

*Белоусов Игорь Рафаилович,
Охоцимский Дмитрий Евгеньевич,
Платонов Александр Константинович,
Сазонов Виктор Васильевич*

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ МЕХАНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ ЧЕРЕЗ СЕТЬ ИНТЕРНЕТ ¹

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН связан многолетней дружбой и совместной работой с С.С. Лавровым. Святослав Сергеевич был руководителем замечательного коллектива баллистиков ОКБ С.П. Королева, и именно он организовал внедрение только что родившейся тогда вычислительной техники в практику работы ОКБ. Созданные им самим и под его руководством программные средства на каждом этапе развития ЭВМ были образцом качества, функциональной полноты и практической целесообразности ограничений.

Вычислительная техника не стоит на месте, она стала теперь уделом многих, и нам приятно показать ее современные возможности патриарху практического использования ЭВМ – Святославу Сергеевичу Лаврову.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное управление роботами в среде Интернет – новое перспективное направление научных исследований, имеющее важное практическое значение. Обычно сеть Интернет используется как информационная среда (для электронной коммерции, обмена цифровыми данными в различных форматах – аудио, видео, графика, текст). Развитие общедоступных компьютерных сетей, повышение их пропускной способности, увеличение широты охвата, а также развитие новых технологий в робототехнике и теории управления позволяет сделать вывод, что в самое ближайшее время сеть Интернет может найти широкое использование и для управления различными уда-

ленными объектами, к числу которых, прежде всего, относятся роботы. [1].

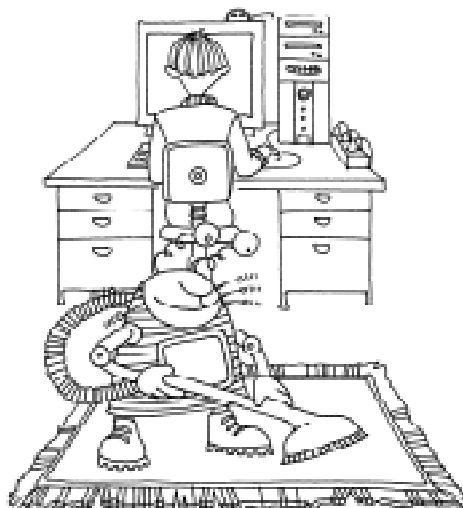
Среди возможных приложений «Интернет-робототехники» – удаленное управление автоматизированными производствами, телемедицина, выполнение работ в экстремальных средах и другие. Одним из важных направлений в этой области является развитие средств дистанционного обучения, причем особый интерес представляет создание на базе уже разработанных робототехнических систем специальных средств дистанционного обучения робототехнике и мехатронике. Принципиальная особенность таких систем – возможность проведения экспериментов с реальным роботом и оборудованием – особенно важна для университетов и других учебных заве-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 02-07-90223, проекта РАН-CNRS 12257, Программы Президиума РАН и Федеральной целевой программы «Интеграция высшего образования и фундаментальной науки».

дений, не имеющих такого оборудования. Разработанные методы позволяют совместно использовать дорогостоящее робототехническое оборудование через сеть Интернет. Подобная система разрабатывается, в частности, в МИРЭА (Москва) и является частью проекта «Виртуальная кафедра» [2]. Разработаны компьютерные модели робототехнического оборудования, имеющегося на кафедре, компьютерные учебники с дистанционным доступом. Управление манипуляционным и мобильным роботами было продемонстрировано во время Конференций по экстремальной робототехнике (Санкт-Петербург, 2001 и 2002 гг.).

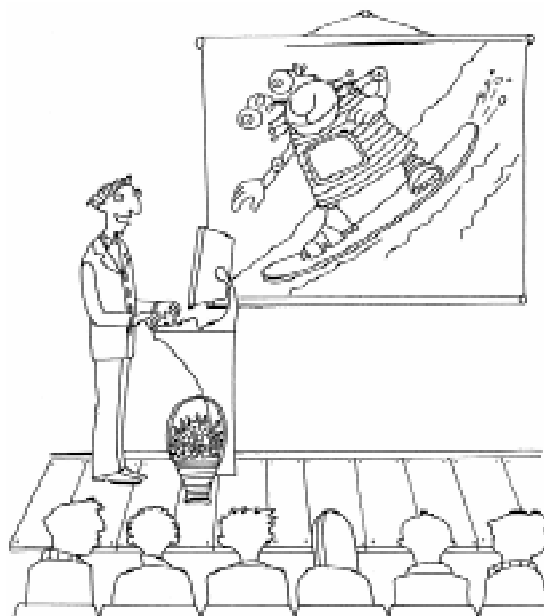
Среди зарубежных систем дистанционного обучения отметим следующие. Проект TEAM (Tele-Education in Aerospace and Mechatronics) [3] нацелен на разработку распределенной телелaborатории, объединяющей робототехнические ресурсы нескольких университетов Европы и Канады. Задача проекта IECAT (Innovative Educational Concepts for Autonomous and Teleoperated Systems) [4] – «организация международной виртуальной лаборатории для проведения дистанционных экспериментов по управлению для робототехники и космоса». Эти эксперименты будут выполняться студентами через Интернет. Проект IECAT поддержан совместной Программой Евросоюза и США по высшему образованию. В настоящее время выполняются также работы по немецким национальным проектам «Виртуальный университет» и «Виртуальные лаборатории». В июне 2002 г. завершен европейский проект ReLAX (Remote Laboratory eXperimentation trial, IST-1999-20827), в котором были рассмотрены коммерческие проблемы проведения экспериментов по управлению роботами и дистанционному обучению через Интернет.

Одной из важнейших целей работ по Интернет-робототехнике, проводимых в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, является разработка системы дистанционного образования в области робототехники, теоретической механики и мехатроники. Это потребовало создания специальной многоязычной (имеются в виду формальные язы-



Дистанционное управление роботами в среде Интернет – новое перспективное направление научных исследований, имеющее важное практическое значение.

ки программирования) программной среды, обеспечивающей взаимодействие с Интернет, роботом, средствами технического зрения и средствами управления, предоставляемыми студенту. В статье описываются особенности разработанной системы и созданные на ее основе задачи студенческого практикума.



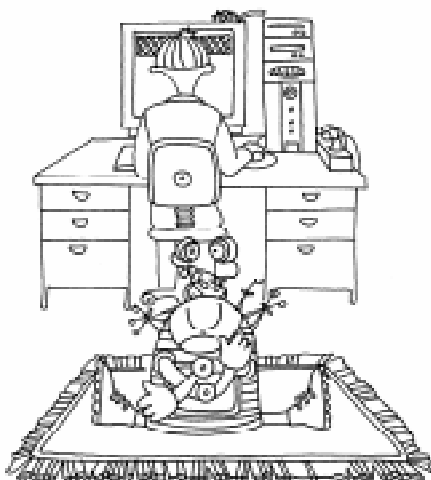
Управление манипуляционным и мобильным роботами было продемонстрировано во время Конференций по экстремальной робототехнике.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ РМ-01 ЧЕРЕЗ СЕТЬ ИНТЕРНЕТ

В работах [5–7] подробно рассмотрена система управления через Интернет роботом-манипулятором РМ-01, которая была разработана в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Отметим кратко принципиальные особенности, которые использованы при формулировке представленных ниже задач практикума.

Разработанные к настоящему времени системы, управление роботами в которых основано на передаче телеизображений, обладают такими недостатками, как наличие существенных задержек в канале обратной связи и неудобная для оператора среда управления. Для преодоления этих недостатков была разработана «виртуальная среда управления». Под этим термином ниже понимается «виртуальный дублер робота», то есть трехмерные модели робота и его рабочего пространства, работающие на экране студента в режиме реального времени. Для трехмерного моделирования использовалась одна из наиболее перспективных открытых технологий программирования на базе языка Java3D.

Идея такого подхода состоит в том, что, вместо громоздких видео изображений,



... статусная строка. В ней сообщаются нештатные ситуации, которые могут произойти с роботом, если будет выполнена заданная пользователем операция

в машину студента передается минимальный набор параметров, однозначно определяющих состояние робота и его рабочей среды (набор обобщенных координат робота и координаты объекта, с которым он взаимодействует). Затем рабочая сцена визуализируется методами компьютерной графики. Это позволяет не только свести к минимуму задержки реакции системы на управляющие воздействия (за счет минимизации пересылаемых данных), но и обеспечить для оператора комфортную управляющую среду (с возможностью смены направления обзора, увеличения деталей сцены, использования полупрозрачных изображений).

Для управления движением удаленного робота был разработан графический пульт, внешний вид которого идентичен реальному пульту ручного управления роботом РМ-01. Он организован как набор кнопок, графических элементов, статусных строк и текстовых полей ввода. С их помощью оператор может выполнять перемещение робота, выбирать режимы управления и контролировать текущее состояние робота (см. левую часть интерфейса управления на рисунках 1, 2). Поскольку именно со знакомства с пультом начинается знакомство студента с роботом, опишем реализацию виртуального пульта более подробно.

В верхней части пульта расположена статусная строка. В ней сообщаются нештатные ситуации, которые могут произойти с роботом, если будет выполнена заданная пользователем неверная операция. В частности, сигнализируется нарушение ограничений на углы в шарнирах, выход желаемого положения схвата за границы рабочей зоны робота, соударение звеньев робота с объектами в его рабочем пространстве.

Оператор может выбрать один из двух режимов работы с роботом – режим непосредственного управления (on-line) и режим предварительной работы с графической моделью робота и рабочей среды (off-line).

Интерфейсные элементы в левой части панели управления служат для задания скорости робота, режима движения и состояния схвата (открыть/закрыть). Возможны три режима движения – WORLD (управление схватом в осях базовой системы

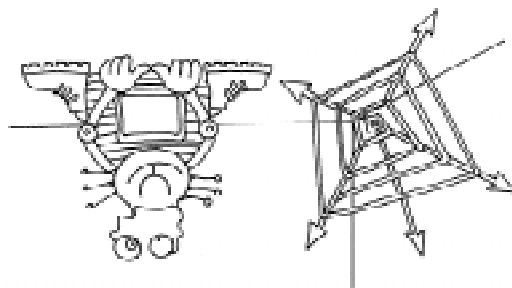
координат робота), TOOL (управление в осях системы координат, связанной с самим схватом) и JOINT (непосредственное управление каждым шарниром).

Кнопки в правой части пульта используются для управления движением в декартовых осях (перемещения и повороты относительно всех осей) и в осях шарниров. В нижней части расположены поля ввода для непосредственного задания значений координат схвата или приращений относительно текущего его положения. Можно выполнять также выравнивание оси схвата по направлению ближайшей из осей базовой системы координат и выводить робот в начальное положение.

Наличие пульта дистанционного управления в виртуальной графической среде позволяет задавать любые движения робота в упомянутых системах координат. Однако для выполнения сложных повторяющихся действий, например, сборочных операций, необходимо наличие инструмента программирования таких операций, то есть языка и среды программирования робота.

С этой целью была разработана среда дистанционного программирования операций, предназначенная для управления роботами через сеть Интернет. Она реализована на базе языка программирования Tcl (Tool command language). Язык Tcl является интерпретируемым языком с набором команд и синтаксисом, подобным C++. Все команды этого языка исполняются в специальной среде – Tcl shell, в которой реализован встроенный механизм проверки правильности введенных команд. Важной особенностью языка Tcl, использованной при разработке языка программирования роботов, является его расширяемость, то есть возможность добавления к стандартному множеству команд новых подмножеств. Одним из таких подмножеств и явилось подмножество команд разработанного языка программирования роботов Rcl – Robot control language. Этим была создана новая интерпретирующая среда – Rcl shell, в которой могут выполняться как стандартные команды языка Tcl, так и команды Rcl.

Первая версия языка Rcl была реализована как расширение языка Tcl в опера-



... любые движения робота в различных системах координат...

ционной среде UNIX/Solaris. Она была создана для программирования движения манипулятора на подвижном основании GT6A. Затем была разработана новая версия Rcl для программирования роботов через сеть Интернет. Это дало возможность использования разработанной среды программирования из-под любого навигатора по Интернет (например, MS Internet Explorer или Netscape Navigator) на любой компьютерной платформе.

Описанная среда программирования, будучи использованной в ряде проектов дистанционного управления манипуляционными и подвижными роботами России, Франции и Англии, показала достаточно высокий уровень удобства и функциональной полноты.

ЗАДАЧИ ПРАКТИКУМА ПО РОБОТОТЕХНИКЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ

С использованием описанных выше методов дистанционного управления движением робота-манипулятора РМ-01 были разработаны задачи практикума по мехатронике для студентов механико-математического факультета МГУ с возможностью дистанционного управления роботом через Интернет. В данном разделе приводятся в качестве примеров постановки двух из таких задач.

Задача 1. Кинематика робота-манипулятора.

Целью выполнения заданий является усвоение материала по теме «Кинематика роботов» (решение прямой задачи кинематики).

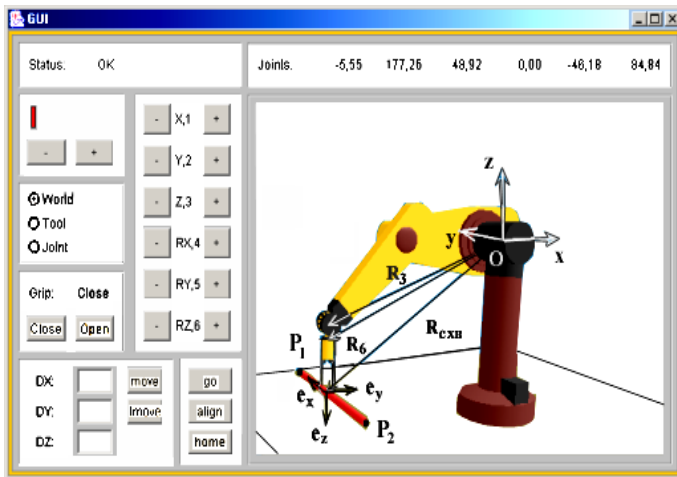


Рисунок 1. Системы координат.

матики, преобразования систем координат, возможные конфигурации манипуляторов) на примере прямого взаимодействия с роботом, что повышает интерес студента и позволяет убедиться в правильности полученных формул и результатов расчета. Одновременно с этим у студента повышается навык работы со средствами использования ЭВМ.

Во вводной части практикума дается теоретический материал. Поскольку при выполнении заданий необходимо управлять движением робота, во вводной части также демонстрируются возможные режимы (WORLD, TOOL, JOINT) и управление роботом с помощью графического пульта.

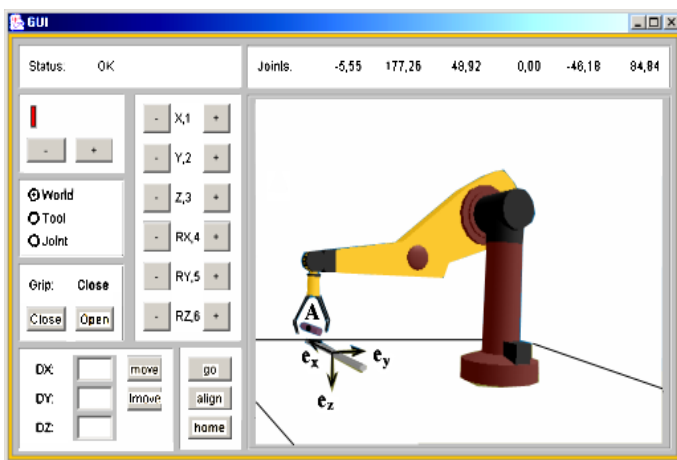


Рисунок 2. Точка А, конфигурация «локоть вниз».



Захватить объект-цилиндр в рабочей зоне робота.

Далее дается формулировка заданий:

1. Захватить объект-цилиндр в рабочей зоне робота (с использованием метода полупрозрачных изображений). Ось e_z схвата должна быть противоположна оси Oz базовой системы координат робота $Oxyz$ (рисунок 1), а центр схвата совпадать с геометрическим центром объекта.
2. Определить обобщенные координаты робота $\{q_i\}$ в точке захвата.
3. Определить ориентацию схвата $\{e_x, e_y, e_z\}$ и координаты векторов $R_3, R_6, R_{схв}$ в базовой системе координат робота.
4. Определить координаты концевых точек P_1 и P_2 объекта при условии, что длина объекта равна L , а диаметр – D .
5. Определить координаты точки А, отстоящей от точки захвата на $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ по осям e_x, e_y, e_z системы координат схвата, соответственно (на рисунке 2 $\Delta x = -0,1$ м, $\Delta y = -0,1$ м, $\Delta z = 0,2$ м). Вывести схват робота в точку А.

6. Рассчитать обобщенные координаты робота в этой точке в конфигурации «локоть вниз» (рисунок 2).

7. Вывести схват робота в точку А в конфигурации «локоть вниз».

Отчет о выполнении задачи должен включать формулы расчета требуемых величин и их численные значения. Кроме того, к отчету необходимо приложить графические файлы, содержащие изображения робота в точке зах-

вата объекта и в точке А в двух конфигурациях (аналог рисунков 1–2 и соответствующие изображения с телекамеры, установленной над рабочей зоной).

Задача 2. Программирование движения робота-манипулятора.

Целью выполнения заданий является усвоение материала по теме «Программирование движения роботов». Здесь студент должен получить более осознанное (в результате практического использования) понимание особенностей управляющих программ робота и навыки использования инструментальных средств их создания.

Во вводной части практикума дается теоретический материал. Излагаются особенности среды дистанционного программирования, рассматриваются необходимые команды языка, особенности работы в *off-line* и *on-line* режимах. Далее дается формулировка заданий.

1. Написать на языке Rcl программу отслеживания траектории, проходящей через вершины равностороннего треугольника со стороной a , который расположен в плоскости, наклоненной под углом α к вектору Oz базовой системы координат робота $Oxyz$. Отладить программу в виртуальной среде. Исполнить ее на удаленном роботе.

2. В накопителе (рисунок 3) находятся в горизонтальном положении один над другим три окрашенных разными цветами объекта – полых цилиндра длиной L и диаметра D . Основание накопителя – прямоугольник с длинами сторон a и b , центр которого смещен относительно базовой системы координат робота на вектор $\{x, y, z\}$ и повернут относительно оси Oz на угол α . Плоскость, проходящая через оси цилиндров, отстоит от центра накопителя на расстоянии d . Три тонких вертикальных стержня, центры которых расположены в точках $\{x_i, y_i, z_i\}$, необходимо использовать в качестве вспомогательных опор, на которые можно «надевать» цилиндры. Составить на языке Rcl программу для изменения порядка расположения цилиндров в накопителе на обратный. Отладить программу в виртуальной среде. Исполнить ее на уда-



... расположен в плоскости, наклоненной под углом α ...

ленном роботе.

Отчет о выполнении задачи должен содержать файлы программ на языке Rcl, которые реализуют требуемые в заданиях 1 и 2 действия. К отчету необходимо приложить видеофайлы в формате MPEG4, иллюстрирующие процесс выполнения заданий, а также графические файлы, содержащие основные этапы выполнения роботом задания 2.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА С ОТКРЫТЫМ ДОСТУПОМ ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ

Важным аспектом системы удаленного управления роботами с использованием сетей общего пользования (Интернет) является задача обеспечения безопасности робототехнического оборудования и обслуживающего персонала. Были созданы подсистемы для защиты системы управления от

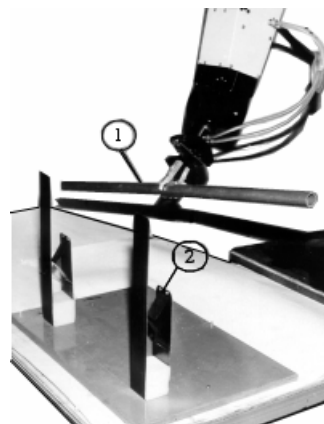
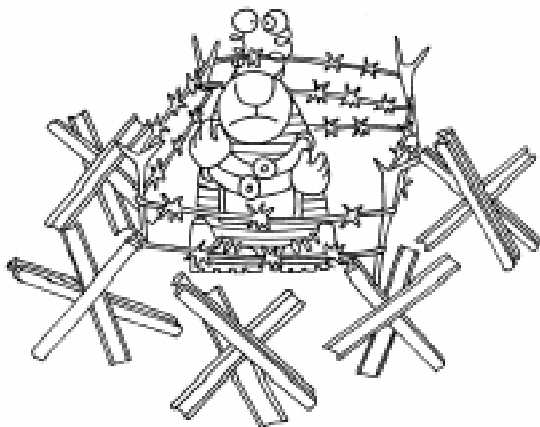


Рисунок 3. Объект (1) и накопитель (2).



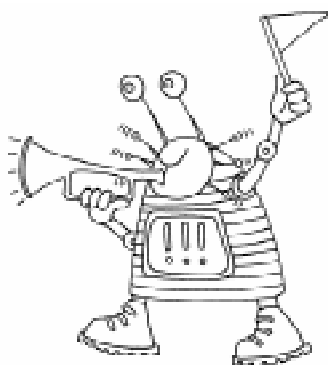
*... задача обеспечения безопасности
робототехнического оборудования...*

несанкционированного доступа и предотвращения возможности выведения робототехнического оборудования из строя в результате ошибки оператора.

Управление роботом РМ-01 осуществлялось через компьютерную сеть ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. При установке серверного программного обеспечения для повышения надежности защиты от несанкционированного доступа использовался стандартный защищенный протокол SSH.

Защита от неправильных действий пользователя заключается в проверке выполнения следующих условий для заданного оператором желаемого положения робота:

- 1) конечная точка робота (основание схвата) находится внутри зоны достижимости манипулятора;
- 2) значения углов в шарнирах находятся в допустимых границах;



*В случае нарушения любого из условий
подается звуковой сигнал...*

3) при движении робота в заданную точку не произойдет соударения его звеньев и схвата с предметами, находящимися в рабочем пространстве робота.

Кроме того, при экспериментах по захвату стержня на бифилярном подвесе проверяются перемещения схвата для недопущения обрыва нитей.

Контроль выполнения перечисленных условий осуществляется в два этапа. Сперва он производится на клиентской части. В случае нарушения любого из условий подается звуковой сигнал, и соответствующее предупреждение выводится в верхней части интерфейса оператора в поле «Status» (рисунок 1). При этом передача на сервер оказавшейся ошибочной команды управления роботом блокируется. Если же по каким-либо причинам (сбой в канале передачи данных, несанкционированные действия пользователя) неверная команда все же поступит на вход серверной программы, то ее анализ будет выполнен и на сервере. Предполагается реализация серверной части на двух компьютерах – один будет связан непосредственно с Интернетом, а второй, с которого будет выполняться управление роботом, будет связан с первым компьютером через параллельный интерфейс. Это позволит исключить все несанкционированные действия, так как проверка выполнения условий на положение робота будет проводиться на втором компьютере, изолированном от Интернет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методы управления роботами через Интернет, обеспечивающие эффективную работу операторов в каналах связи общего пользования, которые могут обладать существенными задержками при передаче данных. Особую актуальность представляет создание на основе разработанных методов и систем среды дистанционного обучения. Разработаны задачи практикума по мехатронике для студентов механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова с возможностью дистанционного управления роботом-манипу-

лятором. Они были опробованы при проведении «Дней механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова» в 2001 и 2002 гг. Планируется их внедрение в учебный процесс на механико-математическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова и, в ближайшем будущем, в других

ВУЗах. Представляется перспективной разработка аналогичных задач для учащихся старших классов общеобразовательных школ. Их выполнение позволит в наглядной и занимательной форме сформировать базовые навыки программирования и управления движением объектов.

Литература.

1. *Fukuda T.* Network systems for robotics and automation. IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 5, № 4, December 1998, p. 4.
2. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П.* Система дистанционного обучения по робототехнике и мехатронике на базе Интернет. Труды 12^{ой} научно-технической Конференции «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2001, с. 353–361.
3. Проект TEAM, <http://www.ars.fh-weingarten.de/team>
4. Проект IECAT, <http://www.ars.fh-weingarten.de/iecat>
5. *Белоусов И.Р.* Эффективное телеуправление роботами через сеть Интернет. Научно-практическая конференция по экстремальной робототехнике, Санкт-Петербург, апрель, 2001, с. 166–170.
6. *Belousov I., Chellali R., Clapworthy G.* Virtual Reality Tools for Internet Robotics. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'2001, Seoul, Korea, May 21–26, 2001, pp.1878–1883.
7. *Белоусов И.Р.* Некоторые новые эффективные методы управления роботами через сеть Интернет. Доклады академии наук, т. 383, № 2, 2002, с. 198–201.

*Белоусов Игорь Рафаилович,
канд. физ.-мат. наук, старший
научный сотрудник Института
прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН,*

*Охоцимский Дмитрий Евгеньевич,
докт. физ.-мат. наук, профессор,
академик РАН, зав. отделом
Института прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН,*

*Платонов Александр
Константинович,
докт. физ.-мат. наук, профессор,
зав. сектором Института
прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН,*

*Сазонов Виктор Васильевич
докт. физ.-мат. наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Института прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН.*



Наши авторы, 2003.
Our authors, 2003.