INFORMATION SYSTEMS ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.058

С.К. Киселев, В.Т. Чан

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ НАРУШЕНИИ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Киселев Сергей Константинович, доктор технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института по специальности «Авиаприборостроение». Заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии, изобретения в области приборостроения, разработки и исследования бортовых систем управления. [e-mail: ksk@ulstu.ru].

Чан Ван Туан, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ, окончил факультет информационных систем и технологий УлГТУ. Имеет статьи в области моделирования и исследования систем управления движением наземных мобильных роботов. [e-mail: bhkqvn@gmail.com].

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы определения нарушения целостности навигационных данных спутниковой навигационной системы (СНС) и управления движением наземных мобильных роботов.

Указаны особенности движения наземного робота, которые влияют на организацию контроля целостности данных. Предложен алгоритм контроля, реализующий методы автономного бортового контроля целостности данных навигационных систем. Алгоритм построен на основе уравнений соответствия сигналов в различных частях системы управления. Алгоритм предназначен для определения неработоспособности СНС, выражающейся в потере сигнала и невозможности решения навигационной задачи. Алгоритм учитывает недетерминированный характер движения наземного робота с возможными остановками в процессе следования по траектории. Рассмотрены варианты реализации алгоритма оценки достоверности для системы управления, содержащей дополнительные датчики перемещения робота, и для аппаратурно-безызыточной системы, не содержащей дополнительных датчиков. Представлены результаты моделирования движения наземного мобильного робота по произвольной траектории при возникновении случаев нарушения целостности навигационных данных. По результатам моделирования показаны особенности работы алгоритма.

Рассмотрены варианты управления роботом при потере целостности навигационных данных. Предложена структура системы и способ управления мобильным роботом при сбоях СНС. Способ основан на выборе режима управления в системе — по измеренным данным положения робота в случае целостности навигационных данных СНС или по данным, вычисленным по модели робота, в противном случае. Реализация способа позволяет избежать значительных отклонений робота от заданной траектории движения на интервалах потери сигнала СНС.

Ключевые слова: наземный мобильный робот, система управления, способ управления, спутниковая навигационная система, движение, навигационные данные, целостность, моделирование, алгоритм.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-4-12

CONTROL OF A GROUND MOBILE ROBOT MOTION IN CASE OF THE NAVIGATIONAL DATA CORRUPTION OF THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEM

Sergei Konstantinovich Kiselev, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute with a degree in Aircraft and Instrument Engineering; Head of the Department of Measuring and Computing System of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles, monographs, patent holder in the field of instrumentation, development and research of onboard control systems. e-mail: ksk@ulstu.ru.

Van Tuan Tran, Postgraduate Student of the Department of Measuring and Computing Systems of UISTU; graduated from the Faculty of Information System and Technologies of UISTU; an author of articles in the field of modeling and research of motion control systems for mobile robots. e-mail: bhkqvn@gmail.com.

Abstract

The article discusses the determination of navigational data corruption, which received by the satellite navigation system as well as traffic control of ground mobile robots.

It also specifies the movement features of ground robots, which affect the data integrity monitoring. It proposes an algorithm of control to implement the methods of autonomous onboard monitoring of the navigational data integrity. The algorithm is based on the equations of signal correspondence in various parts of the control system. It is designed to determine the inoperability of the satellite navigation system that implies the loss of signal and failure in the navigation problem solution. The algorithm takes into account the non-deterministic nature of moving ground robot with possible stops in the process of following the trajectory. The article considers the implementation variants of algorithm to assess reliability for the control system containing additional sensors of the robot's displacement and for the hardware-redundant system containing no additional sensors. The results of modeling the movement of a ground mobile robot along an arbitrary trajectory in case of navigational data corruption are presented. The features of algorithm based on the simulation results are described in the article.

The authors considered variants of robot control in case of navigational data corruption. The structure of the system and a method for controlling a mobile robot in case of satellite navigation system failures are also proposed. The method is based on the control mode in the system, according to the measured data of the position of the robot in the case of navigational data corruption or otherwise according to the data calculated from the robot model. The implementation of the method makes it possible to avoid significant deviations of the robot from a given trajectory of movement at intervals of signal loss of the satellite navigation system.

Keywords: Ground mobile robot, control system, control method, satellite navigation system, motion, navigation data, integrity, simulation, algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией современной мобильной робототехники является переход от телеуправляемых систем, которые требуют непосредственного участия человека для выполнения всех действий робота, к автономным системам, в которых оператор лишь указывает конечные и промежуточные цели [1].

В существующих классификациях роботов есть несколько групп устройств, для которых наиболее важной задачей является навигация. При этом для части роботов важной является локальная навигация (определение текущего положения робота относительно некоторой точки, обычно стартовой, это актуально для роботов, выполняющих задания в пределах заранее известной области, например, здания). Это такие группы роботов, как промышленные транспортные роботы, осуществляющие внутрицеховые и межцеховые перемещения грузов; сервисные роботы для логистических систем; сервисные роботы для профессиональной убор-

ки; сервисные роботы для обследования и технического обслуживания [2].

Для других групп роботов более важной является глобальная навигация (определение абсолютных координат робота). Это такие группы, как сервисные роботы для выполнения технологических операций вне помещений, сервисные роботы для строительства и сноса, роботы для работы в экстремальных условиях, роботы военного и специального назначения [2].

Задача глобальной навигации является наиболее сложной, хотя она может быть решена при помощи датчиков спутниковых навигационных систем (СНС), таких как GPS и ГЛОНАСС. Основными преимуществами использования СНС являются высокая точность определения координат, малое время готовности устройства, отсутствие накопления погрешностей, простота использования и относительная дешевизна бортового приемника СНС [3, 4].

Но у СНС есть существенный недостаток — их применение ограничено зонами доступности сигнала

спутников. На местности со сложным рельефом, в городских условиях, вблизи вышек связи сигнал со спутника принимается неустойчиво и с помехами. В этих случаях происходит нарушение целостности навигационных данных, что может существенно повлиять на точность следования робота по заданной траектории и нарушить выполнение им своих функций [5].

В наиболее ответственных применениях, например, в авиации, для контроля целостности навигационных данных реализуют так называемые функциональные дополнения СНС – внешние методы контроля, когда контроль проводится либо на главной станции управления СНС, либо на контрольно-корректирующей станции. Процедура внешнего контроля достаточно сложна, поскольку требует создания и использования наземной сети [6].

Для мобильных роботов более приемлемым является использование методов, которые позволяют автономно контролировать целостность навигационных данных – методов бортового контроля целостности AAIM (Airborne Autonomous Integrity Monitoring) [7]. Большинство существующих алгоритмов автономного контроля целостности навигационных данных основано на методах статистической теории радиотехнических устройств, например, методе оценок (максимального отличия решения; сравнения дальности; сравнения местонахождения; невязки по методу наименьших квадратов), и фильтрационных методах [8].

Задача управления движением мобильного робота при пропадании сигнала СНС обычно решается комплексированием ее с навигационной системой другого типа. При глобальной навигации чаще всего используется инерциальная навигационная система [9]. Но инерциальные навигационные системы обладают существенным недостатком – ошибка в определении координат объекта накапливается с течением времени, а точность выходной информации зависит от точности чувствительных элементов.

В качестве чувствительных элементов применяют прецизионные дорожостоящие гироскопы и акселерометры, которые сильно усложняют и удорожают систему. Навигационные версии гироскопов должны устанавливаться на стабилизированной платформе. Коммерческая инерциальная навигационная система средней точности стоимостью около 50 тыс. долл. накапливает за час работы погрешность измерения 2000 м. Погрешность более дорогих версий (стоимостью до 200 тыс. долл.) составляет около 0,1% от пройденного пути [10–12].

Инерциальные навигационные системы так же малоэффективны в случаях, когда скорость объекта часто и резко меняется. Эти особенности ограничивают их применение в наземных мобильных роботах малого размера.

Для снижения стоимости робота, экономии энергии бортовых источников питания систему управления стремятся сделать аппаратно-безызбыточной, не содержащей дополнительных датчиков перемещения робота.

1 Постановка задачи

Движение наземного робота при выполнении функциональной задачи является, как правило, недетерминированным процессом. В структуре системы управления роботом обычно присутствуют устройства, которые обеспечивают оценку складывающейся ситуации и изменение параметров и траектории движения. Так, например, в мобильных роботах «Инженер» производства компании «Сервосила» в системе управления используются лазерный сканер, инерциальные датчики, датчики одометрии, система стереозрения и приемник спутниковой навигации [13]. При этом лазерный сканер и система стереозрения предназначены для обнаружения препятствий и корректировки траектории движения для избегания столкновений с ними. Для локализации робота в пространстве используются инерциальные датчики, датчики одометрии, приемник спутниковой навигации.

Таким образом, задача управления плоским движением наземного робота имеет ту особенность, что в процессе выполнения функций робот может неоднократно останавливаться на неопределенное время в разных, заранее неизвестных точках траектории и затем продолжать движение. Такие остановки могут привести к тому, что при использовании известных автономных алгоритмических методов оценки навигационных данных может быть сформирован ложный сигнал об их недостоверности. При разработке алгоритмов оценки целостности навигационных данных необходимо учитывать указанные особенности движения наземных роботов. Кроме того, необходимо рассмотреть возможные варианты управления движением робота при обнаружении недостоверности данных СНС.

2 ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Для корректного обнаружения недостоверности навигационных данных СНС необходимо учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота. Для решения задачи оценки достоверности навигационных данных, получаемых СНС в системе управления наземным мобильным роботом, предлагается использовать методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия [14, 15].

Если, например, робот приводится в движение двумя независимыми ведущими колесами, каждое из которых приводится во вращение собственным электродвигателем, то величина продольной скорости движения робота $V_{\text{пр}}$ определяется как средняя скорость линейного перемещения каждого из колес:

$$V_{\text{пр}} = \frac{(\omega_{\text{п}} + \omega_{\text{л}})}{2} r_{\text{к}}.$$

где $\omega_{\text{п}}$, $\omega_{\text{л}}$ – угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес соответственно; $r_{\text{к}}$ – радиус колеса. Тогда за некоторое время $\Delta t = t_2 - t_1$ робот преодолит расстояние, приближенно равное $S_1 = V_{\text{пр}} \Delta t$.

Когда СНС работает без потери сигнала, то на выходе приемника в момент t_1 будут координаты X_1, Y_1 , а в момент t_2 соответственно X_2, Y_2 , и расстояние, на которое переместится робот за Δt , будет равно S_2 :

$$S_2 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}.$$

Необходимо в процессе движения робота постоянно отслеживать отношение $S = S_2/S_1$, которое при правильной работе СНС будет приблизительно постоянным ($S \approx \text{const}$). Если же нарушится целостность данных, причиной которой будет потеря приемником СНС сигнала, то координаты на выходе приемника не изменятся и S_2 , а соответственно, и S , будут равны нулю. Для вычисления S необходимо знать угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес $\omega_{\text{п}}$, $\omega_{\text{л}}$, т. е. использовать информацию с одометров.

Алгоритм не изменится, если вместо угловых скоростей вращения колес использовать управляющие напряжения на двигатели $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{л}}$ соответственно, т. к. при равномерном движении скорости вращения колес пропорциональны управляющим напряжениям. Оценка достоверности данных СНС в этом случае ведется по сигналу $S' = S_2/S_1'$,

$$\text{где } S_1' = \frac{(U_{\text{п}} + U_{\text{л}})}{2} \Delta t.$$

Такой вариант алгоритма может быть реализован, когда система управления робота является аппаратурно-безызыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения робота.

3 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ НАЗЕМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ СНС

Для оценки работы предложенного алгоритма в среде систем Simulink и MatLab был смоделирован наземный мобильный робот с системой управления на базе СНС (рис. 1).

Моделировалось движение трехколесного робота с двумя независимыми ведущими колесами (блок «Модель робота»), подобного описанному в [16]. Модель робота была дополнена моделью СНС (блок «Модель СНС») [17]. При движении робота по заданной траектории в данные о его координатах модели СНС в случайные моменты времени вводились случайные по длительности интервалы потери сигнала («Блок моделирования потери сигнала») [18]. Моделировалось движение робота по произвольной траектории (блок «Заданная траектория») [19]. Оценка достоверности навигационных данных СНС проводилась по сигналу S' , полученному через управляющие напряжения на двигателях робота по его модели.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА

При нормальном без пропусков сигнале СНС робот следовал по заданной траектории на плоскости XY с допустимыми погрешностями, определяемыми, во-первых, собственной динамикой робота, и, во-вторых, погрешностями определения положения, заданными в модели СНС. При установке интервалов потери сигнала траектория движения робота отличалась от заданной, так как в этих интервалах координаты робота на выходе «Блока моделирования потери сигнала»

Рис. 1. Модель мобильного робота с системой управления на базе СНС

Рис. 2. Траектории движения робота

не обновлялись в соответствии с его перемещением и, следовательно, управляющий сигнал в системе формировался неправильно (рис. 2). При восстановлении правильных координат на выходе СНС робот возвращается к заданной траектории, и погрешность его позиционирования уменьшается.

Общее время движения робота по траектории, приведенной на рисунке 2, составляло 7000 секунд. Для вычисления S_2 и S_1' использовался интервал Δt , равный 5 секундам. Результаты работы алгоритма оценки достоверности навигационных данных СНС приведены на рисунке 3.

На рисунке 3 видно, что в те моменты, когда в данных СНС возникали потери сигнала величина $S' = 0$. В конце каждого интервала потери сигнала СНС восстанавливает работоспособность и измеряет положение робота, в которое он успел переместиться за время потери сигнала, что вызывает импульсное изменение S' .

5 УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПОТЕРЕ СИГНАЛА СНС

Как показывают результаты моделирования, рисунок 3, движение при потере сигнала (и, соответственно, «замерзании» координат на выходе приемника СНС) приводит к значительным отклонениям робота от за-

Рис. 3. Результаты определения интервалов недостоверности данных СНС

данной траектории. Избежать этого можно, если по значению сигнала S (или S') своевременно переключаться на управление от других датчиков, например, одометров, а при восстановлении корректности данных снова возвращаться к управлению от СНС.

Известно, что на практике постоянное управление роботом по координатам, определяемым по данным одометрии, приводит к накоплению значительных погрешностей, т. к. реально пройденные расстояния отличаются от вычисленных по углу поворота и заданному радиусу колес из-за различных влияющих факторов (проскальзывание колес, разные радиусы колес, различие поверхностей, по которым движется робот, и др.). Но, учитывая, что интервалы управления от одометров, в общем случае, будут достаточно короткими (только во время потери сигнала СНС), по сравнению с общим временем движения робота, то использование одометрии не приведет к значительным погрешностям траектории.

В том случае, если система управления движением робота является аппаратурно-безызыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения, то для исключения слишком больших отклонений от заданной траектории, можно, например, на время потери сигнала СНС прекращать движение робота, а при восстановлении целостности продолжать движение. Такой вариант управления будет эффективен, если потеря сигнала на приемнике СНС произошла по причине отсутствия связи с достаточным количеством спутников. По прошествии некоторого времени спутники изменят свое положение, сигнал восстановится, координаты приемника СНС будут определены, и робот сможет продолжить движение по траектории. Время следования робота в точку назначения в этом случае будет заранее неизвестно и непрогнозируемо и, как минимум, возрастет. Если же потеря сигнала произойдет по другим причинам (попадание в зону экранирования сигнала от спутников), то без перемещения робота связь может не восстановиться, и робот не сможет автономно закончить движение.

В таких случаях предлагается переходить во время пропадания сигнала на управление по модели робота. Система в этом случае будет иметь вид, представленный на рисунке 4.

Система управления типовой структуры, состоящая из устройства управления (преобразователи, вычислители, двигатели), объекта управления (робот) и датчика положения (приемник СНС), замкнутая обратной связью по положению, дополнена тремя блоками: блоком определения целостности навигационных данных, который функционирует по описанному выше алгоритму, блоком переключения режима работы и блоком модели робота.

Система работает следующим образом. При движении робота блок определения целостности навигационных данных постоянно контролирует их изменение и при корректных данных с приемника СНС выставляет признак их целостности по значению сигнала S (или S') «1», либо ошибочности — значение «0». Блок переключения режима работы управляется данным признаком. При целостности данных (значение «1») в обратную связь системы управления подаются координаты робота с приемника СНС. При потере сигнала и ошибочности данных с приемника СНС (значение «0») в обратную связь поступают координаты робота, вычисленные по его модели. Необходимая для этого модель содержит динамическую модель робота с включением модели двигателей. Для данной модели входными сигналами являются значения управляющих напряжений на двигатели U_{Π} и $U_{Д'}$, а выходными — вычисленные координаты робота [20]. Следовательно, на интервалах пропадания сигнала СНС управляющее воздействие формируется по разности координат, определяемых требуемой траекторией движения, и координат, вычисленных по модели робота. В системе происходит выбор режима управления — по измеренным данным положения робота или по данным, вычисленным по его модели.

Рис. 4. Система управления мобильным роботом при потере сигнала СНС

Рис. 5. Траектория движения робота с системой управления с выбором режима работы

Работа предложенной системы с выбором режима управления была смоделирована, результаты представлены на рисунке 5.

При моделировании были сохранены условия, которые задавались при получении траектории на рисунке 2 – количество и длительность интервалов пропадания сигнала СНС. Результаты моделирования показывают, что траектория движения робота близка к требуемой, значительных погрешностей не возникает.

Ограничения при использовании предложенного способа управления аналогичны ограничениям управления по данным с датчиков угла поворота колес. Модель не учитывает факторы, которые были указаны для одометров и при длительном движении по модельным данным будут накапливаться погрешности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации в наземных мобильных роботах на основе уравнений соответствия сигналов в различных частях системы управления предложен алгоритм определения неработоспособности СНС, выражающейся в потере сигнала и невозможности решения навигационной задачи. Алгоритм учитывает недетерминированный характер движения наземного робота с возможными остановками в процессе следования по траектории. Рассмотрены варианты реализации алгоритма оценки достоверности навигационных данных для системы управления, содержащей дополнительные датчики перемещения робота и для аппаратно-безызыточной системы, не содержащей дополнительных датчиков. Результаты моделирования движения наземного мобильного робота по произвольной траектории при возникновении случаев нарушения целостности навигационных данных показали особенности работы предложенного алгоритма.

Рассмотрены варианты управления роботом при потере целостности навигационных данных. Предложена структура системы и способ управления мобильным роботом при сбоях СНС. Способ основан на выборе режима управления в системе — по измеренным данным положения робота в случае целостности навигационных данных СНС или по данным, вычисленным по модели робота, в противном случае. Реализация способа позволяет избежать значительных отклонений робота от заданной траектории движения на интервалах потери сигнала СНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минин А.А. Навигация и управление мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером : дис. ... канд.техн. наук. 05.02.05. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2008. 182 с.
2. Технологии робототехники. Агентство промышленного развития Москвы. URL: <https://investmoscow.ru/media/3340361/05-технологии-робототехники.pdf> (дата обращения: 27.04.2021).
3. Jurišica, Ladislav & Duchoň, František & Kastan, Dusan & Babinec, Andrej. (2012). High Precision GNSS Guidance for Field Mobile Robots. International Journal of Advanced Robotic Systems. 9.1.10.5772/52554.
4. Сурков В.О. Системы навигации подвижных наземных объектов и их характеристики // Молодой ученый. 2015. № 9 (89). С. 298–302. URL: <https://moluch.ru/archive/89/18270/> (дата обращения: 18.04.2021).
5. Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электронприбор», 2004. 208 с.
6. Михайлов С., Кульнев В. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополне-

ний к спутниковым радионавигационным системам // Беспроводные технологии. 2006. №3 (04). С. 61–69.

7. Иванов А.В. Автономные системы контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. 2014. № 7. С. 55–64.

8. Иванов А.В., Негуляева А.П., Москвитин С.П. Автономный контроль целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем методами сравнения и невязок // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22, № 3. С. 358–367.

9. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: Электроприбор, 2009. 276 с.

10. Бобровский С. Навигация мобильных роботов (ч. 1) // Журнал PC Week/RE. 2004. № 9 (423). С. 52.

11. Бобровский С. Навигация мобильных роботов (ч. 2) // Журнал PC Week/RE. 2004. № 10 (424). С. 53.

12. Бобровский С. Навигация мобильных роботов (ч. 3) // Журнал PC Week/RE. 2004. № 11 (425). С. 45.

13. Мобильные роботы Сервосила «Инженер». URL: <https://www.servosila.com/media/doc-ru/Servosila-Mobile-Robots-Engineer-Brochure-Rus.pdf> (дата обращения: 11.03.2021).

14. Изерман Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение // Приборы и системы управления. 1998. № 4. С. 56–70.

15. Gertler J. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation // Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS (Baden-Baden, 1991). Oxford: Pergamon Press, 1991. Vol. 1. pp. 9–21

16. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов / С.М. Власов, В.И. Бойков, С. В. Быстров, В.В. Григорьев. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 169 с.

17. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации / Национальный авиационный университет. К.: Холтех, 2010. 520 с.

18. Чан В.Т., Киселев С.К. Контроль целостности навигационных данных, используемых для управления мобильным роботом // Информатика и вычислительная техника. XII Всерос. науч.-тех. конф. аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2020 (Россия, г. Ульяновск. 15-16 июня 2020 г.): сб. науч. тр. под общ. ред. В.Н. Негоды. Ульяновск: УлГТУ, 2020. С. 260–270.

19. Чан В.Т., Киселев С.К. Формирование траектории для исследования движения мобильных роботов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 54-й науч.-тех. конф. В 3 ч. Ч. 2. Ульяновск: УлГТУ, 2020. С. 133–136.

20. Сатышев А.С., Каптюк И.В. Динамическая модель мобильного колесного робота // Молодёжь и наука: сб. матер. VIII Всерос. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section12.html> (дата обращения 27.04.2021).

REFERENCES

1. Minin A.A. *Navigatsiia i upravlenie mobilnym robotom, osnashchennym lazernym dalnomerom*. Dis. kand. tekhn. nauk. 05.02.05. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana [Navigation and Guidance of Robot Equipped by Laser Ranging Device. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 2008. 182 p.

2. *Tekhnologii robototekhniki. Agentstvo promyshlennogo razvitiia Moskvy* [Robotic Technologies. Moscow Industrial Development Agency]. Available at: <https://investmoscow.ru/media/3340361/05-tekhnologii-robototekhniki.pdf> (accessed 27.04.2021).

3. Jurišica, Ladislav & Duchoň, František & Kastan, Dusan & Babinec, Andrej. (2012). High Precision GNSS Guidance for Field Mobile Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9.1.10.5772/52554.

4. Surkov V.O. Sistemy navigatsii podvizhnykh nazemnykh obektov i ikh kharakteristiki [Navigation Systems of Mobile Ground Facilities and System Characteristics]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2015, no. 9 (89), pp. 298–302. Available at: <https://moluch.ru/archive/89/18270/> (accessed: 18.04.2021).

5. Dmitriev S.P., Kolesov N.V., Osipov A.V. *Informatsionnaia nadezhnost, kontrol i diagnostika navigatsionnykh sistem* [Information Reliability, Inspection, and Diagnosis of Navigation Systems]. St. Petersburg, GNTs RF OAO “Kontsern “TsNII Elektropribor”, 2004. 208 p.

6. Mikhailov S., Kulnev V. Analiz napravlenii i sostoiianiia razrabotok funktsionalnykh dopolnenii k sputnikovym radionavigatsionnym sistemam [Analysis of Development Directions and Progress of Functional Up-Dates to the Satellite Radio Navigation Systems]. *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless Technologies], 2006, no. 3 (04), pp. 61–69.

7. Ivanov A.V. Avtonomnye sistemy kontrolya tselostnosti navigatsionnykh dannykh sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem [Autonomous System of Monitoring the Integrity of Navigation Data of Satellite Navigation Systems]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2014, no. 7, pp. 55–64.

8. Ivanov A.V., Neguliaeva A.P., Moskvitin S.P. Avtonomnyi kontrol tselostnosti navigatsionnykh dannykh sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem metodami sravneniia i neviazok [Autonomous Integrity Monitoring System of Satellite Navigation System Navigation Data Using Method of Comparison and Method of Residuals]. *Vestnik TGTU* [Transactions of Tabov State Technical University], 2016, vol. 22, no. 3, pp. 358–367.

9. Matveev V.V., Raspopov V.Ia. *Osnovy postroeniia besplatformennykh inertsiialnykh navigatsionnykh sistem* [The Inertial Strapdown Systems Framework]. St. Petersburg, Elektropribor Publ., 2009. 276 p.

10. Bobrovskii S. Navigatsiia mobilnykh robotov (ch. 1) [Mobile Robot Navigation. Part 1]. *Zhurnal PC Week/RE* [PC Week/RE Journal], 2004, no. 9 (423), p. 52.

11. Bobrovskii S. Navigatsiia mobilnykh robotov (ch. 2) [Mobile Robot Navigation. Part 2]. *Zhurnal PC Week/RE* [PC Week/RE Journal], 2004, no. 10 (424), p. 53.
12. Bobrovskii S. Navigatsiia mobilnykh robotov (ch. 3) [Mobile Robot Navigation. Part 3]. *Zhurnal PC Week/RE* [PC Week/RE Journal], 2004, no. 11 (425), p. 45.
13. *Mobilnye roboty Servosila "Inzhener"* [Mobile Robots Servosila "Inzhener"]. Available at: <https://www.servosila.com/media/doc-ru/Servosila-Mobile-Robots-Engineer-Brochure-Rus.pdf> (accessed 11.03.2021).
14. Izerman R. Perspektivnye metody kontrolya, obnaruzheniia i diagnostiki neispravnostei i ikh primeneniie [Application of Prospective Methods for Testing, Detecting, and Diagnosing Faults]. *Pribory i sistemy upravleniia* [Instruments and Control Systems], 1998, no. 4, pp. 56–70.
15. Gertler J. Analytical Redundancy Methods in Fault Detection and Isolation. *Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS* (Baden-Baden, 1991). Oxford, Pergamon Press, 1991, vol. 1, pp. 9–21.
16. Vlasov S.M., Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigorev V.V. *Beskontaktnye sredstva lokalnoi orientatsii robotov* [Noncontact Means of Local Robot Orientation]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017. 169 p.
17. Konin V.V., Kharchenko V.P. *Sistemy sputnikovoi radionavigatsii*. Natsionalnyi aviatsionnyi universitet [Satellite Radio Navigation Systems. National Aviation University]. Kiev, Kholtekh Publ., 2010. 520 p.
18. Tran V.T., Kiselev S.K. Kontrol tselostnosti navigatsionnykh dannnykh, ispolzuemykh dlia upravleniia mobilnym robotom [Data Integrity Monitoring used for Mobile Robot Guidance]. *Informatika i vychislitelnaia tekhnika. XII Vseros. nauch.-tekh. konf. aspirantov, studentov i molodykh uchenykh IVT-2020 (Russia, city of Ulyanovsk. 15–16 Jun., 2020). Sb. nauch. tr. pod obshch. red. V.N. Negody* [Proc. of 12th Russian Sci.-Tech. Conf. of Postgraduates, Students, and Young Scientists on Informatics and Computer Engineering, IVT-2020, ed. V.N. Negoda]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2020, pp. 260–270.
19. Tran V.T., Kiselev S.K. Formirovaniie traektorii dlia issledovaniia dvizheniia mobilnykh robotov [Path Generation for Researching the Mobile Robot Movement]. *Vuzovskaia nauka v sovremennykh usloviiax. Sb. mater. 54-i nauch.-tekh. konf. v 3 ch. Ch. 2* [Proc. of 54th Sci.-Tech. Conf. on Academic Research under Present-Day Conditions in three parts. Part 2]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2020, pp. 133–136.
20. Satyshev A.S., Kaptiuk I.V. Dinamicheskaiia model mobilnogo kolesnogo robota [A Dynamic Model of a Mobile Wheeled Robot]. *Molodezh i nauka. Sb. mater. VIII Vseros. nauch.-tekh. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posviashchennoi 155-letiiu so dnia rozhdeniia K.E. Tsiolkovskogo* [Proc. of 8th Russian Sci.-Tech. Conf. of Postgraduates, Students, and Young Scientists devoted to the 155th K.E. Tsiolkovskii's Anniversary]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2012. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section12.html> (accessed 27.04.2021).