

Утверждаю

Первый проректор - проректор по научной
работе и стратегическому развитию

д.т.н., доцент Коробед Б.Н.

«30» апреля 2021 г.

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Шестакова Евгения Игоревича «Алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы управления модульными роботами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

Актуальность темы диссертации.

Одним из новых и актуальных для практики направлений современной робототехники является разработка роботов модульной конструкции. К ним относятся, в частности, шагающие платформы, манипуляционные роботы с большим числом степеней подвижности. Применение известных методов искусственного интеллекта, таких как обучение с подкреплением или искусственные нейронные сети, не позволяет решить задачи адаптации таких роботов к условиям функционирования и к возможным изменениям параметров самого робота в процессе работы. В связи с этим представляется актуальным новый подход к управлению модульными роботами, предлагаемый Е.И. Шестаковым, представляющий собой развитие и

обобщение метода автономного адаптивного управления (ААУ), ранее предложенного А.А. Ждановым.

Общая характеристика работы.

Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и списка сокращений, объем составляет 118 страниц, включая 47 рисунков, 16 таблиц, 22 формулы. Список литературы содержит 122 наименования.

Во введении обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор существующих алгоритмов управления движением модульных роботов, в том числе, использование управляющих таблиц, применение нейронных сетей, гармонический осциллятор, применение теории конечных автоматов. На основании обзора сделан обоснованный вывод о том, что все рассмотренные методы управления являются детерминированными и не способны учесть изменения ситуации, включая и выход из строя отдельных модулей робота. Анализируя применение методов искусственного интеллекта, автор приходит к выводу, что генетические алгоритмы не подходят для решения задачи управления, с чем можно согласиться, поскольку речь идет об управлении мобильными роботами в реальном масштабе времени. Вместе с тем, трудно согласиться с замечанием автора о том, что искусственные нейронные сети не могут обучаться. Существуют нейронные сети, обучаемые без учителя, в том числе, и сети, меняющие свою структуру в процессе работы. На наш взгляд в этом обзоре следовало бы упомянуть и методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning), которые активно развиваются в последнее время, и, по существу решают ту же задачу – обучение в процессе реальной деятельности, но иными средствами, чем метод ААУ, который, в конечном итоге, и принимается диссертантом. Отметим, что автор убедительно обосновал целесообразность применения и дальнейшего развития метода ААУ для решения поставленных задач. Представляет интерес подробный

обзор программных средств моделирования модульных роботов, на основании которого автор делает обоснованный вывод о целесообразности разработки архитектуры системы управления и способа построения программных средств моделирования с учетом взаимодействия моделирующего комплекса с физическим образцом модульного робота.

Во **второй главе** представлен разработанный автором способ построения адаптивной системы управления мобильным роботом, основанный на методе ААУ. Не вызывает сомнений иерархическая структура предлагаемой системы управления. Вместе с тем, отметим ограниченность круга задач, которые рассматривает автор, а именно, перемещение робота или схвата манипулятора в заданную точку и реконфигурация кинематической схемы. В первом случае можно было бы принять во внимание задачу планирования в рабочем пространстве с препятствиями, которая как раз успешно решается манипуляторами с избыточными степенями подвижности. Во втором случае автор упоминает об активной реконфигурации мобильного робота в соответствии с распознанным видом препятствий, но в работе такая задача не рассмотрена – здесь решается только задача пассивной реконфигурации, когда у многомодульного механизма выходит из строя один из модулей. Такая задача, впрочем, также представляет значительный практический интерес.

Автором предложена обобщённая структура адаптивной системы управления, соответствующая идеологии ААУ (Рис.2.1.2). Здесь, на наш взгляд, следовало бы конкретизировать информационно сенсорную систему – что она собой представляет, какие датчики модулей используются в том или ином случае, являются ли они одинаковыми для разных модулей, или способны взаимно дополнять информацию о текущей ситуации. Наконец, что представляет собой образ текущей ситуации, и как он формируется из показаний датчиков различной модальности. Вызывает некоторые сомнения п.5 в списке основных принципов построения адаптивной системы. Что понимает автор под термином «Система управления»? Если это система,

размещенная физически на самом роботе, то она едва ли сможет включать средства виртуального моделирования. Если же такие средства размещены отдельно в блоке управления, то вопрос об обучении реального робота без его участия, т.е. по его математической модели вызывает большие сомнения.

В п.2.2 автором предложена математическая модель, описывающая работу метода ААУ в форме самообучающегося динамического конечного автомата. Эта модель является определенным вкладом автора в теорию ААУ и представляет научный интерес. В следующем п.2.3 показано, как работает эта модель при управлении модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа». Вместе с тем, любой метод обладает собственными ограничениями, которые необходимо указывать. В данном случае это конечное число состояний объекта управления. Автор не указывает, каким образом определяется это пространство состояний, но можно предположить, что его размерность может быть очень большой, например, если говорить о наборе возможных конфигураций манипулятора (Рис.2.3.1). В какой-то мере задачу можно облегчить, задавая целые области состояний (Рис.2.3.4), но здесь, по мнению рецензента, можно потерять точность достижения цели. Кроме того, можно предположить, что выходной сигнал автомата в общем случае зависит не только от непосредственно предыдущего состояния (см. формулу (12)), но и от нескольких предыдущих состояний, хранящихся в оперативной памяти. Заметим, что метод ААУ такими ограничениями не обладает, сохраняя на некоторое время предыдущую информацию. Поэтому автору следовало бы более подробно обосновать выбранную структуру автомата.

В **третьей главе** описан предложенный способ построения программного обеспечения для моделирования модульных роботов как системы взаимодействующих классов, описываемых в виде UML-диаграмм. Данный подход описывает отдельными классами мехатронные модули, поворотные сочленения, датчики, различные способы управления модульным

роботом, включая метод ААУ и другие необходимые для построения программного комплекса классы.

Разработанный автором программный комплекс (Рис.3.1.1) может быть успешно использован для моделирования широкого класса модульных роботов, причем при различных методах управления ими. Заметим, что он представляет интерес и для учебного процесса в Технических Университетах по курсу моделирования робототехнических систем

К новым результатам этой главы можно отнести также предложенный автором способ описания кинематической структуры модульных роботов на языке XML и алгоритм автоматического построения компьютерных моделей модульного робота с использованием кватернионов.

В диссертации подробно описана программная реализация метода Автономного Адаптивного Управления (Рис.3.2.9), структура которой состоит из двух контуров – контура обучения и контура управления. Кроме того, предложена организация взаимодействия программных средств моделирования и разработанного макетного образца модульного робота через интерфейсы USB/Bluetooth и специальным разработанным протоколом передачи информации. Эти результаты представляют значительную практическую ценность.

В **четвертой** главе приведены результаты обширных экспериментальных исследований по обучению и переобучению модульного робота. В том числе, здесь анализируется связь между количеством модулей, точностью и временем обучения. Представляет интерес успешный эксперимент, демонстрирующий способность манипуляционного робота к самообучению и переобучению, в том числе, при неисправности одного из модулей. К сожалению, все эксперименты проведены только путем математического моделирования. С учетом этого замечания, полученные результаты в полной мере подтверждают работоспособность и эффективность предложенного подхода на основе метода ААУ.

В **заключении** подведены основные результаты работы и намечены возможные направления дальнейших исследований.

Научная новизна результатов работы

- разработаны принципы построения адаптивной системы управления модульными роботами на основе метода Автономного Адаптивного Управления;

- предложена математическая модель, описывающую работу адаптивной системы управления в форме «Самообучающегося Динамического Конечного Автомата», которая расширяет понятие конечного автомата;

- Предложены алгоритмы адаптивного управления модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа»;

- Предложен способ организации программных средств моделирования модульных роботов.

Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы состоит в разработке программно-алгоритмических средств для создания адаптивных систем управления, способных обучаться, дообучаться и переобучаться непосредственно в процессе функционирования. Предложенные алгоритмы адаптивного управления можно применять при разработке опытных и серийных образцов многозвенных роботов различного типа и назначения, а разработанное программное обеспечение для моделирования модульных роботов – в учебных и научно-исследовательских целях.

Апробация и публикации по теме диссертации

Основные результаты работы отражены в 10 печатных работах, включая рецензируемые журналы, два из которых входят в базу цитирования Scopus и

один – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, а также в одном свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты работы апробированы и получили положительную оценку на пяти всероссийских и международных конференциях.

Замечания по содержанию диссертации

- Было бы целесообразно сравнить различные методы управления модульными роботами при проведении экспериментальных исследований, что сделало бы более убедительным выбор и применение метода Автономного Адаптивного Управления.

- Недостатком также является отсутствие сопоставления экспериментальных результатов, полученных при моделировании и при экспериментах с реальными образцами модульных роботов.

- В диссертации не рассмотрена задача реконфигурации, возможность которой является одним из основных преимуществ модульных роботов

- В работе следовало определить ограничения, возникающие при применении предложенных алгоритмов адаптивного управления.

Заключение

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты диссертации, полученные Шестаковым Е.И., обладают научной новизной и практической ценностью, а сама диссертационная работа может быть квалифицирована как законченное научное исследование по актуальной тематике.

Основные результаты достаточно полно отражены в научных публикациях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Анализ результатов работы позволяет сделать заключение о соответствии диссертационной работы требованиям, предъявляемым ВАК РФ к работам на соискание степени кандидата технических наук по

специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей», а ее автор Е.И. Шестаков достоин присуждения искомой степени кандидата технических наук.

Отзыв на диссертацию обсуждён и утвержден на научном семинаре кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) 29 апреля 2021 года

протокол №18/20-21 от 29.04.2021

Заведующий кафедрой

«Робототехнические системы и мехатроника»

к.т.н., доцент

Серебранный В.В.

д.т.н., профессор

Ющенко А.С.