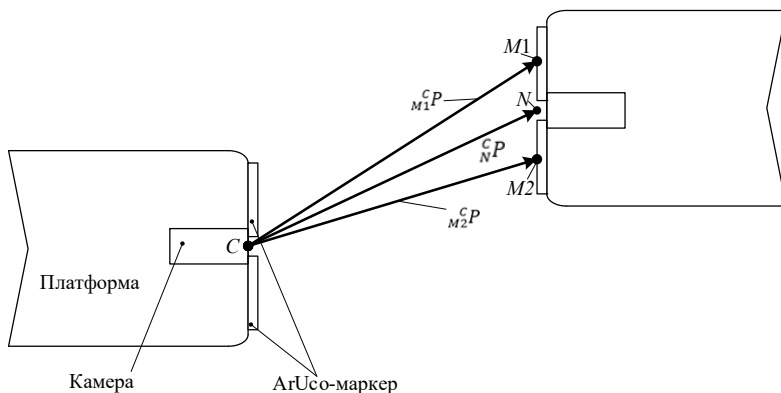


Рис. 2. Определение координат точки конечного позиционирования

Далее с учетом дополнительных данных о взаимном положении робототехнических платформ обновляется траектория движения заряжающего робота до точки конечного позиционирования на основе алгоритма LRLHD-A* [28]. Применение данного алгоритма позволит определить энергоэффективный маршрут от текущего положения до целевого. Работа алгоритма успешно приведена в [28]. Полученная траектория сглаживается с применением алгоритма CSA [29] для достижения плавности перемещения мобильного робототехнического средства.

По сгенерированной траектории определяется ближайшая точка (вершина полученного маршрута), к которой затем перемещается заряжающий робот. Данные об ориентации и положении, полученные с помощью технического зрения, позволяют уточнить направление движения заряжающего робота к точке конечного позиционирования и корректировать его при значительном отклонении, которое задается отдельно. Движение продолжается, пока заряжающий робот не достигнет точки конечного позиционирования с заданной точностью. В алгоритме это реализовано циклически, проверяя, достиг заряжающий робот точки конечного позиционирования или нет: если нет, то определяется ближайшая точка траектории, к которой затем направляется робот. Если система технического зрения перестанет определять маркеры, то заряжающий робот будет перемещаться по глобальной траектории. В таком случае это может повлиять на

точность конечного позиционирования, если маркеры так и не будут обнаружены.

При достижении точки конечного позиционирования параллельность между платформами достигается за счет использования данных об ориентации заряжающего робота относительно точки позиционирования. Для этого предлагается использовать матрицы поворота каждого маркера, которые так же, как и векторы сдвига, определяются с помощью системы технического зрения. В соответствии с приведенными в [30] определениями, связанными с матрицами поворота, соответствующие координатные оси двух систем отсчета являются сонаправленными при нулевых значениях углов поворота одной системы отсчета относительно другой. С учетом этого, если, например, ориентация задается через углы Эйлера, то матрица поворота (2) становится единичной (3):

$$R = \begin{pmatrix} c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta s\gamma & -c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta c\gamma & s\alpha s\beta \\ s\alpha c\gamma + c\alpha c\beta s\gamma & -s\alpha s\gamma + c\alpha c\beta c\gamma & -c\alpha s\beta \\ s\beta s\gamma & s\beta c\gamma & c\beta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $c x = \cos x$, $s x = \sin x$, $x \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$,

$$R|_{\alpha=0, \beta=0, \gamma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Тогда параллельность платформ можно проверять по тому признаку, что матрицы поворота стремятся к единичной. Ориентацию и относительное положение платформ необходимо изменять для достижения параллельности платформ при конечном позиционировании, данная информация используется в дальнейшем расчете эффективности передачи энергии с помощью беспроводной системы.

4.2. Расчет эффективности передачи энергии. В соответствии с приведенными в [4] уравнениями по продольному смещению L и поперечному смещению H (рисунок 3) определяют показатели η_L , η_H эффективности передачи энергии, соответственно, при продольном и поперечном смещениях.

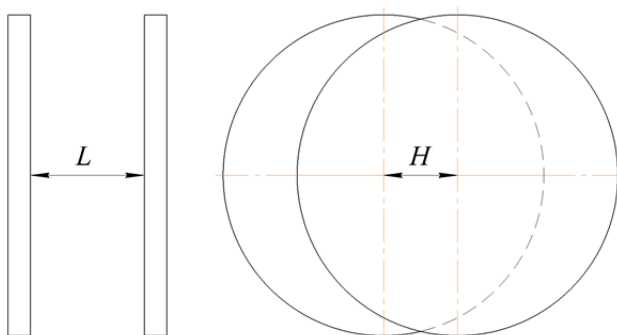


Рис. 3. Определение смещений между приемной и передающей катушками БСПЭ

Итоговая эффективность вычисляется путем перемножения полученных показателей при продольном и поперечном смещениях (3):

$$\eta_s = \eta_L \cdot \eta_H. \quad (3)$$

Уравнения, представленные в [4], были получены по характеристикам реального прототипа. Это позволяет с высокой точностью составлять прогнозы эффективности на основе смещений. Получение аналитических выражений требует, во-первых, преобразования множества нелинейных зависимостей, которые присутствуют в БСПЭ, во-вторых, дополнительных исследований и сравнения с характеристиками прототипа.

4.3. Оценка времени передачи энергии. Время заряда аккумулятора мобильного робота-рабочего в данном случае зависит от итогового показателя эффективности η_s , остаточного заряда типа аккумулятора, а также от мощности зарядного устройства.

Значение остаточного заряда аккумулятора C_t вычисляется по формуле (4):

$$C_t = C \left(1 - \frac{p}{100} \right), \quad (4)$$

где C – полная энергоемкость в Вт·ч аккумулятора робота-рабочего; p – значение энергоемкости аккумулятора в процентах, при которой необходим заряд.

Передаваемая мощность $P_{1(max)}$ может быть определена посредством измерения или расчета, итоговый показатель эффективности η_s является расчетным параметром в соответствии с п.3.2. Тогда после определения C_t можно найти время передачи энергии для достижения требуемого уровня заряда аккумулятора. В общем виде зависимость данного времени от упомянутых параметров представляется как (5).

$$t_E = f(P_{1(max)}, \eta_s, C_t). \quad (5)$$

Форма характеристики зависимости времени заряда может варьироваться при изменении любого параметра. Форма кривой заряда аккумулятора зависит также от применяемых алгоритмов, реализуемых специализируемыми контроллерами или иными схемотехническими решениями, которые в данной работе не рассматриваются.

5. Эксперименты. Для оценки времени заряда предлагаемый метод был применен в серии экспериментов в симуляционной среде Gazebo. В качестве мобильных платформ использовались две модели роботов Pioneer 3-AT, на одной из которых была установлена камера, на второй – два AgUco-маркера. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ реализован на языке программирования Python, для распознавания маркеров на изображении с камеры использована библиотека OpenCV. Глобальная траектория движения заряжающего робота до точки конечного позиционирования генерируется на основе алгоритма LRLHD-A* [28].

Также принимаются следующие допущения: система управления каждым роботом с помощью внешней навигационной системы может определить положение роботов друг относительно друга, заряжающий робот обладает достаточным уровнем заряда аккумулятора для передачи энергии роботу-рабочему. Делалось допущение, что зависимость (5) линейная:

$$t_E = \frac{100C_t}{P_{1(max)}\eta_s}. \quad (6)$$

В числителе (6) множитель 100 используется, когда показатель эффективности η_s задается в процентах.

В ходе экспериментов использовалась карта высот модели рабочего пространства из библиотеки моделей симулятора Gazebo. На

этом пространстве было задано 14 случайных точек с различными координатами. В окрестности данных точек устанавливался заряжающий робот и робот-работчий, после чего проводилась симуляция позиционирования двух платформ (рисунок 4). В соответствии с предложенным методом, после позиционирования определялось относительное положение платформ, затем вычислялся показатель эффективности. На основе полученных данных определялось время заряда.

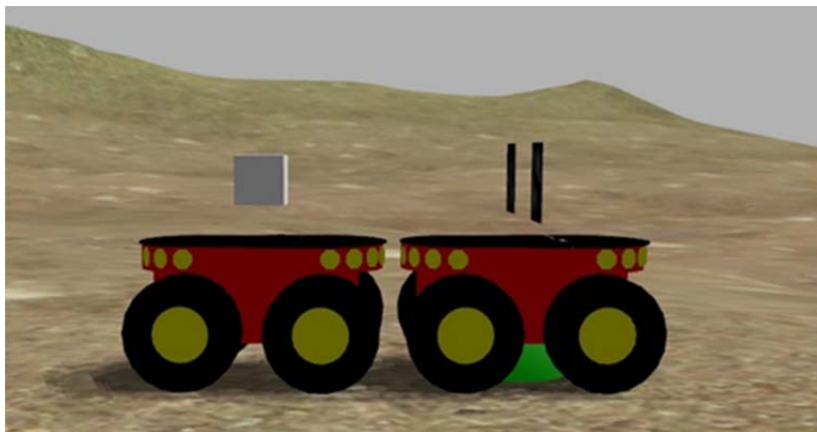


Рис. 4. Конечное позиционирование двух мобильных платформ Pioneer 3-AT (платформа слева – заряжающий робот, оснащенная камерой; платформа справа – робот-работчий)

В симуляции позиционирования платформ в соответствии с предложенным алгоритмом остановка роботов производилась в момент, когда расстояние между камерой и маркерами становилось менее 0,54 м. Выбор данного порогового значения обуславливается двумя факторами:

- длина мобильной платформы;
- расположение камеры и маркеров.

Длина мобильной платформы составляет 0,508 м [31].

Камера и маркеры на роботах расположены по центру каждой мобильной платформы, таким образом, минимальное возможное расстояние между камерой и маркерами в момент касания платформ составляет 0,508 м. В качестве расстояния, учитывающего толщину приемной и передающей частей БСПЭ, было принято значение 0,022 м. Таким образом, в момент, когда расстояние между камерой и маркерами равно 0,54 м, платформы находятся на расстоянии от 0 до

0,01 м для того, чтобы эффективность была близка к максимальному значению. Возможный запас по расстоянию в 0,01 м был принят для избегания столкновений платформ при остановке.

На рисунке 5 приведен вид с камеры заряжающего робота. В левом верхнем углу рисунка 5 показано расстояние до центральной точки между маркерами, а также расстояние до левого и правого маркеров соответственно. Кроме того, на маркерах и центральной точке изображено направление осей привязанных систем отсчета, которые наглядно демонстрируют их ориентацию в пространстве.

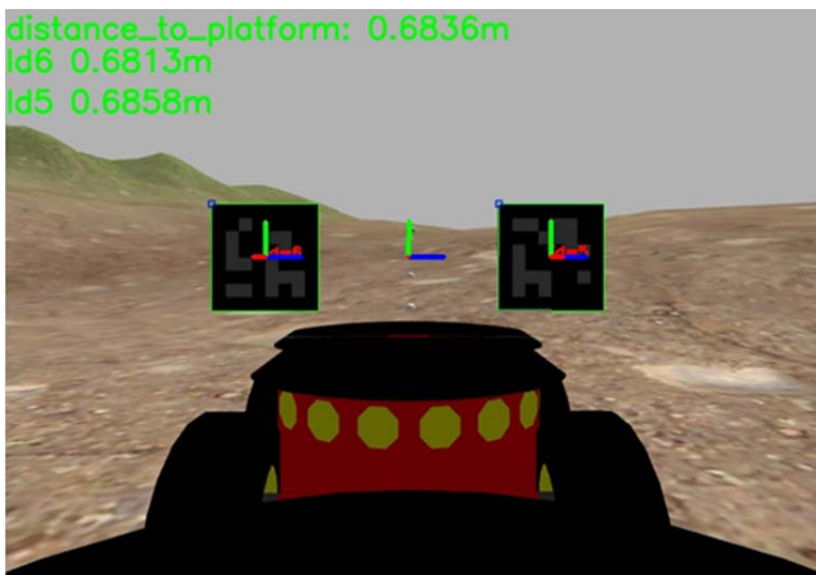


Рис. 5. Вид с камеры заряжающего робота

Для вычисления эффективности БСПЭ были приняты следующие величины:

- максимальная эффективность: 80%
- диаметр катушки: 0,08 м;
- мощность нагрузки: 15 Вт;
- мощность передающей катушки: 20 Вт.

В таблице 1 приведены средние расчетные значения эффективности и смещений по каждой точке. В таблице 2 также показаны углы наклона поверхности относительно горизонта в точках конечного позиционирования роботов. Значения, приведенные в

данных таблицах и на изображениях далее, определялись с точностью до 15 знака.

Таблица 1. Расчетные данные с экспериментов по конечному позиционированию роботов

№ точки	Продольное смещение, м	Поперечное смещение, м	Эффективность, %	Абсолютное отклонение от η_{max} , %
1	0,0175	0,0206	63,39	16,61
2	0,0182	0,0127	66,29	13,71
3	0,0177	0,0154	65,97	14,03
4	0,0164	0,0187	64,67	15,33
5	0,0168	0,0172	66,15	13,85
6	0,0169	0,0127	67,14	12,86
7	0,0181	0,0062	67,76	12,24
8	0,0182	0,0045	68,22	11,78
9	0,0177	0,0083	67,84	12,16
10	0,0180	0,0108	66,82	13,18
11	0,0164	0,0286	61,91	18,09
12	0,0175	0,0298	58,11	21,89
13	0,0158	0,0239	63,78	16,22
14	0,0184	0,0296	60,58	19,42

Наименьшее отклонение от максимальной эффективности, составившее в среднем 11,78%, получилось в точке №8, при этом видно, что продольное смещение между приемной и передающей частями катушек не является наименьшим среди других расчетных значений, на итоговое значение эффективности в большей степени повлияло поперечное смещение, которое среди экспериментов в среднем получилось меньше, чем в других точках. Это обусловлено тем, что в точке №8 была наиболее ровная поверхность позиционирования. Также это подтверждается значениями углов наклона поверхностей позиционирования из таблицы 2.

Таблица 2. Углы наклона поверхностей в точках конечного позиционирования

№ точки	Угол наклона поверхности, град	№ точки	Угол наклона поверхности, град
1	17,42	8	0
2	12,05	9	1,12
3	14,53	10	10,01
4	14,89	11	18,77
5	12,65	12	19,99
6	6,83	13	17,08
7	6,59	14	19,33

В точке позиционирования №8 поверхность имеет наклон 0° , то есть конечное позиционирование платформ происходило на ровной поверхности. Ближайшее значение угла наклона поверхности к точке №8 имеет точка №9. Также можно наблюдать, что разница между наклонами поверхностей позиционирования несопоставима с разницей изменения эффективности в этих точках. Это может быть обусловлено наличием локальных неровностей в окрестности точки позиционирования мобильных роботов.

Алгоритм конечного позиционирования, как составляющее метода оценки времени заряда аккумулятора, позволил в среднем получить отклонение от η_{max} равное примерно 15%.

На рисунке 6 приведены средние значения эффективности и смещений по каждому эксперименту.

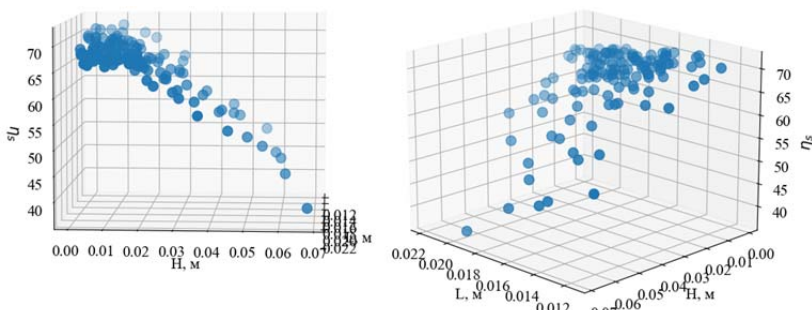


Рис. 6. Графическое представление расчетных значений эффективности в зависимости от смещений

Полученная зависимость имеет схожий нелинейный характер, что и характеристики, представленные в [4]. По приведенному рисунку видно, что изменение поперечного смещения меньше сказывается на эффективности, чем изменение продольного смещения между приемной и передающей катушками.

Также с помощью технического зрения и ArUco-маркеров были определены продольные и поперечные углы смещения катушек относительно друг друга. Третий угол, который отвечает за поворот относительно оси симметрии катушки, не должен влиять на эффективность передачи энергии, поскольку в БСПЭ ориентация магнитного поля приемной катушки повторяет ориентацию поля передающей, значит, изменение данного угла не должно значительно сказываться на эффективности. Диаграмма со средними величинами эффективности, соответствующими каждой точке, приведена на

рисунке 7. Стоит отметить, что данные углы были учтены при расчете эффективности.

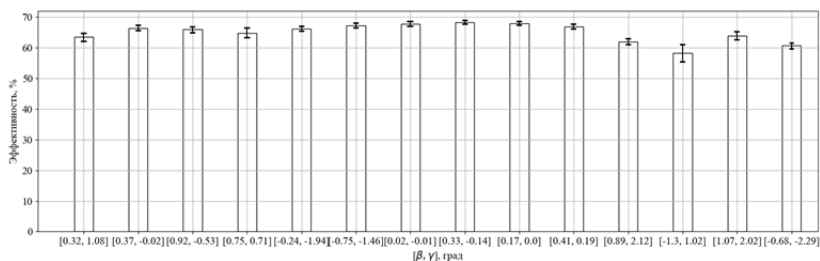


Рис. 7. Диаграмма со средней расчетной эффективностью и угловыми смещениями

Из представленной выше диаграммы следует, что заряжающий робот останавливался со средним значением продольного углового смещения $0,05^\circ$, в случае с поперечным угловым смещением среднее значение составило $0,16^\circ$. При этом максимальное продольное угловое смещение среди всех экспериментов составило $2,58^\circ$, поперечное – $4,86^\circ$.

Также была произведена оценка времени заряда в каждом эксперименте по всем 14 точкам. По формуле (6) и усредненным данным, полученным после симуляций, было определено среднее время заряда робота-рабочего для 14 вариантов точек, что приведено в виде диаграммы на рисунке 8. Для расчетов было принято, что $C_t = 70$ Вт·ч, $P_{1(max)} = 20$ Вт. Отметим, что величина p из формулы (4) при этом была принята 60%, следовательно, робот-рабочий не является полностью обесточенным.

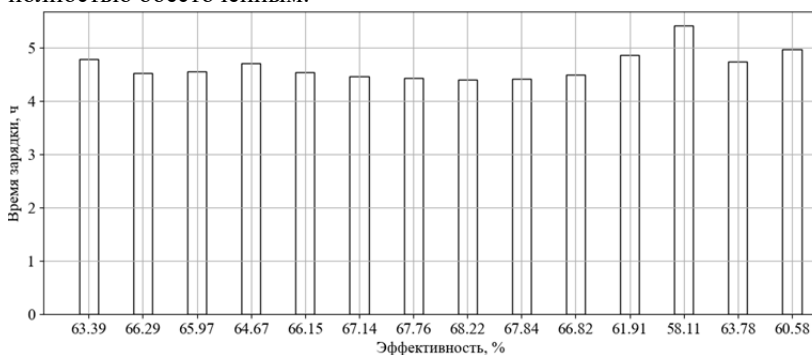


Рис. 8. Диаграмма с прогнозом времени заряда на основании расчетных значений эффективности БСПЭ

По представленной выше диаграмме с помощью применения разработанного метода можно предварительно оценить, сколько времени необходимо для заряда аккумулятора мобильного робототехнического средства. Так, по диаграмме видно, что может потребоваться более 5 часов для заряда с учетом того, что заряжающий робот двинется из точки №12, при эффективности 58,11%. Наиболее быстро процесс заряда может пройти в точках №7-9, в данных точках в среднем были получены наибольшие значения эффективности ввиду отсутствия значительных локальных неровностей поверхности конечного позиционирования.

Таким образом, разработанный метод позволяет предварительно оценить эффективность передачи энергетических ресурсов и в дальнейшем уменьшить время заряда робота-рабочего путем выбора точек конечного позиционирования, в которых значительно (более, чем на 5%) отличается эффективность передачи энергии. Кроме того, с помощью разработанного метода возможно корректирование положений робототехнических средств после позиционирования.

6. Заключение. Предложенный в работе метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами основан на применении алгоритма конечного позиционирования данных роботов, а также на определении показателя эффективности передачи энергии в соответствии с моделью энергетических характеристик БСПЭ [4]. С помощью разработанного алгоритма конечного позиционирования заряжающий робот сближается с роботом-рабочим для передачи энергетических ресурсов. Использование двух ArUco-маркеров на роботе-рабочем для взаимного позиционирования роботов позволяет уточнить относительное положение и определить ориентацию центра передней части заряжающего робота относительно точки конечного позиционирования.

Полученные после экспериментов в симуляторе Gazebo продольные смещения можно уменьшить путем сокращения расстояния остановки, которое для экспериментов было взято 0,01 м. При этом потребуются корректирование закона управления для обеспечения большего быстродействия при остановке робота, чтобы избежать возможных столкновений. Также для экстренной остановки заряжающего робота можно воспользоваться дополнительными датчиками, которые позволят определять столкновение робототехнического средства с препятствиями. Увеличение поперечного смещения между мобильными роботами может быть вызвано как возможными ошибками алгоритма движения

робототехнического средства, так и локальными неровностями поверхности, на которой позиционируются роботы.

По полученным оценкам времени заряда аккумулятора было выявлено, что в зависимости от неровностей местности в той или иной точке конечного позиционирования мобильных роботов может значительно отличаться эффективность передачи энергии беспроводным способом. Предложенный метод оценки позволяет определять время и показатель эффективности передачи энергии как на основе данных, полученных в реальных условиях позиционирования роботов, так и на основе моделирования, благодаря чему возможно планирование процесса перераспределения энергетических ресурсов в группе роботов, состоящей из двух и более агентов. Также можно отметить, что применение подхода с определением локальных неровностей посредством анализа карты глубины может позволить улучшить работу метода за счет дополнительной возможности корректирования положения робота при позиционировании.

Кроме того, после позиционирования мобильных роботов возможно повторное использование предложенного метода для корректирования положения между робототехническими платформами и увеличения эффективности передачи энергетических ресурсов.

Литература

1. Rim C.T., Mi C. *Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices* // John Wiley & Sons. 2017. 632 p.
2. Riehl P.S., et al. *Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. vol. 63. no. 3. pp. 780–790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.
3. Cortes I., Kim W. *Autonomous Positioning of a Mobile Robot for Wireless Charging Using Computer Vision and Misalignment-Sensing Coils* // 2018 Annual American Control Conference (ACC). 2018. pp. 4324–4329. <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431723>.
4. Krestovnikov K., Erashov A. *Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils* // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.
5. Won P., Biglarbegian M., Melek W. *Development of an effective docking system for modular mobile self-reconfigurable robots using extended kalman filter and particle filter* // Robotics. 2015. vol. 4. no1. pp. 25–49. <https://doi.org/10.3390/robotics4010025>.
6. Song G., Wang H., Zhang J., Meng T. *Automatic docking system for recharging home surveillance robots* // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. vol. 57. no. 2. pp. 428–435. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955176>.
7. Su K.L., Liao Y.L., Lin S.P., Lin S.F. *An interactive auto-recharging system for mobile robots* // International Journal of Automation and Smart Technology. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 43-53. <http://dx.doi.org/10.5875/ausmt.v4i1.197>.

8. Vongbunyong S., Thamrongaphichartkul K., Worrasittichai N., Takutrua A. Automatic precision docking for autonomous mobile robot in hospital logistics case-study: battery charging // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. vol. 1137. no. 1. pp. 012060. doi:10.1088/1757-899X/1137/1/012060.
9. Zhang X., Li X., Zhang X. Automatic Docking and Charging of Mobile Robot Based on Laser Measurement // 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. vol. 5. pp. 2229–2234. <https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9390995>.
10. Guangrui F., Geng W. Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment // 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). 2017. pp. 79-83. <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291357>.
11. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Autonomous target docking of nonholonomic mobile robots using relative pose measurements // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. vol. 68. no. 8. pp. 7233–7243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3001805>.
12. Barbosa J., et al. Design and validation of an RGB-D based localization system-integration in a docking system // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2015. vol. 80. no. 3. pp. 423–440. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0181-7>.
13. Uyar Y.E.A.M.N., et al. Developing and modelling of satellite docking algorithm // 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. pp. 465–471. <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8002987>.
14. Ivanov D.S., Koptev M.D., Tkachev S.S., Shachkov M.O. Docking algorithm for flexible microsatellite mock-ups on planar air-bearing testbench // Keldysh Institute Preprints. 2017. no. 110. 24 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-110-e>.
15. Barrios L., Collins T., Kovac R., Shen W.M. Autonomous 6D-docking and manipulation with non-stationary-base using self-reconfigurable modular robots // 2016 IEEE/R SJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. pp. 2913–2919. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759451>.
16. Yan Z., et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array // IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 72567–72576. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917791>.
17. Babić A., Mandić F., Vasiljević G., Mišković N. Autonomous docking and energy sharing between two types of robotic agents // IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 29. pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.453>.
18. Guo S., et al. Binocular Camera-based a Docking System for an Amphibious Spherical Robot // 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2018. pp. 1621–1626. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484518>.
19. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-speed tracking with kernelized correlation filters // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2014. vol. 37. no. 3. pp. 583–596. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2345390>.
20. Dombia M., Cheng X., Havyarimana V. An auto-recharging system design and implementation based on infrared signal for autonomous robots // 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). 2019. pp. 894–900. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813317>.
21. Zhang J., Cai L., Chu Y., Zhou Q. A Sectional Auto-docking Charging Control Method for the Mobile Robot // 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2019. pp. 330–335. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816514>.

22. Luo R.C., Huang C.H., Huang C.Y. Search and track power charge docking station based on sound source for autonomous mobile robot applications // 2010 IEEE/R SJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. pp. 1347–1352. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649993>.
23. Quilez R., Zeeman A., Mitton, N., Vandaele J. Docking autonomous robots in passive docks with Infrared sensors and QR codes // International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCOM). 2015. 10 p.
24. Kalaitzakis M., et al. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. pp. 781–789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>.
25. Крестовников К.Д., Черских Е.О. Шабанова А.Р. Схемотехнические и конструктивные решения на основе синхронного выпрямителя для беспроводной системы передачи энергии // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. №4. С. 15. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.018>.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // Radioengineering. 2021. vol. 30. no. 1. pp. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.
27. Сайт с исходными файлами библиотеки OpenCV для языка программирования Python. URL: github.com/opencv/opencv-python (дата обращения 22.09.2021).
28. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots // Springer, Cham: International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2020. pp. 319–330. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3>.
29. Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 24. №4. С. 107–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
30. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. – Pearson Education India, 2009. 408 p.
31. Спецификация мобильной платформы Pioneer 3-AT. URL: www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf (дата обращения 22.09.2021).

Ерашов Алексей Алексеевич — младший научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка алгоритмов управления робототехническими средствами с применением технического зрения и машинного обучения. Число научных публикаций — 9. erashov.a@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

Камынин Константин Валерьевич — программист, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: анализ данных и распознавание образов, машинное обучение в интеллектуальных системах. Число научных публикаций — 0. konstvictorovich@mail.ru; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

Крестовников Константин Дмитриевич — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка модели и алгоритмов для распределения энергетических ресурсов в рое

робототехнических средств путем двунаправленной беспроводной передачи энергии. Число научных публикаций — 25. k.krestovnikov@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

Савельев Антон Игоревич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка математического обеспечения, кроссплатформенных программных средств и мобильных сервисов окружающего киберфизического пространства. Число научных публикаций — 92. saveliev@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-04-21.

Поддержка исследований. РФФ № 20-79-10325.

A. ERASHOV, K. KAMYNNIN, K. KRESTOVNIKOV, A. SAVELIEV
**METHOD FOR ESTIMATING TIME OF WIRELESS TRANSFER
OF ENERGY RESOURCES BETWEEN TWO ROBOTS**

Erashov A., Kamynin K., Krestovnikov K., Saveliev A. Method for Estimating Time of Wireless Transfer of Energy Resources Between Two Robots.

Abstract. The energy capacity of the batteries used as the main power source in mobile robotic devices determines the autonomous operation of the robot. To plan the execution of tasks by a group of robotic tools in terms of time consumption, it is important to take into account the time during which the battery of each individual robot is charged. When using wireless power transfer, this time depends on the efficiency of the power transfer system, on the power of the transferring part of the system, as well as on the level of charge required to recharge. In this paper, we propose a method for estimating the time of transfer of energy resources between two robots, taking into account these parameters. The proposed method takes into account the application of the algorithm for the final positioning of robots, the assessment of linear offsets between robots, includes the calculation of efficiency, as well as the determination of the battery charge time, taking into account the parameters obtained at the previous stages of the method. The final positioning algorithm for robots uses algorithms for processing data from a robot vision system to search for fiducial markers and determine their spatial characteristics to ensure the final positioning of mobile robotic platforms. These characteristics are also used to determine the linear offsets between robots, on which the efficiency of energy transfer depends. To determine it, the method uses a mathematical model of the energy characteristics of the wireless power transfer system and the obtained linear offsets. At the last stage of the method, the time for charging the battery of the mobile robot is calculated, taking into account the data from the previous stages. Application of the proposed method to simulate the positioning of robots in a certain set of points in the working space will reduce the time spent on charging the robot battery when using wireless power transfer. As a result of the simulation, it was determined that the transfer of energy resources between robots took place with an efficiency in the range from 58.11% to 68.22%, and out of 14 positioning points, 3 were identified with the shortest energy transfer time.

Keywords: mobile robotics, wireless power transfer, energy transfer time estimation, positioning of mobile robots, computer vision, ArUco marker.

Erashov Aleksei — Junior researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, SPC RAS. Research interests: development of algorithms for controlling robots using computer vision and machine learning. The number of publications — 9. erashov.a@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

Kamynin Konstantin — Software engineer, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: data analysis and pattern recognition, machine learning in intelligent systems. The number of publications — 0. konstvictorovich@mail.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

Krestovnikov Konstantin — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: development of a model and algorithms for the distribution of energy resources in a swarm of robotic means by bi-directional wireless power transfer. The number of publications — 25. k.krestovnikov@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

Saveliev Anton — Ph.D., Senior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: development of cross-platform software and mobile services of the surrounding cyber-physical space. The number of publications — 92. saveliev@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-04-21.

Acknowledgements. RSF № 20-79-10325.

References

1. Rim C.T., Mi C. Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices. John Wiley & Sons. 2017. 632 p.
2. Riehl P.S., et al. Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. vol. 63. no. 3. pp. 780–790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.
3. Cortes I., Kim W. Autonomous Positioning of a Mobile Robot for Wireless Charging Using Computer Vision and Misalignment-Sensing Coils. 2018 Annual American Control Conference (ACC). 2018. pp. 4324–4329. <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431723>.
4. Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils. Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31.
5. Won P., Biglarbegian M., Melek W. Development of an effective docking system for modular mobile self-reconfigurable robots using extended kalman filter and particle filter. Robotics. 2015. vol. 4. no.1. pp. 25-49. <https://doi.org/10.3390/robotics4010025>.
6. Song G., Wang H., Zhang J., Meng T. Automatic docking system for recharging home surveillance robots. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. vol. 57. no. 2. pp. 428–435. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955176>.
7. Su K.L., Liao Y.L., Lin S.P., Lin S.F. An interactive auto-recharging system for mobile robots. International Journal of Automation and Smart Technology. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 43-53. <http://dx.doi.org/10.5875/ausmt.v4i1.197>.
8. Vongbunyong S., Thamrongaphichartkul K., Worrasittichai N., Takutrua A. Automatic precision docking for autonomous mobile robot in hospital logistics-case-study: battery charging. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. vol. 1137. no. 1. pp. 012060. doi:10.1088/1757-899X/1137/1/012060.
9. Zhang X., Li X., Zhang X. Automatic Docking and Charging of Mobile Robot Based on Laser Measurement. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. vol. 5. pp. 2229-2234. <https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9390995>.
10. Guangrui F., Geng W. Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). 2017. pp. 79–83. <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291357>.
11. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Autonomous target docking of nonholonomic mobile robots using relative pose measurements. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. vol. 68. no. 8. pp. 7233–7243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3001805>.
12. Barbosa J., Cardeira C., Oliveira P., Batista P., Silvestre C. Design and validation of an RGB-D based localization system-integration in a docking system. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2015. vol. 80. no. 3. pp. 423–440. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0181-7>.

13. Uyar Y.E.A.M.N., et al. Developing and modelling of satellite docking algorithm. 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. pp. 465–471. <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8002987>.
14. Ivanov D.S., Koptev M.D., Tkachev S.S., Shachkov M.O. Docking algorithm for flexible microsatellite mock-ups on planar air-bearing testbench. Keldysh Institute Preprints. 2017. No. 110. 24 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-110-e>.
15. Barrios L., Collins T., Kovac R., Shen W.M. Autonomous 6D-docking and manipulation with non-stationary-base using self-reconfigurable modular robots. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. pp. 2913–2919. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759451>.
16. Yan Z., et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array. IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 72567–72576. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917791>.
17. Babić A., Mandić F., Vasiljević G., Mišković N. Autonomous docking and energy sharing between two types of robotic agents. IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 29. pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.453>.
18. Guo S., et al. Binocular Camera-based a Docking System for an Amphibious Spherical Robot. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2018. pp. 1621–1626. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484518>.
19. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-speed tracking with kernelized correlation filters. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2014. vol. 37. no. 3. pp. 583–596. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2345390>.
20. Dombia M., Cheng X., Havyarimana V. An auto-recharging system design and implementation based on infrared signal for autonomous robots. 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). 2019. pp. 894–900. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813317>.
21. Zhang J., Cai L., Chu Y., Zhou Q. A Sectional Auto-docking Charging Control Method for the Mobile Robot. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2019. pp. 330–335. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816514>.
22. Luo R.C., Huang C.H., Huang C.Y. Search and track power charge docking station based on sound source for autonomous mobile robot applications. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. pp. 1347–1352. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649993>.
23. Quilez R., Zeeman A., Mitton N., Vandaele J. Docking autonomous robots in passive docks with Infrared sensors and QR codes. International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCOM). 2015. 10 p.
24. Kalaitzakis M., Carroll S., Ambrosi A., Whitehead C., Vitzilaios N. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. pp. 781–789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>.
25. Krestovnikov K.D., Cherskikh E.O., Shabanova A.R. [Schematic and design solutions based on a synchronous rectifier for a wireless power transmission system]. Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii – Modeling, optimization and information technology. 2019. vol. 7. no. 4. 15 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.018>.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics. Radioengineering. 2021. vol. 30, no. 1. pp. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.

27. Sajt s ishodnymi fajlami biblioteki OpenCV dlja jazyka programirovanija Python [Site with the source files of the OpenCV library for the Python programming language]. Available at: github.com/opencv/opencv-python (accessed 22.09.2021).
28. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2020. pp. 319–330. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3>.
29. Zakharov K.S., Saveliev A.I. [Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space]. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of the Southwest State University. 2021. vol. 24. no. 4. pp. 107–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
30. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. Pearson Education India. 2009. 408 p.
31. Pioneer 3-AT mobile platform specification. Available at: www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf (accessed 22.09.2021).