

УДК 004.8

АЛГОРИТМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

В. И. ПЕТРЕНКО¹, Ф. Б. ТЕБУЕВА², М. М. ГУРЧИНСКИЙ³,
Н. Ю. СВИСТУНОВ⁴, А. С. ПАВЛОВ⁵

¹ vip.petrenko@gmail.com, ² fariza.teb@gmail.com, ³ gurcmikhail@yandex.ru, ⁴ svistunovn@gmail.com,
⁵ losde5530@gmail.com

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.

Аннотация. Предложен алгоритм обучения системы управления двумя антропоморфными манипуляторами с 7 степенями подвижности, имеющими пересекающиеся рабочие области. В основе алгоритма лежит технология глубокого обучения с подкреплением искусственной нейронной сети (ИНС). Также описана практическая реализация системы управления манипуляторами на основе ИНС, позволяющая избегать столкновений и достигающая средней точности воспроизведения целевых положений схватов манипуляторов в 98,3%. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения предложенного метода для разработки систем управления антропоморфными манипуляторами на основе глубокого машинного обучения с подкреплением.

Ключевые слова: антропоморфный манипулятор; кинематика; искусственная нейронная сеть; машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных областей современной робототехники являются сервисные роботы. Они применяются для выполнения операций как в экстремальных условиях [1–3], так и в быту: для приготовления пищи [4], уборки [5] в заведениях общественного питания [6,7], гостиничном деле [8], банках и прочих сферах услуг [9].

Для выполнения операций с объектами окружающей среды многие сервисные роботы оснащаются одним [10] или двумя антропоморфными манипуляторами [11]. Выполнение целевых операций манипуляторами требует решения задач планирования движения, кинематики и динамики.

Планирование движения заключается в поиске такой траектории движения схвата

манипулятора, которая с одной стороны обеспечила бы выполнение целевой операции, с другой – обход препятствия и отсутствие столкновения звеньев манипулятора между собой. Проблема обхода препятствий при совместном выполнении целевых операций одновременно двумя манипуляторами дополняется необходимостью избегания столкновений звеньев одного манипулятора со звеньями второго манипулятора. Преимуществом антропоморфных манипуляторов является кинематическая избыточность, обеспечивающая расширенные возможности для обхода препятствий и звеньев второго манипулятора.

Совместные движения манипуляторов бывают двух типов. Первый тип – это движение манипуляторов, вместе удерживающих объект манипуляции. Для первого типа

Таблица 1

Значения параметров Денавита–Хартенберга

Table 1

Values of Denavit-Hartenberg parameters

Сочленение	θ_i	α_i	a_i	d_i	Допустимые значения θ_i
1	180°	90°	0	0	-90° ... 90°
2	-90°	90°	0	0	-20° ... 90°
3	-90°	90°	0	-30	-45° ... 45°
4	-90°	90°	0	0	-70° ... 90°
5	-90°	90°	0	25	-90° ... 90°
6	-90°	90°	0	0	-45° ... 45°
7	0°	0°	-10	0	-70° ... 70°

движения часто известна траектория, по которой должен двигаться объект манипуляции. Существует большое количество методов, предназначенных для планирования этого типа движения [12–18]. Недостатком аналитических методов решения данной задачи [19] является специализация на строго определенной кинематической схеме антропоморфного манипулятора, а также низкая энергоэффективность. Из возможных траекторий обхода препятствия второго манипулятора выбирается та, при которой расстояние между манипуляторами будет наибольшим. В данной работе предлагается решение задачи управления двумя антропоморфными манипуляторами на основе искусственной нейронной сети (ИНС) и глубокого машинного обучения с подкреплением. Для этого разработан алгоритм машинного обучения системы управления антропоморфными манипуляторами.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ

Объектом управления является совокупность двух антропоморфных манипуляторов, совместно выполняющих целевые операции.

Кинематическая схема одного из рассматриваемых манипуляторов приведена на рис. 1, системы координат, связанные с сочленениями – на рис. 2; параметры Денавита–Хартенберга – в табл. 1, где θ_i – угол, на который нужно повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i (знак определяется по правилу правой руки); α_i – угол, на который нужно повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправленной с осью z_i ; a_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i , т.е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i ; d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} .

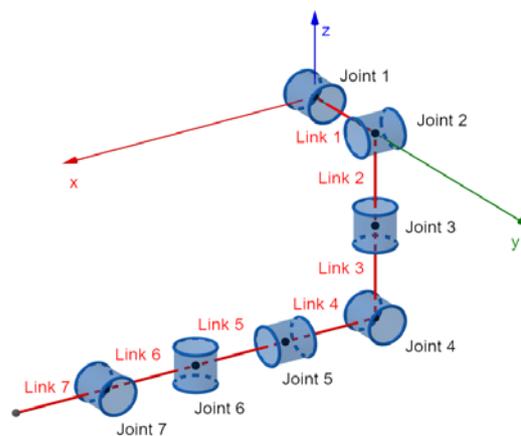


Рис. 1. Кинематическая схема антропоморфного манипулятора

Fig. 1. Kinematic diagram of an anthropomorphic manipulator

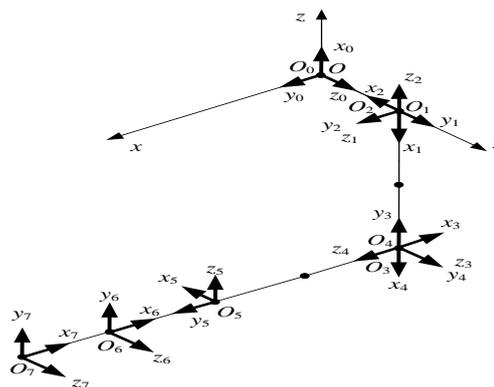


Рис. 2. Системы координат, связанные со звеньями антропоморфного манипулятора

Fig. 2. Coordinate systems associated with the links of the anthropomorphic manipulator

Решение прямой задачи кинематики для данного манипулятора может быть выполнено с использованием следующих формул:

$$\begin{aligned}
{}^i T_j &= \prod_{k=i+1}^j {}^{i-1} A_k, \quad i < j, \\
{}^{i-1} A_i &= T_{z,\theta}(\theta) T_{z,d}(d) T_{x,a}(a) T_{x,\alpha}(\alpha), \\
T_{z,\theta}(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
T_{z,d}(d) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
T_{x,a}(a) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
T_{x,\alpha}(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

где ${}^i T_j$ – однородная матрица преобразования из i -й системы координат в j -ю, $i < j$, составленная в соответствие с представлением Денавита–Хартенберга; ${}^{i-1} A_i$ – однородная матрица сложного преобразования для смежных систем координат; $T_{z,\theta}(\theta)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси z на угол θ ; $T_{z,d}(d)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси z на расстояние d ; $T_{x,a}(a)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси x на расстояние a ; $T_{x,\alpha}(\alpha)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси x на угол α . Таким образом, положение схвата манипулятора определяется матрицей ${}^0 T_j$, четвертый столбец которой содержит обобщенные координаты схвата. Сигналами управления антропоморфных манипуляторов являются обобщенные координаты

$$q(t) = \langle q_1(t), q_2(t) \rangle,$$

где $q_1(t)$, $q_2(t)$ – обобщенные координаты первого и второго манипулятора соответственно в момент времени t .

Целью управления парой манипуляторов является обработка необходимых траекторий схватов в их конфигурационном пространстве:

$$l(t) = \langle l_1(t), l_2(t) \rangle,$$

где $l_i(t) = \langle p_i(t), \phi_i(t) \rangle$ – траектория схвата i -го манипулятора в декартовом пространстве p_i и пространстве углов Эйлера ϕ_i .

Далее в работе используются объединенные величины:

$$p(t) = \langle p_i(t) \rangle_{i=1,2},$$

$$\phi(t) = \langle \phi_i(t) \rangle_{i=1,2},$$

$$l(t) = \langle p(t), \phi(t) \rangle.$$

Процесс управления двумя антропоморфными манипуляторами в условиях полной наблюдаемости среды можно рассматривать как Марковский процесс принятия решения (МППР), который может быть описан кортежем из пяти элементов, $\langle S, A, R, P, \rho_0 \rangle$, где:

S – набор всех возможных состояний среды; A – набор всех возможных действий; $R: S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$ – функция вознаграждения при выполнении в момент времени t в состоянии s_t действия a_t , приведшего в состояние s_{t+1} :

$$r_t = R(s_t, a_t, s_{t+1});$$

$P: S \times A \rightarrow \mathcal{P}(S)$ – функция вероятности перехода, где $P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ – вероятность перехода в состояние s_{t+1} из состояния s_t при выполнении действия a_t ; ρ_0 – распределение вероятности начального состояния s_0 .

Архитектура системы обучения с подкреплением, приложенной к описанной задаче, приведена на рис. 3.



Рис. 3. Структура среды для обучения

Fig. 3. The structure of the learning environment

Система управления антропоморфными манипуляторами рассматривается как агент, функционирующий в симуляционной среде. Агент способен получать текущее состояние s_t среды в момент времени t , на основе которого формируется предпринимаемое действие a_t на основе некоторой политики принятия решения μ :

$$a_t = \mu(s_t)$$

Симуляционная среда сообщает агенту текущее состояние s_t , воспринимает выбранное действие a_t и моделирует последствия выполнения действия a_t приводящее к переходу среды в состояние s_{t+1} . Состояние s_t включает в себя набор текущих обобщенных координат антропоморфных манипуляторов q_t и точку l_{t+1} траектории l , которая должна быть достигнута в момент $t + 1$:

$$s_t = \langle q_t, l_{t+1} \rangle.$$

Действие a_t соответствует вектору q_{t+1} обобщенных координат манипуляторов, которые должны быть достигнуты в момент времени $t + 1$:

$$a_t = q_{t+1}.$$

Также симуляционная среда определяет вознаграждение r_t , получаемое агентом. Вознаграждение складывается из следующих величин:

1. Стоимости перемещения, пропорционального модулю изменения обобщенных координат при переходе из положения q_t в положение q_{t+1} .

2. Штрафа за столкновение манипуляторов. Столкновение манипуляторов считается наступившим, если манипуляторы сблизились на расстояние, меньшее, чем некоторое пороговое значение D . Для расчета значений расстояний между звеньями манипуляторов использовался видоизмененный метод, предложенный в [20].

3. Точности позиционирования схвата манипулятора, выраженной как расстояние между координатами целевой точки и фактическими координатами схвата.

В данной работе основное внимание уделено факторам 2 и 3.

Алгоритм обучения предназначен для оптимизации политики принятия решений μ

с целью максимизации суммы вознаграждений, получаемых агентом. Политика принятия решений агентом моделируется с помощью искусственной нейронной сети. Входными сигналами ИНС являются: текущее положение манипуляторов q_t и точка l_{t+1} траектории l , которая должна быть достигнута в момент $t + 1$. Задачей ИНС является поиск такого действия a , которое будет обладать наибольшей ценностью. Функция $Q^\mu(s_t, a_t)$ ценности выполнения действия a_t при состоянии среды s_t в момент времени t в соответствии с политикой μ основывается на уравнении Беллмана:

$$Q^\mu(s_t, a_t) = \operatorname{argmax}_{a_{t+1}} [r_t(s_t, a_t) + \gamma Q^\mu(s_{t+1}, a_{t+1})],$$

где $\operatorname{argmax}_x [f(x)]$ – аргумент максимизации, т.е. такое значение x , при котором $f(x)$ достигает своего наибольшего значения;

$r_t(s_t, a_t)$ – величина вознаграждения за выполнение действия a_t при состоянии среды s_t в момент времени t ; $\gamma \in [0; 1]$ – коэффициент дисконтирования обучения (discounting factor). Чем он меньше, тем меньше агент учитывает выгоду от своих будущих действий.

Значение $Q^\mu(s_t, a_t)$ определяется набором весов ИНС. Целью машинного обучения с подкреплением агента является оптимизация весов таким образом, чтобы политика принятия решения μ стремилась к оптимальной μ^* :

$$\mu(s_t) \rightarrow \mu^*(s_t).$$

Таким образом, алгоритм машинного обучения системы управления антропоморфными манипуляторами состоит из следующих шагов:

1. Выбор значений констант, определяющих параметры процесса обучения:

- размеров наборов данных для обучения L и валидации V искусственной нейронной сети (большой размер выборки предполагает достижение большей точности, но уменьшает скорость обучения);

- числа итераций обучения I ;

- значений коэффициентов функции вознаграждения, определяющих степень влияния стоимости перемещения, штрафа за

столкновение и точности позиционирования схватов;

– минимального допустимого расстояния D между манипуляторами.

Подбор коэффициентов функции вознаграждения и числа итераций обучения осуществляется эмпирическим путем.

2. Подготовка $L + V$ пар вида $((C_1, C_2), (A_1, A_2))$, где C_1, C_2 – координаты схвата первого и второго манипулятора соответственно, A_1, A_2 – массивы углов поворота θ_i сочленений первого и второго манипулятора соответственно. Каждая пара выработывается следующим образом:

2.1. Заполнение массивов A_1, A_2 с помощью генератора псевдослучайных чисел с равномерным распределением. При этом в качестве диапазона генерации для i -го угла используется диапазон допустимых значений θ_i , указанный в таблице 1.

2.2. Вычисление значений C_1, C_2 путем решения прямой задачи кинематики для первого и второго антропоморфного манипулятора на основе массивов углов A_1, A_2 соответственно.

3. Проведение I итераций машинного обучения с подкреплением на наборе данных из L элементов. На каждой итерации выполняются следующие действия:

3.1. Подача на вход обучаемой ИНС значений координат схватов.

3.2. Получение выходных значений углов манипуляторов.

3.3. Решение прямой задачи кинематики на основе выходных значений углов для определения координат сочленений и схватов манипуляторов.

3.4. Проверка факта столкновения.

3.5. Вычисление расстояния между эталонными положениями схватов и положениями, вычисленными на основе углов, сгенерированных ИНС.

3.6. Определение величины вознаграждения.

3.7. Корректировка весов нейронов ИНС.

4. Тестирование обученной модели путем повторения шагов 3.1–3.6 на валидационном наборе данных.

5. Сохранение обученной ИНС.

В работе предлагается использовать систему управления, свободную от модели окружающей среды, поскольку данный подход позволит избежать проблемы построения точной динамической модели манипуляторов антропоморфного робота.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для апробации предложенного алгоритма на языке Python разработан симулятор совместной работы двух манипуляторов с возможностью визуализации их положения (рис. 4). На рисунке обозначены: 1 – изображено положение звеньев манипуляторов согласно исходным данным; 2 – положение, сгенерированное ИНС.

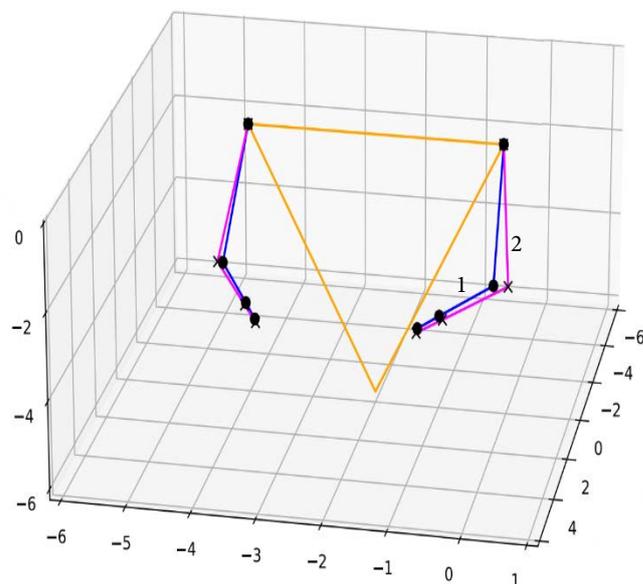


Рис. 4 Симуляция совместной работы двух манипуляторов

Fig. 4 Simulation of the joint work of two manipulators

Симуляция проводилась в соответствии со следующими условиями: позиция цели выбиралась случайным образом в трехмерном пространстве, управление манипулятором производилось посредством передачи ему конечных координат. Целью алгоритма машинного обучения является достижение схватами манипуляторов заданных точек пространства без столкновения манипуляторов между собой.

Машинное обучение производилось с использованием средств нейросетевой библиотеки Keras [21]. В качестве модельной

ИНС использовалась нейронная сеть прямого распространения (рис. 5), имеющая во входном слое 6 нейронов с линейной функцией активации, в выходном слое – 14 нейронов с линейной функцией активации, а также 6 скрытых слоев, содержащих по 1024 нейрона с функцией активации типа «выпрямитель» (rectified linear unit, ReLU). Всего проведено 25 эпох обучения.

В качестве данных для обучения использовался 1 млн пар «углы–координаты». Для валидации использовалось 100 тыс. таких пар. Для ускорения процесса обучения тренировочные данные подавались пакетами по 1000 пар.

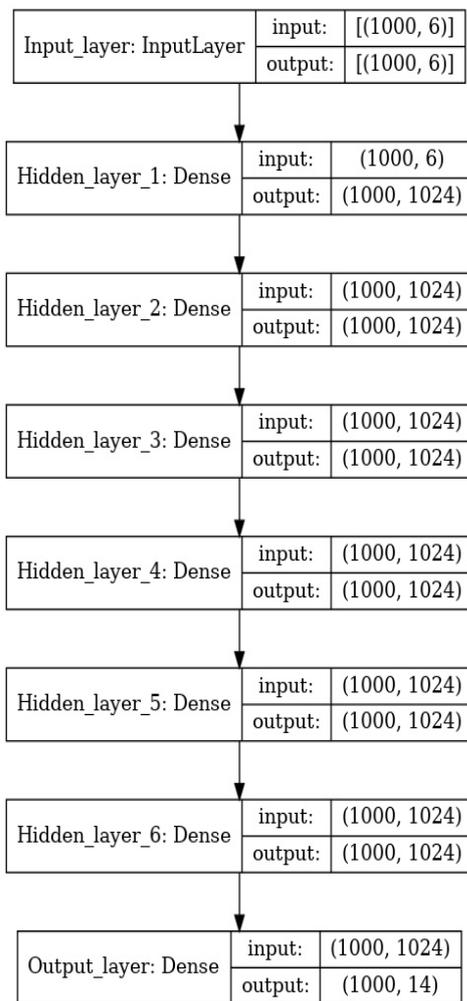


Рис. 5. Структура обучаемой ИНС

Fig. 5. The structure of the trained ANN

В качестве функции потерь использовано среднее значение суммы расстояний между координатами схватов манипуляторов и соответствующих им целевых точек, выра-

женное в сотых долях миллиметра. Для каждого сгенерированного положения производилась проверка на столкновение манипуляторов, а также на выход значений углов за допустимые пределы. При возникновении таких ситуаций к значению функции потерь прибавлялся штраф в размере 1000 единиц. Изменение значения функции потерь в процессе прохождения 25 эпох обучения представлено на рис. 6. После прохождения 9 эпох сгенерированные наборы данных перестали содержать массивы углов, приводящих к некорректным положениям и столкновениям.

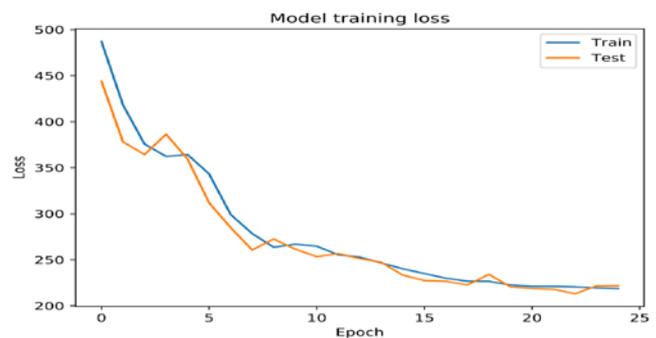


Рис. 6. Значения функции потерь

Fig. 6. Values the loss function

На рис. 7 представлено значение метрики точности (accuracy). Данная метрика вычислялась как среднее значение скалярных произведений нормализованных радиус-векторов схватов и нормализованных векторов, соответствующих эталонным положениям из наборов для обучения и валидации.

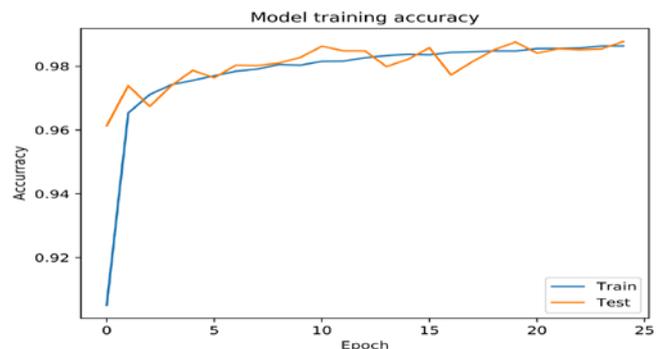


Рис. 7. Точность достижения целевых положений схватов манипуляторов

Fig. 7. Accuracy of reaching the target positions of the manipulator grips

Полученные значения точности свидетельствуют о достаточной обученности модели, а также об отсутствии переобучения. Итоговая средняя точность составила 98,3%, что свидетельствует о возможности применения разработанного метода для управления системами из двух манипуляторов с достаточной точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенного алгоритма удалось обучить ИНС в составе системы управления двумя антропоморфными манипуляторами. В процессе движения антропоморфных манипуляторов отсутствовали столкновения звеньев между собой. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения предложенного метода для разработки систем управления антропоморфными манипуляторами на основе глубокого машинного обучения с подкреплением. Направлениями дальнейшего развития являются: усложнение задачи за счет введения в операционную среду дополнительных статических, а затем динамических препятствий; адаптация предложенного алгоритма для оптимизации движения антропоморфных манипуляторов по критериям энергоэффективности, усилиям и времени перемещения за счет учета в симуляционной среде динамической модели манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **About** the concept of using anthropomorphic robots during human exploration of the Moon / O. Saprykin, et al. // *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. Vol. 11, no. 16. Pp. 9674-9679. [O. Saprykin, et al., "About the concept of using anthropomorphic robots during human exploration of the Moon", in *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 16, pp. 9674-9679, 2016.]
2. **Control** system of the anthropomorphous robot for work on the low-altitude earth orbit / I. M. Kutlubaev, et al. // *Int. J. Pharm. Technol.* 2016. Vol. 8, no. 3. Pp. 18193-18199. [I. M. Kutlubaev, et al., "Control system of the anthropomorphous robot for work on the low-altitude earth orbit", in *Int. J. Pharm. Technol.*, vol. 8, no. 3. pp. 18193-18199. 2016.]
3. **Kutlubaev I. M., Zhydenko I. G., and Bogdanov A. A.** Basic concepts of power anthropomorphic grippers construction and calculation // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016 - Proceedings). 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963. [I. M. Kutlubaev, I. G. Zhydenko, and A. A. Bogdanov, "Basic concepts of power anthropomorphic grippers construction and calculation", in *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016 - Proceedings)*, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963.]
4. **Improving** Robotic Cooking Using Batch Bayesian Optimization / K. Junge, et al. // *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2020. Vol. 5, no. 2. Pp. 760-765. DOI: 10.1109/LRA.2020.2965418. [K. Junge, et al., "Improving Robotic Cooking Using Batch Bayesian Optimization", in *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 760-765, 2020. DOI: 10.1109/LRA.2020.12965418.]
5. iRobot Vacuum Cleaning, Mopping & Outdoor Maintenance [Electronic resource]. URL: <https://www.shopirobot.com.au/> (accessed: 24.03.2020). [*iRobot Vacuum Cleaning, Mopping & Outdoor Maintenance* (2020, Mar. 24) [Online]. Available: <https://www.shopirobot.com.au.>]
6. **Experiences** with a barista robot, FusionBot /D. K. Limbu // *Communications in Computer and Information Science*, et al. 2009. Vol. 44 CCIS. Pp. 140-151. DOI: 10.1007/978-3-642-03986-7_17. [D. K. Limbu, et al., "Experiences with a barista robot, FusionBot", in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 44 CCIS, pp. 140-151. 2009. DOI:10.1007/978-3-642-03986-7_17.]
7. **A Robot** Barista Comments on its Clients: Social Attitudes Toward Robot Data Use / S. Hedao, et al. // *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction.* 2019. Vol. 2019. Pp. 66-74. DOI: 10.1109/HRI.2019.8673021. [S. Hedao, et al., "A Robot Barista Comments on its Clients: Social Attitudes Toward Robot Data Use", in *CM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction.* vol. 2019. pp. 66-74. 2019. DOI: 10.1109/HRI.2019.8673021.]
8. **Leveraging** human-robot interaction in hospitality services: Incorporating the role of perceived value, empathy, and information sharing into visitors' intentions to use social robots, Tour. Manag., R. de Kervenoael, et al. Vol. 78. 2020. DOI: 10.1016/j.tourman.2019.104042. [Tour. Manag., R. de Kervenoael, et al. "Leveraging human-robot interaction in hospitality services: Incorporating the role of perceived value, empathy, and information sharing into visitors' intentions to use social robots" vol. 78. 2020. DOI: 10.1016/j.tourman.2019.104042.]
9. **Promobot V.4** | PRO MOBOT. [Электронный ресурс]. URL: <https://promo-bot.ru/production/promobot-v4> (дата обращения: 24.03.2020). [Promobot V.4 | PRO MOBOT. (2020, Mar. 24) [Online]. Available: <https://promo-bot.ru/production/promobot-v4.>]
10. **Gonbata M., Leonardi F. and Aquino Junior P.** Robotic Manipulators Mechanical Project For The Domestic Robot HERA, // II Brazilian Humanoid Robot Work. III Brazilian

- Work. Serv. Robot. 2019. Pp. 30–35. [M. Gonbata, F. Leonardi and Aquino P. Junior, "Robotic Manipulators Mechanical Project For The Domestic Robot HERA" in *II Brazilian Humanoid Robot Work. III Brazilian Work. Serv. Robot*, pp. 30–35, 2019.]
11. **Baxter** | Redefining Robotics and Manufacturing | Rethink Robotics [Electronic resource]. URL: <https://web.archive.org/web/20140826071530/http://www.rethinkrobotics.com/products/baxter> (accessed: 24.03.2020). [Baxter | Redefining Robotics and Manufacturing | Rethink Robotics (2020, Mar. 24). [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20140826071530/http://www.rethinkrobotics.com/products/baxter> .]
 12. **Fast**, Anytime Motion Planning for Prehensile Manipulation in Clutter/ A. Kimmel, et al. // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2019. Vol. 2018. Pp. 874-880. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2018.8624939. [A. Kimmel, et al., "Fast, Anytime Motion Planning for Prehensile Manipulation in Clutter", in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, vol. 2018, pp. 874-880, 2019. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2018.8624939.]
 13. **Object** Placement Planning and optimization for Robot Manipulators / J. A. Hausteин, et al. // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2019. Pp. 7417-7424. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967732. [J. A. Hausteин, et al, "Object Placement Planning and optimization for Robot Manipulators", in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 7417-7424, 2019. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967732.]
 14. **Manipulation** planning with directed reachable volumes. McMahan T., et al. // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2017. Vol. 1. Pp. 4026–4033. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206257. [McMahan T., et al., "Manipulation planning with directed reachable volumes", in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 4026–4033. 2017. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206257.]
 15. **Analysis** of the effectiveness path planning methods and algorithm for the anthropomorphic robot manipulator / V. Petrenko et al. // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON. Proceedings. 2019. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729657. [V. Petrenko, et al., "Analysis of the effectiveness path planning methods and algorithm for the anthropomorphic robot manipulator", in *2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON. Proceedings*. 2019. OI: 10.1109/SIBCON.2019.8729657.]
 16. **The method** of the kinematic structure reconfiguration of a multifunctional modular robot based on the greedy algorithm / V. Petrenko, et al. // Proceedings - International Conference on Developments in Systems Engineering, DeSE. 2019. Vol. 2020. Pp. 42-47. DOI: 10.1109/DeSE.2019.00018. [V. Petrenko, et al., "The method of the kinematic structure reconfiguration of a multifunctional modular robot based on the greedy algorithm", in *Proceedings - International Conference on Developments in Systems Engineering, DeSE*, vol. 2020, pp. 42-47, 2019. DOI: 10.1109/DeSE.2019.00018.]
 17. **Kinematic** analysis anthropomorphic gripper with group drive / V. Petrenko, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862, no. 3. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032057. [V. Petrenko, et al., "Kinematic analysis anthropomorphic gripper with group drive", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 862, no. 3, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032057.]
 18. **The method** of forming a geometric solution of the inverse kinematics problem for chains with kinematic pairs of rotational type only / V. Petrenko, et al. // IX International Multidisciplinary Scientific and Research Conference Modern Issues in Science and Technology/Workshop Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/450/4/042016 [V. Petrenko, et al., "The method of forming a geometric solution of the inverse kinematics problem for chains with kinematic pairs of rotational type only", in *IX International Multidisciplinary Scientific and Research Conference Modern Issues in Science and Technology/Workshop Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/450/4/042016.]
 19. **Cooperative** Motion Planning Method for Two Anthropomorphic Manipulators / V. Petrenko, et al. // 7th Sci. Conf. Inf. Technol. Intell. Decis. Mak. Support, (ITIDS 2019), Part Ser. Adv. Intell. Syst. Res., 2019. Vol. 1. Pp. 146-151, DOI: 10.2991/itids-19.2019.27. [V. Petrenko, et al., "Cooperative Motion Planning Method for Two Anthropomorphic Manipulators", in *7th Sci. Conf. Inf. Technol. Intell. Decis. Mak. Support, (ITIDS 2019)*, Part Ser. Adv. Intell. Syst. Res., vol. 1, pp. 146-151, 2019. DOI: 10.2991/itids-19.2019.27.]
 20. **The method** of the quasioptimal per energy efficiency design of the motion path for the anthropomorphic manipulator in a real time operation mode / V. Petrenko, et al. // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2. Pp. 245-252. [V. Petrenko, et al., "The method of the quasioptimal per energy efficiency design of the motion path for the anthropomorphic manipulator in a real time operation mode", in *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2, pp. 245-252, 2018.]

ОБ АВТОРАХ

ПЕТРЕНКО Вячеслав Иванович, и. о. директора института математики и информационных технологий имени профессора Н. И. Червякова, заведующий кафедрой организации и технологии защиты информации, кандидат технических наук, доцент. Исследователь в области защиты информации, систем связи, конечных полей, сигнальных конструкций, дискретных последовательностей, искусственно интеллекта, управления робототехническими системами.

ТЕБУЕВА Фариза Биляловна, заведующая кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности, док-

тор физико-математических наук, доцент. Исследователь в области моделирования процессов защиты информации в информационно-телекоммуникационных системах, искусственного интеллекта, управления робототехническими системами.

ГУРЧИНСКИЙ Михаил Михайлович, программист учебно-научной лаборатории робототехнических систем, аспирант. Исследователь в области искусственного интеллекта, управления робототехническими системами.

СВИСТУНОВ Николай Юрьевич, аспирант. Исследователь в области систем автоматического управления, машинного обучения, групповой робототехники.

ПАВЛОВ Андрей Сергеевич, инженер-лаборант, преподаватель кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, аспирант. Исследователь в области искусственного интеллекта, управления робототехническими системами.

formation and telecommunication systems, artificial intelligence, control of robotic systems.

GURCHINSKY, Mikhail Mikhailovich, programmer of the educational and scientific laboratory of robotic systems, postgraduate student. Researcher in the field of artificial intelligence, control of robotic systems.

SVISTUNOV, Nikolay Yurievich, postgraduate student. Researcher in the field of automatic control systems, machine learning, swarm robotics.

PAVLOV, Andrey Sergeevich, laboratory engineer, lecturer at the Department of Applied Mathematics and Computer Security, postgraduate student. Researcher in the field of artificial intelligence, control of robotic systems.

METADATA

Title: Algorithm of machine learning for the control system of anthropomorphic manipulators.

Authors: V. I. Petrenko ¹, F. B. Tebueva ², M. M. Gurchinsky ³, N. Yu. Svistunov ⁴, A. S. Pavlov ⁵

Affiliation: Institute of Information Technologies and Telecommunications, North Caucasus Federal University Stavropol, Russia.

Email: ¹vip.petrenko@gmail.com, ²fariza.teb@gmail.com, ³svistunovn@gmail.com, ⁴gurcmikhail@yandex.ru, ⁵losde5530@gmail.com

Language: Russian.

Source: SIIT (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 3, no. 2 (6), pp. 35-43, 2021. ISSN 2686-7044 (Online), ISSN 2658-5014 (Print).

Abstract: The article proposes an algorithm for training a control system for two anthropomorphic manipulators with 7 degrees of mobility, which have intersecting working areas. The algorithm is based on deep learning technology with reinforcement of an artificial neural network (ANN). The paper also describes the practical implementation of a manipulator control system based on ANN, which allows to avoid collisions and achieves an average accuracy of reproducing the target positions of the manipulator grips of 98.3%. The results obtained indicate that the proposed method is promising for the development of control systems for anthropomorphic machine learning. manipulators based on deep reinforcement

Key words: anthropomorphic manipulator; kinematics; artificial neural network; machine learning.

About authors:

PETRENKO, Vyacheslav Ivanovich, Acting Director of the Institute of Mathematics and Information Technologies named Professor N. I. Chervyakov, Head of the Department of Organization and Technology of Information Protection, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Researcher in the field of information security, communication systems, finite fields, signal structures, discrete sequences, artificial intelligence, control of robotic systems.

TEBUEVA, Fariza Bilyalovna, Head of the Department of Applied Mathematics and Computer Security, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor. Researcher in the field of modeling information security processes in in-