

Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах

М. А. Шереужев^{✉1,2}, Д. И. Арабаджиев^{1,2}, И. В. Семянников^{1,2}

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, корп. 1

Аннотация. В современной коллаборативной и промышленной робототехнике вопрос безопасности взаимодействия человека и робота является одним из основополагающих. Ввиду больших моментов сил и высоких скоростных режимов работы столкновение манипулятора и оператора часто приводит к ранению человека. Цель работы – разработка и тестирование алгоритма предотвращения столкновений для роботов в динамичной среде. Моделирование производилось в симуляторе Webots с использованием метода виртуальных сил. Алгоритм показал высокую эффективность и надежность, поддерживая безопасное расстояние между роботом и человеком. Разработанная система предотвращения столкновений подходит для применения в промышленных условиях.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, безопасность, коллаборативный робот, Webot

Поступила 05.11.2024, одобрена после рецензирования 15.11.2024, принята к публикации 06.12.2024

Для цитирования. Шереужев М. А., Арабаджиев Д. И., Семянников И. В. Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 67–81. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81

MSC: 68T40

Original article

Modeling algorithm to avoid collisions in robotic collaborative systems

M.A. Shereuzhev^{✉1,2}, D.I. Arabadzhiev^{1,2}, I.V. Semyannikov^{1,2}

¹Moscow State University of Technology “STANKIN”
127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane

²Moscow State Technical University named after N. E. Bauman
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1

Abstract. In modern collaborative and industrial robotics, the issue of safety of human-robot interaction is one of the main problems. Due to the high mass and high-speed operating modes, a collision between the manipulator and the operator often leads to injury to a person. The aim of the work is to develop and test an algorithm to avoid collision for robots in a dynamic environment. The simulation was carried out in the Webots simulator using the virtual force method. The algorithm has shown high efficiency and reliability, maintaining a safe distance between a robot and a person. The developed system to avoid collision is suitable for industrial environments.

Keywords: collision prevention, safety, collaborative robot, Webots

Submitted 05.11.2024,

approved after reviewing 15.11.2024,

accepted for publication 06.12.2024

For citation. Shereuzhev M.A., Arabadzhiev D.I., Semyannikov I.V. Modeling algorithm to avoid collisions in robotic collaborative systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 67–81. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81

ВВЕДЕНИЕ

В области взаимодействия человека и робота безопасность рассматривается как ключевой аспект, необходимый для обеспечения безопасной совместной работы роботов и людей. Это требование одинаково важно как для коллаборативных, так и для промышленных роботов, учитывая их растущее применение в повседневной жизни и на производстве [1]. Промышленные и коллаборативные роботы обеспечивают повышенную производительность и гибкость, а их системы управления упрощают разработку программ [2].

В настоящее время промышленные манипуляторы, как правило, должны работать в изолированных зонах, огражденных барьерами, поскольку они все еще редко имеют возможность воспринимать окружающий мир и представляют значительную опасность для человека. Высокая инерция и скорости работы промышленных манипуляторов, обусловленные требованиями производительности, делают любое столкновение с человеком потенциально опасным и способным нанести серьезные травмы.

Разработка алгоритмов предотвращения столкновений связана с рядом трудностей, обусловленных двумя основными факторами: сложной кинематической структурой роботов и геометрической сложностью окружения в промышленной среде [3]. Эти алгоритмы требуют сложных вычислений, так как для их работы необходимо учитывать большое количество факторов. В связи с этим симуляционные среды становятся незаменимыми инструментами для тестирования таких алгоритмов, особенно с использованием виртуальной реальности, которая предоставляет проектировщикам визуальную обратную связь [4].

Повышение вычислительных мощностей современных компьютеров открывает возможности для создания виртуальных моделей, способных точно имитировать реальные сценарии. Это критически важно для такой задачи коллаборативной робототехники, как предотвращение столкновений в реальном времени [5]. В последние годы виртуальные симуляционные среды, такие как CoppeliaSim (ранее V-REP), Webots, Gazebo, зарекомендовали себя как мощный инструмент для симуляции роботизированных систем и их окружения, предоставляя инженерам удобное средство для разработки и тестирования сложных алгоритмов [5].

Задачи, решаемые в данной работе:

1. Анализ существующих методов, позволяющих избежать столкновения коллаборативного робота и человека-оператора.
2. Разработка алгоритма для возможности избегания препятствий.
3. Тестирование алгоритма в имитационной среде и оценка полученных результатов.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Предотвращение столкновений является одной из ключевых задач в робототехнике и активно исследуется на протяжении последних нескольких десятилетий. Одним из ранних методов, разработанных для решения этой проблемы, был метод потенциальных полей [3],

где робот рассматривается как движущийся в потенциальном поле. В этом подходе целевая точка располагается в минимуме потенциального поля, а препятствия представлены вершинами в этом поле. Таким образом, робот находит путь к цели, избегая столкновений с препятствиями, двигаясь по «склонам» потенциального поля. С тех пор было предложено множество методов, направленных на усовершенствование и дополнение этого подхода. Например, недавние исследования [4] используют методы глубокого обучения для предотвращения столкновений манипуляторов с применением камеры Kinect для фиксации положения препятствий и вычисления минимальных расстояний между роботом и окружающими объектами.

Одним из ключевых методов предотвращения столкновений является применение виртуальных эллипсоидов для аппроксимации структуры робота. Как было предложено в работе [5], эллипсоиды используются для моделирования внешних границ звеньев робота, и когда одно из звеньев приближается к препятствию, возникает отталкивающая сила, которая корректирует движение робота. В другом подходе, описанном в [5], предложен скелетный метод для предотвращения самопроизвольных столкновений в многоруких роботах. В этом методе звенья робота аппроксимируются цилиндрами, на которые действуют силы отталкивания при приближении к препятствиям.

Одним из современных методов является алгоритм предотвращения столкновений для избыточных манипуляторов, предложенный в работе [6]. Этот алгоритм оперирует на уровне кинематики, рассчитывая минимальное расстояние между роботом и препятствиями и корректируя движение манипулятора на основе векторов отталкивания.

Однако, как отмечается в работе [4], многие современные методы сталкиваются с проблемами приоритетности задач, когда цель робота конфликтует с задачей предотвращения столкновений. Авторы предложили способ плавного изменения приоритетов между задачами через введение специального коэффициента, что позволяет улучшить гибкость управления манипулятором и избежать перепланировки.

Хотя проблема предотвращения столкновений тщательно изучена в теоретической робототехнике, интеграция этих алгоритмов в реальных промышленных условиях остается сложной задачей. В данном исследовании был предложен алгоритм предотвращения столкновений в промышленной роботизированной ячейке. Моделирование и верификация алгоритма осуществлялись с использованием симулятора Webots.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Среда моделирования

Современные симуляторы, такие как Webots, обладают широкими возможностями для интеграции алгоритмов предотвращения столкновений. Webots предоставляет инструменты для моделирования и верификации сложных алгоритмов в условиях, приближенных к реальной работе роботизированных систем. Одной из сильных сторон Webots является возможность симуляции сложных робототехнических систем с использованием нескольких физических движков, а также поддержка реального времени для выполнения задач обнаружения столкновений и расчета минимальных расстояний между объектами [7, 8].

Webots выгодно отличается от других симуляторов, таких как Gazebo и CoppeliaSim, своим интуитивно понятным интерфейсом и качественной графической визуализацией. В отличие от Gazebo, требующего более сложной настройки, и CoppeliaSim с менее удобным интерфейсом Webots обеспечивает оптимальное сочетание функциональности и удобства использования.

Алгоритм предотвращения столкновений

Один из подходов к предотвращению столкновений основан на **методе виртуальных сил** [9, 10]. В отличие от метода потенциальных полей, в котором робот движется под воздействием притягивающих и отталкивающих сил, метод виртуальных сил учитывает не только силы отталкивания и притяжения, но и момент сил, создаваемых препятствиями. Этот метод позволяет более точно контролировать движение робота в сложных условиях с учетом динамики системы и может быть интегрирован с алгоритмами машинного обучения [11].

Притягивающая сила F_{att} направлена к цели и рассчитывается по аналогии с методом потенциальных полей. Она пропорциональна вектору ошибки между текущей позицией робота и целью:

$$F_{att} = -K_p (p_e - p_{goal}),$$

где K_p – коэффициент пропорциональности, контролирующий скорость движения робота к цели;

p_e – положение конечного эффектора робота;

p_{goal} – положение цели.

Отталкивающая сила F_{rep} аналогично методу потенциальных полей направлена в противоположную сторону от препятствия и зависит от расстояния до препятствия d . Эта сила вступает в расчет, когда робот находится ближе к препятствию, чем некоторое пороговое расстояние d_0 , и рассчитывается по формуле:

$$F_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{p_r - p_0}{d^2}, & \text{если } d < d_0 \\ 0, & \text{если } d \geq d_0 \end{cases}$$

где k_{rep} – коэффициент отталкивания;

p_r – положение точки робота (размер 3×1), ближайшей к препятствию, $p_r = [p_{rx}, p_{ry}, p_{rz}]^T$;

p_0 – положение препятствия (размер 3×1), $p_0 = [p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}]^T$;

O – нулевой вектор (размер 3×1), $O = [0, 0, 0]^T$;

d – минимальное расстояние между роботом и препятствием.

В отличие от метода потенциальных полей, помимо притягивающих и отталкивающих сил, робот может испытывать виртуальный момент M_{rep} , создаваемый препятствием. Этот момент рассчитывается на основе расстояния d между точкой конечного эффектора робота и непосредственно препятствием по формуле:

$$M_{rep} = \lambda (p_r - p_0) \times F_{rep}^T,$$

где λ – коэффициент масштабирования момента.

Момент τ_{total} , определяемый для всех степеней свободы робота, состоит из двух компонент: момента τ_{att} , обусловленного движением к цели, и момента τ_{rep} , вызванного отталкивающей силой и моментом.

Для соблюдения размерности векторов сил с матрицей Якоби векторы притягивающей и отталкивающей сил приводятся к виду:

$$F_{att} = [F_{att\ x}, F_{att\ y}, F_{att\ z}, 0, 0, 0]^T,$$

$$F_{rep} = [F_{rep\ x}, F_{rep\ y}, F_{rep\ z}, 0, 0, 0]^T.$$

Виртуальный момент приводится к виду:

$$M_{rep} = [0, 0, 0, M_{rep\ x}, M_{rep\ y}, M_{rep\ z}]^T.$$

Момент движения к цели τ_{total} вычисляется по формуле:

$$\tau_{att} = J_{TCP}^T F_{att},$$

где J_{TCP} – якобиан (размер 6×6), связанный с центральной точкой инструмента;

$$F_{att} – \text{сила притяжения (размер } 6 \times 1), F_{att} = [F_{att\ x}, F_{att\ y}, F_{att\ z}, 0, 0, 0]^T.$$

Момент τ_{rep} , имитирующий отталкивание манипулятора от препятствий, вычисляется по формуле:

$$\tau_{rep} = J_{CP}^T F_{rep} + M_{rep},$$

где J_{CP} – якобиан (размер 6×6), связанный с точкой робота, ближайшей к препятствию;

M_{rep} – виртуальный момент силы (размер 6×1);

F_{rep} – сила отталкивания (размер 6×1).

Суммарный момент τ_{total} определяется по формуле:

$$\tau_{total} = \tau_{att} + \tau_{rep}.$$

Подчиняясь вычисленным моментам, робот движется к цели, избегая препятствий. Этот подход позволяет учитывать не только силы, но и моменты, что делает его более точным и эффективным при работе в сложных средах с высоким риском столкновений.

Таким образом, использование метода виртуальных сил позволяет реализовать алгоритм предотвращения столкновений, который более эффективно учитывает динамические аспекты системы, такие как моменты сил, и может быть адаптирован для сложных роботизированных систем.

Экспериментальная среда

В качестве объекта исследования был выбран промышленный манипулятор с шестью степенями свободы – **FANUC CR-15iA**. В ходе экспериментов робот либо простаивал, либо выполнял операцию, в то время как подвижные препятствия двигались по курсу столкновения с манипулятором.

В контексте предложенной методологии была выполнена серия симуляций в реальном времени с целью верификации структуры и эффективности разработанного алгоритма. Для моделирования использовался симулятор **Webots**, который обеспечивал как 3D-визуализацию и отслеживание объектов, так и выполнение основных вычислений, таких как расчет векторов напряжения и отталкивания, решение задач прямой и обратной кинематики, реализация конечных автоматов.

В рамках симуляций, выполненных в **Webots**, было создано виртуальное представление рабочей зоны, включающее робота, сотрудника и траекторию его движения. Так как в рамках данной работы задача определения минимального расстояния между манипулятором и человеком не рассматривается, данная величина определяется и визуализируется через графический интерфейс в реальном времени с помощью встроенных инструментов **Webots**, что позволяет наблюдать взаимодействие робота и сотрудника с графической обратной связью высокого качества.

В процессе моделирования манипулятор перемещался свободно по всем координатам. Однако анализировались движения оператора и конечного инструмента только в плоскости *Oxy*. Такой подход обусловлен тем, что многие технологические операции, например,

сборка и упаковка, выполняются на фиксированном уровне рабочего стола или конвейера. Человек, обладая вытянутой по вертикали формой, перемещается по рабочей зоне преимущественно на одном уровне. По этой причине в рамках данной работы рассмотрение перемещения инструмента по оси Oz не представляет интереса.

Для оценки эффективности работы алгоритма предотвращения столкновений проводилось три различных теста. В первых двух тестах оценивалась производительность алгоритма при различных конфигурациях робота и препятствий. Манипулятор перемещался по траекториям X и Y в 1-м и 2-м тестах соответственно. Третий тест проводился в условиях типичной роботизированной ячейки, где робот выполнял операции захвата и размещения объектов, избегая столкновения с человеком, перемещающимся по общему рабочему пространству по траектории K под углом 45° относительно оси x робота. Во всех тестах минимальное допустимое расстояние сближения человека и манипулятора составляло $0,75$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Тест 1

В данном эксперименте робот оставался в неподвижном состоянии, в то время как человек-оператор подходил к роботу спереди вдоль оси X (рис. 1).

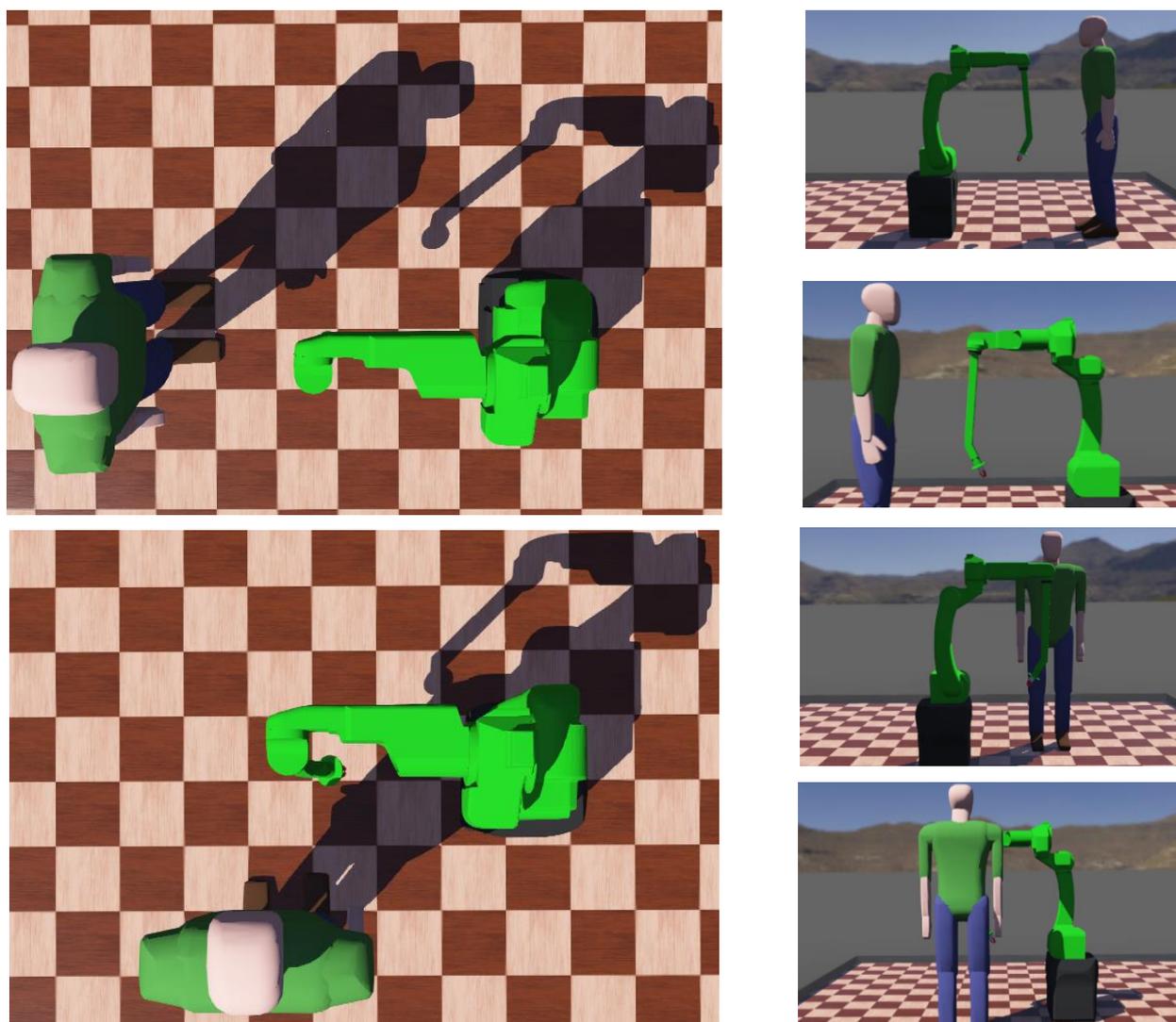


Рис. 1. Сцена виртуального полигона для проведения 1-го и 2-го тестов

Fig. 1. Scene of the virtual testing ground for 1st and 2nd tests

В процессе движения оператора минимальное расстояние между ним и роботом постепенно сокращалось, и при достижении заданного безопасного порога робот начал реагировать, удаляясь от оператора, чтобы избежать возможного столкновения. Моментальные снимки проведения 1-го и 2-го тестов представлены на рис. 2.

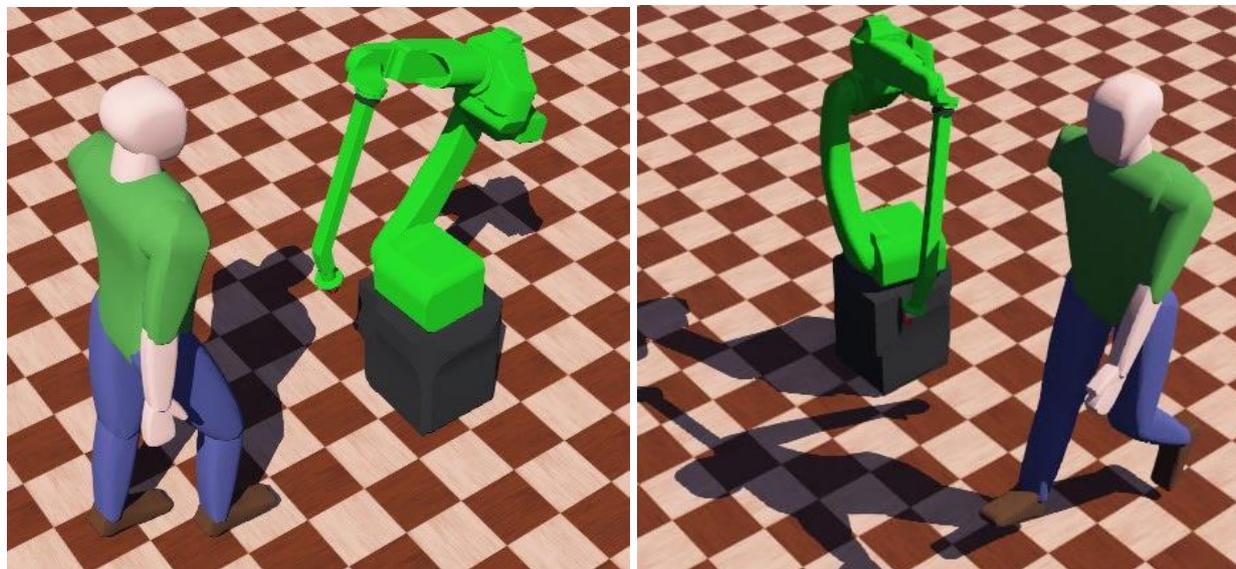


Рис. 2. Симуляция робототехнической ячейки при проведении 1-го и 2-го тестов

Fig. 2. Simulation of the robotic cell during the 1st and 2nd tests

Для анализа поведения системы и оценки реакции робота были выбраны следующие параметры:

1. Положение конечного эффектора робота в декартовой системе координат.
2. Положение оператора в декартовой системе координат.
3. Минимальное расстояние между роботом и оператором в каждый момент времени.
4. Скорость конечного эффектора во времени.

На основании полученных данных были построены графики, которые позволили провести анализ работы системы. На рис. 3 отображены координаты оси x конечного эффектора и оператора, а также разница между ними. В начальный момент времени робот оставался неподвижным, в то время как оператор двигался с постоянной скоростью порядка 1,15 м/с вдоль оси x , направляясь к роботу. Как только расстояние между роботом и оператором сократилось до заданного безопасного значения, робот начал удаляться, реагируя на приближение человека.

Как только оператор изменил траекторию движения и начал удаляться от робота, манипулятор возвращался в исходное положение. Цикл движения повторялся несколько раз, и робот продемонстрировал аналогичную реакцию в каждом из циклов. Анализ нескольких циклов моделирования показал, что минимальное расстояние поддерживалось на уровне 0,75 м, что соответствовало установленному порогу безопасности. На рис. 4 представлена зависимость скорости движения конечного эффектора вдоль оси x от времени, которая позволяет оценить реакцию системы на изменения в окружении.

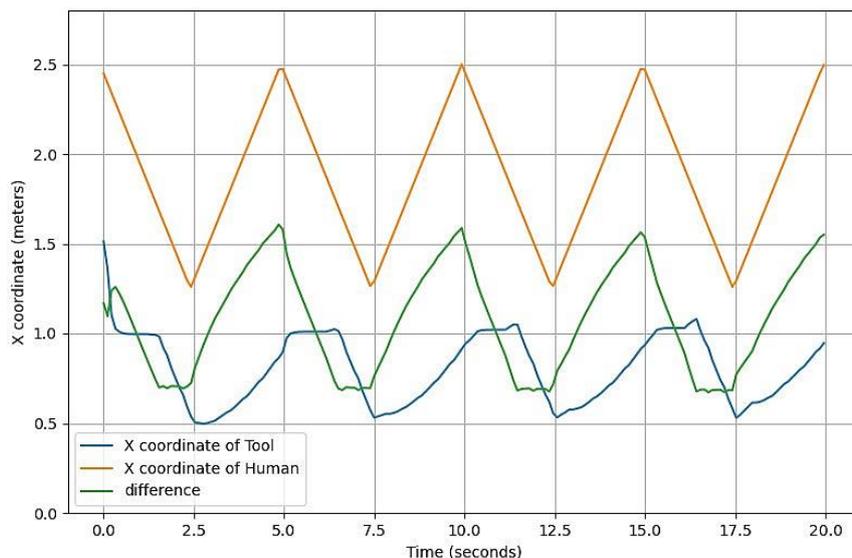


Рис. 3. Изменение координаты X человека, инструмента робота и их разница при проведении 1-го теста

Fig. 3. Change in coordinates of a person, a robot tool and their difference during the 1st test

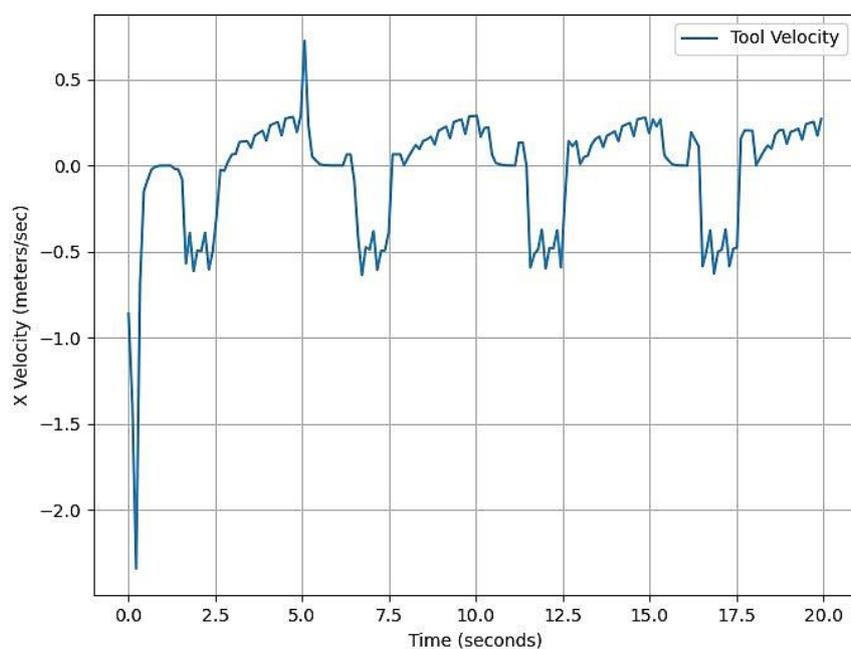


Рис. 4. Изменение скорости движения инструмента вдоль оси Ox

Fig. 4. Change in the movement speed of the tool along the Ox axis

Полученные результаты демонстрируют, что предложенный алгоритм успешно решает задачу предотвращения столкновений в реальном времени, что подтверждается стабильной и предсказуемой реакцией робота на приближение оператора.

Тест 2

В данном эксперименте оператор подходил к роботу со стороны вдоль оси Y (рис. 1). В начальный момент времени расстояние между конечным эффектором робота и оператором составляло 2,5 метра, после чего оператор начал двигаться в сторону робота со средней скоростью 1,15 м/с вдоль оси Y манипулятора. На рис. 5 видно, что сначала робот находился в состоянии покоя, пока оператор не приблизился на заданное безопасное рас-

стояние 0,75 м. При достижении этого расстояния робот начал реагировать, отдаляясь с целью предотвращения столкновения.

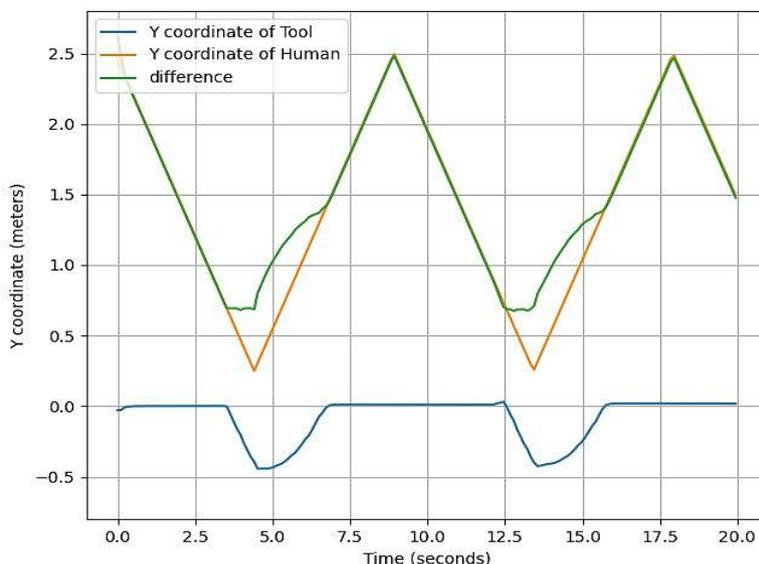


Рис. 5. Изменение координаты Y человека, инструмента робота и их разница при проведении 2-го теста

Fig. 5. Change in the Y coordinate of the human, the robot tool and their difference during the 2nd test

На рис. 6 представлен график изменения скорости движения инструмента вдоль оси Oy. Аналогично предыдущему эксперименту, замечен отвод инструмента при приближении человека и дальнейший его возврат в исходное положение. Этот сценарий, при котором оператор приближается сбоку, отличается от ситуации с фронтальным подходом, рассмотренным ранее, тем, что реакция робота преимущественно зависела от его движения вокруг оси вращения 1-го звена, что связано с особенностями кинематической структуры робота.

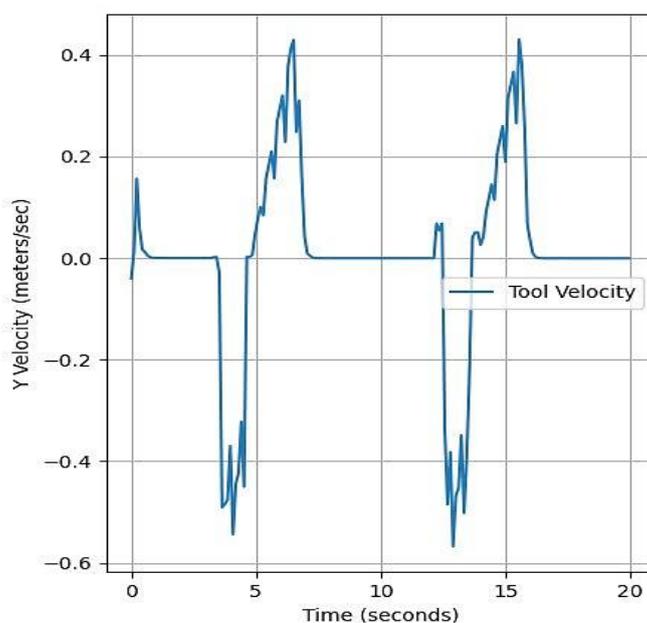


Рис. 6. Изменение скорости движения инструмента вдоль оси Oy

Fig. 6. Change in the movement speed of the tool along the Oy axis

Несмотря на различия в характере движений, результаты демонстрируют аналогичную эффективность работы системы предотвращения столкновений: робот плавно адаптировал свое положение и успешно избегал столкновения с оператором. Эти результаты подтверждают универсальность предложенного алгоритма для различных сценариев взаимодействия человека и робота.

Так как Webots является физическим симулятором, в нем нет инструментов для точного определения скорости объекта, ввиду чего скорость инструмента находится путем численного дифференцирования координаты. По этой причине график скорости имеет колебательный характер в случае 1-го (рис. 5) и 2-го (рис. 6) тестов.

Тест 3

Для выполнения сложных манипуляций с сохранением способности избегания столкновений с динамическими объектами предложенный алгоритм может быть реализован в виде архитектуры конечного автомата (рис. 7). Примером такой реализации является Тест 3. В данном тесте робот выполнял операцию прохождения траектории в виде окружности в плоскости Oxy , которая однозначно отслеживается на графиках изменения координат схвата инструмента в виде периодической функции. Подобный тип движения часто встречается в траекториях движения манипуляторов при выполнении промышленных операций.



Рис. 7. Конечный автомат робототехнической ячейки для контроля столкновений с человеком

Fig. 7. Finite state automaton of a robotic cell for human collision detection

Основные состояния конечного автомата включают:

1. Перемещение робота в начальное положение.
2. Выполнение операции.
3. Замедление робота в случае присутствия человека в рабочей зоне.
4. Запуск безопасного уклонения, если человек пересек критическое расстояние в 0.75 метров.

5. Возврат на траекторию после безопасного уклонения.

Целью теста является обеспечение максимальной точности следования роботом заранее заданной траектории при одновременном избегании столкновений с человеком, который работает в той же зоне, что и робот. Описанный выше конечный автомат позволяет роботу переключаться между различными состояниями в зависимости от текущей ситуации и взаимодействовать с окружением. На рис. 8 наблюдаются изменения координат инструмента относительно базы робота, изменяющиеся по периодическому закону с разным периодом, зависящим от режима работы (стандартный или с пониженной скоростью). Также представлено абсолютное расстояние от инструмента до человека в зависимости от времени. Траектория движения вдоль окружности в плоскости Oxy и траектории уклонений, сформировавшиеся в процессе прохождения теста 3, продемонстрированы на рис. 9.

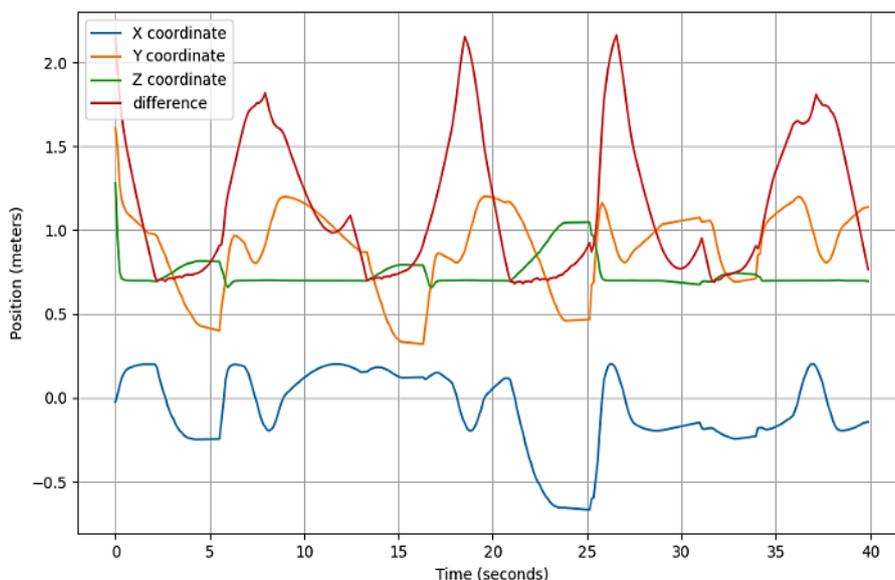


Рис. 8. Изменение координат X , Y , Z инструмента робота и расстояния до человека в 3-м тесте
Fig. 8. Change in X , Y , Z coordinates of the robot tool and the distance to the person in test 3

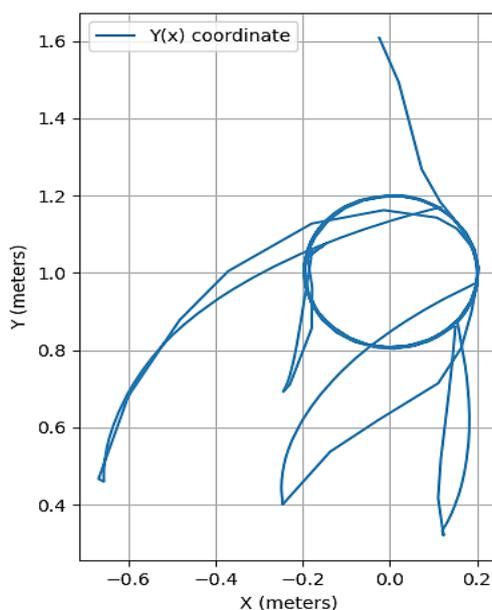


Рис. 9. Траектория движения инструмента робота в плоскости Oxy
Fig. 9. The trajectory of the robot tool in the Oxy plane

На рис. 10 представлены моментальные снимки процесса моделирования 3-го теста. Результаты симуляции показали успешное выполнение задачи: робот не только точно следовал заданной траектории, но и эффективно избегал столкновений с человеком.

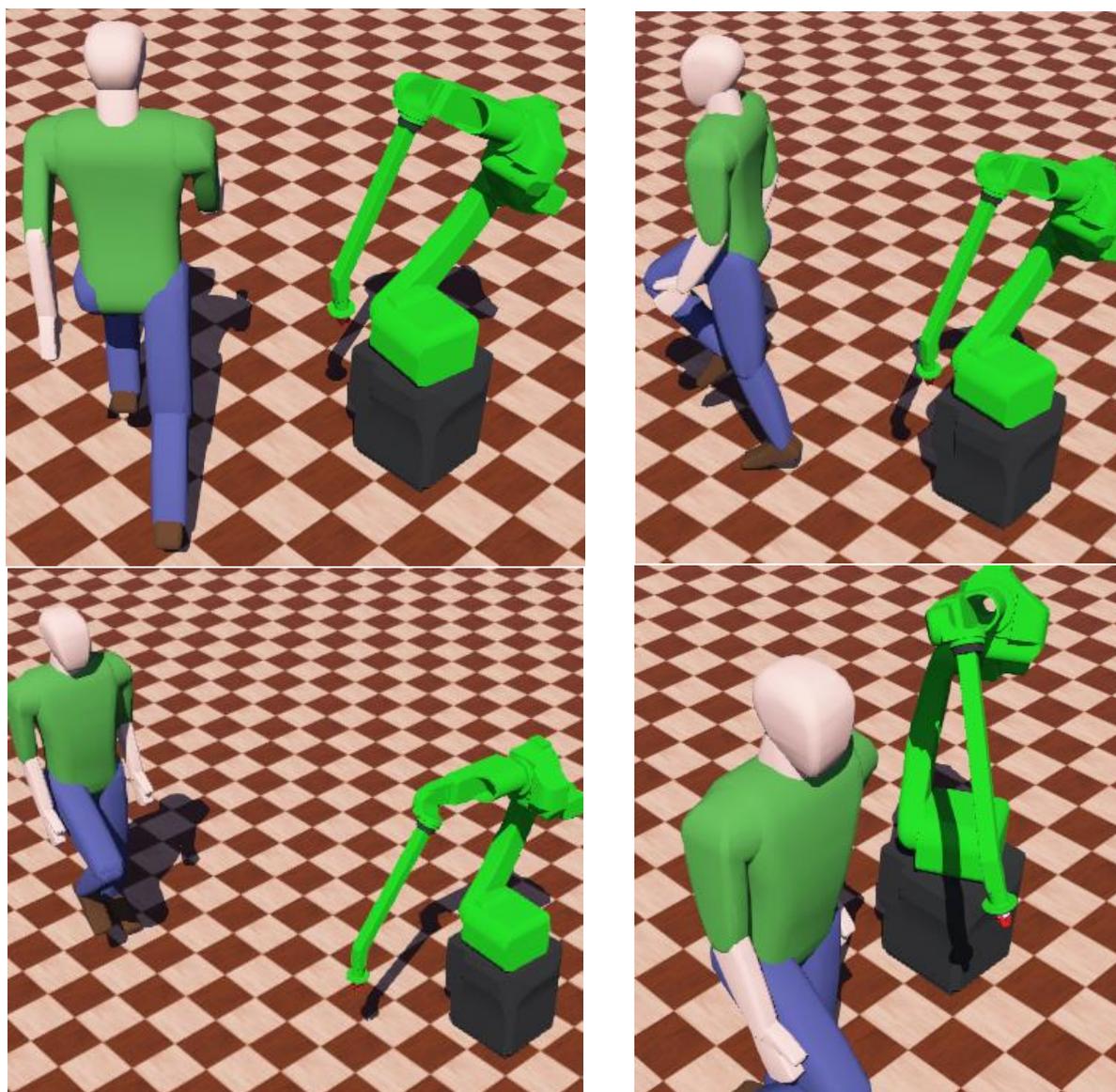


Рис. 10. Симуляция робототехнической ячейки при проведении 3-го теста

Fig. 10. Simulation of the robotic cell during the 3rd test

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм предотвращения столкновений, основанный на методе потенциальных полей и виртуальных сил, продемонстрировал высокую эффективность при работе в динамической среде совместно с человеком-оператором. В процессе выполнения тестов робот успешно адаптировался к изменяющимся условиям окружения, поддерживая безопасное расстояние от подвижных объектов и человека, что подтверждает его надежность в ситуациях, требующих быстрых реакций.

Тем не менее данная работа имеет ряд ограничений. В представленном исследовании не рассматривался вопрос детекции и определения позиции препятствия или человека.

Кроме того, следует учитывать, что использование виртуальных симуляторов, таких как Webots, не всегда способно полностью имитировать реальные условия, особенно в сложных рабочих зонах, где присутствуют другие факторы, влияющие на траекторию робота.

Одним из основных недостатков предложенного алгоритма является отсутствие учета возможного смещения промежуточных звеньев в сторону препятствия при удалении конечного эффектора от приближающегося человека. Для устранения данного недостатка необходимо использовать якобианы, соответствующие промежуточным точкам манипулятора, и вычислять минимальные расстояния между этими точками и препятствиями. Такой подход позволит более точно оценивать риск столкновения и обеспечивать безопасность движения манипулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные задачи коллаборативной робототехники требуют разработки алгоритмов, обеспечивающих предотвращение столкновений между роботом и оператором, что позволяет повысить безопасность, производительность и адаптивность роботизированных систем при выполнении технологических операций.

В данной работе представлен алгоритм предотвращения столкновений на основе метода искусственных потенциальных полей. Вектор притяжения определяется через разницу между текущей позицией центральной точки инструмента и целевой точкой, что обеспечивает движение робота по номинальной траектории. Вектор отталкивания рассчитывается на основе минимального расстояния до препятствий и корректирует движение робота при приближении оператора. Моделирование алгоритма осуществлялось в имитационной среде Webots.

Проведенные тесты демонстрируют, что предложенная система предотвращения столкновений обладает высокой надежностью. Результаты моделирования показали, что система способна успешно адаптироваться к изменениям в окружении и эффективно избегать столкновений при выполнении задач совместной робототехники. Это делает ее пригодной для применения в промышленных средах, где требуется безопасное взаимодействие роботов и людей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Haddadin S., Croft E. Physical human-robot interaction. *Handbook of Robotics*. Springer. 2016. Pp. 1835–1874. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_69
2. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*. 2018. Vol. 55. Pp. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009
3. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5(1). Pp. 90–98. DOI: 10.1109/ROBOT.1985.1087247
4. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Force control*. Springer: London. 2009. Pp. 363–405.
5. Rohmer E., Singh S.P.N., Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. *2013 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520
6. Reinstein M., Hoffmann M. Dead reckoning in a dynamic quadruped robot based on multimodal proprioceptive sensory information. *IEEE Transactions on Robotics*. 2012. Vol. 29(2). Pp. 563–571. DOI: 10.1109/TRO.2012.2228309

7. Michel O., Rohrer B. Webots: professional mobile robot simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2009. Vol. 5(3). Pp. 39–42. DOI: 10.5772/5618
8. Dellaert F., Fox D., Burgard W., Thrun S. Monte Carlo localization for mobile robots. *Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation*. 1999. Pp. 1322–1328.
9. Jiang Y., Yang C., Ju Z., Liu J. Obstacle avoidance of a redundant robot using virtual force field and null space projection. *Intelligent Robotics and Applications: XII International Conference, ICIRA*. Springer. 2019. Pp. 728–739. DOI: 10.1007/978-3-030-27526-6_64
10. Kim C.Y., Kim Y.H., Ra W.S. Modified 1D virtual force field approach to moving obstacle avoidance for autonomous ground vehicles. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2019. Vol. 14. Pp. 1367–1374. DOI: 10.1007/s42835-019-00127-8
11. Xu Q., Zhang T., Zhou K. et al. Active collision Avoidance for robotic Arm based on artificial potential field and deep reinforcement learning. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(11). P. 4936. DOI: 10.3390/app14114936

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Научное исследование было профинансировано образовательными организациями в рамках проекта 2024–2026 годов в рамках гранта FSFS-2024-0012.

Funding. The research was funded by educational organizations within the framework of the 2024–2026 project under grant FSFS-2024-0012.

Информация об авторах

Шереужев Мадин Артурович, кан. тех. наук, мл. науч. сотр. Центра когнитивных технологий и машинного зрения, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1; старший преподаватель кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1; shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>, SPIN-код: 1734-9056;

Арабаджиев Денис Игоревич, инженер Центра когнитивных технологий и машинного зрения, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1; аспирант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1; denisarabadzhiev13@gmail.com, SPIN-код: 7438-1760

Семянников Иван Владимирович, инженер студенческого бюро робототехники, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1; магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, корп. 1; semyannikoviv@student.bmstu.ru

Information about the authors

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Engineering Sciences, Junior Research at the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Senior Teacher at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>, SPIN-code: 1734-9056;

Denis I. Arabadzhiev, Engineer at the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Postgraduate Student at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

denisarabadzhev13@gmail.com, SPIN-code: 7438-1760

Ivan V. Semyannikov, Engineer of Student Robotics Office of Moscow State University of Technology STANKIN;

127055, Russia, Moscow, 1 Vadkovsky lane;

Master Student at the Department SM7 Robotic systems and mechatronics, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street 5, bld. 1;

semyannikoviv@student.bmstu.ru