ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЧЕТВЕРОНОГИХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

RESEARCH ON CONTROL STRATEGIES FOR QUADRUPEDAL WALKING ROBOTS

УДК 621.865.8

Цзун Синван, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра СМ7, Москва, Россия

Zong Xingwang, BMSTU, Department SM7, Moscow, Russia, zxw112252337@gmail.com

Аннотация

Четырехногие роботы становятся важной темой в области исследований бионической робототехники благодаря своему потенциалу для применения в сложных полевых условиях. В данной статье рассматривается современный подход к исследованию четырехногих шагающих роботов. Предложена гибридная стратегия управления походкой Trot четвероногого шагающего робота, основанная на управлении виртуальной моделью и управлении пружинным перевернутым маятником. Экспериментальная платформа была построена в Matlab. Были проведены эксперименты по моделированию ходьбы робота в прямом направлении и ходьбы под действием боковой ударной силы.

Annotation

Quadruped robots are becoming an important topic in the field of bionic robotics research due to their potential for use in challenging field environments. This paper discusses the current approach to research on quadrupedal walking robots. A hybrid gait control strategy for a Trot quadrupedal walking robot, based on virtual model control and spring inverted pendulum control, is proposed. The experimental platform was built in Matlab. Experiments were conducted to simulate the walking of the robot in the forward direction and walking under the action of lateral impact force.

Ключевые слова: Четырехногий робот, управление виртуальной моделью, моделирование в Matlab, походка рысью, модель пружинного перевернутого маятника

Keywords: Quadruped robot, virtual model control, modeling in Matlab, trotting gait, spring inverted pendulum model

Введение

Четырехногие шагающие роботы обладают хорошей локомоционной способностью и сильной приспособляемостью к окружающей среде, и могут адаптироваться к сложным условиям окружающей среды, таким как равнины, холмы, горы, пустыни и т.д. Поэтому с 1960-х годов ученые в стране и за рубежом начали изучать четвероногих роботов с точки зрения бионики [1] [2]. В данной работе основное внимание обращено на стратегию управления роботом.

1. Обзор методов исследования

В соответствии со стратегией управления, использованной в этой статье,

вводится метод управления на основе модели. методы управления на основе моделей можно разделить на следующие:

(1) Способ управления на основе критерия устойчивого состояния

Для того, чтобы поддерживать стабильный тела при статическом ходьбе, четвероногим робот должен гарантировать, что проекция центроида на земле находится в многоугольника, образованного за счет поддержки стопы. Обычно используемые критерии стабильности включают в себя критерий определения точки нулевого момента (ZMP) [3] [4], критерий определения запаса энергетической стабильности (ESM) [5], критерий запаса динамической устойчивости (DSM) [6] и т. д.

(2) Метод управления на основе модели перевернутого маятника с пружинной нагрузкой

Подробно наблюдая за процессом движения пеших животных, исследователи упростили характеристики движения большинства пеших животных во время динамического движения до подпружиненной модели с перевернутым маятником (SLIP) и применили ее для управления движением роботов. Райберт М.Х. вводит модель SLIP в управление при исследовании прыгающего робота. в соответствии с симметрией движения модели SLIP вблизи нейтральной точки (нейтральной точки), величина скорости движения может регулироваться путем изменения отношения относительного положения между местоположением и нейтральной точкой. Райберт М.Х. Этот метод управления используется для достижения динамического баланса робота-одиночки. а затем

реализовал динамическое управление балансом двуногих и четвероногих роботов с помощью концепции виртуальной ноги (Virtual Leg) [7] [8].

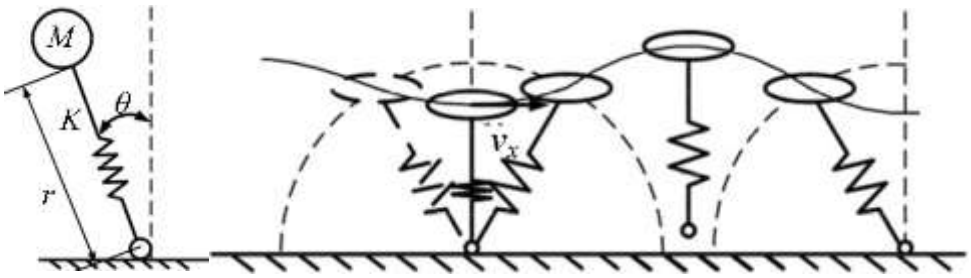


Рис 1. Упрощенная модель для переднего и бокового бега

(3) Метод управления на основе виртуальной модели

Американский ученый Pratt J.E. впервые в своей докторской диссертации предложил метод управления виртуальной моделью (Virtual model control, VMC [9]. VMC соединяют тело с внешней средой главным образом посредством воображаемой пружины и демпфирования, и получают виртуальную силу, необходимую для поддержания баланса тела. наконец, объединенная сила получается по принципу сохранения энергии (как показано на рис 2.

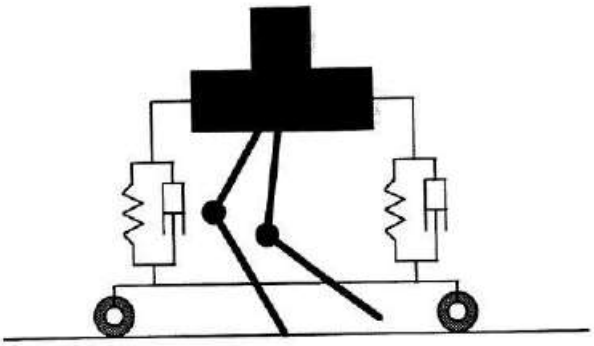


Рис 2. Виртуальная модель плоского двуногого робота

Поскольку такие данные, как матрица инерции стержня, не нужны в процессе расчета, метод VMC является наиболее легко применяемым методом управления силой при реализации. Пратт JE использовал этот метод

последовательно, чтобы реализовать управление ходьбой двух двуногих роботов, Spring Turkey и Spring Flamingo [10]. Робот-четвероногий HyQ из Итальянского технологического университета также использует методы управления VMC и осуществляет походку и рысью по ровной поверхности, что также демонстрирует устойчивость к боковым ударам [11], [12].

Стратегия управления роботом и моделирование

В этой главе сначала завершается управление ногами на основе виртуальной модели VMC, а для общего управления четвероногим роботом используется стратегия управления виртуальным роботом на основе модели SLIP, которая вводит фактическое состояние робота в виртуальную модель робота, а затем отображает результаты управления на реального робота для завершения управления в замкнутом контуре.

2. Стратегия управления роботом

2.1 Активное управление на основе фидфорварда виртуальной модели VMC

Метод, основанный на виртуальной модели и управлении силой в суставе, заключается в приравнивании управления силой конца ноги робота к управлению виртуальной моделью, и получении эквивалентной силы конца ноги через ошибку положения конца ноги, рассчитанную моделью, и получении эффекта виртуальной модели макроса конца ноги при сопоставлении с суставом.

В данной работе мы используем виртуальную модель в качестве основы, а результаты расчета виртуальной модели - в качестве гибридного управления по принципу "сила вперед сила положение". Сначала необходимо создать

виртуальную модель ноги, здесь в качестве виртуальной модели используется пружинно-демпфирующая модель конца стопы в трех направлениях xyz, как показано на рис 3.

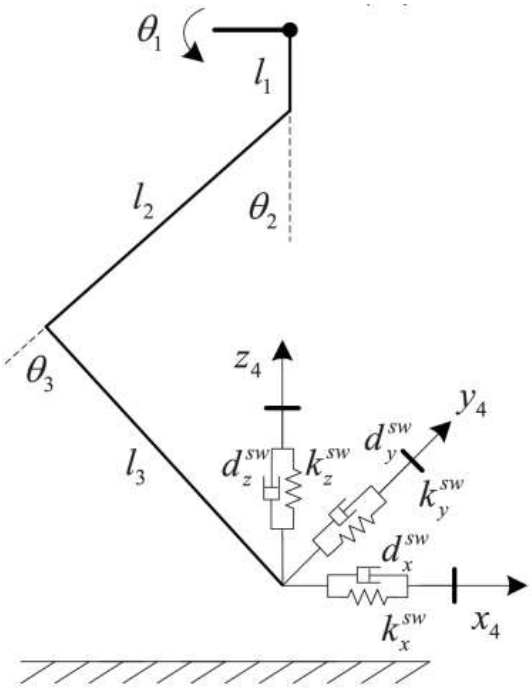


Рис 3. Виртуальная модель ноги

Фактическое положение конца стопы рассчитывается на основе информации об угле сустава и вводится в виртуальную модель для расчета требуемой силы в трех направлениях, а сила, рассчитанная виртуальной моделью, используется как прямой сигнал силы, подаваемый на сустав, который накладывается на выходную силу, рассчитанную по положению сустава с помощью PD-управления, как сигнал силы, подаваемый на сустав. Блок-схема управления методом управления на основе виртуальной модели VMC, как показано на рис 4.

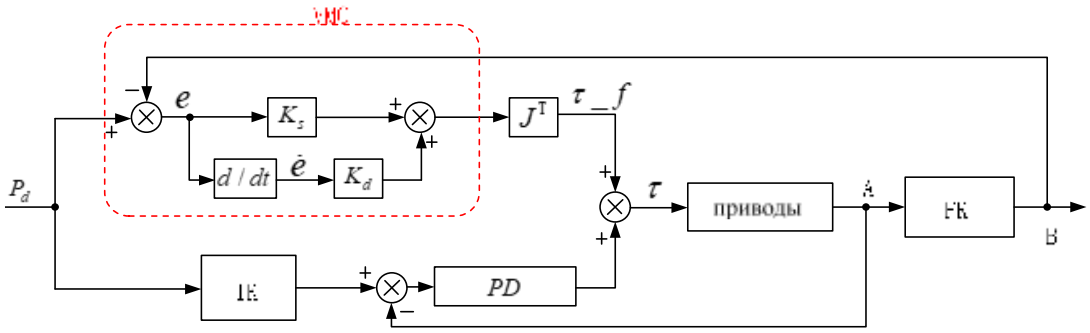


Рис 4. Активное управление на основе виртуальной модели VMC

IK-Инверсная кинематика PD-PD управление суставами VMC-Виртуальная модель управления FK-Положительная кинематика A-Положение сустава B-Положение конца стопы

Для традиционного метода управления, основанного на виртуальной модели и управлении совместной силой, ноге робота требуется точный сигнал машины состояния, когда она покидает точку опоры, и если сигнал машины состояния неточный или есть задержка, сила виртуальной модели приведет к тому, что конец стопы будет иметь большое ускорение. В отличие от этого, активное управление на основе виртуальной модели, благодаря наличию управления положением, с одной стороны, управление положением может ограничить внезапное изменение силы из-за неточного сигнала машины состояния или наличия задержки, с другой стороны, положение конца стопы может контролироваться во время фазы качания, избегая переключения модели управления.

2.2 Управление походкой Trot

Состояние движения диагональной рысью

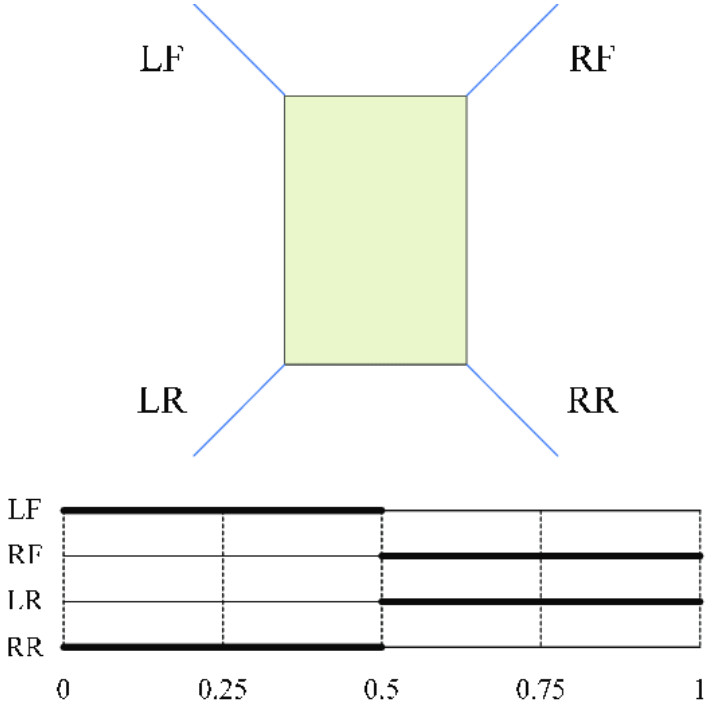


Рис 5. Диаграмма переключения состояний рыси

Особенность движения в состоянии диагональной рыси заключается в том, что диагональные ноги приземляются в одно и то же время или одновременно отрываются от земли, то есть, когда пара диагональных ног находится в состоянии поддержки земли, другая пара диагональных ног ноги раскачиваются в направлении движения, а затем приземляются после поворота в желаемое положение. Поддержка, диагональные ноги, которые изначально находились в фазе опоры, начинают раскачиваться и совершать возвратно-поступательные движения, чтобы реализовать диагональное движение рыси четвероногого робота. Следовательно, в стратегии управления движением робота рысью процесс движения делится на 4 состояния, и состояния переключаются по очереди для достижения окончательного управления движением.

2.3 Управление рысьей походкой на основе модели SLIP

Управление походкой рыси на основе модели SLIP закл0ючается в использовании SLIP в качестве модели управления виртуальным роботом, обнаружении информации о состоянии реального робота с помощью датчиков угла поворота суставов, IMU и т.д., и выводе фактического состояния виртуального робота в соответствующий момент времени через расчет машины состояний; использование виртуального робота в качестве основы для управления походкой в сочетании с заданной желаемой скоростью и положением, результатом управления походкой все еще является виртуальный робот. походка робота; походка виртуального робота вводится в контроллер движения ноги для вывода желаемого состояния виртуальной ноги; и команда управления виртуальной ногой передается на реальную ногу робота, тем самым влияя на состояние реального робота. В результате этого процесса достигается управление с замкнутым контуром, а блок-схема управления показана на рис 6.



Рис 6. Блок-схема управления походкой рысью на основе модели SLIP

2.4 Управление боковой устойчивостью робота

Для четырехногих бионических роботов, поскольку расстояние между передними и задними ногами намного больше, чем между левыми и правыми ногами, устойчивость вперед сильнее, чем боковая устойчивость, поэтому в данной работе основное внимание уделяется исследованию управления боковой устойчивостью робота, и если проблема управления боковой устойчивостью решена, тот же метод управления может быть использован для управления устойчивостью вперед.Профессор Райберт [40] однажды доказал, что выбор точки приземления маховой ноги может косвенно управлять скорость туловища робота, и применили эту идею управления к классическому роботу BigDog [13] с отличными результатами, заложив основу для управления основными роботами на базе ног, как показано на рис7.

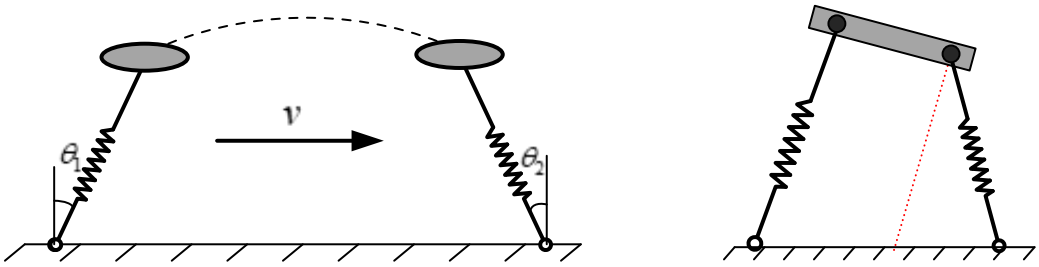


Рис 7. Принцип боковой стабилизации робота

Процесс регулировки точки посадки в боковом направлении

В цикле походки θ_1 - угол отрыва от земли, а θ_2 - угол приземления. Если $\theta_1 = \theta_2$, скорость туловища робота остается постоянной; если θ_1 больше θ_2, скорость туловища робота увеличивается; если θ_1 меньше θ_2, скорость туловища робота уменьшается. Выбор точки посадки рассчитывается по следующему уравнению.

$$y = \frac{v_y \cdot T_{\text{trot}}}{2} + K_{vy}\left(v_y - v_{yd}\right)$$

Где T_{trot} - период диагональной походки, V_y - фактическая скорость туловища робота, а V_{yd} - желаемая скорость туловища робота.

3. Имитационные эксперименты

Моделирование динамики выполняется в среде Matlab/SimMechanics. Весь робот содержит 12 активных суставов, и все компоненты обладают массой и инерционными свойствами. В анимации моделирования форма каждой части показана в упрощенном виде: большая и маленькая ноги показаны в виде тонких стержней, тело - в виде плоского прямоугольника, а бедро - в виде точки массы. Все компоненты в модели являются однородными компонентами массы с центром масс, расположенным в их соответствующих геометрических центрах. В следующей таблице перечислены конкретные структурные параметры имитационной модели.

Таблица 1. Структурные параметры трехмерной имитационной модели четвероногого робота

Назначение	Значение	Назначение	Значение
Масса робота	16кг	Длина тела	0.6м
Масса тела	6кг	Ширина тела	0.3м
Тазобедренная Масса	0.5(*4)кг	Номинальная высота тела	0.36м
Масса бедра	1.5(*4)кг	Длина бедра	0.2м
Масса теленка	0.5(*4)кг	Длина теленка	0.25м

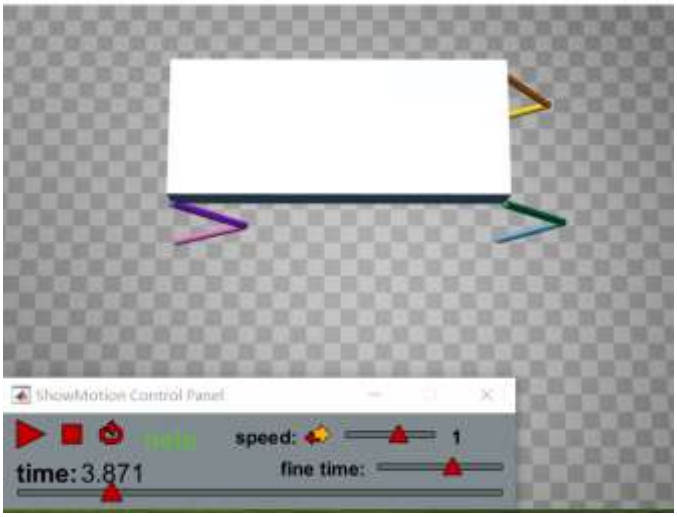


Рис 8. симуляционная модель

3.1 Передняя рысь - анализ ошибок

Сначала управляем роботом, чтобы он бежал прямо вперед по ровной поверхности, и желаемая скорость равномерно ускоряется от 0 до 0,6 м/с в течение первых 2 с. Робот движется с фиксированной частотой шагов, а период походки составляет около 0,6 с. Для проверки эффективности предложенного метода управления наблюдаются и анализируются ошибки управления фазой опоры и фазой качания.

Анализ результатов контроля фазы опоры:

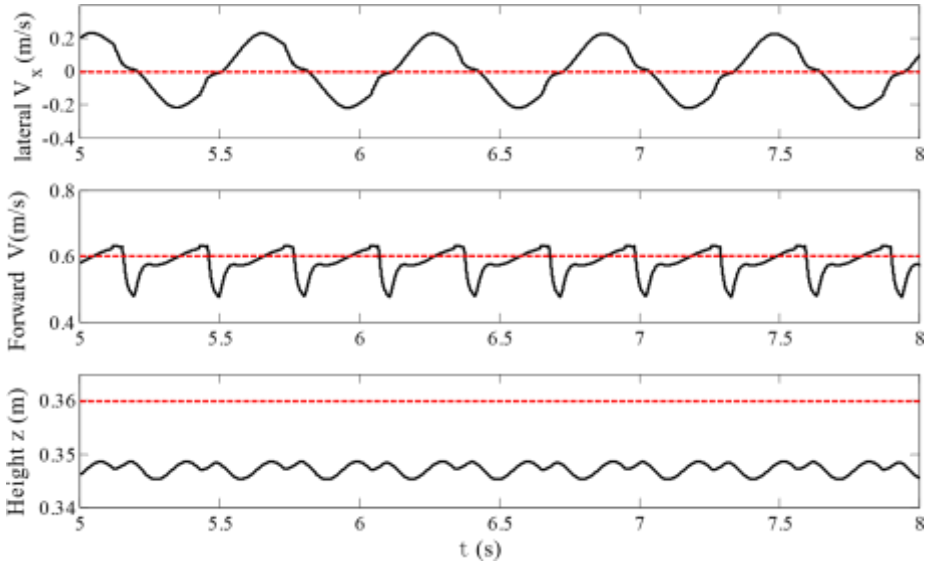


Рис 9. Кривая изменения скорости и высоты

Для управления фазой опоры целью управления является скорость, высота и ориентация робота. Наблюдаем и записываем изменения положения робота в мировой системе координат. Результаты управления роботом, полученные путем моделирования, показаны на рисунке 9, где пунктирная линия представляет ожидаемое значение, а сплошная линия представляет фактическое измеренное значение. Из приведенного выше рисунка видно, что точность управления боковой скоростью (v_x) тела низкая, ожидаемая скорость равна 0, а реальная скорость изменяется взад и вперед от -0,2 м / с до 0,2 м / с. Когда робот движется вперед, его тело раскачивается из стороны в сторону, что соответствует ожидаемому суждению.

Средняя скорость v_y движения робота составляет около 0,57 м / с, и есть небольшая ошибка между ожидаемой скоростью 0,6 м / с. Видно, что робот имеет высокую точность управления в направлении скорости движения вперед. Скорость движения робота вперед имеет процесс замедления и ускорения на каждом шаге. Это связано с тем, что в момент смены опоры для ноги, нога, которая только что приземлилась на землю, столкнется с землей, поэтому будет составляющая силы в прямом направлении, которая заставит робота замедлиться; после удара "тяга" вперед, рассчитанная на основе виртуальной модели, будет двигать робота вперед и ускорять его.

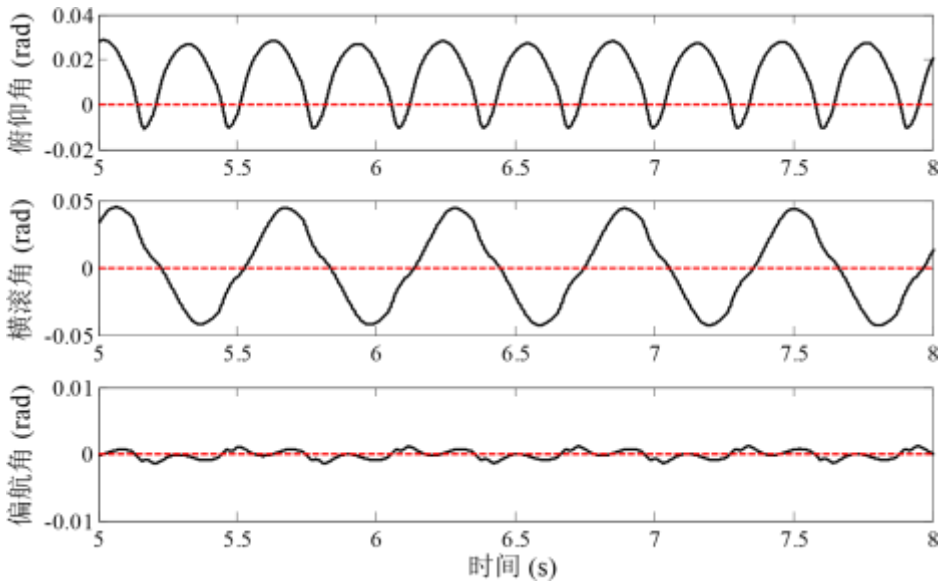


Рис 10. Кривая изменения ориентации

Результаты управления ориентацией робота показаны на рисунке 10. Все ожидаемые значения ориентации, указанные в моделировании, равны 0, то есть желательно, чтобы плоскость тела оставалась параллельной горизонтальной плоскости и всегда двигалась вперед. Среди них большие изменения угла тангажа и угла крена контролируются в пределах 0,03рад (около 1,7 °) и 0,05рад (около 2,9 °) соответственно, а угол рыскания в основном поддерживается близким к нулю, что обеспечивает высокую точность управления.

3.2 Контроль бокового баланса

Для дальнейшего тестирования бокового баланса робота было проведено испытание на боковой удар. В тесте на столкновение с боковым ударом, когда робот движется вперед со скоростью 0,6 м / с, к центру масс робота прикладывается направленная тяга с силой 60 Н и длительностью 0,25 с, и реакция робота показан на рисунке 5-6. Управляемый внешней силой, робот получает правую (положительную) боковую скорость, а ожидаемая точка опоры,

полученная при планировании походки, находится с правой стороны робота, поэтому качающаяся нога шагает вправо. Поскольку ожидаемая боковая скорость робота в этом моделировании равна нулю, левая (отрицательная) виртуальная сила вычисляется опорной фазой VMC, поэтому опорная нога прилагает силу влево, чтобы удерживать робота от движения вправо. Таким образом, в процессе от 3с до 5с робот сделал несколько шагов в сторону и ограничил поперечное движение, так что поперечная скорость медленно снижалась до нормального значения. После этого управляем углом рыскания робота, чтобы робот медленно возвращался на исходную траекторию движения, восстановление бокового удара - это пассивный боковой баланс, то есть возникновение бокового движения происходит из-за пассивного вмешательства из внешнего мира.

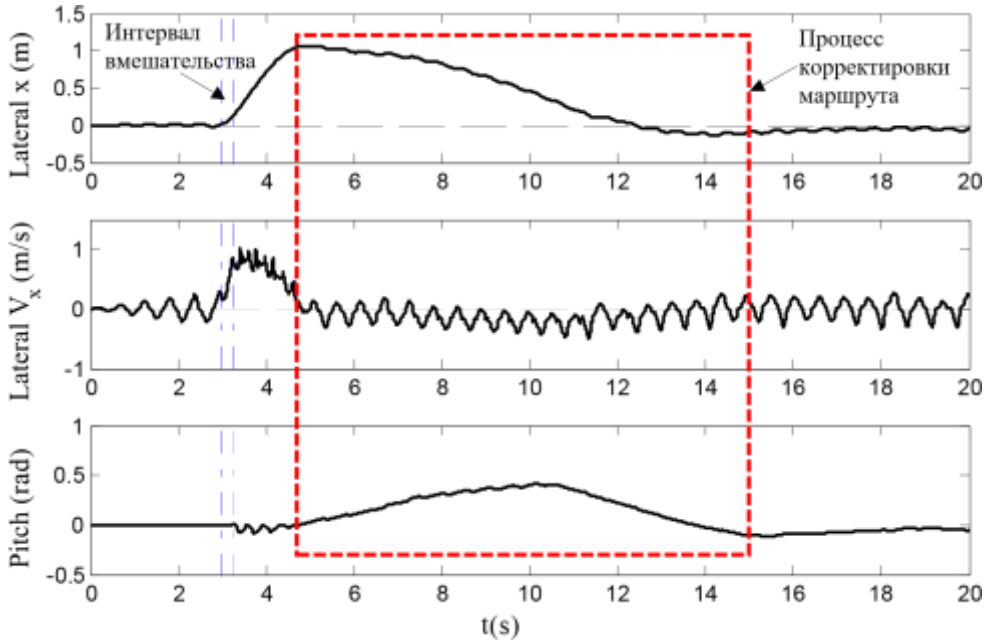


Рис 11. Результаты моделирования столкновения при боковом ударе

Результаты моделирования прямой рыси показывают, что, за исключением стабильного колебания боковой скорости, все другие контрольные цели

обладают высокой точностью управления; четвероногий робот может автоматически возвращаться в сбалансированное состояние после того, как его потревожили, и имеет хорошую устойчивость. Результаты теста бокового баланса доказывают, что робот может автоматически подавлять помехи за счет бокового шага после того, как ему мешает большой боковой удар, и может активно управлять углом рыскания, чтобы заставить робота вернуться на желаемый маршрут движения.

Заключение

Будучи мобильным роботом, который может адаптироваться к сложной среде, четвероногие бионические роботы привлекают все больше и больше внимания ученых. С развитием войн и социальных изменений у четвероногих бионических роботов есть более широкие перспективы применения. В данной статье представлена гибридная стратегия управления на основе четырехногих роботов, которая может помочь роботу достичь определенной степени устойчивости к боковым ударам и стабилизированной ходьбы на основе походки Trot. Наконец, осуществимость стратегии управления проверяется с помощью имитационных экспериментов.

Список литературы

1. McGhee R B. Finite state control of quadruped locomotion[J]. Simulation, 1967, 9(3): 135-140.
2. Mosher R. Test and evaluation of a versatile walking truck[C]//Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium, Washington DC, 1968. 1968: 359-379.

3. Вукобратович М., Боровац Б. Нулевой момент - тридцать пять лет жизни[J]. Международный журнал гуманоидной робототехники, 2004, 1(01): 157-173.
4. Hoepflinger M A, Remy C D, Hutter M, et al. The quadruped ALoF and a step towards real world haptic terrain classification[C]//12th Mechatronics Forum Biennial International Conference (Mechatronics 2010). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Autonomous System Lab, 2010.
5. Хардарсон Ф. Анализ устойчивости и синтез статически сбалансированной ходьбы для четвероногих роботов[D]. Королевский технологический институт, 2002.
6. Pack D J, Kang H S. Всенаправленное управление походкой с использованием метода поиска графа для четвероногого шагающего робота[C] // Робототехника и автоматизация, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on. IEEE, 1995, 1: 988-993.
7. Raibert M H. Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot[J]. Журнал биомеханики, 1990, 23: 79-98.
8. Thompson C M, Raibert M H. Пассивный динамический бег[C]//Experimental Robotics I. Springer, Berlin, Heidelberg, 1990: 74-83.
9. Pratt J E. Virtual model control of a biped walking robot[D]. Массачусетский технологический институт, 1995.
10. Pratt J, Chew C M, Torres A, et al. Virtual model control: Интуитивный подход для двуногих локомоций[J]. Международный журнал исследований робототехники, 2001, 20(2): 129-143.

11. Model-based predictive control: a practical approach[M]. CRC press, 2013.
12. Havoutis I, Semini C, Caldwell D G. Virtual model control for quadrupedal trunk stabilization[J]. Динамическая ходьба, 2013.
13. Galvez J A, Estremera J, Gonzalez de Santos P. Новая конфигурация нога-робот для исследования распределения силы [J]. Мехатроника, 2003, 13(8): 907-932.

Literature

1. McGhee R B. Finite state control of quadruped locomotion[J]. Simulation, 1967, 9(3): 135-140.
2. Mosher R. Test and evaluation of a versatile walking truck[C]//Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium, Washington DC, 1968. 1968: 359-379.
3. Vukobratović M, Borovac B. Zero-moment point—thirty five years of its life[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2004, 1(01): 157-173.
4. Hoepflinger M A, Remy C D, Hutter M, et al. The quadruped ALoF and a step towards real world haptic terrain classification[C]//12th Mechatronics Forum Biennial International Conference (Mechatronics 2010). Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Autonomous System Lab, 2010.
5. Hardarson F. Stability analysis and synthesis of statically balanced walking for quadruped robots[D]. Royal Institute of Technology, 2002.
6. Pack D J, Kang H S. An omnidirectional gait control using a graph search method for a quadruped walking robot[C]//Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on. IEEE, 1995, 1: 988-993.

7. Raibert M H. Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot[J]. Journal of biomechanics, 1990, 23: 79-98.
8. Thompson C M, Raibert M H. Passive dynamic running[C]//Experimental Robotics I. Springer, Berlin, Heidelberg, 1990: 74-83.
9. Pratt J E. Virtual model control of a biped walking robot[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1995.
10. Pratt J, Chew C M, Torres A, et al. Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(2): 129-143.
11. Model-based predictive control: a practical approach[M]. CRC press, 2013.
12. Havoutis I, Semini C, Caldwell D G. Virtual model control for quadrupedal trunk stabilization[J]. Dynamic Walking, 2013.
13. Galvez J A, Estremera J, Gonzalez de Santos P. A new legged-robot configuration for research in force distribution [J]. Mechatronics, 2003, 13(8): 907-932.