*А. С. Горобцов, А. Е. Марков, П. С. Тарасов, А. В. Скориков
А. В. Дианский, Д. А. Степаненко*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОЦИЕЙ И АВТОНОМНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru, markovalex95@gmail.com, tarasradio@mail.ru, scorpion_energy@mail.ru

Представлен программно-аппаратный комплекс для создания и исследования систем управления мобильными роботами с шагающими и колесными движителями. Рассмотрены методы подключения различных SLAM-алгоритмов, в том числе использующих данные с приборов технического зрения.

Ключевые слова: антропоморфные роботы, зооморфные роботы, групповое управление, SLAM, техническое зрение.

*A. S. Gorobtsov, A. E. Markov, P. S. Tarasov, A. V. Skorikov
A. V. Dianskiy, D. A. Stepanenko*

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR CREATION AND RESEARCH OF LOCOMOTION AND AUTONOMOUS MOTION CONTROL SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTS

Volgograd State Technical University

A software and hardware complex for creation and research of control systems for mobile robots with walking and wheeled movers is presented. The synthesis of control laws is performed by the inverse problem method; Methods for connecting various SLAM algorithms, including those using data from computer vision devices, are considered.

Keywords: humanoid robots, zoomorphic robots, group control, SLAM, CV

1. Теоретическое описание

Формирование управления локомоцией роботов осуществляется методом обратной задачи [1, 2] с использованием математической модели робота как связанной системы тел. Уравнения метода обратной задачи имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} M\dot{x} = f(x, \dot{x}, t) & (a) \\ Q_1(x) = 0 & (b) \\ Q_2(x) = w(t) & (e) \\ Q_3(x) = 0 & (z) \\ Q_4(x, \dot{x}, z(t)) = 0 & (d) \\ Q_5(x, \dot{x}, z(t)) < k & (e) \end{array} \right. \quad (1)$$

Уравнение (1, *e*) размерностью k_2 задает кинематику движения опорных точек робота и его корпуса. Вектор-функция $w(t)$ включает в себя траектории точек ног и корпуса. Уравнение (1, *z*) размерностью k_3 задает вспомогательные связи для исключения избыточных степеней свободы всего робота. Уравнение (1, *d*) размерностью $k_4 \leq 3$ определяет выполнение условий устойчивости. Скалярное неравенство (1, *e*) задает условие отсутствия скольжения в опорных точках робота, которое зависит от коэффициента трения об опорную поверхность k .

Полученные из (1) программные значения кинематических параметров приводов исполь-

зуются для вычисления сил (моментов) в приводах, входящих в уравнения прямой задачи:

$$\begin{cases} M\dot{x} + D_1^T p_1 = f(x, \dot{x}, t) + u(t) \\ D_1 \ddot{x} = h_1(x, \dot{x}) \end{cases}, \quad (2)$$

где D_1 – матрица коэффициентов уравнений связей размерностью $k_1 \times n$; p_1 – вектор множителей Лагранжа размерностью k_1 ; $h_1(x, \dot{x})$ – вектор правых частей вторых производных уравнений связей.

Силы в приводах находятся с помощью выражений вида

$$u_j^* = c_j \delta_j + d_j; j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $u_j^*(t)$ – сила (момент) на выгодном звене j -го привода; c_j, d_j – коэффициенты ПД-регулятора; δ_j – отклонение между измеренным и программным значениями смещения вы-

ходного звена привода; n_1 – количество приводов робота.

Выражение (3) описывает ПД-регулятор. Могут использоваться также другие регуляторы, например, учитывающие программные значения управляющих сил (моментов). Ключевым элементом программно-аппаратного комплекса является уравнение (1), которое решается с помощью программы моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД [3]. Уравнение (2) с использованием (3) может решаться как с помощью программы ФРУНД, так и с использованием модуля моделирования динамики ROSGazebo [4].

2. Состав программно-аппаратного комплекса

Структура программно-аппаратного комплекса показана на рис. 1. Комплекс состоит из трех частей – блоков решения обратной и прямой задачи, блока приборов технического зрения.

Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса

Блок решения обратной задачи служит непосредственно для управления роботами. Блок содержит пульт управления для задания пространственного движения корпуса робота и генератор программного движения – решатель обратной задачи. Программное движение мо-

жет передаваться непосредственно на робота с помощью программного интерфейса или визуализироваться на графическом экране в реальном режиме времени. Пример визуализации программного движения шестиногого робота на графическом экране показан на рис. 2.

Рис. 2. Пульт управления и визуализация программного движения шестиногого робота

Интерфейс передачи данных на робота включает получение и обработку траекторий движения от программы управления, преобразование и отправку их роботу (аппаратный ин-

терфейс). Реализованы интерфейсы к макету шестиногого малоразмерного робота, робота андроида и макету колесной роботизированной платформы – рис. 3 [1; 5–7].

Рис. 3. Типы роботов, используемые в комплексе

Блок решения прямой задачи служит для исследования управляемого движения робота путем решения уравнений прямой задачи (2) с учетом (3). Уравнения прямой задачи могут решаться или в программе ФРУНД (реализовано параллельное решение (1) и (2)) или в MBS-решателе ROSGazebo. Решение в Gazebo позволяет использовать стандартные средства ROS, предназначенные для работы с системами

технического зрения, в том числе SLAM-алгоритмы. На рис. 4 показана модель шестиногого робота в визуализаторе Gazebo.

Блок приборов технического зрения позволяет включать в схемы управления роботами любые датчики, содержащиеся в ROS, в частности, приборы технического зрения. В мобильную колесную платформу (рис. 3) включен лидар фирмы VELODYNE.

Рис. 4. Модель шестиногого робота в визуализаторе Gazebo

На рис. 5 показаны расчетные схемы роботов, включенные в рассматриваемый комплекс. Реа-

лизовано также формирование управления для связанного движения группы роботов [8] – рис. 6.

Рис. 5. Расчетные схемы используемых роботов:

а – робот-андроид; *б* – шестиногий робот; *в* – восьминогий робот с ортогональными движителями;
г – четырехколесный автомобиль; *д* – четырехногий робот с дельта-приводами

Рис. 6. Расчетные схемы группового движения роботов:
а – группа из двух роботов; б – из пяти

Заключение

Представленный программно-аппаратный комплекс позволяет синтезировать управление широким классом мобильных роботов и может быть использован как в научных целях, так и для разработки опытных образцов роботов, ориентированных на коммерческие приложения. Комплекс позволяет также интегрировать системы компьютерного зрения, для использования в автономных роботах, например, в беспилотных автомобилях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов = Features of Solving the Inverse Dynamic Method Equations for the Synthesis of Stable Walking Robots Controlled Motion / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, А. Е. Марков, Ан. В. Скориков, П. С. Тарасов // Труды СПИИРАН = SPIRAS Proceedings. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 85–122.
2. Горобцов А. С. Синтез параметров управляемого движения многосвязных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 6. – С. 43–50, 2 с. обл.
3. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, А. Е. Плетнев, Ю. А. Поляков. – М. : Машиностроение, 2011. – 462 с.
4. Исследование синтеза движений робота-гексапода с использованием системы технического зрения и симулятора GAZEBO / А. Е. Марков, П. С. Тарасов, Ан. В. Скориков, А. С. Горобцов // России – творческую молодежь : Материалы XIII Всероссийской научно-практической студенческой конференции (г. Камышин, 20–21 апреля 2020 г.). В 5 т. Т. 2 / под общ. ред. И. В. Степанченко ; ВолГТУ, КТИ (филиал) ВолГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 17–20.
5. Горобцов, А. С. Новые механизмы двуногих и многоногих шагающих роботов / А. С. Горобцов // Новые механизмы в современной робототехнике / под ред. В. А. Глазунова. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2018. – Гл. 13. – С. 295–315. – (Мир робототехники и мехатроники).
6. Робот с комбинированным колесно-шагающим движителем / А. С. Горобцов, А. В. Скориков, П. С. Тарасов, О. К. Чесноков // Известия ВолГТУ : научный журнал № 9 (244) / ВолГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 26–30.
7. Марков, А. Е. Проект системы компьютерного зрения для беспилотного автомобиля / А. Е. Марков, П. С. Тарасов // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 16–20 апреля 2018 г.) : тез. докл. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.] ; Волгоградский гос. техн. ун-т, Совет СНТО. – Волгоград, 2018. – С. 166–167.
8. Управление согласованным движением группы шагающих роботов при переносе груза / А. С. Горобцов, А. К. Алешин, Г. В. Рашоян, С. А. Скворцов, К. А. Шаляхин // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – № 6 (267). – С. 9–16 + 2 с. обл.