

В.В. Соловьев, В.И. Финаев, В.В. Шадрина, И.В. Пушнина

**НАВИГАЦИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОММУНИКАЦИЙ В ГРУППЕ
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ***

Рассмотрена задача навигации для управления движением автономного мобильного робота (подвижного объекта) в неопределенной среде. Осуществлена постановка задачи ориентации в пространстве подвижного объекта при условии, что ориентация подвижного объекта происходит при отсутствии информации от спутника, а обработка навигационных данных от локальных систем осуществляется путем интегрирования разных данных. Выполнен анализ и определены достоинства и недостатки двух основных групп методов навигации: локальной и глобальной навигации. Предложен комбинированный способ навигации для автономного мобильного робота. Сделан краткий обзор наиболее известных научных работ, в которых приведено описание и показано применение метода комплексирования разнородных навигационных данных для задач локальной навигации мобильного робота. Рассмотрена структура интегрированной системы локальной навигации со схемой комплексирования навигационных измерителей, в которую входят: блок акселерометров, блок гироскопов, фильтр Калмана. Сущность предложенного в настоящей работе метода оценки положения и ориентации двухколесного мобильного робота состоит в комплексировании данных одометрии, магнитного компаса и инициальной навигационной системы с применением возможностей расширенного фильтра Калмана. Приведена математическая модель расширенного фильтра Калмана. Рассмотрен практический пример построения математической модели, использующей расширенный фильтр Калмана. Применение модели обеспечивает повышение точности определения координат подвижного объекта и способствующая эффективно решению задачи коммуникации группы подвижных объектов. В примере рассмотрено движение подвижного объекта по окружности, прямолинейное движение и движение подвижного объекта по синусоиде. Моделирование выполнено в среде MathLab и показало эффективные результаты применения предложенного метода комплексирования разнородных навигационных данных на основе выполнения интегрирования разных данных.

Навигационная система; подвижной объект; фильтр Калмана; ИНС; одометрия; комплексирование данных.

V.V. Soloviev, V.I. Finaev, V.V. Shadrina, I.V. Pushnina

NAVIGATION FOR COMMUNICATION IN A GROUP OF VEHICLES

In this paper the problem of navigation for motion control of the autonomous mobile robot (mobile object) in an uncertain environment is considered. Formulated is the problem of orientation in the space of the mobile object, provided that the orientation of a mobile object occurs in the absence of data from the satellite, and the processing of navigation data from local systems is carried out by integrating different data. The analysis is made and the advantages and disadvantages of two main groups of navigation methods: local and global navigation are determined. A combined navigation method for the autonomous mobile robot is proposed. Made is a brief review of the most well-known scientific works, in which the description is given and the application of the method of different navigation data integration for local navigation tasks of the mobile robot is shown. The structure of the integrated system of the local navigation with the scheme of integration of navigation meters is considered, which includes: accelerometer unit, gyroscope unit, Kalman filter. The essence of the proposed method for estimating the position and orientation of a two-wheeled mobile robot consists in combining the data of odometry, magnetic compass and an initial navigation system with the use of the extended Kalman filter. A model of the extended Kalman filter is presented. A practical example of designing a mathematical model using an extended Kalman filter that provides an increase in the accuracy of determining the coordinates of a

* Работа была выполнена при поддержке РФФ 16-19-00001 в Южном федеральном университете.

mobile object and contributes to the effective solution of the problem of communication of a group of mobile objects is considered. In the example there are considered the circular motion, the rectilinear motion and the sinusoid motion of the mobile object. The simulation is performed in MATLAB and provided effective results of the proposed method application.

Navigation system; mobile object; Kalman filter; INS; odometry; data aggregation.

Введение. При управлении группами подвижных объектов (ПО) чрезвычайно важной задачей является обеспечение коммуникаций между отдельными ПО и группами ПО в целом, а также ориентация ПО на местности, особенно в неопределенной среде их передвижения к цели. Понимание того, где находится ПО на местности, а также понимание того, что делает или должен делать отдельный ПО в составе с остальными ПО способствует эффективному выполнению поставленной перед группой ПО задачи. Естественно, что эффективная коммуникация между ПО обеспечивается за счет связи, которая осуществляется по радиоканалам, либо системами технического зрения в пределах видимости. Все же более важной задачей является задача определения местоположения каждого ПО, т.е. знание координат в пространстве передвижения [1–4]. Поэтому точное определение координат ПО является актуальной задачей, а навигационная подсистема в системе управления ПО и в системе телекоммуникаций группы ПО обеспечивает эффективное решение задачи достижения цели.

Если говорить об области применения мобильных ПО как самостоятельно функционирующих (автономных ПО), так и в составе группы ПО, то можно назвать достаточно много технических приложений, например таких, как охрана объектов, мониторинг пространства, в медицинских приложениях, в сельском хозяйстве, в военных целях и прочее. При любом аспекте технического применения ПО всегда требования к навигационным системам ПО являются достаточно жесткими.

Навигационные системы (НС), которые применяют при ориентации ПО, делят на глобальные НС и локальные НС [5–8]. Глобальные НС – спутниковые навигационные системы [9, 10], а локальные НС – это системы для определения координат и ориентации ПО там, где прием радиосигналов от внешних источников ограничен, например, закрытые помещения или при существовании достаточно большого уровня помех [11]. В локальных НС применяют инерциальные системы, энкодеры, радары, видеокамеры и прочее [12]. Применение только одного из перечисленных устройств в задаче определения координат ПО не позволит получить требуемую точность работы НС. Для точного определения координат и ориентации ПО следует применить сразу несколько устройств, обеспечивающих получение навигационной информации.

Также необходимо решать задачу информационного обеспечения НС, т.к. следует обрабатывать с высокой скоростью большие объемы информации, компенсировать погрешности автономных НС, что требует применения соответствующих моделей и математического обеспечения.

Применение в НС нескольких источников при получении навигационной информации для задачи движения ПО и является предметом данной статьи.

Задача ориентации ПО. Ориентация ПО должна происходить при отсутствии информации от спутника, а обработка навигационных данных от локальных систем должна осуществляться интегрированным образом (комплексно) [12]. Таким образом, хотя ПО и утратил связь с источниками сигналов GPS/ГЛОННАС, но необходимо определить его реальное местоположение и направление движения.

Будем считать, что ПО представлен в виде двухколесного мобильного робота [13], т.е. платформа имеет два ведущих колеса, а третье – ведомое, находится впереди. Данный ПО оснащен инерциальной навигационной системой (ИНС) и энкодерами, что позволяет определить его координаты. Также ПО имеет цифровой компас для определения направления перемещения.

Передвижение ПО происходит на плоскости (рис. 1) с применением дифференциального привода, по одному на ведущее колесо. Устойчивость ПО обеспечивается шаровой опорой (ведомым колесом) на передней части ПО.

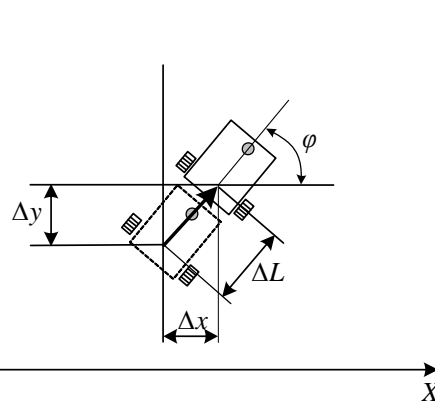


Рис. 1. Положение ПО на плоскости

Управление перемещением и оценка состояния ПО происходит в дискретные моменты времени с шагом Δt . Для каждого шага Δt от ИНС будет получено значение кажущегося ускорения, которые будут интегрированы с показаниями одометра. Такое решение позволит найти координаты и направление перемещения ПО.

Краткий обзор методов комплексной обработки навигационных данных. Задача локальной навигации ПО рассматривалась во многих работах и многими авторами, поэтому определим основные, значимые направления исследований в данной области и рассмотрим ранее полученные результаты.

В работе [14] приведено описание работы алгоритма интегрированного применения одометрии и системы технического зрения для нахождения координат ПО. Система технического зрения реализована с применением видеокамеры, с помощью которой определяются навигационные метки. Абсолютные координаты ПО определяются относительно этих навигационных меток на плоскости. Предложенный авторами алгоритм выполняет интегрирование данных одометрии и системы технического зрения ПО. В алгоритме применен расширенный фильтр Калмана. Недостаток алгоритма состоит в том, что определить (вычислить) координаты ПО можно только при заранее найденных (известных) координатах меток, посредством применения видеокамеры.

В работе [12] показано решение задачи при комбинировании методов глобальной и локальной навигации. Имеется локальная информация датчиков о внешней среде, информация от глобальной НС в виде градиента относительно цели и расстояния до цели. Применены два вида датчиков: тактильный датчик на бампере ПО и ультразвуковой датчик, направленный перпендикулярно к движению ПО. Данный метод эффективен по критерию минимизации энергетических затрат и небольшой стоимости сенсорной системы. Но если имеется карта местности, то этот способ по эффективности уступает применению глобальной НС.

В работе [15] рассмотрена оценка положения ПО при комплексировании сенсорных данных одометрии и магнитного компаса с помехами с применением фильтра Калмана. Фильтр Калмана позволяет пошагово определять состояние ПО при зашумленных измерениях. Так как измерение магнитным компасом – элемент глобальных методов определения координат ПО, то, в отличие от одометрии, на-

копление погрешности во времени отсутствует. Следовательно, измерения магнитным компасом обеспечивают возможность компенсации погрешности, накапливающейся при одометрии.

В работе [16] рассмотрено комплексирование навигационных данных от инерциальной и спутниковой НС также с применением нелинейного фильтра Калмана, причем, навигационное решение от спутникового датчика уточняется с помощью фильтра Калмана, согласно данных инерциальной подсистемы.

В работе [17] рассмотрено определение координат ПО в известной среде. Метод комбинирует оценку по данным одометрии с данными мобильной камеры. Ориентиры, как неподвижные объекты, имеются в базе данных. Расширенный фильтр Калмана применен для коррекции координат и ориентации ПО на основе ошибок между наблюдаемым и оцененным углом для каждого ориентира. Недостаток подхода связан с необходимостью применения внешних ориентиров и знанием их координат.

Анализ позволил сделать вывод, что применение расширенного фильтра Калмана для комплексной обработки данных обеспечивает более точное решение задачи локальной навигации ПО, чем определение координат и ориентация по данным одной НС.

Структура интегрированной системы локальной навигации. Следует отметить достаточно частое применение таких схем комплексирования навигационной информации, как раздельная схема, слабо и жестко связанная схема, а также глубоко интегрированная схема [18].

Раздельная схема – самый простой вариант совместного использования возможностей ИНС и ГЛОНАСС/GPS, которые работают независимо друг от друга. Так как ошибки ИНС растут во времени, следовательно, необходимо применять коррекцию вычислений данных ИНС по данным спутниковой навигации. Это можно сделать при повторных запусках алгоритма ИНС с новыми начальными условиями координат и курса движения ПО. Однако, данная схема не может быть использована при автономной работе ПО в условиях отсутствия спутниковой навигации.

Слабо связанная схема дополняет НС, т.к. появляется связующий блок с алгоритмом интегрального фильтра Калмана. Функциональному разделению подсистем соответствует их физическое разделение. Вычислительные блоки реализуются, как раздельные блоки, между которыми имеются информационные связи, не требующие больших скоростей передачи данных.

В жестко связанной схеме одна из НС измеряет первичные параметры движения. Навигационная система формирует измерения для вычислительного блока с фильтром Калмана. При применении одного фильтра Калмана достоверность работы системы достаточно серьезно снижается, т.к. будет получено одно решение. Также нет сложности в синхронизации измерений НС. Нужен только один генератор тактовых частот. Также есть существенный недостаток – при отказе одной из НС система откажет в целом.

Глубоко интегрированная схема достаточно сложная и не столь гибкая с позиций структурной организации. Оценки координат и ориентации ПО выполняются в интегральном фильтре Калмана. Навигационная система имеет выходы, сигналы с которых для интегрального фильтра Калмана будут входными. В интегральном фильтре Калмана происходит определение ошибок, псевдодальностей и псевдоскоростей, которые затем передаются в приемник, что способствует улучшению характеристик захвата сигнала. Фильтр должен иметь порядок 20 – 40, т.е. для его построения нужна достаточно быстродействующая бортовая вычислительная машина.

На рис. 2 показана слабо связанная схема комплексирования, которая обеспечивает эффективное решение поставленной задачи.

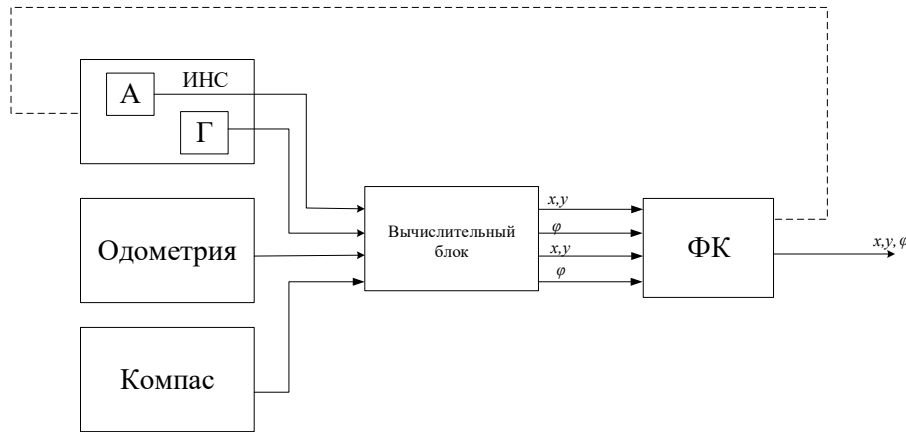


Рис. 2. Схема комплексирования навигационной информации: А – блок акселерометров; Г – блок гироскопов; ФК – фильтр Калмана

На выходе фильтра Калмана будут сформированы оценки инструментальных погрешностей ИНС, т.е. оценки ошибки смещения нулей гироскопов и акселерометров, ошибки масштабных коэффициентов и прочее. Эти оценки ошибок применяются для коррекции показаний инерциальных датчиков. Если при поступлении данных от ИС возникли некоторые перерывы, то получаемые оценки ошибок ИНС и измерительных элементов обеспечивают увеличение точности ИНС при передвижении ПО в автономном режиме.

Предлагаемая схема позволяет получить достаточную избыточность, что позволяет уменьшить ошибки при определении координат и скорости ПО, ориентации и угловой скорости. Комплексирование навигационной информации обеспечивает достаточно большую скорость выдачи информации при требуемой точности и потере спутникового сигнала.

Модель расширенного фильтра Калмана. Алгоритм комплексной обработки информации содержит два этапа.

Перед работой алгоритма выполняется первичный расчет навигационных параметров. Состояние ПО, как колесного мобильного робота, определено координатами базовой точки (x, y) и угловой ориентацией ПО φ . С применением фильтра Калмана оценивается состояние ПО на каждом шаге согласно модели его динамики и данных ИНС, одометрии и компаса, причем эти данные являются зашумленными.

Известны [19] уравнения кинематики и динамики данного вида ПО:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi; \quad \dot{y} = v \sin \varphi; \quad \dot{\varphi} = \omega; \\ v &= \frac{l}{2a_0}(U_1 + U_2); \quad \omega = \frac{l}{2a_0 l}(U_1 - U_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y – координаты ПО; v, ω – линейная и угловая скорости ПО; φ – угловая ориентация ПО относительно оси ординат, коэффициент $a_0 = nc/r$, где n – передаточное число редуктора, c – коэффициент электромеханического взаимодействия, r – радиус колес, l – половина расстояния между колесами ПО, U_1, U_2 – управляющие воздействия для электродвигателей.

Переменные состояния НС определены вектором:

$$Z_{ИНСk} = [x_k \ y_k \ \phi_k]^T. \quad (2)$$

Так как функционирование НС происходит непрерывно во времени, то сигналы на входе системы определены суммой полезного сигнала и случайной помехи измерения:

$$y_{ИНС} = Z_{ИНС} + \Delta z_{ИНС}, \quad (3)$$

$$y_{одометр} = Z_{одометр} + \Delta z_{одометр}, \quad (4)$$

$$y_{компас} = Z_{компас} + \Delta z_{компас} \quad (5)$$

Помеха измерений определена корреляционной функцией. Значения $\Delta z_{ИНС}$, $\Delta z_{одометр}$ и $\Delta z_{компас}$ – не коррелированы.

Алгоритм фильтра Калмана имеет фазы экстраполяции и коррекции [20, 21]. На фазе экстраполяции определяется априорная оценка состояния системы $Z_{ИНС}$. На фазе коррекции определяется апостериорная оценка состояния системы, дополненная текущими измерениями $Z_{компас}$ или $Z_{одометр}$. Изменение состояния системы определено нелинейным разностным уравнением:

$$Z_{ИНС(k+1)} = f(Z_{ИНС(k)}, u_k), \quad (6)$$

где u - вектор управлений.

Измерение по состоянию системы определено нелинейным уравнением:

$$Z_{одометр(k+1)} = h_1(Z_{ИНС(k)}), \quad (7)$$

$$Z_{компас(k+1)} = h_2(Z_{ИНС(k)}), \quad (8)$$

где h_i - матрицы наблюдения.

Произведем дискретизацию модели:

$$Z_{ИНС(k)} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \phi_k \end{bmatrix} = f(Z_{ИНС(k-1)}, u_{k-1}) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + \Delta t v_{k-1} \cos(\phi_{k-1}) \\ y_{k-1} + \Delta t v_{k-1} \sin(\phi_{k-1}) \\ \phi_{k-1} + \Delta t w_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вектор измерений является полным вектором состояния.

В качестве \hat{Z}_{00} берется первое измерение. В качестве P_{00} – ковариационная матрица R_0 шумов измерений, которая является диагональной: $\hat{Z}_{00} = H Z_{ИНС(0)}$, $P_{00} = R$, причем:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{хсенс}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{усенс}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi сенс}^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

1 этап алгоритма. Экстраполяция происходит постоянно и не зависимо от измерений. Предсказание вектора состояния определено зависимостью:

$$\hat{Z}_{k|k-1} = f(\hat{Z}_{k-1|k-1}, u_{k-1}).$$

Предсказание ковариационной матрицы ищется в виде:

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q,$$

$$F_{k-1} = \frac{df}{dx} \Big|_{\hat{Z}_{k-1|k-1}, u_{k-1}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta t v_{k-1} \sin(\phi_{k-1}) \\ 0 & 1 & \Delta t v_{k-1} \cos(\phi_{k-1}) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где F_{k-1} - матрица Якоби дискретной системы.

2 этап алгоритма. Коррекция происходит при наличии данных от измерительного устройства. Расхождение с измерениями определено в виде:

$$\Delta y_k = y_k - H\hat{Z}_{k|k-1}.$$

Матрица усиления определена в виде:

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T(H_kP_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1}.$$

Обновление вектора состояния определено зависимостью:

$$\hat{Z}_{k|k} = \hat{Z}_{k|k-1} + K_k\Delta y_k.$$

Обновление ковариационной матрицы определено зависимостью:

$$P_{k|k} = (I - K_kH_k)P_{k|k-1}.$$

Результаты моделирования. Для проверки эффективности функционирования системы с расширенным фильтром Калмана разработана программа в среде MatLab, содержащая функциональные модули: генератор эталонного сигнала, модуль ИНС, модуль энкодера, модуль компаса, модуль фильтра Калмана. Генератор эталонного сигнала выдает идеальные координаты x , y нахождения ПО. На координаты генератора в модуле ИНС накладывался случайный шум с амплитудой 0,5 м. Модуль энкодера - модель расчета координат ПО по количеству поступающих импульсов, причем в этом модуле через каждые 15 тактов моделирования накладывался случайный шум с амплитудой 0,3 м. В модуле компаса на основе идеальных координат рассчитывался текущий угол φ ориентации ПО.

В модуле фильтра Калмана реализован алгоритм расширенного фильтра Калмана [21]. Считается, что шумы некоррелируемые и стационарные, что позволяет для определения воздействия шумов выбрать диагональную стационарную ковариационную матрицу R . Таким образом, зашумленные показания ИНС корректировались с помощью показаний энкодера и компаса.

При имитационном моделировании были получены графики, определяющие ошибку позиции ПО с течением времени (см. рис. 3-5).

При выполнении 1-го эксперимента (рис. 3) ПО проходит 15 кругов по окружности радиусом 5 м со скоростью 0,25 м/с. Показания навигационных параметров считываются каждый такт с интервалом $\Delta t=1$ сек на протяжении 2000 тактов. Длина пройденного пути МР составила 499,9 м.

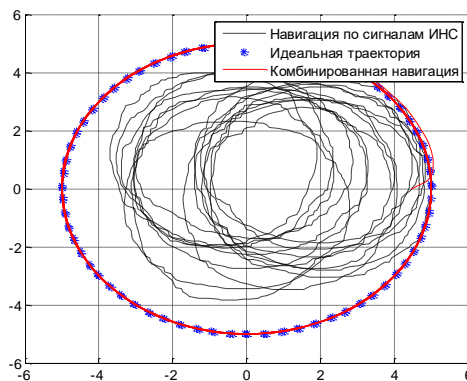


Рис. 3. Движение ПО по окружности

Максимальное отклонение ПО от идеальной траектории по показаниям комплексированной системы с использованием расширенного фильтра Калмана составило 0,8 м, следовательно, навигация только по показаниям ИНС дает неудовлетворительные результаты.

При выполнении второго эксперимента (рис. 4) ПО движется по прямой со скоростью 1,41 м/с. Длина пройденного пути составила 2892 м, а максимальное отклонение от идеальной траектории с применением расширенного фильтра Калмана составило 1,25 м.

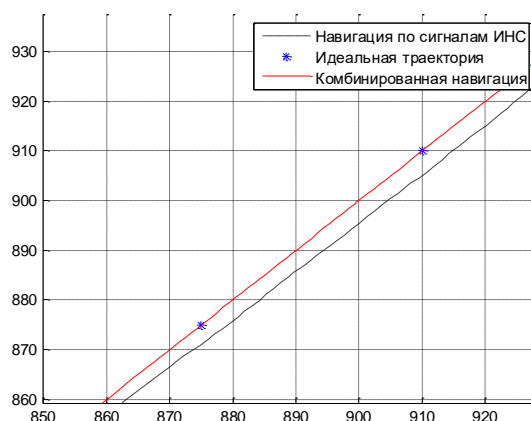


Рис. 4. Прямолинейное движение ПО

При выполнении 3-го эксперимента (см. рис. 5) ПО движется по синусоиде со скоростью 1,42 м/с. Длина пройденного пути составила 2829 м, а максимальное отклонение позиции ПО от идеальной траектории с использованием разработанного фильтра Калмана составило 1,26 м.

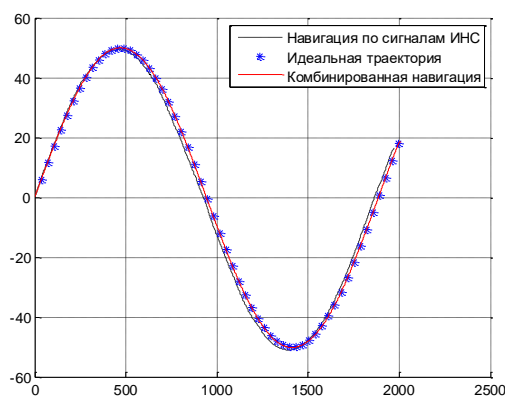


Рис. 5. Движение ПО по синусоиде

Выводы. Предложен и исследован алгоритм комплексирования данных ИНС, энкодера и компаса для решения задачи локальной навигации автономного ПО. Отличие системы комплексирования состоит в применении расширенного фильтра Калмана, что обеспечивает уменьшить ошибки при определении координат и скорости ПО, ориентации и угловой скорости. Выполнено имитационное моделирование, которое показало эффективность применения алгоритма комплекс-

сирования навигационной информации не только на прямолинейных, но и на криволинейных траекториях движения ПО. Применение данного алгоритма позволяет решать важную техническую задачу навигационного обеспечения, в данном случае, двухколесного ПО, как мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Костишин М.О., Жаринов И.О., Сулов В.Д.* Автономная навигация мобильного робота на основе ультразвукового датчика измерения расстояний // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 162-163.
2. *Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Юценко А.С.* Автономные мобильные роботы – навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 48-67.
3. *Голован А.А., Гришин А.А., Жихарев Д.Н., Ленский А.В., Пахомов В.Б.* Алгоритмы решения задачи навигации мобильных роботов. – М.: Институт механики МГУ, 1999. – 54 с.
4. *Чернухин Ю.В., Доленко Ю.С., Бутов П.А.* Нейросетевой подход к решению задачи локальной навигации интеллектуальными мобильными роботами в условиях, приближенных к реальной среде // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 80-84.
5. *Бобровский С.* Навигация мобильных роботов (в 3 ч.). Ч. 1 // PC Week/RE. – 2004. – № 9. – С. 52.
6. *Степанов О.А.* Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. – 3-е изд. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 370 с.
7. Обзор глобальных навигационных систем. – <http://www.vspcenter.ru/glonass/system/> (дата доступа 27.03.2017).
8. *Shahida Khatoon and Ibraheem.* Autonomous Mobile Robot Navigation by Combining Local and Global Techniques // International Journal of Computer Applications (0975–8887). – 2012. – Vol. 37, No. 3.
9. *Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г.* Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
10. *Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews.* Global Positioning, Inertial Navigation and Integration. SBN: 978-0-470-09971-1. August 2007. – 416 p.
11. *Черноожкин В.А., Половко С.А.* Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб.: Изд-во СПб НИУИТМиО, 2008. – № 57.
12. *Защелкин К.В., Калинин В.В., Ульченко Н.О.* Реализация комбинированного способа навигации автономного мобильного робота // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 09 (85). Компьютерные системы и компоненты. – С. 102-109.
13. *Soloviev V.V, Pshikhopov V.K, Shapovalov I.O, Finaev V.I and Beloglazov D.A.* Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No. 21. – P. 41954-41961. – ISSN 0973-4562.
14. *Котов К.Ю., Мальцев А.С., Соболев М.А., Филиппов М.Н.* Совместное использование одометрии и системы технического зрения для оценки координат мобильного робота // Труды XIII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – С. 230-236.
15. *Меркулов В.В., Носенков Д.А.* Метод оценки позиции мобильного робота на основе комплексирования сенсорных данных одометрии и магнитного компаса с использованием фильтра Калмана // Сб. научных трудов SWorld. – Вып. 2. – Т. 1. – Одесса, 2013. – С. 83-87.
16. *Грибовский А.В., Козадаев К.В., Красовский С.П.* Информатика: Ежеквартальный научный журнал // Объединенный институт проблем информатики НАН Республики Беларусь. – Минск, 2012. – № 1. – С. 106-114.
17. *Chenavier F., Crowley J.* Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 12-14, 1992. – P. 2588-2593.
18. *Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г.* Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.

19. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов / под ред. Пшихопова В.Х. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с.
20. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill. Course 8. SIGGRAPH 2001.
21. Ваарман В.В., Троянов Д.А., Соловьев В.В., Белоглазов Д.А. Разработка и исследование методов комплексной обработки навигационной информации автономного мобильного робота // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2016): Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. - С. 27-33.

REFERENCES

1. Kostishin M.O., Zharinov I.O., Suslov V.D. Avtonomnaya navigaciya mobil'nogo robota na osnove ul'trazvukovogo datchika izmereniya rasstoyaniy [Autonomous navigation of a mobile robot based on an ultrasonic distance measurement sensor], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informacionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Journal scientific and technical of information technologies, mechanics and optics], 2013, No. 2 (84), pp. 162-163.
2. Mikhaylov B.B., Nazarova A.V., Yushchenko A.S. Avtonomnye mobil'nye roboty – navigaciya i upravlenie [Autonomous mobile robot navigation], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 48-67.
3. Golovan A.A., Grishin A.A., Zhiharev D.N., Lenskiy A.V., Pahomov V.B. Algoritmy resheniya zadachi navigacii mobil'nykh robotov [Algorithms for solving the problem of mobile robots navigation]. Moscow: Institut mekhaniki MGU, 1999, 54 p.
4. Chernuhin Yu.V., Dolenko Yu.S., Butov P.A. Neyrosetevoy podkhod k resheniyu zadachi lokal'noy navigacii intellektual'nymi mobil'nymi robotami v usloviyakh, priblizhennykh k real'noy srede [Neural network approach to solving the problem of local navigation by intelligent mobile robots in conditions close to the real environment], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 80-84.
5. Bobrovskiy S. Navigaciya mobil'nykh robotov [Navigation of mobile robots] in 3 part. Part 1, *PC Week/RE*, 2004, No. 9, pp. 52.
6. Stepanov O.A. Primenenie teorii nelineynoy fil'tracii v zadachakh obrabotki navigacionnoy informacii [Application of the theory of nonlinear filtering in problems of processing of navigation information]. 3 ed. Saint Petersburg: GNC RF CNII «EHlektropribor», 2003, 370 p.
7. Obzor global'nykh navigacionnykh system [Overview of global navigation systems]. Available at: <http://www.vspcenter.ru/glonass/system/> (accessed 27 March 2017).
8. Shahida Khatoon and Ibraheem. Autonomous Mobile Robot Navigation by Combining Local and Global Techniques, *International Journal of Computer Applications (0975–8887)*, 2012, Vol. 37, No. 3.
9. Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G. Sovremennyye informacionnyye tekhnologii v zadachakh navigacii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov [Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned aerial vehicles]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 556 p.
10. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. Global Positioning, Inertial Navigation and Integration. SBN: 978-0-470-09971-1. August 2007, 416 p.
11. Chernozhkin V.A., Polovko S.A. Sistema lokal'noy navigacii dlya nazemnykh mobil'nykh robotov [Local navigation system for land-based mobile robots], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informacionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Journal scientific and technical of information technologies, mechanics and optics]. Saint Petersburg: Izd-vo SPb NIUTMiO, 2008, No. 57.
12. Zashchelkin K.V., Kalinichenko V.V., Ul'chenko N.O. Realizaciya kombinirovannogo sposoba navigacii avtonomnogo mobil'nogo robota [Realization of the combined method of navigation of the Autonomous mobile robot], *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternyye sistemy* [Electrotechnical and computer systems], 2013, No. 09 (85). *Komp'yuternyye sistemy i komponenty* [Computer systems and components], pp. 102-109.
13. Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I and Beloglazov D.A. Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, Vol. 10, No. 21, pp. 41954-41961. ISSN 0973-4562.

14. *Kotov K.Yu., Mal'cev A.S., Sobolev M.A., Filippov M.N.* Sovmestnoe ispol'zovanie odometriy i sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya ocenki koordinat mobil'nogo robota [Joint use of odometry and technical vision system for estimation of mobile robot coordinates], *Trudy XIII Mezhdunarodnoy konferencii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah"* [Proceedings of the XIII International conference "problems of control and modeling in complex systems"]. Samara: Samarskiy nauchnyy centr RAN, 2011, pp. 230-236.
15. *Merkulov V.V., Nosenkov D.A.* Metod ocenki pozicii mobil'nogo robota na osnove kompleksirovaniya sensorykh dannykh odometrii i magnitnogo kompasa s ispol'zovaniem fil'tra Kalmana [The method of estimation of the position of a mobile robot based on the combination of sensory data of odometry and magnetic compass using Kalman filter], *Sb. nauchnykh trudov SWorld* [Collection of scientific papers SWorld]. Issue 2. Vol. 1. Odessa, 2013, pp. 83-87.
16. *Gribovskiy A.V., Kozadaev K.V., Krasovskiy S.P.* Informatika: Ezhekvertal'nyy nauchnyy zhurnal [Informatics: quarterly scientific journal], *Ob'edinennyi institut problem informatiki NAN Respubliki Belarusi* [United Institute of Informatics of the NAS of the Republic of Belarus]. Minsk, 2012, No. 1, pp. 106-114.
17. *Chenavier F., Crowley J.* Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 12-14, 1992*, pp. 2588-2593.
18. *Krasil'shchikov M.N., Sebyakov G.G.* Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov na osnove sovremennykh informacionnykh tekhnologiy [Control and guidance of unmanned aerial vehicles maneuvering on the basis of modern information technology]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 280 p.
19. *Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob'ektov* [Intelligent planning of the trajectories of moving objects], ed. by Pshihopova V.H. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p.
20. *Welch G., Bishop G.* An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill. Course 8. SIGGRAPH 2001.
21. *Vaarman V.V., Troyanov D.A., Solov'ev V.V., Beloglazov D.A.* Razrabotka i issledovanie metodov kompleksnoy obrabotki navigacionnoy informacii avtonomnogo mobil'nogo robota [Development and research of methods of complex processing of navigation information of Autonomous mobile robot], *Informacionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSAU-2016): Sb. trudov HIV Vserossiyskoy nauchnoy konferencii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Information technologies, system analysis and management (ITSAU-2016): Sat. proceedings of the XIV all-Russian scientific conference of young scientists, post-graduates and students]. Taganrog: Izd-vo YUFU, 2016, pp. 27-33.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371773; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Финаев Валерий Иванович – e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Шадрина Валентина Вячеславовна – e-mail: valentina_@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Пушнина Инна Валерьевна – кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Soloviev Victor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371773; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Finaev Valery Ivanovich – e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; the department of automatic control systems; head of the department; dr. of eng. sc.; professor.

Shadrina Valentina Vyacheslavovna – e-mail: valentina_@mail.ru; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Pushnina Inna Valerjevna – the department of automatic control systems; assistant.