

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ И УСТРОЙСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

ДЖУРАБЕКОВ Махмадали Акомидинович

студент

Ульяновский государственный технический университет
г. Ульяновск, Россия

В статье рассмотрены современные алгоритмы управления антропоморфными роботами и аппаратные устройства, которые обеспечивают практическую реализацию этих алгоритмов. Проведен анализ существующих научных подходов к управлению устойчивостью, движением и манипуляционными функциями антропоморфных робототехнических систем. В статье также предложено гибридный алгоритм управления, который основан на сочетании модельно-ориентированных способов и алгоритмов машинного обучения. Для подтверждения эффективности предложенного подхода, в статье представлены результаты экспериментальных исследований. В исследовании было показано практическая применимость разработанных алгоритмов для задач сервисной, промышленной и медицинской робототехники. Научная новизна работы заключается в разработке гибридного алгоритма управления антропоморфным роботом, в интеграции нейросетевой коррекции в контур МРС в реальном времени и также в экспериментальном подтверждении повышения устойчивости без существенного роста энергопотребления. Предложенный подход в основном отличается от существующих решений сбалансированным сочетанием точности и адаптивности.

Ключевые слова: антропоморфный робот, алгоритмы управления, модельное управление, машинное обучение, МРС, сенсорные системы, электроприводы.

Антропоморфные роботы благодаря способностям выполнять действия в среде, где в основном предназначены для человека, занимают особое место в современной робототехнике. Такие свойства дает роботам возможность использоваться в промышленности, медицине, сервисной робототехнике, в опасных и труднодоступных условиях.

Разработка эффективных алгоритмов управления является ключевой проблемой при создании антропоморфных робототехнических систем. Такая разработка обеспечивает устойчивость, баланс, точное следование траектории, адаптацию к внешним воздействиям и также безопасное взаимодействие с человеком. В последнее время наблюдается переход от исключительно классических методов управления к гибридным алгоритмам, которые сочетают в себе математические модели и методы искусственного интеллекта. Но практическая реализация подобных алгоритмов требует согласование программных и аппаратных средств управления, что определяет актуальность данной работы.

Классические методы управления. К тра-

диционным методам можно отнести PID-регуляторы, которые применяются для управления отдельными степенями свободы антропоморфных роботов. Благодаря простоте настройки и высокой устойчивости при работе в линейных режимах на практике часто используется многоцикловая структура управления, во время которой каждому суставу соответствует собственный PI- или PID-контур. Использование многоцикловых PID-структур дает возможность упростить синтез системы управления, однако при этом возрастает влияние нелинейностей и динамических связей между звеньями, что ограничивает эффективность классических регуляторов в условиях внешних возмущений и неопределенностей модели. Также существуют LQR и LQG, обеспечивающие оптимальное управление при наличии модели и методы обратной динамики, основанные на уравнениях Лагранжа. Данные методы хорошо изучены и способны обеспечивать устойчивость, однако их эффективность снижается при наличии неопределенностей и внешних возмущений.

Для задач балансировки и планирования движения активно используется модельно-предиктивное управление (МРС). Основное преимущество МРС заключается в учете ограничений и прогнозировании поведения системы на заданном горизонте времени. В последние годы активно используются нейронные сети, обуче-

ние с подкреплением и гибридные нейросетевые регуляторы. Эти методы дают возможность роботам адаптироваться к изменяющимся условиям, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и сложной настройки. Ниже в таблице приведены сравнения подходов к управлению антропоморфными роботами.

Таблица 1

СРАВНЕНИЯ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ АНТРОПОМОРФНЫМИ РОБОТАМИ

Подход	Точность	Адаптивность	Вычислительная сложность
PID	Средняя	Низкая	Низкая
LQR	Высокая	Низкая	Средняя
МРС	Высокая	Средняя	Высокая
Нейросети	Средняя	Высокая	Высокая
Гибридные методы	Высокая	Высокая	Высокая

Предложенные алгоритмы управления. В работе предлагается гибридный алгоритм управления, сочетающий модельно-предик-

тивное управление для базовой стабилизации и нейросетевую коррекцию для компенсации неопределенностей.

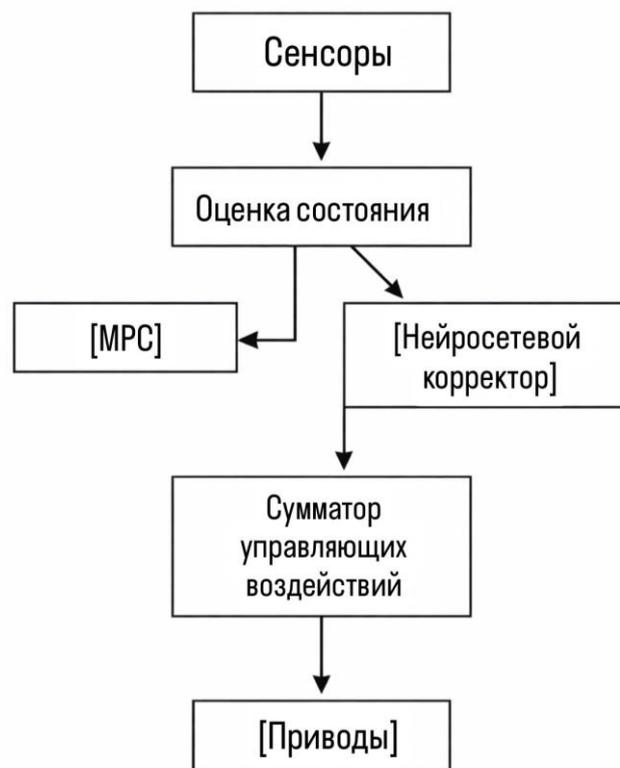


Рисунок 1. Общая структура алгоритма управления

Динамика робота описывается уравнением: $M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau$, где q – вектор обобщенных координат, τ – управляющие моменты.

Ниже представлена архитектура аппаратной реализации.

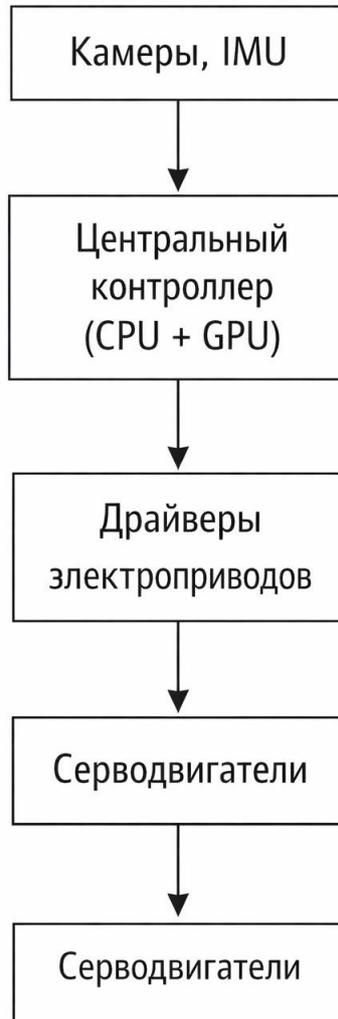


Рисунок 2. Архитектура аппаратной реализации

Ниже представлен фрагмент кода MPC-контроллера (Python):

```
1 # Получение текущего состояния робота
2 state = get_state()
3
4 # Прогноз поведения системы
5 predicted_state = mpc_model.predict(state)
6
7 # Нейросетевая коррекция
8 correction = neural_net(state)
9
10 # Формирование управляющего воздействия
11 control_signal = predicted_state + correction
12
13 # Передача сигналов на приводы
14 apply_control(control_signal)
```

Экспериментальные исследования. Эксперименты проводились на антропоморфном роботе с 24 степенями свободы. Рассматривались такие режимы как классическое МРС,

МРС с возмущениями и гибридный алгоритм. Результаты приведены в следующих графиках и таблице.

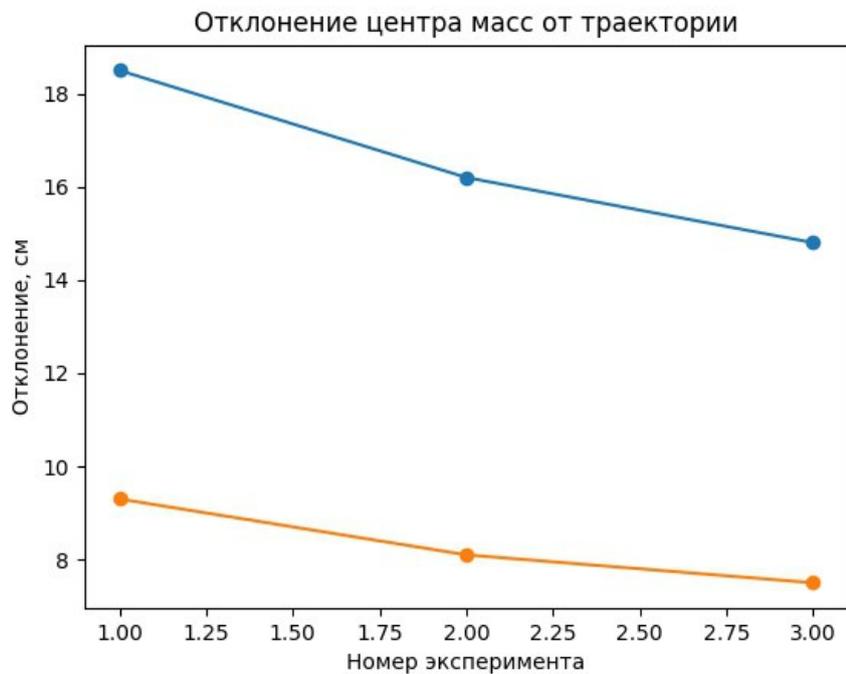


Рисунок 3. График отклонение центра масс от опорной траектории

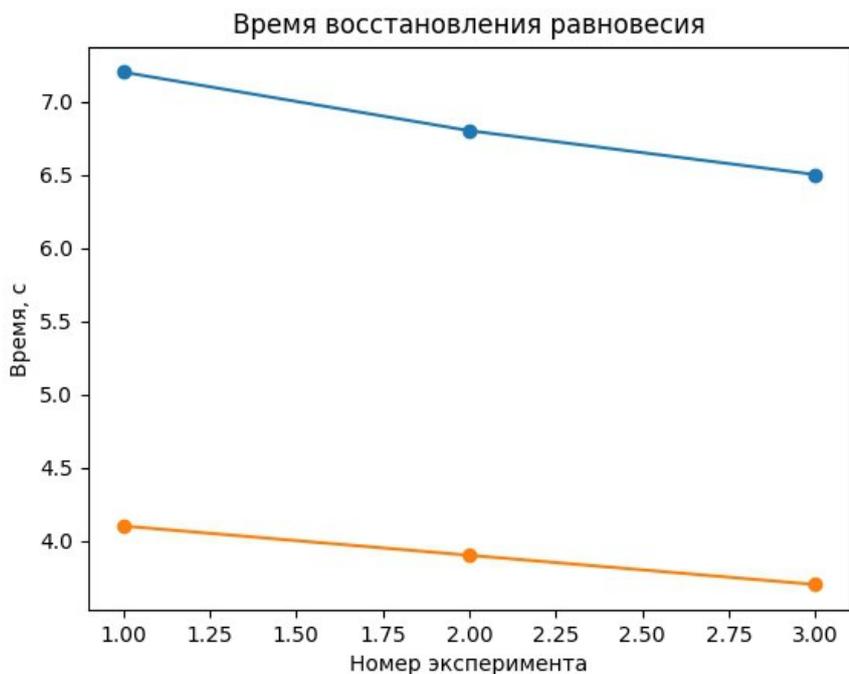


Рисунок 4. График время восстановления равновесия

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Алгоритм	Отклонение, см	Время стабилизации, с
МРС	18,5	7,2
МРС+ИИ	9,3	4,1

Заключение. В статье представлены алгоритмы управления антропоморфными роботами и методы их аппаратной реализации. Результаты, полученные в ходе экспериментов,

подтверждают эффективность предложенного гибридного подхода. Полученные результаты могут быть использованы при разработке сервисных и промышленных робототехнических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин А.С.* Электропривод и системы управления. – М.: МЭИ, 2015. – 540 с.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 2004. – 752 с.
3. *Вукобратович М., Боровац Б.* Динамика и устойчивость гуманоидных роботов // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 7. – С. 3–20.
4. *Голубев И.И., Лебедев В.А.* Интеллектуальные системы управления в робототехнике // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2020. – № 4. – С. 45-58.
5. *Кузнецов А.В., Фролов К.В.* Робототехнические системы и комплексы. – М.: Машиностроение, 2018. – 416 с.
6. *Samacho E.F., Bordons C.* Model Predictive Control. Springer, 2013. 405 p.
7. *Craig J.J.* Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd ed. Pearson Education, 2005. 864 p.
8. *Hogan N.* Impedance control: An approach to manipulation // ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1985. Vol. 107. P. 1-24.
9. *Kajita S., Hirukawa H., Harada K., Yokoi K.* Introduction to Humanoid Robotics. – Springer, 2014. – 270 p.
10. *Kober J., Bagnell J.A., Peters J.* Reinforcement learning in robotics: A survey // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, No. 11. P. 1238-1274.
11. *Levine S., Finn C., Darrell T., Abbeel P.* End-to-end training of deep visuomotor policies // Journal of Machine Learning Research. 2016. Vol. 17. P. 1-40.
12. *Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scokaert P.O.M.* Constrained model predictive control: Stability and optimality // Automatica. 2000. Vol. 36, No. 6. P. 789-814.

ALGORITHMS FOR CONTROLLING ANTHROPOMORPHIC ROBOTS AND DEVICES FOR THEIR IMPLEMENTATION

DZHURABEKOV Makhmadali Akomidinovich

Student

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

The article discusses modern control algorithms for anthropomorphic robots and hardware devices that provide practical implementation of these algorithms. The analysis of existing scientific approaches to the management of stability, movement and manipulative functions of anthropomorphic robotic systems is carried out. The article also suggests a hybrid control algorithm, which is based on a combination of model-oriented methods and machine learning algorithms. To confirm the effectiveness of the proposed approach, the article presents the results of experimental studies. The study showed the practical applicability of the developed algorithms for the tasks of service, industrial and medical robotics. The scientific novelty of the work lies in the development of a hybrid algorithm for controlling an anthropomorphic robot, in the integration of neural network correction into the MPC circuit in real time, and also in the experimental confirmation of increased stability without a significant increase in energy consumption. The proposed approach mainly differs from existing solutions in a balanced combination of accuracy and adaptability.

Keywords: anthropomorphic robot, control algorithms, model control, machine learning, MPC, sensor systems, electric drives.
