

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:681.5

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-19-27



Разработка системы управления движением роботизированной платформы на основе методов лазерной дальнометрии (LiDAR)

Алексей Игоревич Кутырёв[✉], канд. техн. наук, старший научный сотрудник

alexeykutyrev@gmail.com[✉]

Артур Изнауевич Дышеков, младший научный сотрудник

a.i.dyshekov@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Система управления движением роботизированной платформы должна проектировать маршрут и строить карту движения платформы в режиме реального времени. Разработана система управления движением роботизированной платформы в рядах садовых насаждений на основе технологии измерения расстояний путем излучения света дальномером оптического диапазона датчиком LiDAR. На языке программирования Python в операционной системе Ubuntu и среде визуализации Rviz разработан программный код для планирования пути движения и задания точек траектории движения. Для поиска оптимальной траектории движения применен алгоритм обхода графа и поиска оптимального пути. Изготовлена роботизированная платформа, оснащенная датчиком LiDAR Velodyne Puck (VLP-16) и дальномером Benewake TFmini Plus, измеряющим в режиме реального времени расстояние между роботизированной платформой и моделью дерева яблони через последовательный порт (COM-порт). Оценка точности выполнения движения роботизированной платформы произведена в лабораторных условиях. Эксперимент проводился с использованием люминесцентных газоразрядных ламп Super Lamp Holder SLH3 45W 220v 5500K RoHS, уровень освещенности варьировался от 10000 до 110000 люкс и контролировался с помощью спектрометр-пульсметра Uprtek MF250N. Факторный эксперимент выявил наиболее эффективный режим движения роботизированной платформы по заданной траектории: скорость движения – 2,5 км/ч; освещенность – 109600 лк; расстояние до дерева – 0,5 м. Позиционирование роботизированной платформы относительно каждого дерева в рядах насаждений и автономное выполнение основных технологических операций с отклонением от заданной траектории не более 1,5...2 см отвечают агротехническим требованиям по мониторингу садовых насаждений, внесению средств защиты растений, уборке урожая плодовых культур, контурной обрезке кроны деревьев.

Ключевые слова: метод лазерной дальнометрии, LiDAR, система управления, роботизированная платформа, позиционирование, скорость движения, освещенность

Формат цитирования: Кутырёв А.И., Дышеков А.И. Разработка системы управления движением роботизированной платформы на основе методов лазерной дальнометрии // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2. С. 19-27. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-19-27>

© Кутырёв А.И., Дышеков А.И., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Developing a motion control system for a robotic platform based on laser ranging methods (LiDAR)

Aleksei I. Kutyrev, PhD (Eng), Senior Research Engineer

alexeykutyrev@gmail.com[✉]

Artur I. Dyshekov, Junior Research Engineer

a.i.dyshekov@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Abstract. The motion control system of the robotic platform should design a route and build a map of the platform's real-time movement. The authors have developed a system for controlling the movement of a robotic platform in rows of garden plantings based on the technology of measuring distances by emitting light with an optical range finder LiDAR sensor. They have obtained a program code for planning the path of travel and setting the points of the travel trajectory in the Python programming language in the Ubuntu operating system (the Rviz visualization environment). To find the optimal trajectory, they have applied an algorithm for traversing the graph and finding the optimal path. As a result, they have designed a robotic platform equipped with a LiDAR Velodyne Puck sensor (VLP-16) and a Benewake TFmini Plus range finder measuring in real time the distance

between the robotic platform and the apple tree model via a serial port (COM port). The accuracy of the robotic platform travel was evaluated under laboratory conditions. The experiment was conducted with the use of Super Lamp Holder SLH345W 220v 5500K RoHS fluorescent discharge lamps, the illumination level varied from 10000 to 110000 lux and was controlled with the help of an Uprtek MF250N pulse spectrometer. The factorial experiment revealed the most efficient travel mode of the robotic platform along the given trajectory: travel speed – 2.5 km/h; illuminance – 109600 lux; distance to the tree – 0.5 m. Positioning of the robotic platform relative to each tree in the rows of plantations and autonomous performance of basic technological operations with a deviation from the specified trajectory of not more than 1.5 to 2 cm meet the agrotechnical requirements for monitoring of orchard plantations, application of plant protection agents, harvesting of fruit crops, and contour pruning of tree crowns.

Keywords: laser ranging method, LiDAR, control system, robotic platform, positioning, speed of travel, illumination.

For citation: Kutyrev A.I., Dyshekov A.I. Developing a motion control system for a robotic platform based on laser ranging methods (LiDAR). *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(2):19-27. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-19-27>

Введение. Система управления движением роботизированной платформы должна иметь возможность построения маршрута движения, управления режимами движения, адекватной интерпретации и анализа информации, поступающей от сенсоров об окружающей среде, и отслеживания собственных координат [1-3]. Существующие навигационные системы требуют значительных вычислительных ресурсов и не позволяют с высокой степенью точности и надежности позиционировать роботизированные платформы в недетерминированной среде для мониторинга садовых насаждений, внесения средств защиты растений, уборки урожая плодовых культур, контурной обрезки кроны деревьев [4].

В промышленных садовых насаждениях используется глобальная, локальная и персональная навигация [5-7]. Для позиционирования роботизированных платформ в полевых условиях используют пассивные и активные способы (системы) приема информации [8]. Пассивная система обеспечивает прием данных о собственных координатах и других параметрах движения от внешних источников, глобальных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, радиомаяков. Активная система навигации определяет местоположение исключительно посредством собственных устройств (датчиков) роботизированных платформ, инерциальных навигационных систем, механических и оптических гироскопов, механических акселерометров, одометров, лазерных дальномеров, генераторов радио- или иных сигналов (ультразвуковых, инфракрасных), стереоскопических камер [9, 10]. Для обнаружения растений и препятствий в рядах садовых насаждений используются активные и пассивные датчики [11-14]. Для контроля ускорения, скорости движения и изменения положения рабочих органов в пространстве применяются акселерометры, гироскопы и РТК-станции [15, 16].

Сравнение различных типов датчиков, используемых для навигации роботизированных платформ, показало значительное преимущество датчика LiDAR, имеющего обзор 360 град. и позволяющего роботизированной платформе обнаруживать препятствия, наносить их на карту с точностью до нескольких сантиметров, одновременно генерируя большие объемы данных включая данные на основе точек или пикселей. Обработка полученных

данных сосредоточена на сегментации, классификации точечных и пиксельных изображений, что позволяет осуществлять кластеризацию и позиционирование.

Существующие системы управления автономными мобильными энергетическими средствами и исследования известных ученых показали применение в полевых условиях множества видов алгоритмов [17-20].

Алгоритм планирования и следования по пути, обуславливающий совершение маневров через обозначенные путевые точки методом обхода графа и поиска оптимального пути, позволяет с высокой степенью точности позиционировать роботизированные платформы платформы в рядах садовых насаждений при движении по типичным траекториям, состоящим из прямых участков (в междурядье вдоль ряда деревьев) и дуг окружностей (для заезда в следующий ряд), для выполнения различных технологических операций¹ [21].

Цель исследований: разработка системы управления движением роботизированной платформы в рядах садовых насаждений на основе методов лазерной дальнометрии, алгоритма обхода графа и поиска оптимального пути.

Материал и методы. Для разработки системы управления движением на основе метода лазерной дальнометрии изготовлена роботизированная платформа с закрепленным на ней датчиком LiDAR (рис. 1).

Система управления роботизированной платформой состоит из двух уровней, решающих свою задачу. В качестве контроллера верхнего уровня системы управления использован одноплатный компьютер Nano Pi M4, работающий под управлением операционной системы Ubuntu. Контроллер верхнего уровня отвечает за получение и обработку данных с датчика LiDAR, принимает команды от мини-компьютера Intel NUC при работе в автономном режиме и от микроконтроллера Arduino при работе в режиме с пульта ДУ. Обработанные данные отправляются на нижний уровень системы управления. С контроллеров нижнего уровня управляющие ШИМ-сигналы направляются на драйверы электродвигателей, вследствие чего роботизированная платформа начинает движение.

¹ Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2011. 1296 с.

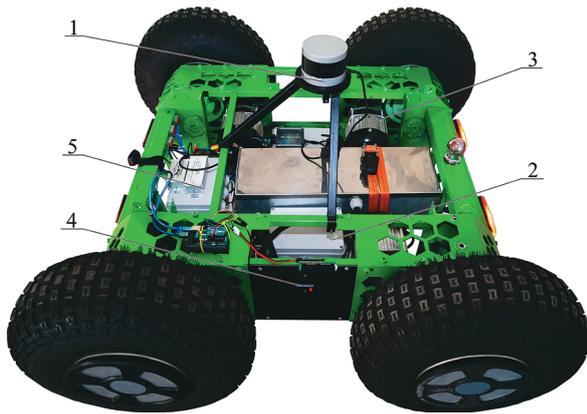


Рис. 1. Роботизированная платформа с системой управления движением на основе метода лазерной дальнометрии:

- 1 – LiDAR Velodyne Puck (VLP-16);
 2 – блок системы управления верхнего уровня;
 3 – двигатель постоянного тока BM1418ZXF;
 4 – дальнометр Benewake TFmini Plus;
 5 – блок системы управления нижнего уровня

Fig. 1. The manufactured robotic platform with a motion control system based on laser ranging methods:

- 1 – LiDAR Velodyne Puck (VLP-16);
 2 – upper-level control system unit; 3 – BM1418ZXF DC motor;
 4 – Benewake TFmini Plus rangefinder;
 5 – lower-level control system unit

Для передачи управляющего сигнала на драйверы двигателей используется 16-канальный ШИМ-генератор PCA9685. Управление скоростью и направлением вращения валов моторов производится с помощью драйверов Maytech MTVEESC50A. Система управления включает в себя LM2596-DC-DC-преобразователь, понижающий напряжение с 12 до 5 В для питания всей логической части. Логическая часть системы управления роботизированной платформы расположена внутри двух водонепроницаемых кейсов, стандарт IP-55. Прием сигнала с пульта дистанционного управления осуществляется шестиканальным приемником радиосигнала FS-IA6B, работающим на частоте 2,4 ГГц.

Для построения облака точек и карты окружающей местности в системе управления использовался датчик LiDAR компании Velodyne Puck VLP-16: длина волны лазера – 905 нм; частота сканирования – 300 кГц; максимальная дальность поля зрения – 360°. Скорость вращения зеркала 20 об/сек. обеспечивает точность определения дальности с помощью LiDAR Velodyne VLP-16 до 3 см. Применение LiDAR Velodyne Puck VLP-16 позволяет строить карту сада путем сканирования окружающего пространства в режиме реального времени и дополнения её вновь обнаруженными объектами. Для получения данных с датчика LiDAR и последующих вычислений использован мини-компьютер Intel NUC. Обмен данными между узлами системы управления реализован с помощью фреймворка ROS. Для построения карты применены алгоритм Hector SLAM (Simultaneous mapping and localization) и картографический алгоритм

Gmapping, позволившие построить карту препятствий и одновременно определить на ней положение роботизированной платформы по данным датчика LiDAR.

Для просмотра построенной карты и указания точек, к которым должна двигаться роботизированная платформа, использовалась среда визуализации Rviz. Точки, через которые роботизированная платформа должна проехать, указываются кликом мыши на карте препятствий в пользовательском интерфейсе программы Rviz с точностью до 1 мм, на месте клика появляется красная полусфера. После указания последней точки маршрута все точки соединяются зеленой линией, показывающей глобальную траекторию движения роботизированной платформы. После построения глобальной траектории включается локальный планировщик, который рассчитывает скорость и направление движения роботизированной платформы с учетом найденных препятствий. В качестве локального планировщика использовался Teb local planner.

На языке программирования Python в операционной системе Ubuntu, среде визуализации Rviz разработан программный код для планирования пути движения и задания точек траектории движения. Для соединения точек на построенной карте применен алгоритм обхода графа и поиска оптимального пути. Алгоритм анализирует полученный после сканирования датчиком LiDAR граф (набор точек) и соединений (ребер), находит путь от начальной точки траектории движения к конечной с учетом найденных препятствий и оценивает расстояние до цели. Пример поиска пути в графе с препятствиями (1-10) с помощью данного алгоритма в веб-сервисе Github PathFindings представлен на рисунке 2.

Алгоритм позволяет находить во взвешенном графе траекторию движения от заданной начальной точки к установленной конечной точке траектории движения с «наименьшей стоимостью»:

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (1)$$

где $f(n)$ – минимальная «стоимость» перемещения в соседнюю точку траектории; $g(n)$ – «стоимость пути» от заданной начальной точки траектории n до любой другой заданной точки; $h(n)$ – функция ранжирования альтернативного пути от заданной точки n до конечной точки траектории.

Каждый раз при перемещении между точками рассчитывается минимальная «стоимость» $f(n)$ перемещения в следующую точку траектории. «Стоимостью» перехода из одной точки в другую может являться множество показателей – таких, как расстояние между точками траектории, время, расход топлива и другие.

Оценка точности выполнения движения роботизированной платформы с разработанной системой управления по заданной траектории произведена в лабораторных условиях на экспериментальном участке с искусственными моделями яблоневых деревьев. Образцы деревьев высотой 1,5 м и шириной кроны 0,5 м имели межствольное расстояние 1,5 м с шириной междурядья 3 м (рис. 3).

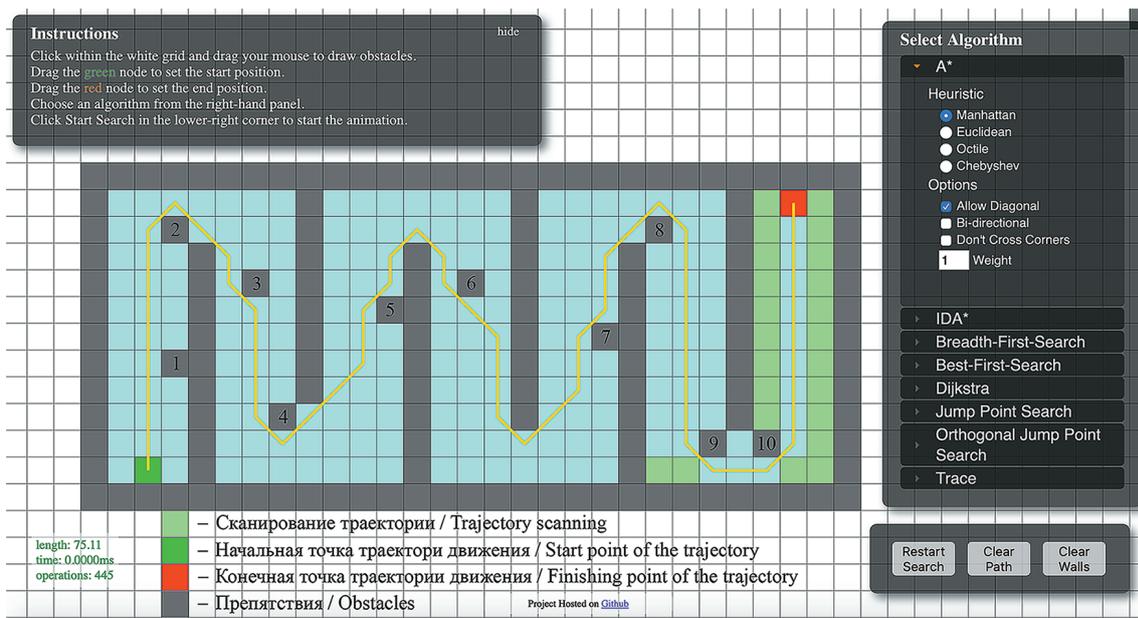


Рис. 2. Поиск оптимального пути с помощью алгоритма обхода графа и поиска оптимального пути (веб-сервис Github PathFindings)

Fig. 2. Finding the optimal path using the algorithm (Github PathFindings web service)

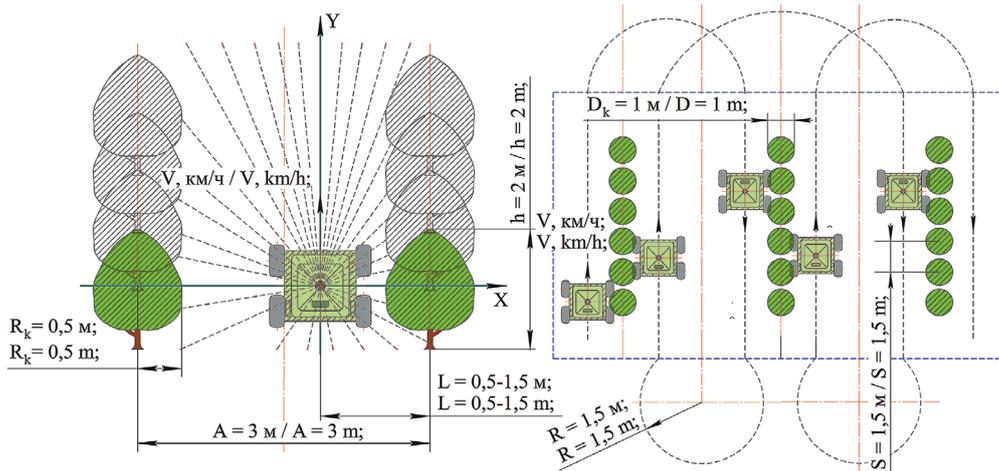


Рис. 3. Параметры экспериментального лабораторного участка (способ движения роботизированной платформы – челночный односторонний)

Fig. 3. Parameters of the experimental laboratory site (The shuttle one-way method of the robotic platform movement)

Уровень освещенности при проведении эксперимента варьировался от 10000 до 110000 люкс (интервал варьирования – 50000 люкс) и контролировался с помощью спектрометр-пульсметра Uprtek MF250N. В качестве источника света применялись люминесцентные газоразрядные лампы Super Lamp Holder SLH345W 220v 5500K RoHS.

Закрепленный на раме роботизированной платформы дальномер Benewake TFmini Plus в режиме реального времени позволяет определять точность движения роботизированной платформы измерением расстояния между роботизированной платформой и искусственной моделью дерева яблони через последовательный порт (COM-порт). Для мониторинга и сохранения полученных экспериментальных данных применялась программа Advanced Serial Port Monitor 3.5.3.

Значения расстояния между роботизированной платформой и искусственной моделью дерева выводились на LCD-дисплей MT-20S4A-I и записывались в памяти Intel NUC для последующей обработки полученных данных.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований реализована возможность построения маршрута движения роботизированной платформы в среде визуализации Rviz путем расстановки начальной, промежуточных и конечной точек траектории движения на построенной с помощью датчика LiDAR карте окружающей местности. Препятствия и «опасная зона», обнаруженные при сканировании датчиком LiDAR и работе планировщика траектории, выделены серым цветом, а роботизированная платформа обозначена зеленым прямоугольником в системе координат X, Y, Z (рис. 4).

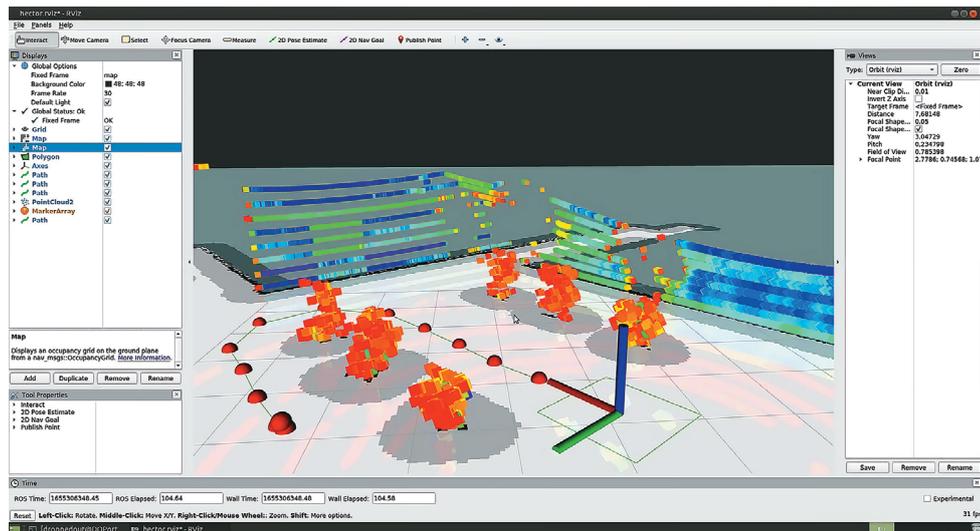


Рис. 4. Построение траектории движения по точкам в среде визуализации Rviz

Fig. 4. Plotting the movement trajectory by points in the Rviz visualization environment

Работа роботизированной платформы в рядах искусственной модели плодового сада заключается в следующем. На первом этапе датчик LiDAR сканирует окружающее пространство и строит 3D-облако точек местоположения в координатах X, Y, Z. Полученные данные передаются в блок управления верхнего уровня, систему навигации, в которой в среде визуализации Rviz производится построение карты местности, окружающей роботизированную платформу. На втором этапе определяется позиция роботизированной платформы, система управления проводит обновление карты на каждом шаге алгоритма, определяя местоположение платформы на ней, оптимизируя вектор управления и передавая обработанные данные на нижний уровень системы управления. Процесс управления роботизированной платформой заканчивается при достижении конечной точки заданной траектории движения.

Оценка точности движения роботизированной платформы производилась экспериментально в трехкратной повторности, путем анализа отклонений начальной, промежуточной и конечной точек траектории движения от заданной траектории (рис. 5). Промежуточные точки траектории движения установились на расстоянии 0,5...1,5 м от дерева с интервалом варьирования 0,5 м.

Определены максимальные и минимальные отклонения от заданного расстояния между роботизированной платформой и точками траектории (ствола искусственной модели яблони), размах вариации, среднее линейное отклонение и среднеквадратическое отклонение. Графики отклонения траектории движения роботизированной платформы от установленного расстояния до дерева (0,5 и 1,5 м) при различной освещенности (10000 lx, 60000 lx, 11000 lx) и скорости движения (2,5 и 3,0 км/ч) представлены на рисунках 6, 7.

Для определения наиболее эффективного режима движения роботизированной платформы проведен



Рис. 5. Проведение лабораторного эксперимента

Fig. 5. Conducting a laboratory experiment

факторный эксперимент по известной методике²³. В качестве изменяемых факторов приняты скорость движения роботизированной платформы, освещенность и расстояние до ствола дерева. Интервал варьирования факторов выбран исходя из проведенных предварительных исследований. Эксперимент проведен в трехкратной повторности. Факторный план эксперимента с различными режимами движения и условиями освещенности приведен в таблице 1. За выходной параметр принято отклонение расстояния до дерева от требуемого значения. Матрица планирования трехфакторного эксперимента и результаты его проведения представлены в таблице 2. Определена линейная интерполяция, найдена дисперсия воспроизводимости в проведенных параллельных опытах. Результаты статистической обработки данных факторного эксперимента приведены в таблице 3.

² Доспехов В.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 336 с.

³ Соболев И.М., Стадишев Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 2010. 108 с.

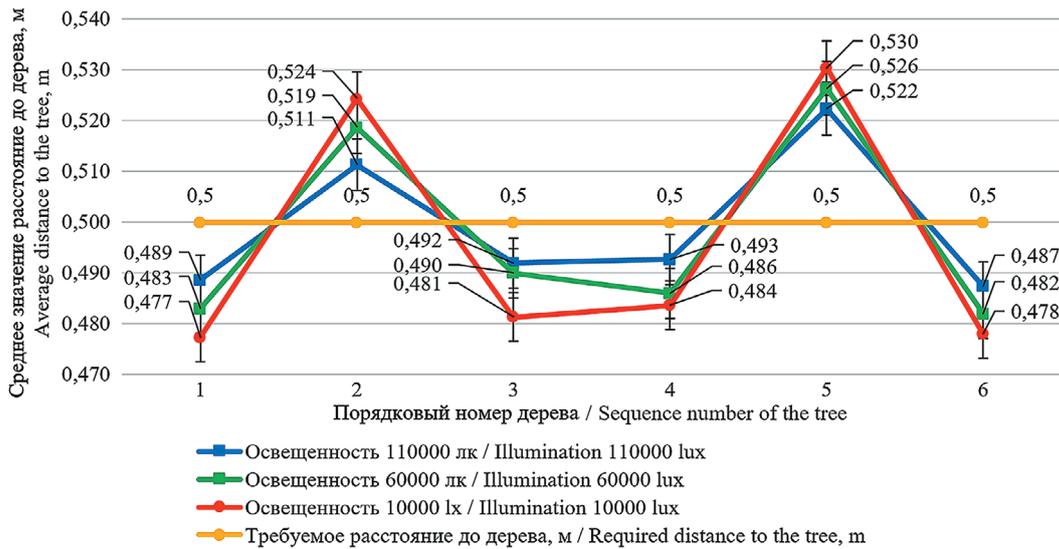


Рис. 6. Отклонение траектории движения роботизированной платформы при скорости движения 2,5 км/ч и заданном расстоянии до дерева 0,5 м
Fig. 6. Graph of the deviation of the movement trajectory of the robotic platform at a speed of 2.5 km/h and the required (specified) distance to the tree of 0.5 m

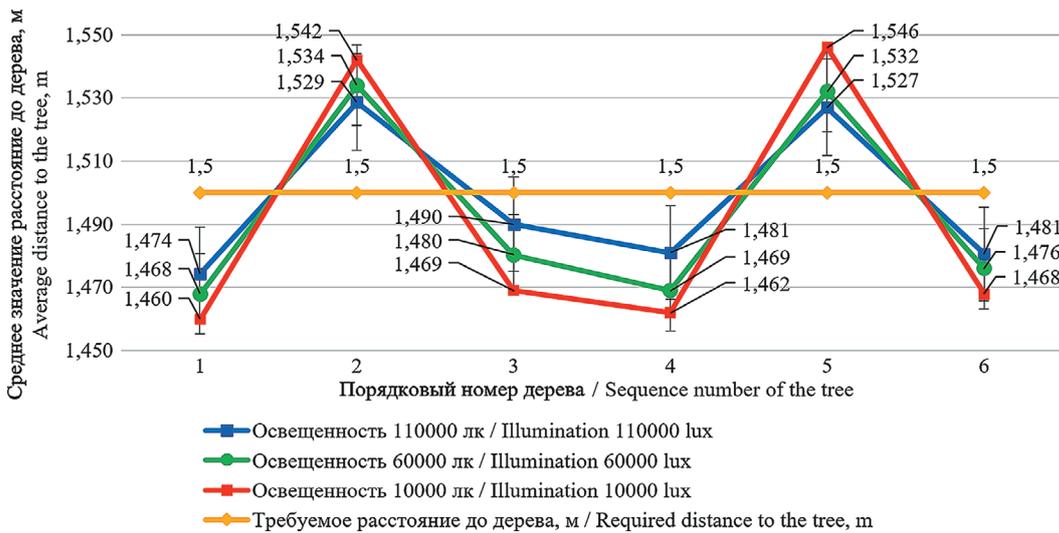


Рис. 7. Отклонение траектории движения роботизированной платформы при скорости движения 3 км/ч и требуемом (заданном) расстоянии до дерева 1,5 м
Fig. 7. Deviation of the movement trajectory of the robotic platform at a speed of 3 km/h and the required (specified) distance to the tree of 1.5 m

Условия планирования факторного эксперимента

Таблица 1

Conditions for planning a factor experiment

Table 1

Фактор Factor	Нижний уровень Lower level (-1)	Основной уровень Main level (0)	Верхний уровень Upper level (+1)	Интервал варьирования Variation range
Скорость движения, км/ч (x1) Speed of travel, km/h (x1)	2,5	3	3,5	0,5
Освещенность, лк (x2) Ambient light intensity, lux (x2)	10000	60000	110000	50000
Расстояние от дерева, м (x3) Distance from the tree, m (x3)	0,5	1	1,5	0,5

Таблица 2

Матрица планирования и результаты трехфакторного эксперимента

Table 2

Planning matrix and results of three-factor experiment

Номер опыта Experiment number	Матрица планирования Planning matrix			Значения переменных факторов Values of variables			Результаты эксперимента, значения выходного фактора Experiment results, output factor values		
	x1	x2	x3	Скорость движения, км/ч Speed of travel, km/h	Освещенность, лк, Ambient light intensity, lux	Расстояние до дерева, м Distance to the tree, m	y1	y2	y3
				x1	x2	x3			
1	-1	1	-1	2,5	110000	0,5	19	21	22
2	1	-1	-1	3,5	10000	0,5	39	37	37
3	-1	-1	1	2,5	10000	1,5	36	36	35
4	1	-1	1	3,5	110000	1,5	38	39	39
5	-1	-1	-1	2,5	10000	0,5	33	32	33
6	1	1	-1	3,5	110000	0,5	36	35	37
7	-1	1	1	2,5	110000	1,5	31	32	32
8	1	-1	1	3,5	10000	1,5	44	46	46

Таблица 3

Результаты статистической обработки данных эксперимента

Table 3

Results of the statistical processing of field experiment data

Показатель / Indicator	Значение / Value
Суммарная дисперсия, σ^2 / Total variance, σ^2	7,33
Максимальная дисперсия, σ^2_{max} / Maximum variance, σ^2_{max}	2,33
Расчётный критерий Кохрена, $G_{рас}$ / Calculated Cochran criterion, $G_{рас}$	0,31
Табличный критерий Кохрена, $G_{табл}$ / Tabulated Cochran test, $G_{табл}$	0,51
Однородность дисперсий / Homogeneity of variance	однородна / homogeneity
Дисперсия адекватности, σ^2_a / Adequacy variance, σ^2_a	1,13
Дисперсия воспроизводимости, σ^2_b / Repeatability variance, σ^2_b	0,91
Расчетный критерий Фишера, F_p / Calculated Fisher criterion, F_p	1,23
Табличное значение критерия Фишера, F_T / Tabulated value of Fisher criterion, F_T	4,49
Адекватность математической модели / The adequacy of the mathematical model	Модель адекватна / Model is adequate ($F_p < F_T$)

Найдены коэффициенты математической модели и получено уравнение математической модели в кодированном (2) и натуральном (3) виде:

$$y = 34,79375 + 4,62375 \cdot x_1 + (-3,04125) \cdot x_2 + 3,04125 \cdot x_3 + 0,9587498 \cdot x_1 \cdot x_2 + (-0,4587498) \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,3762493 \cdot x_2 \cdot x_3 + (-1,623751) \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (2)$$

$$y = 29,39826 + 0,9874967 \cdot x_1 + (-5,655751E - 04) \cdot x_2 + (-11,79451) \cdot x_3 + 1,6825E - 04 \cdot x_1 \cdot x_2 + 5,959004 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,897002E - 04 \cdot x_2 \cdot x_3 + (-1,299001E - 04) \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3)$$

Анализ математической модели по критерию Фишера позволил определить адекватность модели $F_p(1,23) < F_T(4,49)$. В результате проведения преобразования получены три варианта математической модели при $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$ (0 уровень, натуральное

значение 3 км/ч), $y = f(x_1, x_3)$ при $x_2 = \text{const}$ (0 уровень, натуральное значение 60000 лк) и $y = f(x_1, x_2)$ при $x_3 = \text{const}$ (0 уровень, натуральное значение 1 м).

Математические модели с учетом постоянного фактора принимают вид:

$$y = (649,143) + (0) + (-59,072) \cdot x_2 + (2,516) \cdot x_3 + (0) + (-68,683) \cdot x_2^2 + (-8,431) \cdot x_3^2 + (0) \cdot x_2 + (0) \cdot x_3 + (10,877) \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (4)$$

$$y = 30,30125 + 0,9874967 \cdot x + (-5,806251E - 04) \cdot 60000,0 + (-12,69751) \cdot y + 1,6825E - 04 \cdot x \cdot 60000,0 + 5,959004 \cdot x \cdot y + 4,047501E - 04 \cdot 60000,0 \cdot y + (-1,299001E - 04) \cdot x \cdot 60000,0 \cdot y; \quad (5)$$

$$y = 30,30125 + 0,9874967 \cdot x + (-5,806251E - 04) \cdot y + (-12,69751) \cdot 1,0 + 1,6825E - 04 \cdot x \cdot y + 5,959004 \cdot x \cdot 1,0 + 4,047501E - 04 \cdot y \cdot 1,0 + (-1,299001E - 04) \cdot x \cdot y \cdot 1,0. \quad (6)$$

Установлено, что экстремум функции отклика математической модели находится в пределах варьирования факторов. Графическая интерпретация функции трех переменных и диаграмма проекции трехмерной поверхности отклика на плоскости приведены на рисунке 8.

Максимальные и минимальные значения функции отклика и соответствующие ему значения факторов в кодированном и натуральном виде представлены в таблице 4.

Минимальное отклонение от заданной траектории (0,7 см) обеспечивается при скорости роботизированной платформы 2,5 км/ч, освещенности 109600 лк и расстоянии до дерева 0,5 м. При скорости движения 3,5 км/ч, расстоянии до дерева 1,5 м и освещенности 10000 лк максимальное отклонение от заданной траектории не превысило 4,6 см. Среднее линейное отклонение составило 2,9 см.

Возможна комплектация разработанной системы управления следующими модулями:

- системой управления движением следования за человеком с помощью системы технического зрения и нейронной сети;
- системой предотвращения столкновений с людьми, животными и препятствиями на основе ультразвуковых датчиков;
- системой управления движением на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути.

Современные датчики оптического диапазона с разрешением 4,5 млн пикселей, частотой кадров 25 FPS и автоматической адаптацией к уровню освещенности в комплексе со стереокамерами и GPS/ГЛОНАСС навигацией позволяют повысить точность и автономное выполнение агрегатами основных технологических операций с отклонением от заданной траектории не более 1,5...2 см.

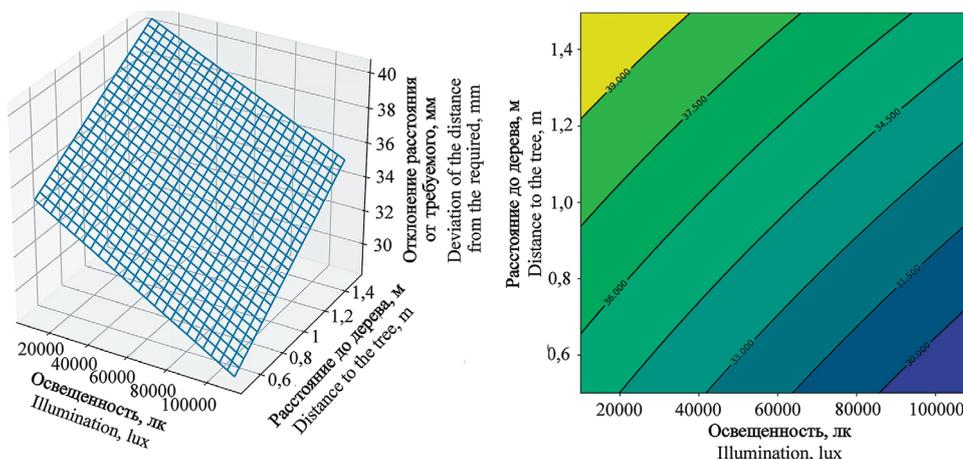


Рис. 8. График проекции трехмерной поверхности отклика на плоскости по оптимуму: $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$

Fig. 8. Projection graphs of three-dimensional response surfaces on the plane according to the optimum: $y = f(x_2, x_3)$ at $x_1 = \text{const}$

Результаты статистической обработки данных эксперимента

Таблица 4

Results of the statistical processing of field experiment data

Table 4

Экстремум функции отклика <i>Maximum of the response function</i>	Скорость движения, км/ч <i>Speed of motion, km/h</i>	Освещенность, лк <i>Light intensity, lux</i>	Расстояние от дерева, м <i>Distance from the tree, m</i>
$Y_{\text{опт.}} = 28,362$	$x_1 = 0 (3)$	$x_2 = 109600$	$x_3 = 0,5$
$Y_{\text{опт.}} = 26,670$	$x_1 = 2,5$	$x_2 = 0 (60000)$	$x_3 = 0,5$
$Y_{\text{опт.}} = 26,200$	$x_1 = 2,5$	$x_2 = 109600$	$x_3 = 0 (1)$

Выводы

1. Разработанная система управления движением роботизированной платформы на основе лазерной дальнометрии с использованием датчика LiDAR Velodyne Puck VLP-16 совместно с алгоритмом обхода графа и поиска оптимального пути, включая среду визуализации Rviz, позволяет проектировать маршрут движения

роботизированной платформы и строить карту в режиме реального времени.

2. Применение датчиков высокого разрешения позволяет позиционирование роботизированной платформы относительно каждого дерева в рядах насаждений и автономное выполнение основных технологических операций с отклонением от заданной траектории не более 1,5...2 см.

Список использованных источников/ References

1. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. № 15 (4). С. 35-41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
- Smirnov I.G., Khort D.O., Kutyrev A.I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):35-41. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
2. Al-Sagban M., Dhaouadi R. Neural based autonomous navigation of wheeled mobile robots. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2016;10(2):64-72.
3. Khort D., Kutyrev A., Kiktev N., Hutsol T., Glowacki S., Kuboń M., Nurek T., Rud A., Gródek-Szostak Z. Automated mobile hot mist generator: A quest for effectiveness in fruit horticulture. *Sensors*. 2022;22(9):3164. <https://doi.org/10.3390/s22093164>
4. Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. Hu Z., Petoukhov S., Yanovsky F., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing*. ISEM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;463:149-159. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_13
5. Luo C.M., Gao J.Y., Li X.D., Mo H.W., Jiang Q.M. Sensor-based autonomous robot navigation under unknown environments with grid map representation. 2014 IEEE Symposium on Swarm Intelligence. 2014. Pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/SIS.2014.7011782>
6. Luan P.G., Thinh N.T. Real-time hybrid navigation system-based path planning and obstacle avoidance for mobile robots. *Applied Sciences*. 2020;10(10):3355. <https://doi.org/10.3390/app10103355>
7. Khort D., Kutyrev A., Filippov R., Kiktev N., Komarchuk D. Robotized platform for picking of strawberry berries. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. *Science and Technology*. 2019;869-872. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061448>
8. Zong C., Ji Z., Yu Y., Shi H. Research on obstacle avoidance method for mobile robot based on multisensor information fusion. *Sensors and Materials*. 2020;32(4):1159-1170. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2540>
9. Alajlan A.M., Almasri M.M., Elleithy K.M., Multi-sensor based collision avoidance algorithm for mobile robot. *Long Island Systems Applications and Technology*. 2015. Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/LISAT.2015.7160181>
10. Khort D., Kutyrev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences*. 2021;262:01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201024>
11. Almasri M., Elleithy K., Alajlan A. Sensor fusion based model for collision free mobile robot navigation. *Sensors*. 2016;16(1):24. <https://doi.org/10.3390/s16010024>
12. Qu D., Hu Y., Zhang Y. The investigation of the obstacle avoidance for mobile robot based on the multi sensor information fusion technology. *International Journal of Manufacturing*. 2013;1:366-370. <https://doi.org/10.7763/IJMMM.2013.V1.79>
13. Sharma R.K., Honc D., Dusek F. Sensor fusion for prediction of orientation and position from obstacle using multiple IR sensors an approach based on Kalman filter. 2014. *International Conference on Applied Electronics*. 2014. Pp. 263-266. <https://doi.org/10.1109/AE.2014.7011716>
14. Chandrasenan C., Nafeesa T.A., Rajan R., Vijayakumar K. Multisensor data fusion based autonomous mobile robot with manipulator for target detection. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014;3:75-81.
15. Smirnov I., Kutyrev A., Kiktev N. Neural network for identifying apple fruits on the crown of a tree. *E3S Web of Conferences*. *International scientific forum on computer and energy Sciences*, WFCES. 2021;01021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127001021>
16. Khort D., Kutyrev A., Smirnov I., Osypenko V., Kiktev N. Computer vision system for recognizing the coordinates location and ripeness of strawberries. *Communications in Computer and Information Science*. 2020;1158:334-343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_22
17. Sgorbissa A., Zaccaria R. Planning and obstacle avoidance in mobile robotics. *Robotics and Autonomous Systems*. 2012;60(4):628-638. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.12.009>
18. Pandey A., Kumar S., Pandey K.K., Parhi D.R. Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller. *Perspectives on Science*. 2016;8:421-423. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.094>
19. Yoon S.W., Park S.B., Kim J.S., Kalman filter sensor fusion for mecanum wheeled automated guided vehicle localization. *Journal of Sensors*. 2015;347379. <https://doi.org/10.1155/2015/347379>
20. Alalise M., Hancke G. Pose estimation of a mobile robot based on fusion of IMU data and vision data using an extended Kalman filter. *Sensors*. 2017;17(10):2164. <https://doi.org/10.3390/s17102164>
21. Урваев И.Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1 (35). С. 44-51. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-5>

А.И. Кутырёв, А.И. Дышеков имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; поступила после рецензирования и доработки 07.11.2022; принята к публикации 11.11.2022

A.I. Kutyrev, A.I. Dyshekov have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Received 01.07.2022; revised 07.11.2022; accepted 11.11.2022