

А. С. Горобцов^{1,2}, Е. Н. Рыжов¹, Н. В. Чигиринская¹, О. К. Чесноков¹

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-СОБАКИ
МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² ИМАШ РАН

vm@vstu.ru

Представлен метод синтеза управления движением четырехногого робота-собаки методом обратной задачи. Используется универсальный генератор походки, определяющий трехмерную траекторию движения точки стопы для произвольного числа ног. Решается обратная и прямая задача. Анализируется устойчивость управляемого движения робота.

Ключевые слова: управление, нелинейные системы, шагающие роботы, обратная задача, устойчивость движения.

A. S. Gorobtsov^{1,2}, E. N. Ryzhov¹, N. V. Tchigirinskay¹, O. K. Chesnokov¹

**THE CONTROL MOTION OF THE FOUR LEGGS ROBOTS
BY INVERSE DYNAMIC METHOD**

¹ Volgograd State Technical University

² IMASH RAS

A method for synthesizing motion control of a four-legged robot dog using the inverse problem method is presented. A universal gait generator is used, which determines the three-dimensional trajectory of the foot point for an arbitrary number of legs. The inverse and direct problem is solved. The stability of the controlled movement of the robot is analyzed.

Keywords: control, nonlinear systems, walking robots.

Введение

Четырехногие шагающие роботы – роботы-собаки – активно совершенствуются в настоящее время, поскольку устойчивость движения для таких роботов обеспечивается значительно проще, чем, например, устойчивость двуногих роботов-андроидов. Популярным методом синтеза управления данными роботами является так называемое обучение с подкреплением [1–2], в котором управляющие силы (моменты) в приводах интерполируются рекуррентной нейронной сетью, параметры которой определяются в процессе обучения. Для обучения, как правило, используется модель динамики движения робота как системы твердых тел. Решается прямая задача динамики. В работах [2–3] обучение с подкреплением выполнялось при коэффициенте дисконта 0,9 и было получено управление для

некоторых режимов движения по ровной и неровной поверхности. Тем не менее в существующих работах нет анализа робастности полученных алгоритмов управления. Кроме этого, обучение с подкреплением для задач оптимального управления многомерными системами требует значительных вычислительных затрат – используются мощные вычислительные кластеры. Все это делает актуальной разработку альтернативных методов управления. В настоящей работе рассматривается метод управления движением робота собаки на основе универсального генератора походок. При таком подходе может быть повышена вычислительная эффективность метода синтеза управления, за счет значительного сокращения размерности пространства параметров интерполяционной модели, в методах машинного обучения.

Универсальный генератор походок шагающих роботов

Генератор походок [4] реализует алгоритмы планирования трехмерной траектории точки стопы шагающего движителя на основе учета прогноза траектории движения точки корпуса, которая расположена в месте крепления рассматриваемого шагающего движителя. Такой подход позволяет получать связанное движение некоторого числа шагающих движителей с произвольным движением корпуса робота. В работах [4, 5] представлено использование такого генератора походок для получения программного движения двуногих и шестиногих шагающих роботов.

Перечислим параметры генератора походок для одного движителя: h – высота подъема стопы; L – максимальная длина шага; kr – отношение времени переброса стопы к сумме времени

подъема, опускания и опоры; фаза стопы в долях периода шагания, T – минимальный период цикла шагания; x, y, z – разницы между координатами заданных точек стопы и корпуса по трем направлениям в системе координат корпуса, которые определяют относительное положение стоп в покое. На рис. 1 показаны графики вертикального перемещения точек двух стоп для случая симметричного расположения в цикле шагания. Траектории могут интерполироваться различными гладкими функциями – тригонометрическими и степенными (сплайнами) без скачков первых и вторых производных. Главная особенность метода – определение длины шага с использованием прогноза движения точки корпуса робота, в которой крепится движитель. Прогноз строится в предположении равноускоренного пространственного движения такой точки.

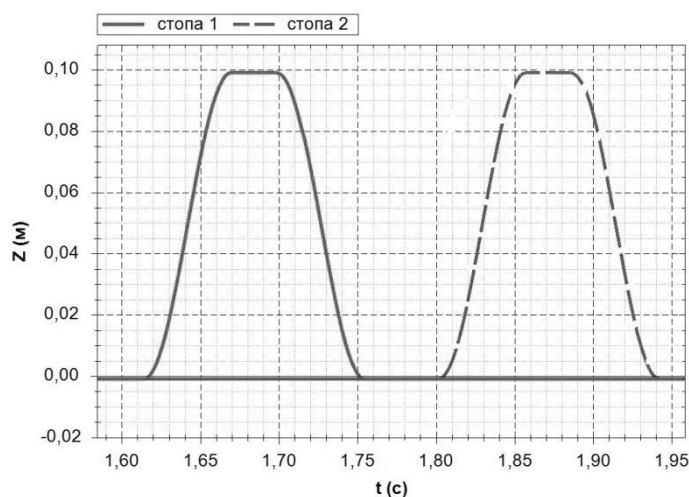


Рис. 1. Программное вертикальное перемещение двух стоп в одном цикле шагания

Генератор походок позволяет синтезировать пространственные траектории заданных точек стоп при произвольном пространственном движении корпуса и неровной опорной поверхности. Генератор допускает формирование траекторий стоп при групповом движении роботов [6].

Пример сгенерированного программного движения робота-собаки показан на рис. 2.

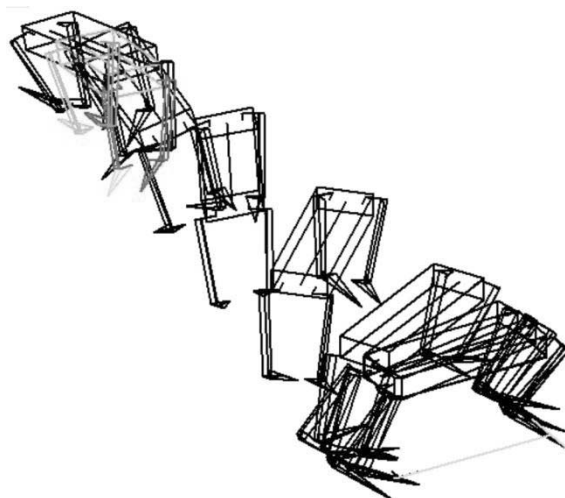


Рис. 2. Кинограмма сгенерированного программного пространственного движения робота-собаки – движение вбок с одновременным поворотом

Математическая модель робота-собаки

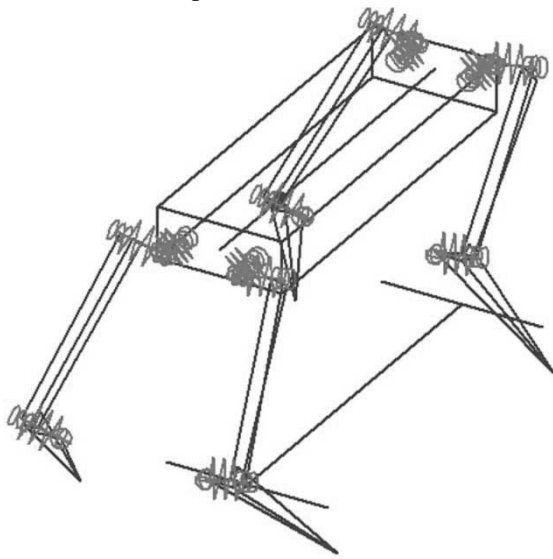


Рис. 3. Расчетная схема робота-собаки; маркерами пружин показаны приводы

Расчетная схема робота-собаки показана на рис. 3. Характерные размеры модели: продольное расстояние между стопами – 700 мм; поперечное – 400 мм; полная масса – 28 кг; масса корпуса – 20 кг. Модель содержит 12 приводов.

Управляемое движение робота-собаки

Управляемое движение робота исследовалось при решении прямой задачи динамики на разработанной математической модели. В системе моделирования ФРУНД [7, 8] реализовано одновременное решение обратной и прямой задачи. Обратная задача служит для нахождения параметров программного движения; решение прямой задачи моделирует управляемое движение робота. Рассматривался прямолинейный разгон робота до скорости 2 м/с за 6 с, равномерное движение в течение 3 с и остановка за 2 с (рис. 4).

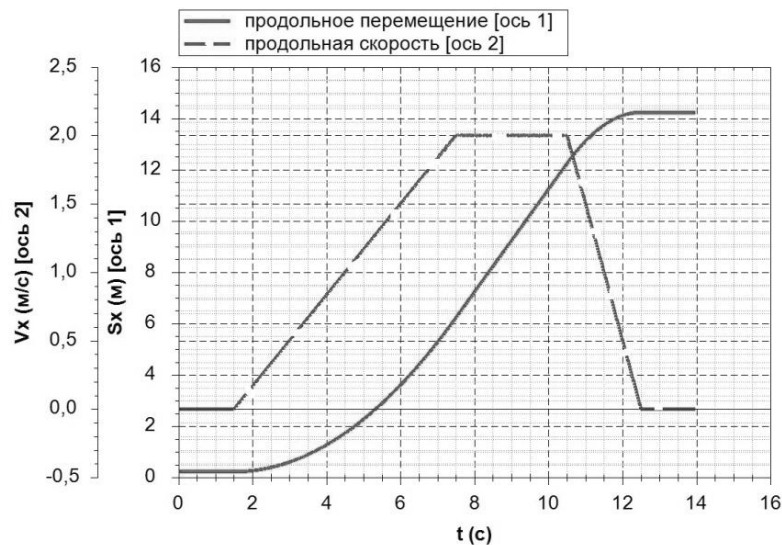


Рис. 4. Программное перемещение и скорость робота при разгоне и торможении

На рис. 5 представлены результаты моделирования управляемого движения робота. Управление моментом в приводах производилось с помощью ПД регуляторов по отклонениям угла и угловой скорости в сочленении. Номинальные параметры ПД регулятора: коэффициент усиления по отклонениям положения 250 (Нм/рад), угловой скорости 20 (Нм/(рад/с)). При меньших значениях коэффициента усиления по положению робот падал при достижении скорости 0,3–0,4 м/с.

Максимальные значения управляющих моментов имели место в приводе голени и изменялись в диапазоне +50 и –100 Н*м на начальном участке разгона; +180 и –250 Н*м на участке постоянной скорости. Пиковые значения управляющего момента в правой передней голени в 1,5 раза выше, чем в левой, несмотря на симметричность походки. На участке разгона максимальные приводные моменты наблюдаются в задних ногах, а при торможении – в передних.

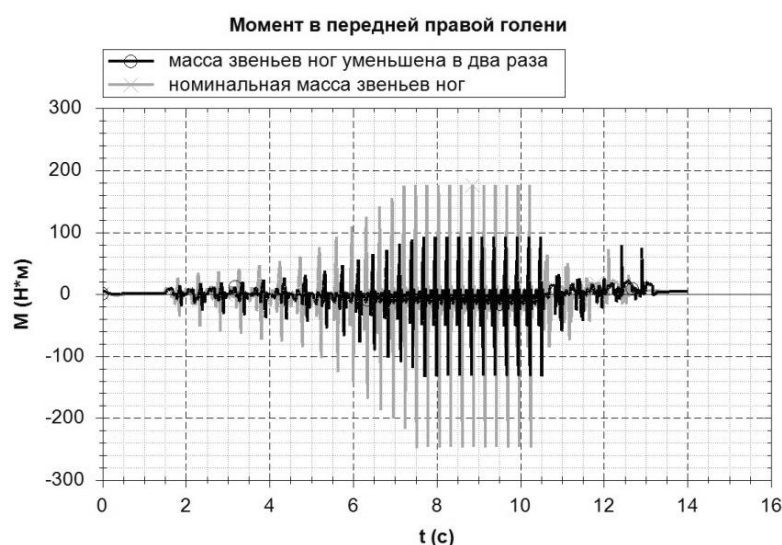


Рис. 5. Управляющие моменты в приводе голени передней правой ноги

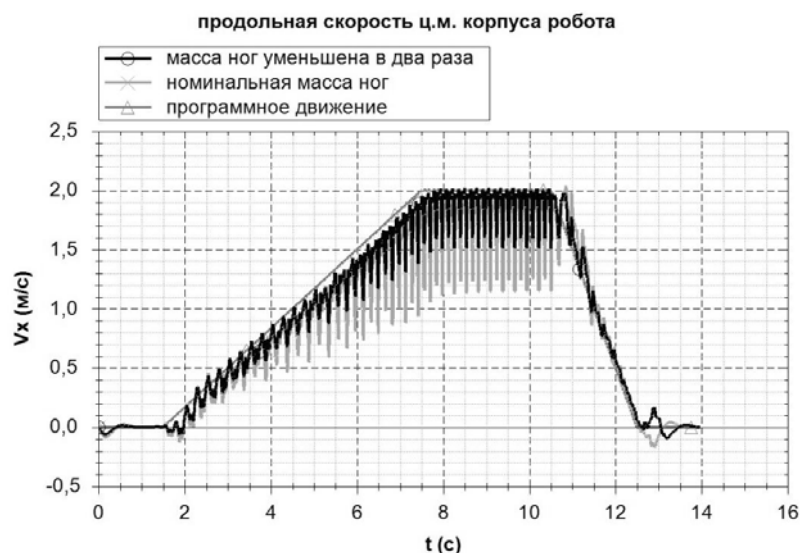


Рис. 6. Продольная скорость корпуса робота при разных массах ног

Пиковые значения моментов приводов связаны с инерционными силами – при уменьшении масс звеньев ног в два раза максимальные значения моментов уменьшались почти в два раза (рис. 5). Неравномерность движения кузова с уменьшением массы ног падает пропорционально (рис. 6). Пиковые значения до определенной границы не оказывают существенного влияния на управляемое движение – при уменьшении максимального момента привода до 100 Н*м движение робота изменяется незначительно.

Следует отметить, что рассмотренные номинальные значения ПД регулятора хотя и обеспечивают удовлетворительное воспроизведение программной траектории самого робо-

та, однако погрешности отслеживания программных углов приводов достигают 0,2 рад (40 % в относительных величинах). Увеличение коэффициентов ПД регулятора в 10 раз незначительно приближает управляемое движение корпуса робота к программному движению, однако вызывает рост максимальных значений приводных моментов в 2–3 раза.

На рис. 7 показан график изменения мощности в приводах задней правой ноги. Пиковая мощность в приводе голени достигает нескольких киловатт, что в первую очередь связано с нерациональными инерционными параметрами ног. Отметим, что приводы существенную часть времени работают в режиме торможения.

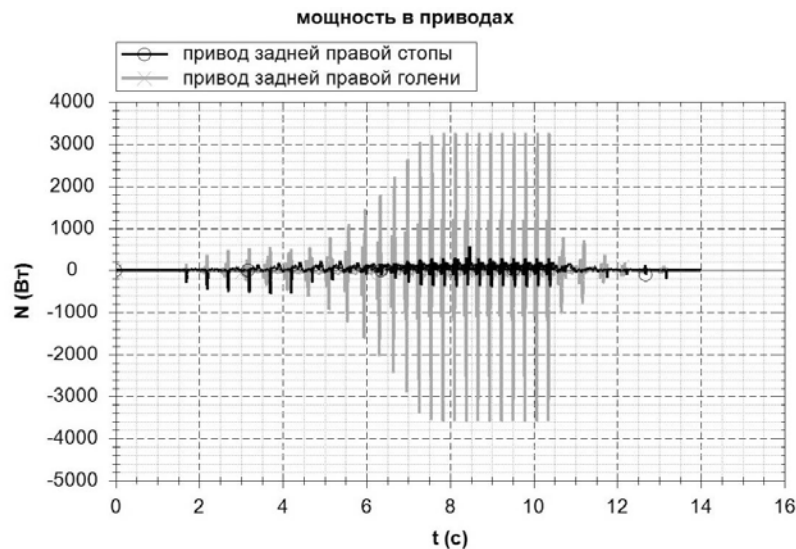


Рис. 7. Мощность в приводах

Важным параметром походки, влияющим на устойчивость движения, является интервал времени, в котором все стопы находятся в опоре. Представленные выше результаты получены для походки, в которой доля времени опоры всеми ногами к периоду шага равнялась 0,3;

при уменьшении этой величины до 0,05 устойчивость движения ухудшалась, что проявлялось в увеличении рыскания робота. Однако при этом максимальные моменты в приводах уменьшались почти в два раза.

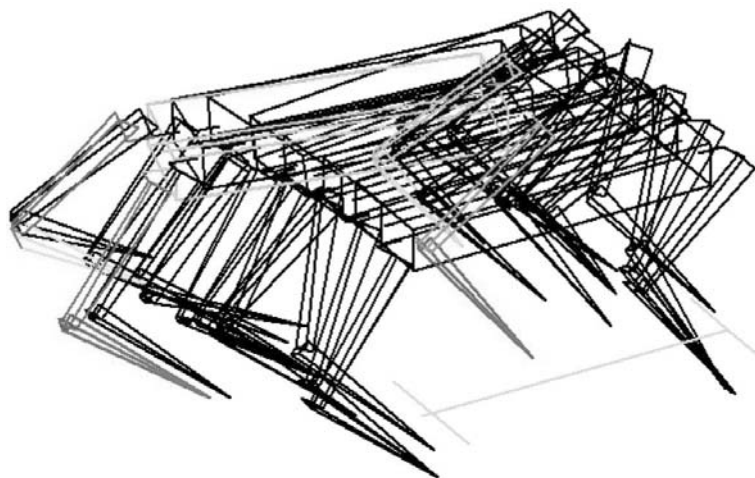


Рис. 8. Кинограмма перемещения робота при боковом возмущающем импульсе

При моделировании управляемого движения взаимодействие стопы с опорной поверхностью представлялось упруго-вязкой моделью в вертикальном направлении и кулоновым трением в горизонтальном. Сила трения зависела от вертикальной реакции. Жесткость вертикального взаимодействия составляла 40 кН/м, что соответствовало частоте вертикальных колебаний робота на опорах 12 Гц. При увеличении жесткости имело место увеличение разности между программным и управляемым движением по

продольной координате. Увеличение коэффициента линейной вязкости (номинальное значение 2 кН/(м/с) в опоре также незначительно улучшает управляемое движение, а при дальнейшем росте приводит к неустойчивости движения. Выбранные параметры упруго-вязкого контакта можно считать рациональными.

На усилия в приводах оказывает существенное влияние высота шага. При уменьшении высоты шага с 10 до 3 см моменты в приводах уменьшаются почти в два раза.

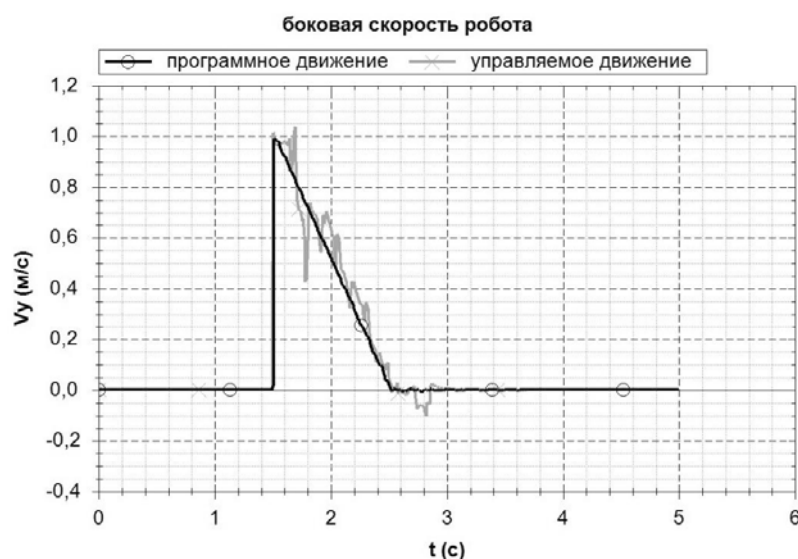


Рис. 9. Поперечная скорость робота при боковом импульсе

Адаптивный генератор походки позволяет реализовывать режимы движения, компенсирующие внешние возмущения. На рис. 8 показано движение робота при боковом возмущающем импульсе, сообщаемом центру масс робота боковую скорость 1 м/с. Такой импульс может быть компенсирован на основе программного движения в форме быстрого разгона и остановке за короткое время (рис. 9). В этом режиме существенное влияние имеет минимальный период шага походки. Данные на рис. 8 и 9 соответствуют минимальному периоду шага 0,29 с. При большем значении этого параметра робот в управляемом движении переворачивается. При расчете управляемого движения возмущение моделируется импульсной силой, сообщаемой необходимую скорость возмущения за время 0,01 с.

Заключение

Рассмотренный метод управления роботом-собакой на основе пространственного адаптивного генератора походки шагающих роботов не требует высоких вычислительных затрат по сравнению с различными модификациями метода Монте-Карло, лежащими в основе методов обучения с подкреплением. Метод допускает интерполяцию управления нейронными сетями для реализации на мобильных вычислительных устройствах невысокой производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Learning to walk via deep reinforcement learning / T. Haarnoja, S. Ha, A. Zhou, J. Tan, G. Tucker, S. Levine // ArXiv Preprint, 2018.
2. Sim-to-real learning of all common bipedal gaits via periodic reward composition / J. Siekmann, Y. Godse, A. Fern, J. Hurst // 2021 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA). – 2021. – Pp. 7309–7315.
3. Surana, S. Efficient Learning of Locomotion Skills through the Discovery of Diverse Environmental Trajectory Generator Priors / S. Surana, B. Lim, A. Cully // ArXiv Preprint, 2022.
4. Программно-аппаратный комплекс для создания и исследования систем управления локомоцией и автономным движением мобильных роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Марков, П. С. Тарасов, Ан. В. Скориков, А. В. Дианский, Д. А. Степаненко // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 21–25.
5. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, А. Е. Марков, А. А. Скориков, П. С. Тарасов // Информатика и автоматизация. – 2019. – № 18. – С. 85–122.
6. Управление согласованным движением группы шагающих роботов при переносе груза / А. С. Горобцов, А. К. Алешин, Г. В. Рашоян, С. А. Скворцов, С. К. Шалюхин // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – С. 9–16.
7. 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.
8. 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.