

МРНТИ 55.30.31  
УДК 621.865.8-182.3(04);

<https://doi.org/10.51889/2020-3.1728-7901.36>

А.А. Ковтун<sup>1</sup>, Н.Н. Керимбаев<sup>2</sup>, Я.В. Метелёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, г. Новокузнецк, Россия

<sup>2</sup>Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ COPPELIASIM

### Аннотация

Использование различных робототехнических систем является кардинальной перестройкой не только промышленной сферы, оно подразумевает иное отношение к процессам мышления, разработке новых систем в разных предметных областях, требующих новых знаний. Наиболее эффективно происходит обучение с конкретной мотивацией и увлекательной формой получения новых знаний. В статье представлено исследование и моделирование процесса автоматического движения робототехнической системы с использованием среды CoppeliaSim. Данная система наиболее приемлема в условиях дистанционного проведения соревнований по робототехнике.

В статье сделан анализ использования среда моделирования CoppeliaSim, выявлены ее положительные стороны. Авторы представили разработку проекта робота в среде моделирования, которая предполагает наличие знаний в областях конструирования, программирования, понимания сути физических процессов и может быть рекомендована для организации соревнований различного уровня.

**Ключевые слова:** робот, моделирование, датчики зрения, CoppeliaSim.

### Аңдатпа

А.А. Ковтун<sup>1</sup>, Н.Н. Керімбаев<sup>2</sup>, Я.В. Метелёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кемеров мемлекеттік университеті, Новокузнецк қ., Россия

<sup>2</sup> ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан

## COPPELIASIM ОРТАСЫН ПАЙДАЛАНЫП РОБОТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ АВТОМАТТЫ ҚОЗҒАЛТУ ҮДЕРІСІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ МОДЕЛДЕУ

Әр түрлі роботтандырылған жүйелерді қолдану тек өндірістік саланы ғана емес, ойлау процестеріне, жаңа білімді қажет ететін әр түрлі пәндік салаларда жаңа жүйелердің дамуына деген басқа қатынасты түбегейлі қайта құру дегенді білдіреді. Жаңа білімді алу нақты мотивацияны және қызықтыратын тиімді оқыту формасы арқылы жүзеге асады. Мақалада CoppeliaSim ортасын қолдана отырып, роботтандырылған жүйенің автоматты қозғалу процесін зерттеу және модельдеу ұсынылған. Бұл жүйе робототехникадан қашықтықтан өткізілетін жарыстарды ұйымдастыру тұрғысынан алып қарағанда қолайлы.

Сондай-ақ, бұл мақалада CoppeliaSim модельдеу ортасын қолдану жайлы мәселелер талданады, оның жағымды жақтары ашылады. Авторлар роботтарды виртуалды жобалау, модельдеу, бағдарламалау, физикалық процестердің мәнін түсіну салаларында білімді қабылдайтын және әр түрлі деңгейдегі жарыстарды ұйымдастыруға пайдалану мүмкіндіктерін баяндайды.

**Түйін сөздер:** робот, моделдеу, көру сенсорлары, CoppeliaSim.

### Abstract

## RESEARCH AND SIMULATION OF THE PROCESS OF AUTOMATIC MOTION OF A ROBOTIC SYSTEM USING THE COPPELIASIM ENVIRONMENT

Kovtun A.A.<sup>1</sup>, Kerimbayev N.N.<sup>2</sup>, Metelev J.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kemerov Stat University, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The use of various robotic systems is a radical restructuring not only of the industrial sphere, it implies a different attitude to thinking processes, the development of new systems in different subject areas that require new knowledge. The most effective is learning with specific motivation and an exciting form of acquiring new knowledge. The article presents a study and modeling of the process of automatic movement of a robotic system using the CoppeliaSim environment. This system is most acceptable in the conditions of remote holding of competitions in robotics. The article analyzes the use of the CoppeliaSim modeling environment, reveals its positive aspects. The authors presented the development of a robot project in a simulation environment, which assumes knowledge in the fields of design, programming, understanding of the essence of physical processes and can be recommended for organizing competitions at various levels.

**Keywords:** robot, simulation, vision sensors, CoppeliaSim.

Использование различных робототехнических систем является кардинальной перестройкой не только промышленной сферы, оно подразумевает иное отношение к процессам мышления, разработке новых систем в разных предметных областях, требующих новых знаний. Наиболее эффективно происходит обучение с конкретной мотивацией и увлекательной формой получения новых знаний.

По мере того как роботы становятся все более распространенными, увеличивается количество исследований, направленных на моделирование процесса автоматического движения робототехнической системы, навигацией и управлением мобильных роботов. В статье Kleeberger K., Vormann R., Kraus W. и др. «Обзор роботизированного схватывания на основе обучения» обсуждаются подходы к роботизированному захвату и манипуляции с объектно-ориентированным знанием и без него. Из-за большого количества данных, необходимых для обучения подходов на основе искусственного интеллекта, симуляции являются привлекательным выбором для обучения роботов. В статье также дается обзор методов и достижений в переходе от моделирования к реальному миру [1].

Исследование Asiain J., Godoy J. “Navigation in Large Groups of Robots, Curr Robot Rep” («Навигация в больших группах роботов») [2]. Авторы изучают проблему предотвращения столкновений двух и более роботов, предлагают роботизированные платформы и тренажеры для крупномасштабных робототехнических систем. Унифицированную структуру для онлайн-планирования, мониторинга и выполнения задач рассматривают Saveriano M., Piater J. [3] в работе «Сочетание систем принятия решений и динамических систем для мониторинга и выполнения задач манипуляции». В работе представлена унифицированная структура, которая объединяет принятие решений на высоком уровне, непрерывный мониторинг выполнения и генерацию движения онлайн.

Проблемы планирования движения мобильных роботов исследуются Sarid S., Shapiro A. «Классификация задачи поиска траектории нескольких роботов в квадратичный класс конкурентной сложности». В статье описаны алгоритмы онлайн-навигации, которые решают обсуждаемые проблемы- Multi-Robot Search Area Multiplication и Multi-Robot BUG [4].

Соревновательная робототехника является подходящей формой изучения различных аспектов формирующегося нового технологического уклада на базе высокоавтоматизированных систем, объединяемых в единую информационно-управленческую сеть.

Lye N.C., Wong K.W., Chiou A. (2011) в статье «Платформа образовательной робототехники: многоэтапный подход к расширению обучения пользователей в условиях соревнований» образовательная робототехника представлена в качестве образовательного инструмента для обеспечения долгосрочной и прогрессивной учебной деятельности для разных возрастных групп. Авторы обращают внимание на то, что использование роботов в образовании не должно быть разовым проектом с единственной целью – участвовать в соревнованиях [5].

Робототехнические соревнования для разных возрастов участников проводятся во всех развитых странах, категорий таких соревнований несколько сотен, подробно и с фактическим материалом это изложено в работе [6]. Широко используются различные конструкторские платформы (например, Lego), многие компоненты проектируются и печатаются на 3D-принтерах, используются различные микроконтроллеры для управления такими системами.

В современных условиях из-за ограничений на свободное передвижение во многих странах (по причине пандемии) становится актуальной возможность проведения дистанционных соревнований. Наиболее подходящей платформой проведения таких соревнований является предлагаемая швейцарскими разработчиками среда моделирования CorreliaSim, учебная версия которой полнофункциональна и предлагается бесплатно. Для изучения этой среды достаточно провести несколько вступительных занятий (дистанционно) и можно дальнейшие аспекты проектирования и программирования роботов проводить в форме подготовки к проведению все более усложняющихся видов дистанционных соревнований, как это проанализировано и предложено в работе [7].

В качестве примера рассмотрим простого двухколесного робота со свободно вращающейся задней опорой, которые обычно используются в реальных робототехнических соревнованиях при движении по линии на скорость с избеганием схода с линии и предотвращением столкновений с другими роботами в этом же заезде. Поля для таких соревнований могут быть весьма различны, мы рассмотрим движение робота по полю, изображенному на рисунке 1, в виде замкнутой линии со взаимными пересечениями. Поле создано в среде моделирования робототехнических объектов

CorreliaSim, похожим на такие, которые используются в соревнованиях типа шорт-трек с некоторым усложнением, в виде небольшого участка змейки, с тем, чтобы проверить автономную самоуправляемость робота.

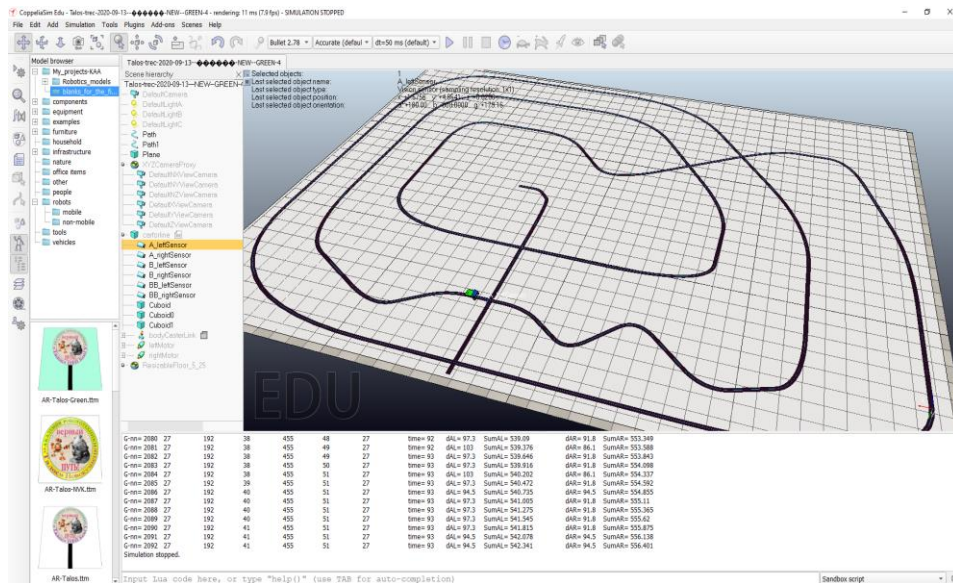


Рисунок 1. Рабочий стол среды CorreliaSim с изображением поля для шорт-трека.

На рисунке 1 представлена основная компоновка окон среды моделирования CorreliaSim, содержащая в нижней части консольное окно с числовыми данными, полученными в результате предыдущего заезда одиночного робота, которые используются для анализа движения по траектории, обозначенной черной линией. Интерфейс CorreliaSim в целом весьма информативен, может быть гибко перенастроен для удобства разработки различных робототехнических систем и комплексов. Для проведения исследования используем робота, конструкция которого представлена на рисунке 2 – робот на позиции старта.

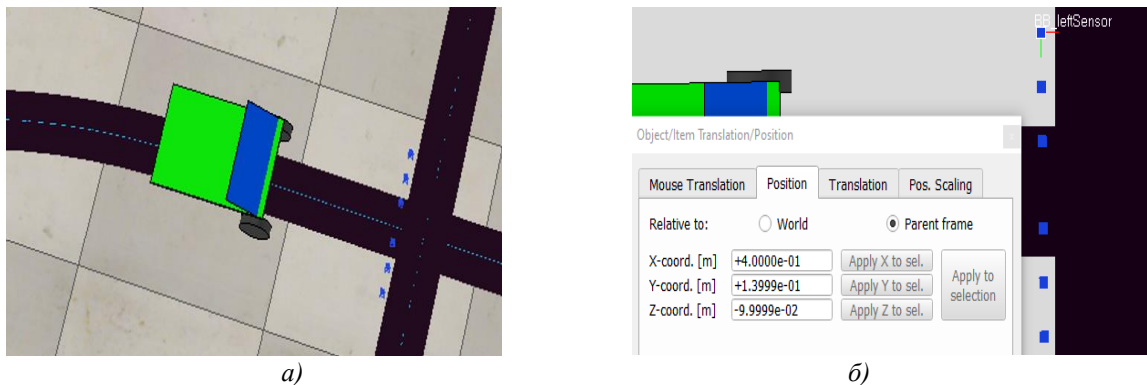


Рисунок 2. Расположение 6 датчиков зрения относительно конструктива робота

Все 6 датчиков зрения расположены вдоль поперечной линии, удаленной от оси приводных колес на расстояние 400 мм – это ось «X» (см. рис. 2 б). На этой поперечной линии датчики расположены симметрично относительно осевой линии робота с шагом 50 мм., внутри каждой тройки датчиков слева и справа, между двумя центральными (между этими тройками) – 80 мм., (соответственно, крайний левый ~140 мм. по «Y», см. рис. 2 б), и вся измерительная база составляет 280 мм. Все размеры соответствуют локальной системе координат, привязанной к середине оси приводных колес робота.

На рисунке 1 робот расположен в зоне старта-финиша, перед поперечной линией, не пересекая её никакой частью, все датчики не соприкасаются с линией (см. рис. 2 а). За линией старта проходит участок змейки с тем, чтобы если настроечные параметры завышены, и робот быстро уходит с маршрута линии следования, не тратится время на ожидание прохождения этого участка, сокращается время верной настройки параметров робота. К настроечным параметрам в конструкции

робота относятся расположение датчиков зрения по отношению как к самому роботу, так и между собой, характеристики моторов.

В управлении роботом настроечных параметров также две группы: общий алгоритм управления и соответствующие коэффициенты изменения скоростей приводных колес робота в зависимости от показаний датчиков зрения. Изучению последнего вопроса посвящено настоящее исследование.

Безусловно, имеются и другие факторы влияния, такие как типы сигналов датчиков, способы более точного измерения расстояний, некоторые из них описываются в работах [8] и [4] с целью подготовки «абсолютных» победителей их стоит принять во внимание, но в данном контексте такой комплексный подход пока откладываем.

Все датчики зрения пронумерованы слева на право по ходу робота: рисунок 2 б – крайний левый с локальными координатами (+0.4, +0.14) – датчик 1. Датчик 6 – крайний правый имеет координаты (+0.4, -0.14). Первоначально 1, 2, 5, 6 датчики находятся над светлым участком поля, считываемые значения близки к единице. Датчики 3 и 4 находятся над черной линией, их показания близки к нулю. Используется простой алгоритм вычисления управляющего воздействия в зависимости от показаний датчиков (рисунок 3)

```


42 |  UV=6*(sensorsArray[1]-sensorsArray[6])+2.5*(sensorsArray[2]
43 | -sensorsArray[5])+1.2*(sensorsArray[3]-sensorsArray[4])
    
```

Рисунок 3. Фрагмент кода

В переменную UV заносятся разностные показания симметричных датчиков с соответствующими весовыми коэффициентами (6, 2.5, 1.2), на величину которой корректируются скорости левого и правого моторов (в противоположные стороны). Формула и сами весовые коэффициенты могут изменяться – это еще более тонкие настройки скорости прохождения всего маршрута.

В процессе непосредственного исследования учитывались следующие параметры.

1. Подсчитывалось количество изменений состояний каждого датчика, когда происходили переходы считываемых значений с белого на черный и наоборот.

2. Определялись углы поворотов левого и правого колес – по сути фиксировались изменения скоростей вращения и длины путей, которые проходили каждое колесо, с частотой 20 герц.

Полученные значения, в виде изменения скоростей вращения левого и правого колес приведены на рисунке 4 для двух вариантов номинальной скорости: 45 и 35 единиц. На графике хорошо заметны прямолинейные участки, когда скорости моторов одинаковы. Для большей точности в таблице на рисунке 5 приведены финишные участки фиксации вычисляемых параметров в числовом виде для 7 различных случаев номинальной начальной скорости.

Из графиков на рисунке 4 видно, что наибольший размах разницы скоростей колес (угла поворота в градусах за условную единицу времени) происходит вначале, когда робот проезжает змейку, и затем еще несколько раз (7 – 8) – это соответствует перекресткам, когда все датчики оказываются над черной линией одновременно.

Эта ситуация предусматривается и программно исключается снижение скоростей обоих моторов одновременно. В таблице на рисунке 5 первое число соответствует количеству циклов расчета (np=). Оно меняется от 1542 (скорость 45) до 13752 (скорость 5). (Заметим, скорости ниже 20 неактуальны, «рысканье» робота становится слишком большим – рисунок 6.).

Следующая группа из 6 чисел, например: 54, 194, 46, 308, 62, 44 – это число срабатываний всех 6 датчиков слева направо. За весь путь по траектории каждый датчик такое число раз изменял свое значение на противоположное, т.е. наезжал на участки другого цвета – если число поделить пополам – получим число корректировок скорости (въехал-выехал). Следует также вычесть 8 перекрестков...

Далее в таблице на рисунке 5 приводится текущее расчетное время (time=), затем параметры текущего значения скорости поворота (dAL, dAR) и накопленный суммарный путь в оборотах для левого и правого колес (SumAL, SumAR).

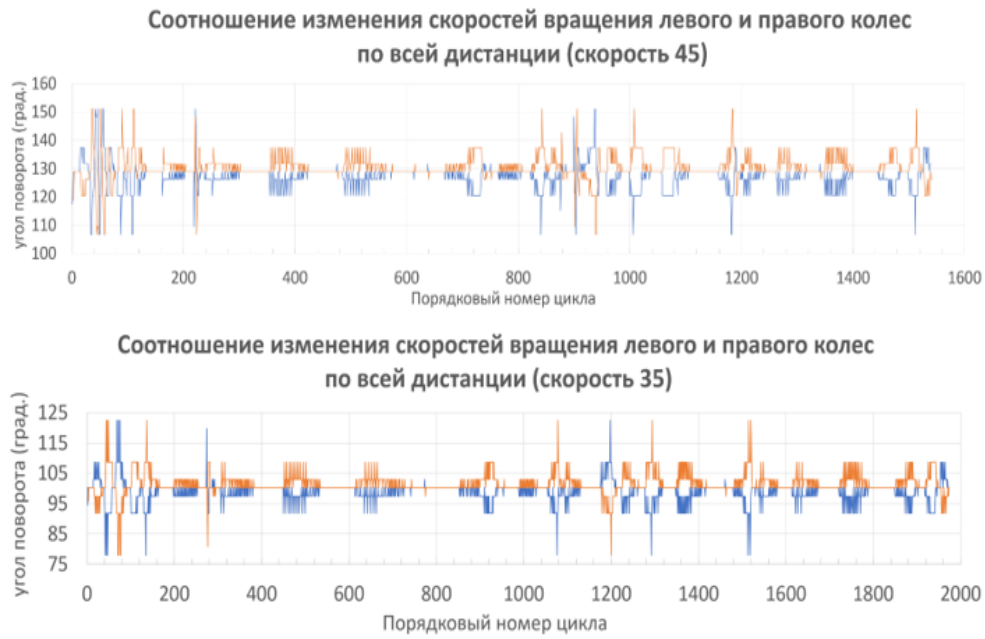


Рисунок 4. Угловые скорости колес

G-nn= 1540 54 194 46 308 62 44 time= 60 dAL= 131.7 SumAL= 543.985 dAR= 126.2 SumAR= 557.663
G-nn= 1541 54 194 46 308 62 44 time= 60 dAL= 131.7 SumAL= 544.351 dAR= 126.2 SumAR= 558.013
G-nn= 1542 54 194 46 308 62 44 time= 60 dAL= 131.7 SumAL= 544.717 dAR= 126.2 SumAR= 558.363
simulation stopping...
G-nn= 1728 41 196 48 348 62 30 time= 68 dAL= 114.6 SumAL= 542.516 dAR= 114.6 SumAR= 556.196
G-nn= 1729 41 196 49 348 62 30 time= 68 dAL= 117.3 SumAL= 542.842 dAR= 111.8 SumAR= 556.507
G-nn= 1730 41 196 49 348 62 30 time= 68 dAL= 114.6 SumAL= 543.16 dAR= 114.6 SumAR= 556.825
simulation stopping...
G-nn= 1971 35 199 32 441 51 25 time= 78 dAL= 100.3 SumAL= 542.056 dAR= 100.3 SumAR= 556.062
G-nn= 1972 35 199 33 441 51 25 time= 78 dAL= 103 SumAL= 542.342 dAR= 97.5 SumAR= 556.333
G-nn= 1973 35 199 34 441 51 25 time= 78 dAL= 100.3 SumAL= 542.621 dAR= 100.3 SumAR= 556.612
simulation stopping...
G-nn= 2298 25 193 45 558 49 23 time= 89 dAL= 85.9 SumAL= 541.32 dAR= 85.9 SumAR= 555.503
G-nn= 2299 25 193 46 558 49 23 time= 89 dAL= 85.9 SumAL= 541.559 dAR= 85.9 SumAR= 555.742
G-nn= 2300 25 193 47 558 49 23 time= 89 dAL= 88.7 SumAL= 541.805 dAR= 83.2 SumAR= 555.973
simulation stopping...
G-nn= 3443 17 171 85 968 43 19 time= 129 dAL= 60 SumAL= 540.687 dAR= 54.5 SumAR= 554.861
G-nn= 3444 17 171 85 968 43 19 time= 129 dAL= 57.3 SumAL= 540.846 dAR= 57.3 SumAR= 555.02
G-nn= 3445 17 171 85 968 43 20 time= 129 dAL= 57.3 SumAL= 541.005 dAR= 57.3 SumAR= 555.179
simulation stopping...
G-nn= 6882 19 111 247 1709 59 15 time= 269 dAL= 28.6 SumAL= 542.7 dAR= 28.6 SumAR= 557.115
G-nn= 6883 19 111 247 1709 59 15 time= 269 dAL= 28.6 SumAL= 542.78 dAR= 28.6 SumAR= 557.195
G-nn= 6884 19 111 247 1709 60 16 time= 269 dAL= 28.6 SumAL= 542.86 dAR= 28.6 SumAR= 557.275
Simulation stopped.
G-nn= 13750 21 127 303 2163 83 19 time= 527 dAL= 17.1 SumAL= 547.159 dAR= 11.6 SumAR= 560.689
G-nn= 13751 21 127 303 2163 84 20 time= 528 dAL= 14.3 SumAL= 547.199 dAR= 14.3 SumAR= 560.729
G-nn= 13752 22 128 303 2163 84 21 time= 528 dAL= 33.8 SumAL= 547.293 dAR= 354.8 SumAR= 561.715
simulation stopping...

Рисунок 5. Финальные строки расчетов со скоростями 45-40-35-30-20-10-5

Видно, что минимальные значения приходятся на скорость 20 (541.005 и 555.179). Тем не менее, общее соотношение пути правого колеса больше левого наблюдается для всех исследуемых режимов.

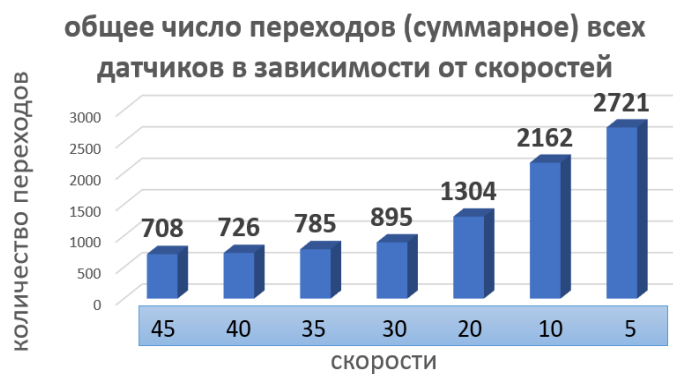


Рисунок 6. «Рысканье» робота в зависимости от номинальной скорости

### Выводы

1. Моделирование поведения роботов в среде CoppeliaSim дает результаты, соответствующие их реальному поведению с соблюдением физических закономерностей.
2. Разработка проекта робота в среде моделирования предполагает наличие знаний в областях конструирования, программирования, понимания сути физических процессов и может быть рекомендована для организации соревнований различного уровня.

### Список использованной литературы:

- 1 Kleeberger, K., Bormann, R., Kraus, W. et al. A Survey on Learning-Based Robotic Grasping. *Curr Robot Rep* (2020). <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00021-6>
- 2 Asiain, J., Godoy, J. Navigation in Large Groups of Robots. *Curr Robot Rep* (2020). <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00017-2>
- 3 Saveriano, M., Piater, J. Combining decision making and dynamical systems for monitoring and executing manipulation tasks. *Elektrotech. Inftech.* 137, 309–315 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00816-7>
- 4 Sarid, S., Shapiro, A. Classifying the multi robot path finding problem into a quadratic competitive complexity class. *Ann Math Artif Intell* 52, 169–203 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9122-0>
- 5 Lye N.C., Wong K.W., Chiou A. (2011) Framework for Educational Robotics: A Multiphase Approach to Enhance User Learning in a Competitive Arena. In: Chang M., Hwang WY., Chen MP., Müller W. (eds) *Edutainment Technologies. Educational Games and Virtual Reality/Augmented Reality Applications. Edutainment 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6872. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23456-9\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23456-9_59)
- 6 Kerimbayev N. et al. Robotics in the international educational space: Integration and the experience // *Education and Information Technologies*. – 2020. – С. 1-17.
- 7 Ковтун А. А. Исследование возможности организации виртуальных робототехнических соревнований / А. А. Ковтун, Г.Е. Корнеев, А.К. Прохоров // *Информация и образование: границы коммуникаций: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции*. – 2020. – № 12 (20). – С. 163-166.
- 8 Ковтун А. А. Выбор типа сигнала для регистрации скорости робота на платформе ARDUINO / А. А. Ковтун, Я. В. Метелев, О. В. Михайлова // *Использование цифровых средств обучения и робототехники в общем и профессиональном образовании: опыт, проблемы, перспективы: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции*. – 2017. – С. 77-81.
- 9 Ковтун А. А. Точное измерение расстояния робототехнической системой / А. А. Ковтун, Я. В. Метелев, О. В. Михайлова // *Использование цифровых средств обучения и робототехники в общем и профессиональном образовании: опыт, проблемы, перспективы: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции*. – 2017. – С. 82-86

### References

- 1 Kleeberger, K., Bormann, R., Kraus, W. (2020) A Survey on Learning-Based Robotic Grasping. *Curr Robot Rep*. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00021-6>. (In English)
- 2 Asiain, J., Godoy, J. (2020) Navigation in Large Groups of Robots. *Curr Robot Rep*. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00017-2>. (In English)
- 3 Saveriano, M., Piater, J. (2020) Combining decision making and dynamical systems for monitoring and executing manipulation tasks. *Elektrotech. Inftech.* 137, 309–315. <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00816-7>. (In English)
- 4 Sarid, S., Shapiro, A. (2008) Classifying the multi robot path finding problem into a quadratic competitive complexity class. *Ann Math Artif Intell* 52, 169–203. <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9122-0>. (In English)
- 5 Lye N.C., Wong K.W., Chiou A. (2011) Framework for Educational Robotics: A Multiphase Approach to Enhance User Learning in a Competitive Arena. In: Chang M., Hwang WY., Chen MP., Müller W. (eds) *Edutainment*

*Technologies. Educational Games and Virtual Reality/Augmented Reality Applications. Edutainment 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6872. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23456-9\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23456-9_59). (In English)*

6 Kerimbayev N. (2020) et al. *Robotics in the international educational space: Integration and the experience. Education and Information Technologies. 1-17. (In English)*

7 A. A. Kovtun, G.E. Korneev, A.K. Prohorov (2020) *Issledovanie vozmozhnosti organizacii virtual'nyh robototekhnicheskikh sorevnovanij [Research on the possibility of organizing virtual robotics competitions]. Informacija i obrazovanie: granicy kommunikacij: sbornik nauchnyh trudov XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. № 12 (20). 163-166. (In Russian)*

8 A. A. Kovtun, Ja. V. Metelev, O. V. Mihajlova (2017) *Vybor tipa signala dlja registracii skorosti robota na platforme ARDUINO [Choosing the type of signal for registering the speed of a robot on the ARDUINO platform]. Ispol'zovanie cifrovych sredstv obuchenija i robototekhniki v obshhem i professional'nom obrazovanii: opyt, problemy, perspektivy: sbornik nauchnyh statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 77-81. (In Russian)*

9 A. A. Kovtun, Ja. V. Metelev, O. V. Mihajlova, (2017) *Tochnoe izmerenie rasstojanija robototekhnicheskoy sistemoj [Accurate distance measurement by a robotic system]. Ispol'zovanie cifrovych sredstv obuchenija i robototekhniki v obshhem i professional'nom obrazovanii: opyt, problemy, perspektivy: sbornik nauchnyh statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 82-86. (In Russian)*