

Построение искусственной иммунной системы для реализации искусственного интеллекта в компьютерной игре

И. Ф. Астахова¹, Е. И. Киселева^{2*}, Н. В. Беляева¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация
Адрес: 394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», г. Воронеж, Российская Федерация
Адрес: 394043, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86

* ekaterkisel@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлена разработка и исследование модели формализации процесса принятия решений в компьютерной игре с использованием методов искусственного интеллекта. В настоящее время с этой целью созданы и применяются различные искусственные нейронные сети и экспертные системы. Анализ данных работ показал, что данные методы показывают хорошие результаты, однако имеют ряд недостатков, самыми существенным из которых является сложность организации и большое время, затрачиваемое на обучение нейронной сети. Таким образом, ставится проблема разработки новых алгоритмов, сравнимых по скорости принятия решения с искусственными нейронными сетями и экспертными системами и при этом обладающих меньшим временем обучения. Одним из путей решения этой задачи является разработка модели принятия решений на основе искусственной иммунной системы. Целью работы является разработка и исследование модели формализации процесса принятия решений в компьютерной игре с использованием методов искусственного интеллекта. Для демонстрации возможностей применения искусственной иммунной системы в компьютерных играх была выбрана игра «точки». Данная игра относится к разряду логических, в которой по умолчанию могут играть только два человека. В данной игре позиционное стратегическое планирование сочетается с тактическим перебором вариантов. Для организации поиска решения в дереве решений был создан игровой искусственный интеллект с применением методов, основанных на принципах иммунной системы. Искусственная иммунная система представляет идеализированный вариант естественного аналога и воспроизводит ключевые составляющие природного процесса: отбор лучших антител популяции в зависимости от степени их аффинитета (близости) к антигену, клонирование антител, мутация антител.

Ключевые слова: игровой искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть, искусственная иммунная система

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Астахова И. Ф., Киселева Е. И., Беляева Н. В. Построение искусственной иммунной системы для реализации искусственного интеллекта в компьютерной игре // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 2. С. 367-373. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.367-373>

© Астахова И. Ф., Киселева Е. И., Беляева Н. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Building an Artificial Immune System for the Implementation of Artificial Intelligence in a Computer Games

I. F. Astachova^a, E. I. Kiseleva^{b*}, N. V. Belyaeva^a

^a Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Address: 1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation

^b Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation

Address: 86 Lenin St., Voronezh 394043, Russian Federation

* ekaterkisel@mail.ru

Abstract

This article presents the development and study of a model for formalizing the decision-making process in a computer game using artificial intelligence methods. Currently, various artificial neural networks and expert systems have been created and used for this purpose. The analysis of these works showed that these methods show good results, but they have a number of disadvantages, the most significant of which is the complexity of the organization and the long time spent on training the neural network. Thus, the problem of developing new algorithms is posed that is comparable in decision-making speed with artificial neural networks and expert systems and at the same time has less training time. One way to solve this problem is to develop a decision-making model based on an artificial immune system. The aim of the work is to develop and study a model for formalizing the decision-making process in a computer game using artificial intelligence methods. To demonstrate the possibilities of using the artificial immune system in computer games, the game "dots" was chosen. This game belongs to the category of logical ones, in which only two people can play by default. In this game, positional strategic planning is combined with tactical enumeration of options. To organize the search for a solution in the decision tree, a gaming artificial intelligence was created using methods based on the principles of the immune system. The artificial immune system is an idealized version of the natural analogue and reproduces the key components of the natural process: selection of the best antibodies in the population depending on the degree of their affinity (proximity) to the antigen, antibody cloning, antibody mutation. An artificial immune system represents an idealized version of a natural analogue and reproduces the key components of a natural process: selection of the best antibodies in a population depending on the degree of their affinity (proximity) to an antigen, cloning of antibodies, and mutation of antibodies.

Keywords: artificial neural network, artificial immune system, artificial intelligence in computer games

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Astachova I.F., Kiseleva E.I., Belyaeva N.V. Building an Artificial Immune System for the Implementation of Artificial Intelligence in a Computer Games. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022; 18(2):367-373. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.367-373>



Введение

В настоящее время компьютерные игры являются одной из наиболее развивающихся отраслей информационных технологий. Игры используются не только в индустрии развлечений, но и как обучающие средства. Оценка качества компьютерной игры производится по целому ряду параметров, включающих сюжет, графику и постановку. Однако наиболее важной составляющей успеха игры является система искусственного интеллекта, применяемая для моделирования действий игроков. Однако создание системы, максимально реалистично реализующих действия игроков, требует дополнительных затрат на разработку и реализацию. Разработчики современных игр придерживаются некоторого уровня структурной сложности и реалистичности искусственного интеллекта, считая его достаточным. Рост вычислительных мощностей игровых платформ позволяет достичь нового уровня взаимодействия с игроком, повысить его скорость и реалистичность.

Игровой искусственный интеллект реализуется с помощью достаточно ограниченного набора средств: искусственных нейронных сетей, эволюционных алгоритмов, специализированных архитектур построения систем искусственного интеллекта. Генетические алгоритмы или нейронные сети широко применяются, существует много уже готовых программ и библиотек, их использующих. При использовании нейронных сетей для программирования искусственного интеллекта вероятность правильного решения очень высока.

Но также нейронные сети имеют ряд недостатков. Пожалуй, самым существенным из них является сложность и большое время обучения сети. Это время может составлять десятки часов. Поэтому стоит проблема разработки новых математических алгоритмов, имеющих высокую вероятность принятия правильного решения, сравнимую с нейронными сетями, но обладающих меньшим временем обучения. Одним из них является алгоритм искусственной иммунной системы [1-22].

В данный момент отсутствует единая модель искусственной иммунной системы для разработки искусственного интеллекта в компьютерных и мобильных играх.

Таким образом, ставится проблема разработки новых алгоритмов, позволяющих реализовать взаимодействие с игроком в компьютерной игре, имеющих скорость и реалистичность, сравнимую с искусственными нейронными сетями и экспертными системами и при этом обладающих меньшим временем обучения. Одним из путей решения этой задачи является разработка модели игрового искусственного интеллекта на основе искусственной иммунной системы¹.

Целью настоящей работы является разработка и исследование модели формализации процесса принятия решений в компьютерной игре с использованием методов искусственной иммунной системы.

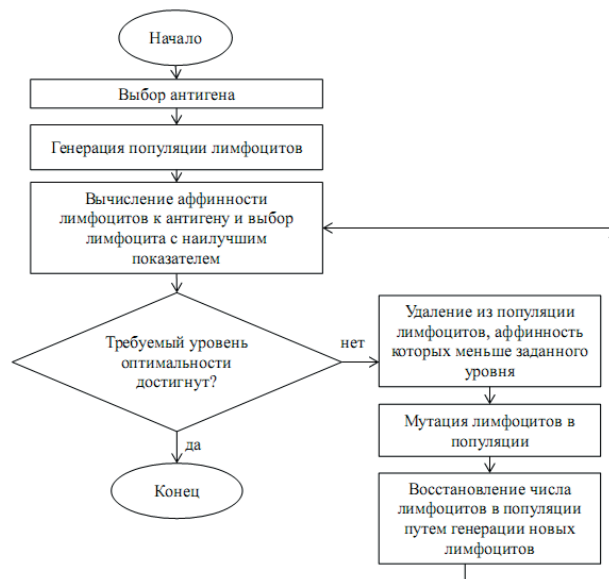
Материалы и методы. Для демонстрации возможностей применения искусственной иммунной системы в компьютерных играх была выбрана игра «точки». Эта игра является разно-

видностью японской игры «go», широко распространена в России, на Украине, в Белоруссии и Казахстане.

Данная игра относится к разряду логических, в которой по умолчанию могут играть только два человека. В данной игре позиционное стратегическое планирование сочетается с тактическим перебором вариантов. Основная цель данной игры – победить соперника путем захвата территории противника путем создания замкнутой цепи, которая состоит только из точек одного цвета. Победитель определяется путем подсчета захваченных точек противника.

Игру можно представить в виде дерева решений, где каждый узел будет представлять собой шаг решения задачи (или ход в игре), а ветви в дереве будут соответствовать какой-либо стратегии игры, а листья представляют собой решение (или итоговые позиции). Основной целью является нахождение в дереве лучший путь от корня до листа. Деревья решений обычно невероятно велики. Например, для данной игры древо решений будет насчитывать около 500000 узлов, при размере поля три на три клетки, для реального игрового поля размером 30x30 количество узлов огромно. Для организации поиска решения в дереве решений был создан игровой искусственный интеллект с применением методов, основанных на принципах иммунной системы.

Искусственная иммунная система представляет идеализированный вариант естественного аналога и воспроизводит ключевые составляющие природного процесса: отбор лучших антител популяции в зависимости от степени их аффинитета (близости) к антигену, клонирование антител, мутация антител [16-25]. Алгоритм искусственной иммунной системы представлен на рисунке 1.



Р и с. 1. Алгоритм искусственной иммунной системы
Fig. 1. Artificial Immune System Algorithm

¹ Каширина И. Л. Нейросетевые технологии. Воронеж: ВГУ, 2008. 72 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23726984> (дата обращения: 13.04.2022); Астахова И. Ф., Киселева Е. И. Алгоритм использования искусственной иммунной системы для оптимизации целевого компонента информационной образовательной системы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 61-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29880179> (дата обращения: 13.04.2022).



Для данной задачи модель иммунной системы можно представить следующим образом:

1. Антигеном A_g является игровое поле (матрица 30×30 , в которой есть три типа элементов – свободные клетки, клетки игрока и клетки противника)
2. Антителом A_n является матрица, представляющая из себя часть игрового поля, в которой будет сделан ход размерностью 7×7
3. Аффинность антитела к антигену вычисляется следующим образом:

$$F(A_g, A_n) = \text{MinMax}(\text{kill}2_m - \text{kill}1_m), \quad (1)$$

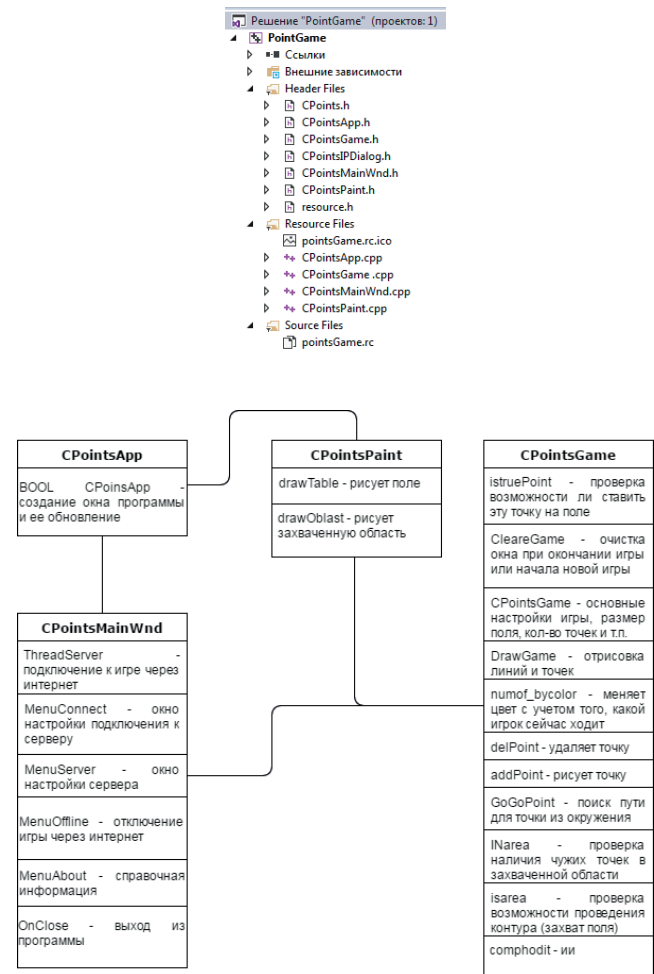
где m – глубина просчета ходов по дереву вариантов, $\text{kill}2$ и $\text{kill}1$ – число окруженных точек противника и число своих окруженных точек соответственно. Значение функции MinMax рассчитывается на множестве вершин дерева вариантов, без учета ходов противника.

Алгоритм функционирования искусственной иммунной системы:

1. Формируется популяция антигенов M_{A_g} антигенов: Случайным образом выбираются координаты точки игрового поля (x, y) , затем формируется матрица, представляющая собой часть игрового поля размером 7 на 7 , для которой точка (x, y) – верхний левый угол. Численность популяции антигенов n подбирается экспериментально
2. Для каждого из антител вычисляется функция аффинности.
3. Выбирается p антител с наилучшей аффинностью и создаются их копии (количество копий каждого антитела равно k)
4. Вычисляется аффинность клонов антител
5. Клоны с наибольшей аффинностью подвергаются мутации (координаты верхнего левого угла произвольно смещаются на одну позицию по вертикали или по горизонтали).
6. Вычисляется аффинность мутировавших клонов, затем из популяции удаляется часть антител с наихудшими показателями аффинности так, чтобы число оставшихся антител было меньше n .
7. Восстановление популяции до n элементов путем генерирования недостающего количества антител случайным образом.
8. Процесс повторяется до стабилизации популяции на протяжении заданного количества циклов.
9. Решение считается антителом с наилучшим показателем аффинности.

Результаты

Для разработки проекта использовался язык C++. Структура проекта представлена на рисунке 2.



Р и с. 2. Структура проекта. Взаимосвязь модулей и их функциональность
F i g. 2. Project Structure. Interrelation of Modules and Their Functionality

Данный проект был разбит на несколько модулей. Каждый из модулей, выполняет одну из следующих задач: отображение и обновление окна программы, нарисовку поля, интерфейс программы, подключение к другому игроку для игры через интернет, реализации искусственного интеллекта.

Модуль $CPointsApp$ создает и обновляет окно программы. Модуль $CPointsPaint$ производит отрисовку игрового поля и отрисовку захваченной области тем или иным игроком.

Модуль $CPointsMainWnd$ позволяет не только подключаться к определенному игроку путем ввода его ip адреса и порта, но и создание сервера для подключения других игроков к нему. В модуле $CPointsGame$ содержится реализация взаимодействия игроков. Функция $CPointsGame$ используется для проверки корректности сделанного игроком хода.

Для вычисления целевой функции используется класс



FitnessFunction, который хранит входные данные – значения искомой функции в точках.

Класс FitnessFunction содержит только один метод, который позволяет вычислить значение целевой функции для переданного выражения, представленного объектом класса Expression.

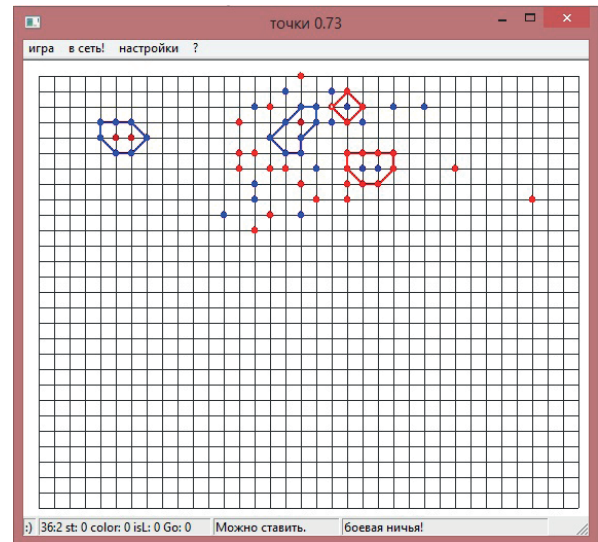
Для осуществления мутации антител был создан класс ExpressionMutator.

Вспомогательный класс ExpressionsImmuneSystemConfig инкапсулирует работу с настройками искусственной иммунной системы. Пример работы программы представлен на рисунке 3.

Заключение

В данной работе получены следующие основные результаты.

1. Разработана формальная модель автоматизации процесса выбора оптимального варианта поведения искусственного интеллекта с применением искусственной системы.
2. Разработан алгоритм процесса выбора оптимального хода в игре с использованием иммунной системы, модифицированный с учетом специфики данной задачи.
3. Создан программный комплекс, реализующий описанные алгоритмы.



Р и с. 3. Скриншот работающей программы
F i g. 3. Screenshot of the running program

References

- [1] Wawrzyński P., Arabas J., Cichosz P. Predictive Control for Artificial Intelligence in Computer Games. In: Rutkowski L., Tadeusiewicz R., Zadeh L.A., Zurada J.M. (eds.) *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2008. ICAISC 2008. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 5097. Springer, Berlin, Heidelberg; 2008. p. 1137-1148. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69731-2_107
- [2] He W. Computer Games Based on Artificial Intelligence. In: Jansen B.J., Liang H., Ye J. (eds.) *International Conference on Cognitive based Information Processing and Applications (CIPA 2021). Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 85. Springer, Singapore; 2022. p. 847-851. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9_112
- [3] Mateas M. Expressive Intelligence: Artificial Intelligence, Games and New Media. In: Basili R., Pazienza M.T. (eds.) *AI*IA 2007: Artificial Intelligence and Human-Oriented Computing. AI*IA 2007. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 4733. Springer, Berlin, Heidelberg; 2007. p. 2. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74782-6_2
- [4] Liapis A. Artificial Intelligence for Designing Games. In: Machado P., Romero J., Greenfield G. (eds.) *Artificial Intelligence and the Arts. Computational Synthesis and Creative Systems*. Springer, Cham; 2021. p. 277-310. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59475-6_11
- [5] Chan L., Hogaboam L., Cao R. Artificial Intelligence in Video Games and eSports. In: *Applied Artificial Intelligence in Business. Applied Innovation and Technology Management*. Springer, Cham; 2022. p. 335-352. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05740-3_22
- [6] Aiolli F., Palazzi C.E. Enhancing Artificial Intelligence in Games by Learning the Opponent's Playing Style. In: Ciancarini P., Nakatsu R., Rauterberg M., Rocchetti M. (eds.) *New Frontiers for Entertainment Computing. ECS 2008. IFIP International Federation for Information Processing*. Vol. 279. Springer, Boston, MA; 2008. p. 1-10. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-09701-5_1
- [7] Ontañón S., Ram A. Case-Based Reasoning and User-Generated Artificial Intelligence for Real-Time Strategy Games. In: González-Calero P., Gómez-Martín M. (eds.) *Artificial Intelligence for Computer Games*. Springer, New York, NY; 2011. p. 103-124. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8188-2_5
- [8] Cerny V., Dechterenko F. Rogue-Like Games as a Playground for Artificial Intelligence – Evolutionary Approach. In: Chorianopoulos K., Divitini M., Baalsrud Hauge J., Jaccheri L., Malaka R. (eds.) *Entertainment Computing – ICEC 2015. ICEC 2015. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 9353. Springer, Cham; 2015. p. 261-271. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24589-8_20
- [9] Plaat A. Intelligence and Games. In: *Learning to Play*. Springer, Cham; 2020. p. 9-41. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59238-7_2
- [10] Gong J. Key Technology of Games Based on Artificial Intelligence Technology. In: Xu Z., Parizi R.M., Loyola-González O., Zhang X. (eds.) *Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1342. Springer, Cham; 2021. p. 607-614. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70042-3_87



- [11] Lee Y.J., et al. Self-supervised Contrastive Learning for Predicting Game Strategies. In: Arai K. (eds) *Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 542. Springer, Cham; 2023. p. 136-147. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16072-1_10
- [12] Caci B., Dhou K. The Interplay Between Artificial Intelligence and Users' Personalities: A New Scenario for Human-Computer Interaction in Gaming. In: Stephanidis C., et al. (eds.) *HCI International 2020 – Late Breaking Papers: Cognition, Learning and Games. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 12425. Springer, Cham; 2020. p. 619-630. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60128-7_45
- [13] Giannakos M., Voulgari I., Papavasopoulou S., Papamitsiou Z., Yannakakis G. Games for Artificial Intelligence and Machine Learning Education: Review and Perspectives. In: Giannakos M. (eds.) *Non-Formal and Informal Science Learning in the ICT Era. Lecture Notes in Educational Technology*. Springer, Singapore; 2020. p. 117-133. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6747-6_7
- [14] Cowley B.U. Generalised Player Modelling: Why Artificial Intelligence in Games Should Incorporate Meaning, with a Formalism for so Doing. In: Fang X. (eds.) *HCI in Games. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 12211. Springer, Cham; 2020. p. 3-22. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50164-8_1
- [15] Hubble A., Moorin J., Khuman A.S. Artificial Intelligence in FPS Games: NPC Difficulty Effects on Gameplay. In: Carter J., Chiclana F., Khuman A.S., Chen T. (eds.) *Fuzzy Logic*. Springer, Cham; 2021. p. 165-190. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66474-9_11
- [16] Bouzy B., Cazenave T., Corruble V., Teytaud O. Artificial Intelligence for Games. In: Marquis, P., Papini, O., Prade, H. (eds.) *A Guided Tour of Artificial Intelligence Research*. Springer, Cham; 2020. p. 313-337. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-06167-8_11
- [17] Fan X., Wu J., Tian L. A Review of Artificial Intelligence for Games. In: Liang Q., Wang W., Mu J., Liu X., Na Z., Chen B. (eds.) *Artificial Intelligence in China. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 572. Springer, Singapore; 2020. p. 298-303. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0187-6_34
- [18] Dasgupta D., Yu S., Nino F. Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models and Applications. *Applied Soft Computing*. 2011; 11(2):1574-1587. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.08.024>
- [19] Cain C.B. Weiqi and Artificial Intelligence: Potential for Strategic Decision Making. In: Lai D. (eds.) *U.S.-China Strategic Relations and Competitive Sports*. Palgrave Macmillan, Cham; 2022. p. 325-359. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92200-9_13
- [20] Levchenko B., Chukhray A., Chumachenko D. Development of Game Modules with Support for Synchronous Multiplayer Based on Unreal Engine 4 Using Artificial Intelligence Approach. In: Nechyporu M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1113. Springer, Cham; 2020. p. 503-513. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_43
- [21] Franklin D.M. Communicative Artificial Intelligence in Multi-agent Gaming. In: Arai K. (eds.) *Advances in Information and Communication. FICC 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1363. Springer, Cham; 2021. p. 541-546. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-73100-7_38
- [22] Astachova I.F., Ushakov S.A., Shashkin A.I., Belyaeva N.V. The application of Artificial immune system for Parallel Process of Calculation and their comparison with existing methods. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1202:012003. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1202/1/012003>
- [23] Astachova I.F., Zolotukhin A.E., Kurklinskaya E.Yu., Belyaeva N.V. The application of artificial immune system to solve recognition problems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1203:012036. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012036>
- [24] Keyser D., Deselaers T., Gollan C., Ney H. Deformation Models for Image Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2007; 29(8):1422-1435. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1153>
- [25] Cireşan D.C., Meier U., Gambardella L.M., Schmidhuber J. Deep, Big, Simple Neural Nets for Handwritten Digit Recognition. *Neural Computation*. 2010; 22(12):3207-3220. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1162/NECO_a_00052

Поступила 13.04.2022; одобрена после рецензирования 02.06.2022; принята к публикации 19.06.2022.

Submitted 13.04.2022; approved after reviewing 02.06.2022; accepted for publication 19.06.2022.

Об авторах:

Астахова Ирина Федоровна, профессор кафедры математического обеспечения ЭВМ факультета прикладной математики, информатики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2627-8508>, astachova@list.ru

Киселева Екатерина Игоревна, доцент кафедры педагогики и методики дошкольного и начального образования психолого-педагогического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет» (394043, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6406-9782>, ekaterkisel@mail.ru



Беляева Наталья Викторовна, ассистент кафедры математического обеспечения ЭВМ факультета прикладной математики, информатики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2627-8508>**, belyaeva@amm.vsu.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Irina F. Astachova, Professor of the Department of Computer Hardware, Faculty of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation), Dr.Sci. (Eng.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2627-8508>**, astachova@list.ru

Ekaterina I. Kiseleva, Associate Professor of the Department of Pedagogy and Methods of Preschool and Primary Education, Psychological and Pedagogical Faculty, Voronezh State Pedagogical University (86 Lenin St., Voronezh 394043, Russian Federation), Cand.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6406-9782>**, ekaterkisel@mail.ru

Natalia V. Belyaeva, Assistant of the Department of Computer Hardware, Faculty of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2627-8508>**, belyaeva@amm.vsu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

