# Лабораторный Практикум по Навигации и Управлению Движением Мобильного Робота с Дифференциальным Приводом Колес

Алексей Б. Колкер, Жанна С. Першина
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

***Аннотация*** **– В статье описывается лабораторный стенд, структура и содержание лабораторного практикума, предназначенного для изучения основных компонентов робототехнической платформы NI Robotics Starter Kit 2.0 с дифференциальным приводом колес, базовых принципов, а также средств проектирования и разработки системы навигации и управления движением мобильным роботом.**

***Ключевые слова*** **– Мобильный робот, одометрия, картографирование, недетерминированность.**

## I. Введение

Актуальным направлением развития систем управления в наземной робототехнике является исследования в области ближней навигации мобильных роботов (МР) в условиях частично или полностью недетерминированных внешних сред, что подтверждается рядом публикаций отечественных и международных исследовательских групп.

Навигация и управление движением МР в условиях частичной или полностью недетерминированной среды предполагает решение следующих задач:

- определение текущих координат МР и координат расположения препятствий;
- построение картографической модели внешней среды;
- планирование оптимальной траектории движения;
- управление движением МР.

Отсутствие учебно-методических комплексов, в которых бы в полной мере рассматривались базовые принципы решений обозначенных выше задач, вдохновили авторов на разработку лабораторного практикума, основанного на их личном опыте разработок и исследований в данной области [2] – [5].

## II. Постановка Задачи

Разработка учебно-методических решений для проведения лабораторных занятий, позволяющих:

- овладеть средствами моделирования, проектирования и разработки систем навигации и управления движением МР с использованием встраиваемых систем, в том числе на базе ПЛИС;
- получить знания базовых способов планирования траектории и управления движением МР в условиях частичной недетерминированности внешней среды;
- получить опыт исследовательской работы.

## III. Описание Лабораторного Стенда

В качестве робототехнической платформы используется NI Robotics Starter Kit 2.0 с дифференциальным приводом колес, общий вид которой изображен на Рис. 1.

NI Robotics Starter Kit 2.0 позволяет изучать основные компоненты МР (сенсоры, двигатели, контроллеры и т.п.) и решать ряд практических задач:

- сканирования и картирование местности;
- объезда препятствий;
- планирования траектории движения;
- сопровождение движущегося объекта.

Аппаратная часть платформы NI Robotics Starter Kit 2.0 представляет собой универсальный набор элементов для сборки МР различной степени сложности и функциональности. Она содержит легко монтируемые механические компоненты, электроприводы, модули управления, различные типы датчиков (ультразвуковой датчик, энкодеры).

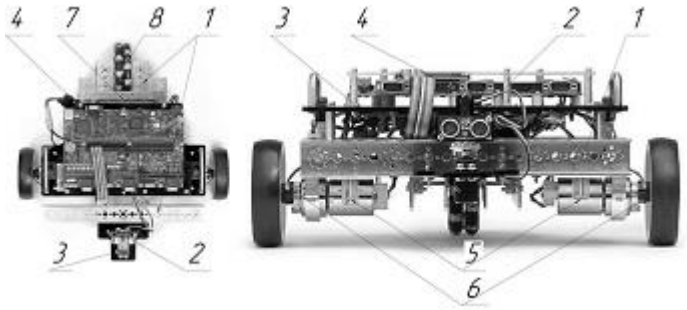


Рис. 1. Общий вид NI Robotics Starter Kit 2.0: *1* – TETRIX платформа; *2* – ультразвуковой датчик расстояния Parallax PING))); *3* – сервопривод; *4* – плата управления на базе NI sbRIO 9632; *5* – электроприводы постоянного тока; *6* – оптические квадратурные энкодеры; *7* – аккумулятор; *8* – омни-колеса

Основные технические характеристики компонентов базовой комплектации представлены в Табл. I. При этом имеется возможность расширения функций системы за счет дополнительных модулей сбора данных с датчиков (лидар, компас, гироскоп и т.д.), GPS-приемника и блока обработки видеоизображений с видеокамеры.



978-1-5090-4069-8/16/$31.00 ©2016 IEEE

NI sbRIO-9632 (Рис. 2) имеет встроенный процессор реального времени и высокопроизводительную ПЛИС, а также линии аналогового и цифрового ввода/вывода на одной плате. Все линии ввода/вывода напрямую соединены с микросхемой ПЛИС. Это позволяет внедрять алгоритмы формирования и обработки сигналов на уровне цифровых логических схем, реализуемых внутри ПЛИС. Микросхема ПЛИС соединена с процессором реального времени при помощи высокоскоростной шины PCI.

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ БАЗОВОЙ КОМПЛЕКТАЦИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ROBOTICS STARTER KIT 2.0

| **Наименование** | **Технические характеристики** |
|---|---|
| Ультразвуковой датчик расстояния Parallax PING))) | диапазон измерения дальности: 0,02-2 м |
| Серводвигатель Hitec HS-485HB | напряжение питания: 4,8/6,0 В<br>крутящий момент: 4800 / 6000 г/см<br>обороты в минуту: 45/ 55 |
| Электроприводы постоянного тока | напряжение питания: 12 В<br>крутящий момент: 3348 г/см<br>обороты в минуту: 152 |
| NI sbRIO-9632 | сетевой интерфейс: Ethernet<br>тактовая частота процессора: 400 МГц<br>память: 256 Мб<br>FPGA: Xilinx Spartan-3<br>каналы цифрового ввода-вывода: 110<br>каналы аналогового ввода: 32<br>каналы аналогового вывода: 4 |

Встроенный процессор реального времени представляет собой промышленный процессор Freescale MPC 5200 с тактовой частотой 400 МГц, который исполняет программы, написанные в LabVIEW Real-Time под управлением операционной системы реального времени VXWorks.

Встроенная ПЛИС представляет собой высокопроизводительную, реконфигурируемую микросхему, которую можно программировать при помощи специализированного модуля LabVIEW FPGA.

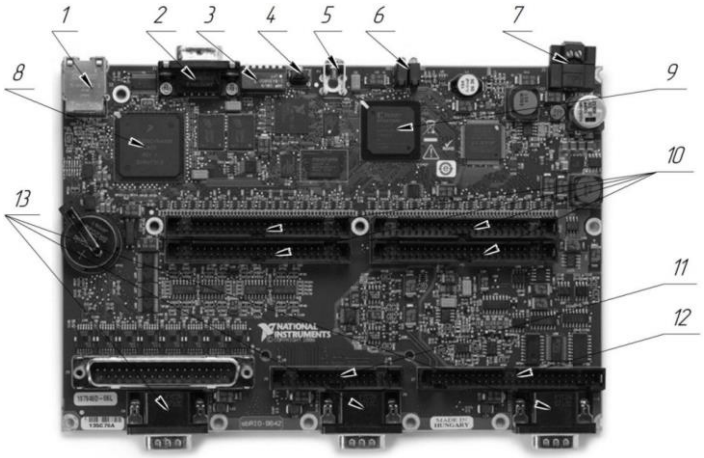


Рис. 2. Общий вид печатной платы NI sbRIO-9632:
*1* – порт Ethernet RJ-45; *2* – последовательный порт RS-232; *3* – DIP переключатели; *4* – кнопка Reset; *5* – ушко заземления; *6* – светодиодные индикаторы; *7* – разъем питания; *8* – процессор реального времени; *9* – микросхема ПЛИС; *10* – цифровой ввод/вывод 3,3 В; *11* – цифровой ввод 24В; *12* – разъем аналоговых входов/выходов; *13* – коннектор для модулей

Среда LabVIEW имеет встроенные функции для передачи данных между ПЛИС и процессором реального времени на NI sbRIO. Более 600 встроенных функций в LabVIEW позволяют создавать многопоточные встраиваемые системы для детерминированного управления, анализа, регистрации данных и создания протоколов связи [1].

## IV. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

### *A. LabVIEW Robotics Environment Simulator*

На первом этапе обучающемуся предлагается ознакомиться с возможностями симулятора LabVIEW Robotics Environment Simulator и библиотеки LabVIEW Robotics Module, а также изучить и освоить процедуру создания и отладки программного проекта. На Рис. 3. Представлен внешний вид интерфейса LabVIEW Robotics Environment Simulator.

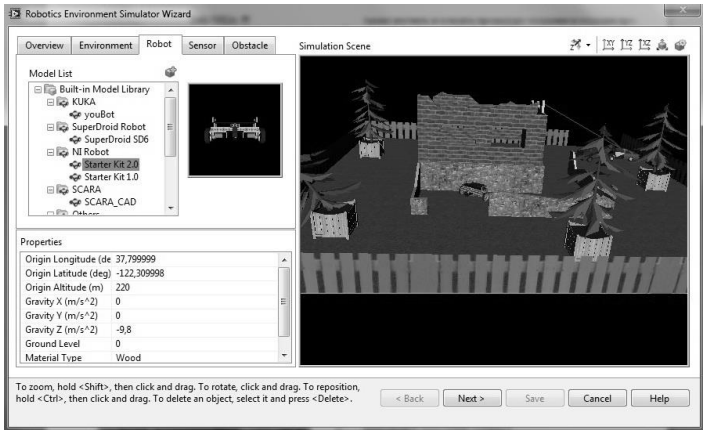


Рис. 3. Внешний вид интерфейса LabVIEW Robotics Environment Simulator

LabVIEW Robotics Environment Simulator позволяет выполнять моделирование МР с необходимой конфигурацией, а также моделирование внешней среды, в которой должен функционировать МР для последующей отладки и тестирования алгоритмов навигации и управления движением МР.

### *B. Базовые принципы управления движением*

Задача управления движением предполагает вычисление значений управляющих сигналов для приводов колес МР, обеспечивающих движение по физически реализуемой траектории. Решение данной задачи в рамках выполнения лабораторного практикума требует изучения кинематической модели МР с дифференциальным приводом колес и базового принципа управления электродвигателями постоянного тока, основанного на широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

*C. Одометрия*

Одним из базовых способов определения текущих координат МР является одометрия [2]. Данный способ основан на данных, получаемых от энкодеров. В связи с этим обучающемуся предлагается изучить устройство, принцип действия и технические характеристики оптического квадратурного энкодера, приобрести навыки проектирования каналов измерения.

Таким образом, зная диаметр колес и используя данные с энкодеров, возможно выполнить расчет пройденного колесом расстояния по формуле (1):

$$L = \pi \cdot d \cdot \frac{n}{N} \qquad (1)$$

$L$ – расстояние пройденное за заданный промежуток времени, $d$ – диаметр колеса, $n$ – суммарное число отсчётов энкодера, $N$ – число отсчетов энкодера за один оборот колеса.

Оценка положения в определенный момент времени МР с дифференциальным приводом колес (Рис. 4) осуществляется по формуле (2):

$$O(t) = O(t_0) + \frac{L_r + L_l}{D} \qquad (2)$$

$L_r$ – расстояние, пройденное правым колесом, $L_l$ – расстояние, пройденное левым колесом, $D$ – ширина робота.

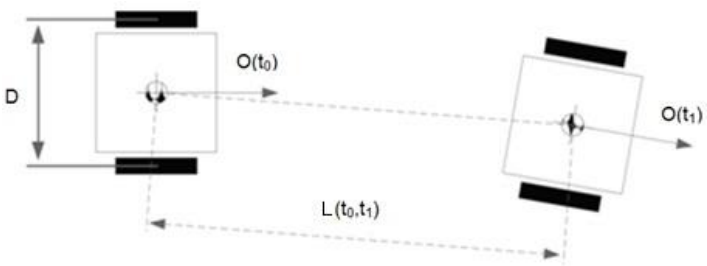


Рис. 4. Оценка положения МР с дифференциальным приводом колес

Расстояние, пройденное за промежуток времени [$t_0$, $t_1$] рассчитывается по формуле (3):

$$L(t_0, t_1) = \frac{L_r + L_l}{2} \qquad (3)$$

Расчет декартовых координат МР выполняется по формулам (4), (5):

$$x(t_1) = x(t_0) + L(t_0 + t_1) \bullet cos(O(t_1)) \qquad (4)$$

$$y(t_1) = y(t_0) + L(t_0 + t_1) \bullet sin(O(t_1)) \qquad (5)$$

Таким образом, пройденную криволинейную траекторию можно аппроксимировать на линейные участки, для которых справедливы вышеприведенные формулы.

*D. Построение картографической модели внешней среды*

Разработка алгоритмов управление движением МР предполагает наличие картографической модели внешней среды. В связи с этим, предлагается рассмотреть модель внешней среды в виде двумерной модели, образованной конечным числом непересекающихся элементов, полностью заполняющих пространство, а также рассмотреть устройство, принцип действия и технические характеристики ультразвукового датчика. Использование ультразвукового датчика в совокупности с серводвигателем позволяет осуществлять сканирование внешней среды в плоскости с необходимым диапазоном и шагом сканирования.

Исходное пространство подвергается разложению на конечное количество дискретных участков. Таким образом, модель может быть представлена прямоугольной сеткой с равномерным шагом, каждая клетка сетки является элементарной ячейкой. Размер клетки выбирается с учетом габаритных размеров робота и свойств его исполнительной системы.

Определение положения объектов и их метрических параметров на двумерной сетке предполагает введение начала координат, направления отсчета и размерности среды функционирования, формируя базовую систему координат.

В результате геометрического разбиения внешней среды, получается множество, представляющее собой матрицу элементов, каждый из которых соответствует определенному дискретному участку:

$$V_{m \times n} = \left\{ v_{ij} \right\} : v_{ij} = 0 \vee 1, \forall i, j : 0 \le i < m, 0 \le j < n$$

$m$, $n$ – количество элементов по оси абсцисс и ординат соответственно. Элемент $v_{ij}$ является проходимым, если $v_{ij} = 0$, и непроходимым, если $v_{ij} = 1$.

Таким образом, в самом общем случае, внешнюю среду условно можно разбить на следующие непересекающиеся подмножества дискретных участков $Obs,\ Free$, где:

$Obs = \left\{ v_{ij} : v_{ij} = 1 \right\} \forall i, j : 0 \le i < m, 0 \le j < n$ – множество препятствий;

$Free = \left\{ v_{ij} : v_{ij} = 0 \right\} \forall i, j : 0 \le i < m, 0 \le j < n$ – свободные от препятствий зоны.

К препятствиям относятся объекты среды, габариты которых соизмеримы с габаритными размерами робота.

К свободным от препятствий зонам относятся участки, позволяющие перемещение робота в любом направлении на расстояния, равные зоне прямой видимости его дальнометрической сенсорной системы.

Следовательно, задача планирования траектории сводится к определению связей между участками $v_{ij} \in Free$.

Таким образом, попадающую в зону видимости часть внешней среды можно представить в виде ориентированного помеченного взвешенного графа $G = \left( V, E, f \right)$, где:

$V_{m \times n} = \left\{ v_{ij} \right\} : v_{ij} = 0 \vee 1, \forall i, j : 0 \le i < m, 0 \le j < n$ – множество вершин, имеющих следующие параметры: координаты клетки в прямоугольной системе координат, угол и радиус клетки в полярной системе координат, признак занятости (координаты ячейки в полярной системе координат, вообще

говоря, избыточны для описания внешней среды, но на некоторых этапах моделирования и анализа удобнее пользоваться полярной системой координат).

$E = \left\{ e_d \right\}$ – множество ребер, связывающих участки $v_{ij} \in Free$, имеющих веса, равные расстоянию между этими участками;

$f$ – функция, определяющая веса ребер графа, соответствующих трудозатратам, связанных с переходами. Каждое ребро $e_d \in E$ по мере перемещения робота «взвешивается» расстоянием, которое необходимо преодолеть роботу, чтобы попасть на участок $v_{ij} \in Free$, соответствующий некоторой целевой вершине графа $G$.

Отсюда решение задачи планирования траектории робота формально определяется построением допустимого маршрута $M \subseteq G$, $M = \left( e_0, e_1, \ldots e_k \right)$, связывающего участки $v_{ij}^0 \in V$ и $v_{ij}^k \in V$, определяющие исходное и целевое местоположение, где ребро $e_0$ инцидентно вершине $v_{ij}^0 \in V$. Если каждое ребро проходит через элементы $v_{ij} \in Free$, маршрут является допустимым, иначе – недопустимым. Задача планирования движения МР сводится к динамическому формированию графа $G$ по мере передвижения и выбору маршрута $M \subseteq G$ на основе алгоритма поиска пути, связывающего вершины $v_{ij}^0 \in V$ и $v_{ij}^k \in V$.

### *E. Планирование траектории движения*

Завершающим этапом выполнения лабораторного практикума является изучение, разработка и исследование алгоритмов поиска пути на графе, формируемом на основе описанной выше модели внешней среды.

Известно множество алгоритмов поиска пути на графе [5], среди которых видное место занимают эвристические алгоритмы. Широко известным алгоритмом, используемым в задачах поиска является алгоритм эвристического поиска A* [6], разработанный в 1968 году группой ученых Питером Хартом, Нильсом Нильсоном и Бертраном Рафаэлем.

Явным недостатком данного алгоритма является невозможность его применения в условиях частичной недетерминированности внешней среде, а именно, отсутствие полной информации о координатах местоположения препятствий.

В работе Яковлева [7] представлена модификация алгоритма A*, именуемого автором HGA* (Hierarchical A*), на основе иерархического подхода, в котором предусмотрено динамическое формирование графа в процессе сканирования пространства сенсорной системой МР и принятие решения о промежуточных целевых координат МР.

Обучающемуся предлагается изучить принцип работы алгоритма HGA* и выполнить его программную реализацию, и, возможно, разработать собственный улучшенный алгоритм поиска пути.

Для моделирования внешних сред с целью исследования эффективности разрабатываемых алгоритмов, предлагается разработать программное обеспечение по генерации препятствий на двумерной модели внешней среды [4].

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разработанном лабораторном практикуме рассмотрены основные компоненты МР, позволяющие оценивать координаты МР в пространстве и выполнять построение картографической модели внешней среды для последующего планирования траектории движения и ее реализации. Предполагается, что знания и навыки, полученные при выполнении данного практикума, позволят решать практические и исследовательские задачи в области навигации и управления МР с использованием специализированных вычислительных устройствах.

В дальнейшем данный практикум планируется дополнить учебным материалом по вероятностным методам оценки координат МР [9], которые предполагаемо должны увеличить точность локализации и картографирования.

Также для расширения функциональных возможностей МР, лабораторный стенд предполагается дополнить системой машинного зрения и, соответственно, разработать учебно-методические решения по стерео- и многоракурсному зрению [8], а также по распознаванию образов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


[1] Баран Е.Д. LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы / Е.Д. Баран // М.: ДМК Пресс. – 2014. – 448 с.

[2] Pershina Z. Localization methods for a mobile robot / Z. Pershina, I. Sagitov // International Summerworkshop Computer Science : proc. of intern. Summerworkshop, Germany, Chemnitz, 7–13 Juli 2014. – Chemnitz : Fakultät at für Informatik (TU Chemnit). – 2014. – P. 54-56.

[3] Лесникова А. А. Система локальной навигации мобильного робота на основе визуальной одометрии / А. А. Лесникова, Ж. С. Першина // Инженерные и научные приложения на базе технологий NI (NIDays-2014) : сб. тр. 13 междунар. науч.-практ. конф. – Москва : ДМК, 2014. – С. 224-225.

[4] Першина Ж.С. Генерация моделей карт местности для исследования алгоритмов поиска пути мобильного робота / Ж. С. Першина, Е. Д. Баран // Материалы международной научно-практической конференции «Робототехника и искусственный интеллект». – Железногорск, Россия, 2011 г.

[5] Першина Ж.С. Разработка инструментальных средств для исследования алгоритмов поиска маршрута передвижения мобильного робота в условиях частичной неопределенности / Е. Д. Баран, Ж. С. Першина, И. Н. Швайкова // Сборник трудов 9 Международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». – Москва, Россия. – 2010 г. – С.137-139.

[6] Нильсон, Нильс. Искусственный интеллект. Методы поиска решений / под ред. С.В.Фомина // М.: Издательство «Мир». – 1973 г. – 270 с.

[7] Yakovlev, K. S. HGA*, an efficient algorithm for path planning in a plane. Scientific and Technical Information Processing, 37(6), 2010, pp. 438-447. DOI: 10.3103/S0147688210060092

[8] Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике / Е.И. Юревич // СПб: Издательство политехнического университета. – 2013. – 100 с.

[9] J. J. Leonard. Cooperative concurrent mapping and localization / W. Fenwick, P. M. Newman, J. J. Leonard //n IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-02). – Washington DC. – May, 2002. – P. 1810-1817.

**Колкер Алексей Борисович**, к.т.н., доцент кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: анализ и обработка данных, компьютерное зрение, робототехника.

**Першина Жанна Сергеевна**, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета, аспирант кафедры мехатроники и роботостроения (при ЦНИИ РТК) Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого. Область научных интересов: компьютерное зрение, робототехника. Автор 7 публикаций.