

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМ РОБОТОМ

Т. Ю. Ким

*Объединённый институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, tatyana_kim92@mail.ru*

Разработана технология создания цифровых двойников робототехнических систем в MATLAB/Simulink. Представлено применение технологии для управления антропоморфным роботом с использованием обучения с подкреплением. Технология позволяет отрабатывать алгоритмы устойчивой бипедальной локомоции в виртуальной среде, сокращая время разработки и исключая риски повреждения физического оборудования. Описаны ключевые этапы создания цифрового двойника.

Ключевые слова: цифровой двойник; антропоморфный робот; обучение с подкреплением; адаптивное управление; имитационное моделирование.

APPLICATION OF DIGITAL TWIN CREATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE CONTROL OF AN ANTHROPOMORPHIC ROBOT

T. Yu. Kim

*The United Institute of Informatics Problems,
Minsk, Belarus, tatyana_kim92@mail.ru*

A technology for creating digital twins of robotic systems in MATLAB/Simulink has been developed. Its application for controlling an anthropomorphic robot using reinforcement learning is presented. The technology enables testing algorithms for stable bipedal locomotion in a virtual environment, significantly reducing development time and eliminating risks of physical hardware damage. Key stages of digital twin development are described.

Keywords: digital twin; anthropomorphic robot; reinforcement learning; adaptive control; simulation modeling.

1. Введение

Создание сложных робототехнических систем, таких как антропоморфные роботы, сопряжено с высокими финансовыми затратами, временными издержками и рисками при испытаниях. Решением является ис-

пользование цифровых двойников – комплексных имитационных моделей, точно воспроизводящих физические характеристики и логику поведения реального объекта. Цифровой двойник позволяет проводить всесторонние испытания алгоритмов управления в виртуальной среде, приближенной к реальным условиям [1].

На основе результатов, полученных в области цифровых двойников [2, 3] и эволюционных методов [4] была предложена универсальная технология их создания. Данная работа фокусируется на применении этой технологии для задачи адаптивного управления антропоморфным роботом, в частности, для генерации устойчивой человеческой походки.

2. Универсальная технология создания цифровых двойников

Предложенная технология представляет собой структурированный программный комплекс в среде MATLAB/Simulink, состоящий из четырех основных взаимосвязанных модулей (рис. 1).

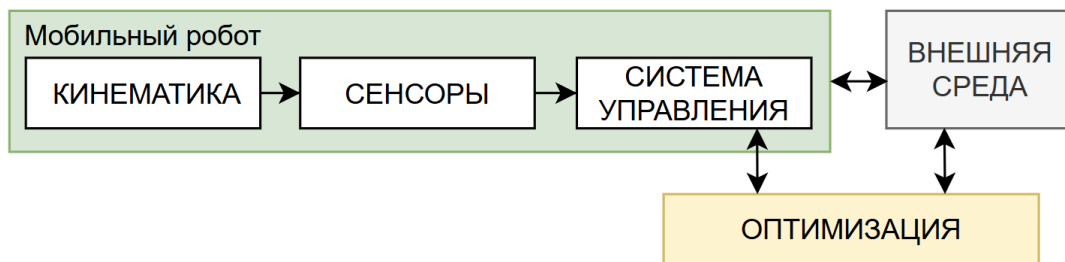


Рис. 1. Универсальная схема создания цифровых двойников

Модуль «Кинематика» предназначен для выбора типа робота и конфигурации его исполнительных механизмов. Технология поддерживает создание моделей различного типа, включая антропоморфного робота. Пользователь может выбрать модель полного робота или его отдельных частей (например, только педипулятор для отработки походки) и задать начальные параметры, такие как ограничения углов в суставах

Модуль «Сенсоры» обеспечивает виртуальное оснащение робота датчиками для взаимодействия с окружающей средой. Для антропоморфного робота используются специализированные сенсоры (Transform Sensor, Bushing Joint), измеряющие относительную позу, скорость, ускорение и усилия в суставах.

Модуль «Внешняя среда» позволяет конфигурировать виртуальное пространство, в котором функционирует робот (тип поверхности, препятствия), и задавать целевую функцию. Для задачи походки целевая функция оценивает такие критерии, как скорость движения вперед, вертикальное и боковое смещение центра масс, потребление энергии.

Модуль «Оптимизация» представляет собой ядро технологии, где реализованы методы адаптивного управления, включая генетические алгоритмы и обучение с подкреплением. В разделе «практическое управление» описан процесс обучения стратегии управления, направленной на максимизацию совокупного вознаграждения от целевой функции.

Разработана универсальная технология, показанная на рис. 2, которая базируется на общих подходах разработки имитационной модели, спроектированной из твердотельных моделей, моделирования и модели системы управления, а также обеспечения взаимодействия между блоками (моделями).

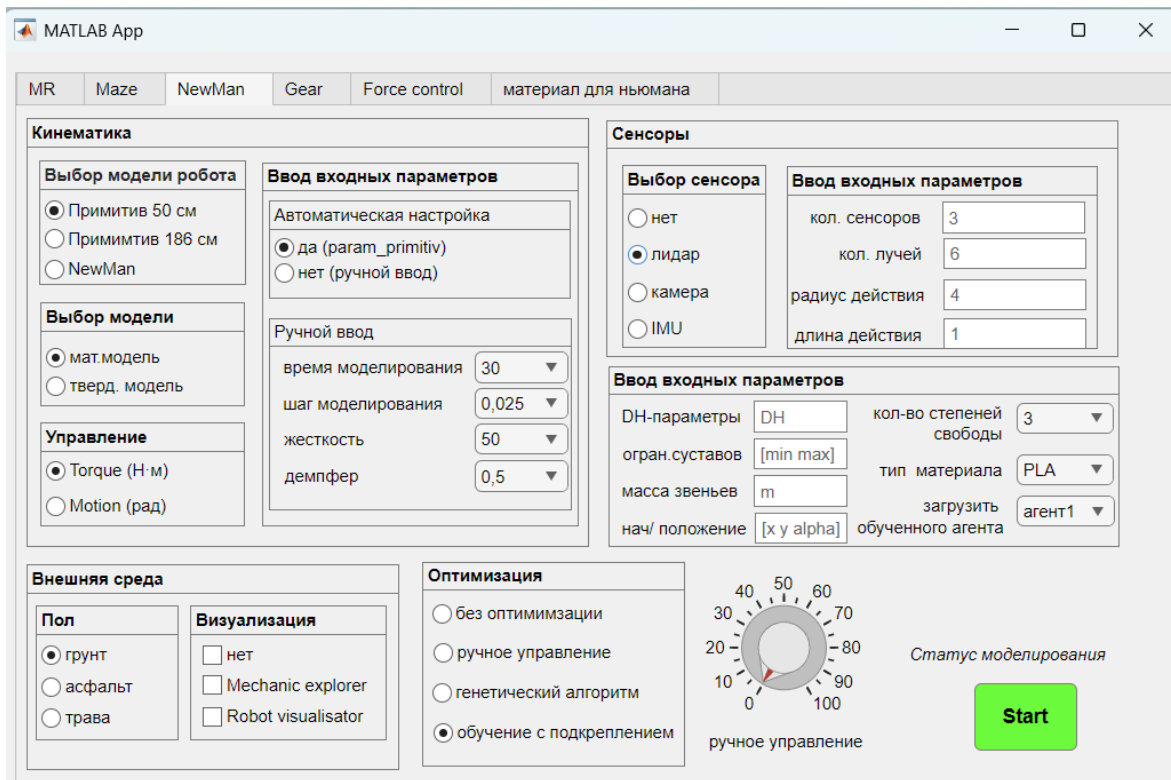


Рис. 2. Интерфейс программы для создания цифровых двойников по предложенной технологии

Гибкость технологии позволяет комбинировать эти модули для быстрого прототипирования цифровых двойников под различные задачи.

3. Практическое применение: имитация человеческой походки

В качестве практического примера рассмотрено применение предлагаемой технологии для создания цифрового двойника антропоморфного робота с целью обучения его устойчивой бипедальной походке.

Реализация происходит в несколько этапов.

1. Создание модели робота с помощью твердотельной CAD-модели, которая была импортирована и преобразована в модель Simscape Multibody. Нижние конечности робота оснащены активными вращательными приводами, руки – пассивными суставами. Для каждого сустава заданы кинематические ограничения для предотвращения неестественных движений.

2. Настройка физики взаимодействия путем подключения и конфигурирования контактных сил между стопами робота и виртуальной поверхностью, учитывающих жесткость и демпфирование для корректного моделирования ходьбы.

3. Интеграция сенсоров и целевой функции с использованием данных сенсоров (Transform Sensor, Bushing Joint) для формирования целевой функции, оценивающей качество походки и выдающей вознаграждение агенту RL.

4. Обучение с подкреплением с применением алгоритма DDPG, где нейросетевой агент генерирует управляющие воздействия на приводы суставов на основе состояния среды с целью максимизации совокупного вознаграждения для достижения устойчивой и эффективной ходьбы.

Архитектура взаимодействия блоков в Simulink для данной задачи представлена на рис. 3.

4. Результаты и обсуждение

Разработанная технология создания цифровых двойников позволила успешно реализовать и протестировать систему управления антропоморфным роботом для имитации человеческой походки. После 6000 эпизодов обучения цифровой двойник демонстрирует устойчивое передвижение вперед с сохранением равновесия. Разработанная функция вознаграждения, учитывающая скорость передвижения, устойчивость и энергоэффективность, позволила сформировать естественную походку без явного программирования траекторий движений.

Применение технологии цифровых двойников обеспечило безопасное и эффективное обучение системы управления сложному двигательному навыку в виртуальной среде, исключив риски повреждения физического оборудования и значительно сократив время разработки. Экспериментально подтверждены следующие преимущества предлагаемого подхода:

- сокращение времени разработки за счет исключения этапов механической сборки/ремонта и развертывания аппаратного обеспечения для тестов;
- гибкость и модульность архитектуры, позволяющие быстро менять конфигурацию робота, параметры среды и методы управления;

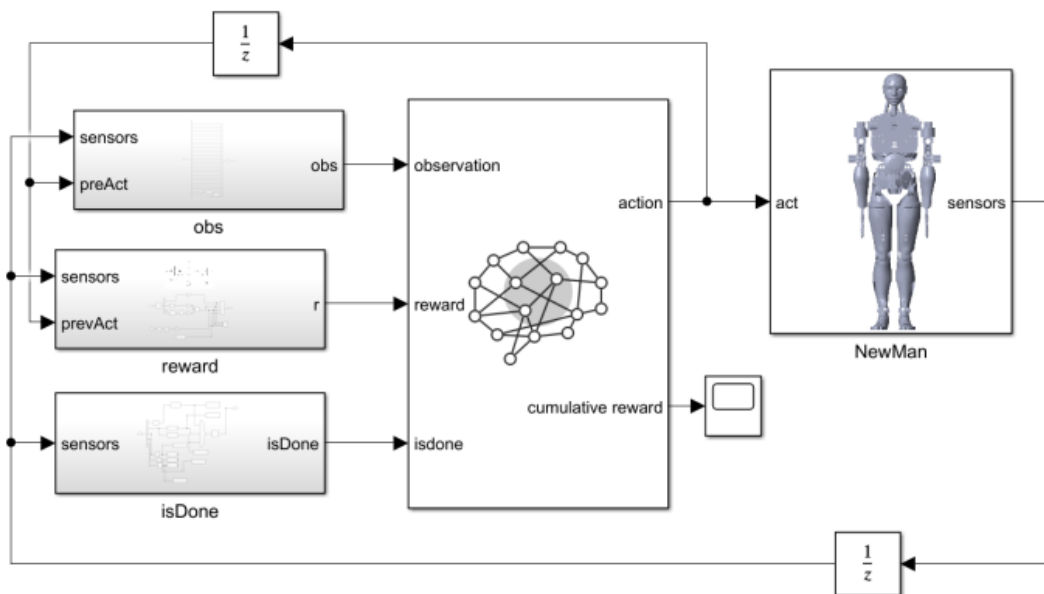


Рис. 3. Схема применения блока обучения с подкреплением совместно с моделью робота

- повышение безопасности разработки, поскольку алгоритмы отрабатываются до достижения стабильной работы без риска повреждения дорогостоящего оборудования;
- возможность переноса отработанной в моделировании стратегии управления на физического робота с помощью методов адаптации и дообучения;
- полученные результаты демонстрируют высокую эффективность сочетания технологии цифровых двойников с методами обучения с подкреплением для решения сложных задач управления антропоморфными роботами.

5. Заключение

Представленная технология создания цифровых двойников является инструментом для ускоренной разработки и оптимизации систем управления сложными робототехническими системами. Ее применение для обучения антропоморфного робота устойчивой походке подтверждает эффективность и перспективность подхода. В будущем планируется расширение библиотеки сенсоров и методов оптимизации, а также проведение натуральных экспериментов для верификации результатов, полученных в моделировании.

Благодарность. Работа выполнена в рамках задания 1.3.1. ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества

и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика».

Библиографические ссылки

1. *Stjepandić J., Sommer M., Stobrawa S.* Digital Twin: A Conceptual View // *DigitalTwin: An Approach for Production Process Optimization in a Built Environment* / eds.: J. Stjepandić, M. Sommer, B. Denkena. Cham : Springer, 2022. P. 31–49. (Springer Series in Advanced Manufacturing.)

2. *Ким Т. Ю., Прокопович Г. А.* Имитационное моделирование движения двухколесного робота RoboCake на горизонтальной плоскости // *Молодежь в науке-2020: тез. докл. XVII Междунар. науч. конф. «Молодежь в науке».* Минск, 22–25 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. Минск : Беларус. навука, 2020. С. 398–400.

3. *Ким Т. Ю., Прокопович Г. А.* Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма // *Информатика.* 2021. Т. 18, № 4. С. 53–68.

4. *Ким Т. Ю., Печковская А. В., Печковский Е. И.* Метод оптимизации массы деталей редуктора при изготовлении с помощью 3D-печати на основе генетического алгоритма // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика.* 2024. Т. 21, № 3. С. 32–46.