

A detailed illustration of a Mars rover, likely a Curiosity rover, positioned on a rocky, orange-brown terrain. The rover is shown from a side-rear perspective, with its six wheels and various instruments visible. It is facing a large, dark rock. The background features rolling hills and a hazy, orange sky, characteristic of the Martian surface.

К.Е. Тотухов  
П.М. Урвачев  
А.П. Частиков

**РАЗРАБОТКА  
МЕТОДА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ СИМУЛЯЦИИ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ  
С ФУНКЦИЕЙ КОРРЕКТИРОВКИ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

**К.Е. Тотухов, П.М. Урвачев, А.П. Частиков**

**РАЗРАБОТКА  
МЕТОДА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ СИМУЛЯЦИИ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ  
С ФУНКЦИЕЙ КОРРЕКТИРОВКИ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

**Монография**

Краснодар  
2017

УДК 004.896

ББК 32.816

T63

Рецензенты:

**Д.Л. Пиотровский**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов,  
ФГБОУ ВО «КубГТУ»;

**В.И. Лойко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем,  
ФГБОУ ВО «КубГАУ»

**T63 Тотухов, Константин Евгеньевич.**

**Разработка метода интеллектуальной компьютерной симуляции робототехнических устройств с функцией коррекции погрешностей позиционирования** : монография / К.Е. Тотухов, П.М. Урвачев, А.П. Частиков. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – 154 с.

ISBN 978-5-91718-491-3

В монографии проведены исследования, целью которых является повышение точности позиционирования робототехнических устройств путём применения интеллектуальной компьютерной симуляции. Сформулированы основные критерии точности управления роботами и поставлены условия решения задачи. Разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение метода интеллектуальной симуляции робототехнических устройств. Проведены испытания системы и оценка эффективности предложенного метода. Данная работа предназначена для специалистов в области интеллектуальной робототехники, а также конструкторов и разработчиков, занимающихся компьютерной симуляцией технических систем.

ББК 32.816  
УДК 004.896

ISBN 978-5-91718-491-3

© К.Е. Тотухов, П.М. Урвачев,  
А.П. Частиков, 2017

© Оформление ООО «Издательский  
Дом – Юг», 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1.</b> <b>АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ</b> <b>ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ</b> <b>КОМПЬЮТЕРНОЙ СИМУЛЯЦИИ</b> .....	10
1.1 Обоснование целесообразности использования компьютерных симуляторов в робототехнике .....	10
1.2 Обзор особенностей существующих программных систем симуляции роботов .....	19
1.3 Обзор исследований эффективности симуляторов робототехники .....	35
1.4 Формальное представление механических манипуляционных систем ПР .....	40
1.5 Выводы .....	47
<b>Глава 2.</b> <b>ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, СТРУКТУРА</b> <b>И МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ</b> <b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА ПР</b> .....	49
2.1 Структурно-функциональное описание симулятора ПР сферической компоновки .....	49
2.2 Интеллектуальная корректировка результатов симуляции посредством экспертной системы .....	54
2.2.1 Продукционная модель с фактами двух типов .....	59
2.2.2 Механизм логического вывода и рабочая память .....	63
2.2.3 Генератор первичных фактов .....	66
2.2.4 Общая структура системы интеллектуальной симуляции ПР .....	71
2.3 Методика разработки симулятора, накопления знаний и обучения ЭС .....	73
2.4 Выводы .....	77

<b>Глава 3.</b>	
<b>АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ</b> .....	78
3.1 Разработка и программная реализация объектно-ориентированной структуры симулятора ПР сферической компоновки .....	78
3.2 Алгоритмизация и программная реализация рабочей памяти и генератора первичных фактов ЭС .....	83
3.3 Алгоритмизация и программная реализация обработчика БЗ ....	89
3.4 Алгоритмизация и программная реализация МЛВ .....	97
3.5 Общий алгоритм интеллектуальной системы и программная реализация .....	104
3.6 Выводы .....	108
<b>Глава 4.</b>	
<b>ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, НАКОПЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ</b> .....	109
4.1 Определение условий и построение модели объекта эксперимента .....	109
4.2 Определение пределов погрешностей и расчет требуемого количества опытов .....	113
4.3 Накопление экспериментальных данных и извлечение знаний .....	118
4.4 Оценка эффективности интеллектуального симулятора .....	125
4.5 Выводы .....	127
<b>Заключение</b> .....	128
<b>Библиографический список</b> .....	130
<b>Приложение А.</b>	
<b>Программный код интеллектуального симулятора (С#)</b> .....	140
<b>Приложение Б.</b>	
<b>База знаний ЭС корректировки отклонений симуляции (XML)</b> .....	147

## ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности робототехника нашла широкое применение как эффективное средство автоматизации производства, замены человеческого труда в трудных или опасных условиях. Промышленные роботы (ПР) используются для решения массы самых разнообразных технологических и производственных задач. Данные задачи всегда предъявляют к ПР строгие требования по целому ряду критериев: по точности позиционирования, по точности измерений положения, по точности и скорости обрабатывания и выполнения управляющих команд, по количеству степеней свободы и подвижности звеньев. В связи с этим, разработка как самого манипулятора ПР, так и программ управления им представляет сложную задачу, предполагающую многоэтапное решение.

В современных подходах к проектированию, конструированию и программированию сложных технических систем широко применяются средства компьютеризированной поддержки разработчика, например такие, как -CAD/-CAM/-CAE обеспечение. Эти подходы распространяются и на создание ПР, в том числе в виде разработки и применения компьютерной симуляции робототехнических систем. Данный метод даёт возможность разработать и отладить как сам манипулятор, так и его систему управления, с использованием специализированного программного обеспечения, получившего название компьютерного симулятора. Таким образом, становится возможным провести отладку, испытание, тестирование механических, электрических и управляющих систем манипулятора в виртуальной среде ПК, что, очевидно, позволяет достичь ощутимой экономии временных и материальных ресурсов в процессе разработки.

С точки зрения достигнутых в области симуляции промышленных роботов результатов, компьютерный симулятор робототехнической системы представляет собой совокупность преимущественно программных средств и компонентов, которые, функционируя слаженно, способны обеспечивать имитацию активности манипулятора, оперирующего под управлением пользовательской программы. Для решения данных задач симулятор опирается, с одной стороны, на математический аппарат анализа робототехнических систем, а с другой, на применяемые в современных автоматизированных системах средства программного управления.

Конечным результатом компьютерной симуляции ПР является совокупность массивов числовых данных, характеризующих функционирование робота в процессе имитации. Так или иначе, на сегодняшнем уровне развития, симуляция пока ещё не может полностью заменить реальный эксперимент при разработке ПР, в виду, с одной стороны, сложности симуляции определённых закономерностей, прежде всего, динамики манипулятора, а с другой, невозможности формализовать разного рода характерные возмущения, воздействующие на ПР. В связи с этим, так или иначе, результаты симуляции всегда будут отличаться от реальных данных на размер погрешности некоторой величины. По этой причине, представляется целесообразной разработка усовершенствованного подхода, позволяющего совмещать симуляцию ПР с обработкой экспериментальных данных таким образом, чтобы данные реального эксперимента впоследствии накапливались, позволяя повышать точность симулятора, его способность определять диапазон погрешности собственных вычислений. Представляется, что системы искусственного интеллекта символьного типа, такие, как экспертные системы, способны обеспечить эффективное решение данной задачи.

Объектом проводимого научного исследования является интеллектуальная система компьютерной симуляции промышленных роботов с функцией корректировки результатов вычислений на величины диапазонов отклонений.

Предметом исследования является метод интеллектуальной симуляции промышленных роботов, позволяющий корректировать вычисления на диапазон отклонения, получаемый посредством накопленных экспериментальных данных в виде правил экспертной системы.

Целью исследования заключается в разработке структуры и методики создания и обучения интеллектуального симулятора ПР со встроенной функцией корректировки отклонений симуляции на основе экспертной системы (ЭС).

В рамках исследования ставятся следующие задачи:

- исследование существующих подходов в построении симуляторов ПР, оценка достоинств и недостатков, выявление принципиальных проблем;
- анализ структуры симулятора ПР, поиск способов усовершенствования конфигурации существующих и интеграции новых функциональных блоков;

- исследование возможности применения знаниевых интеллектуальных (экспертных) систем (ЭС) для решения проблем симуляции;
- разработка оригинальной структуры интеллектуальной системы симуляции ПР сферической компоновки с функцией корректировки погрешностей;
- разработка методики построения интеллектуального симулятора ПР, накопления экспериментальных данных и обучения ЭС;

В качестве методов исследования применяются системный анализ, технологии искусственного интеллекта (инженерия знаний, разработка экспертных систем), математическое моделирование, матричные преобразования (механика манипуляторов), математическая логика, теория множеств, теория алгоритмов, теория графов.

Научная новизна исследования заключается в получении следующих теоретических результатов:

- разработана структура и функционал универсального блока (подсистемы), моделирующего звено манипулятора на основе сигналов управления, аналитических зависимостей и состояний других звеньев. Разработана структурно-функциональная схема системы симулятора ПР сферической компоновки на основе блоков, моделирующих отдельные звенья;

- предложен способ решения проблемы рассогласования симуляции и реальных данных путём разработки и внедрения в симулятор экспертной системы (ЭС) корректировки отклонений. Разработана структура интеллектуальной системы симуляции ПР сферической компоновки с функцией корректировки отклонений посредством встроенной ЭС, накапливающей знания на основе экспериментальных данных;

- сформулирован соответствующий для данной ЭС общий вид продукционного правила, позволяющий установить связь параметров реального ПР с характерными для него диапазонами погрешностей;

- разработана методика построения интеллектуального симулятора ПР, накопления и обработки экспериментальных данных, извлечения знаний о погрешностях и обучения ЭС;

- разработано функциональное, алгоритмическое и объектно-ориентированное описание системы симуляции ПР со встроенной ЭС корректировки отклонений.

Полученные теоретические положения представляют собой достаточно универсальную базу, способную обеспечить интеграцию



процессов компьютерной симуляции и интеллектуальной обработки данных посредством систем, основанных на знаниях. Предложенный метод позволяет достичь интеллектуализации процесса симуляции ПР путём корректировки результатов с учётом диапазонов погрешностей, полученных ранее с помощью реального эксперимента или из исследований схожего характера.

Результаты, изложенные в монографии, могут быть использованы для повышения эффективности решения таких задач робототехники как разработка, испытание, отладка ПР и систем управления манипуляторами.

Практическую значимость имеют следующие положения:

- разработана и реализована программно объектно-ориентированная модель симуляции ПР сферической компоновки;
- разработаны и реализованы программно алгоритмы экспертной системы (базы знаний, механизма вывода, рабочей памяти) корректировки погрешностей симуляции ПР;
- разработан и применён способ хранения БЗ ЭС корректировки погрешностей симуляции на жёстком диске в виде документов XML;
- получены и обобщены экспериментальные данные опытов на реальном ПР сферической компоновки, извлечены знания для ЭС в форме продукционных правил, произведено обучение ЭС;
- произведена опытная оценка эффективности разработанного метода. Достигнуто повышение эффективности на 40–60 % выше требуемой.

Разработанное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение может быть использовано:

- в системах подготовки роботизированных производств;
- в системах разработки и проектирования промышленных роботов;
- в процессе разработки, испытания и тестирования программ управления промышленной робототехникой;
- как средство интеллектуализации процессов внедрения и использования промышленных роботов;
- с целью интеллектуализации обслуживания промышленной робототехники.

В результате данного исследования были защищены следующие теоретические и практические положения:

- методика построения симулятора ПР на основе функциональных блоков, моделирующих звенья манипулятора;

- структура интеллектуальной системы компьютерной симуляции ПР сферической компоновки с функцией корректировки погрешностей;
- методика построения интеллектуальной системы компьютерной симуляции ПР, накопления экспериментальных данных, извлечения знаний и обучения ЭС;
- формула продукционного правила, связывающего характеристики ПР, его состояние с диапазоном отклонений;
- функциональное и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы симуляции ПР с функцией корректировки отклонений.