

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.865.8

Х. АРАФФА, М.М. ТКАЧ

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ
АНТРОПОМОРФНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА**

Формирование расчетной (опорной) траектории движения является важной и сложной проблемой, стоящей перед исследователями и разработчиками методов управления движением, АША. Целью планирования траектории движения является формирование опорного движения для систем управления движением; при этом цель управления – дать возможность двуногой системе (роботу) следовать заданной траектории во время движения (идти прямо, преодолевать препятствия, поднимать / опускать ноги).

Планирование заключается в генерировании временной последовательности значений, получаемых с помощью интерполирующей функции требуемой траектории. Подобно тому, что происходит, когда человек ходит, формирование траектории двуногого робота также подразумевает возможность улучшения посредством изучения, минимизации диссоциированной (неэффективно используемой) энергии, нахождения оптимальной траектории. Обычно это достигается путем указания ряда параметров, которые описывают желаемую траекторию.

В данной работе описываются методы генерирования траектории движения (АША). Другими словами, движение конечного эффектора в рабочем пространстве описывается интерполирующей функцией.

Основываясь на изучении литературы, среди этих методов можно обсудить следующее:

1. Аналитические методы
2. Методы, базирующиеся на центре тяжести
3. Методы, базирующиеся на данных измерения параметров ходьбы человека
4. Методы, базирующиеся на устойчивости
5. Методы, базирующиеся на оптимальности
6. Методы, базирующиеся на вычислительном интеллекте

Далее в этой статье аналитические методы рассматриваются более подробно и обсуждаются три момента:

1. Модель на базе ограничений
2. Траектория осцилляционного движения
3. Модель на базе интерполяции

Ключевые слова: двуногий робот, антропоморфные роботы, планирование траектории, методы генерирования траектории.

Х. АРАФФА, М.М. ТКАЧ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ
АНТРОПОМОРФНОГО КРОКУЮЧОГО АПАРАТУ**

Формування розрахункової (опорної) траєкторії руху є важливою і складною проблемою, що стоїть перед дослідниками і розробниками методів управління рухом, АКА. Метою планування траєкторії руху є формування опорного руху для систем управління рухом; при цьому мета управління - дати можливість двоногій системі (роботу) слідувати заданій траєкторії під час руху (йти прямо, долати перешкоди, піднімати / опускати ноги).

Планування полягає в генеруванні часової послідовності значень, отриманих за допомогою інтерполюючої функції необхідної траєкторії. Подібно до того, що відбувається, коли людина ходить, формування траєкторії двоногого робота також має на увазі можливість поліпшення за допомогою вивчення, мінімізації дисоційованої (неефективно використовуваної) енергії, знаходження оптимальної траєкторії. Зазвичай це досягається шляхом вказівки ряду параметрів, які описують бажану траєкторію.

В даній роботі описуються методи генерування траєкторії руху (АКА). Іншими словами, рух кінцевого ефектора в робочому просторі описується інтерполюючою функцією.

Грунтуючись на вивченні літератури, серед цих методів можна обговорити наступне:

1. Аналітичні методи
2. Методи, що базуються на центрі тяжіння
3. Методи, що базуються на даних вимірювання параметрів ходьби людини
4. Методи, що базуються на стійкості
5. Методи, що базуються на оптимальності
6. Методи, що базуються на обчислювальному інтелекті

Далі в цій статті аналітичні методи розглядаються більш докладно і обговорюються три моменти:

1. Модель на базі обмежень
2. Траєкторія осциляційного руху
3. Модель на базі інтерполяції

Ключові слова: двоногий робот, антропоморфні роботи, планування траєкторії, методи генерування траєкторії.

H. ARAFFA, M. TKACH

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky»

ANALYTICAL METHOD OF FORMATION OF A TRAJECTORY OF MOTION OF ANTHROPOMORPHIC WALKING APPARATUS

The planning trajectory of biped robot (generate joints references) or called generating motion trajectory is an important and complex problem facing researchers and developers of motion control methods, especially when we dealing with walking robot, where the stability during walking in very important.

The main purpose of planning the trajectory is to generate a reference motion for robot control systems, at the same time, the goal of control is to enable the bipedal system (biped robot) to follow a predefined trajectory during walking (go straight, overcome obstacles, raise / lower legs).

Similar to what happens when a person walks, the formation of the trajectory of a biped robot also implies the possibility of improvement through study, minimization of dissociated (inefficiently used) energy, finding the optimal trajectory. This is usually achieved by specifying a series of parameters that describe the desired trajectory.

In planning trajectory, a time sequence of values obtained by means of an interpolation function of the target trajectory.

In this paper, we describe a different method that used for generating a trajectory of biped robot. In other words, the motion of the end effector in the working space is described by an interpolating function.

Based on the study of literature, among these methods one can discussed as following:

1. Analytical methods
2. Methods based on the center of gravity (CoG)
3. Methods based on the measurement of walking parameters of a human
4. Methods based on Stability
5. Methods based on optimality
6. Methods based on computational intelligence

Further in this paper, analytical methods are considered in more detail and discussed three point:

1. Constraint based model
2. Oscillation motion trajectory
3. Interpolation based model

Keywords: Biped Robot, Generation trajectory, Planning Trajectory, method of planning trajectory.

Постановка проблеми

Формирование расчетной (опорной) траектории движения является важной и сложной проблемой, стоящей перед исследователями и разработчиками методов управления движением, АША. Целью планирования траектории движения является формирование опорного движения для систем управления движением; при этом цель управления – дать возможность двуногой системе (роботу) следовать заданной траектории во время движения (идти прямо, преодолевать препятствия, поднимать / опускать ноги).

Аналогично тому, что происходит при ходьбе человека, формирование траектории двуногой работа также подразумевает возможность совершенствования путем учебы, минимизации

диссоциированной (неэффективно использованной) энергии, нахождения оптимальной траектории. Обычно этого достигают, задавая ряд параметров, которые описывают требуемую траекторию.

Анализ последних исследований и публикаций

Обычно для генерирования расчетной траектории движения требуются систематические методы. На основании изучения литературы, среди этих методов можно выделить следующие:

1. Аналитические методы
2. Методы, базирующиеся на центре тяжести
3. Методы, базирующиеся на данных измерения параметров ходьбы человека
4. Методы, базирующиеся на устойчивости
5. Методы, базирующиеся на оптимальности
6. Методы, базирующиеся на вычислительном интеллекте

Далее в этой статье аналитические методы рассматриваются более подробно.

Формулирование цели исследования

Аналитический метод формирования траектории движения

Модель на базе ограничений

Хурмузлу установил ряд кинематических связей в форме функций ограничения на базе физических характеристик ходьбы человека (вертикальная поза, скорость ходьбы, траектория конечности с маховым движением во время фазы с опорой на одну ногу, смещение опорного (стойкого) колена, координация движения конечностей и разработал методический подход с помощью параметрических формулировок, которые связывают уравнения ограничения с требуемыми профилями шарнирных углов (углов в сочленении) для двуногого профиля. Функции ограничения Хурмузлу автоматически генерируют «повторяемую» походку [1].

Траектория осцилляционного движения

Формирование синусоидального движения

Голлидей и Хемами генерировали расчетную траекторию движения в виде периодического режима (генератор незатухающих колебаний – однозвенный маятник), в котором параметры осциллятора выводятся из параметров тела человека для линеализованной динамической модели, а управление осуществляется устройством управления с обратной связью по состоянию [1]. Курематсу и др. использовали циклоидальный профиль для формирования траектории шарниров бедра и лодыжки ноги с маховым движением. Траектория описывается простой периодической синусоидальной функцией, которая показывает аналог траектории бедра и лодыжки человека при обычной ходьбе. Юанг и др. также использовали этот метод для генерирования предопределенных траекторий движения в архитектуре управления многоярусной нейронной сетью [2].

Генератор последовательности связанных осцилляторов

Связанные генераторы были впервые использованы Бэйем и др. [3], а позднее Зелинской [4]. Впоследствии Джаликс и др. разработали пять связанных генераторов (каждый из которых моделировался на основе осциллятора Ван дер Поля), аналогичных осцилляторам, которые присутствуют у людей и лошадей. Основу упомянутых осцилляторов составлял независимый головной осциллятор, заданный для туловища, с которым другие осцилляторы, заданные для верхних и нижних частей ног, были сопряжены для генерирования расчетной траектории шарнирного угла 5-звенного планарного двуногого робота. Цель исследования Джалика состояла в том, чтобы скомбинировать скелетную и мускульную модели с генератором последовательности связанных осцилляторов и контроллером для достижения адаптируемого ритмичного движения [5]. Бенбрахим и др. разработали центральный генератор упорядоченной активности, который использует алгоритм нейронной церебральной модели артикуляционного контроллера (СМАС) для генерирования требуемой расчетной траектории движения для 7-звенного двуногого робота с 6 шарнирами (сочленениями). Для церебральной модели артикуляционного контроллера задаются такие параметры, как время, длина шага и продолжительность ходьбы [6].

Курематсу и др. генерировали траекторию движения двуногого робота, используя генератор упорядоченной активности на базе нейронного осциллятора, который состоит из 4 нейронов, совместно соединенных с ингибиторными связями, и который производит стационарную периодическую осцилляцию для определенного набора параметров. Эта периодическая осцилляция генерирует траекторию для стационарной ходьбы, задавая переменные состояния нейронов шарнирным углам робота [7].

Изложение основного материала исследования

Модель на базе интерполяций

Планирование траектории движения с помощью интерполяции широко применялось для формирования расчетной траектории движения двуногих роботов. На раннем этапе его очень часто использовали, например, в т.н. анимации ключевых кадров, которая является синтезом последовательности изображений, демонстрирующей непрерывную интерполяцию движения между

набором ключевых кадров, указанных параметрами в нескольких временных точках; затем определяется траектория в промежуточные моменты времени. Эти промежуточные траектории генерируются или путем интерполяции каждого из параметров движения независимо, или путем минимизации затрат энергии [8]. Вначале метод полиномиальной (многочленной) интерполяции применялся для простой конфигурации двуногого робота и планарного горизонтального движения. Однако, при наличии различных ограничений в виде сложных условий для ходьбы (наклонная поверхность, сильно пересеченная местность, наличие препятствий на пути и пр.), при использовании различных типов движений (бег, повороты и т.д.), порядок многочлена становится очень высоким, что осложняет произведение расчетов.

Сильва и др. характеризовали расчетную траекторию движения исключительно с помощью пяти переменных движения: длины шага, высоты бедра, максимальных колебаний бедра, максимального клиренса ноги и длины звеньев [9]. Были определены кинематические характеристики и эффективность работы системы во время ходьбы. После этого определялись соотношения между переменными движения и физически допустимые траектории; расчетная траектория движения формировалась путем назначения траекторий в декартовом пространстве для тела и нижних точек ноги. Предполагалось, что траектория бедра остается на фиксированной высоте и имеет постоянную скорость движения вперед; при этом опорная (стойчая) нога саморегулируется соответствующим образом. В результате уравнение для верхнего края ноги с маховым движением вдоль оси движения рассчитывается путем суммирования линейной функции и синусоидальной функции. С помощью алгоритма обратной кинематики соответствующие траектории шарниров (сочленений) генерируются из этих траекторий бедра и ступней.

Ших генерировал расчетные траектории движения туловища и ног двуногого робота как кусочно-заданные кубические многочлены для ходьбы по ровной поверхности, наклонной поверхности и ступеням лестницы для двуногого робота с варьируемой длиной ног [2]. Кроме того, Ших разработал расчетные траектории движения для двуногого робота с варьируемой длиной ног, имеющего 7 степеней подвижности, при ходьбе вверх и вниз по ступеням лестницы [10]. Многочлены третьего порядка были выбраны как имеющие минимальный уровень сложности для того, чтобы можно было свободно задавать положения и скорости на обоих концах временного интервала.

Хуанг сначала сформулировал ограничения всей траектории ноги, которые включают характер поверхности, ограничения в отношении динамической устойчивости, взаимоотношения между характером ходьбы и спецификациями привода, а затем генерировал расчетную траекторию движения, используя сплайновую интерполяцию третьего порядка [127, 128]. В [11] траектория бедра генерируется с помощью периодической сплайн-функции третьего порядка для обеспечения высокой степени устойчивости. Позже в [12] траектория бедра формировалась сплайновой интерполяцией третьего порядка, а затем проверялась с использованием итерационных вычислений для того, чтобы добиться плавного движения бедра с самым большим запасом устойчивости с задействованием двух параметров. Хуанг также представил работу, в которой генерировал расчетную траекторию движения, требующего небольшого крутящего момента и небольшой скорости приводов шарниров (сочленений).

Танг и др. представили методы планирования траектории для ходьбы и «пробития штрафных ударов» (penalty kicking) как в декартовом пространстве, так и в рабочем пространстве шарниров. Траектория генерируется сначала формированием траектории бедра и лодыжки как сплайн-функции третьего порядка в декартовом пространстве, а затем профили шарнирных углов определяются с помощью обратной кинематики. Генерируемая траектория имеет деривативную (вторичную) непрерывность первого порядка, которая гарантирует равномерность скорости шарнира, и деривативную непрерывность второго порядка, которая обеспечивает равномерность ускорения или вращающегося момента шарнира (сочленения) [13].

Ли генерировал расчетную траекторию движения для 5-звенного двуногого робота, сначала деля движение на фазу с опорой на одну ногу и фазу с опорой на две ноги, а также деля посылку о том, что туловище всегда должно находиться в вертикальном положении, а затем получая траектории движения шарнирного угла с помощью полиномиальной интерполяции. Коэффициенты многочленов получают путем минимизации квадратичной ошибки шарнирного угла [103]. Танг и др. предложили методы планирования траектории движения для ходьбы и «пробития штрафных ударов» как в декартовом пространстве, так и в рабочем пространстве шарниров. Траектория движения в рабочем пространстве шарниров непосредственно генерируется с применением метода сплайновой интерполяции третьего порядка к шарнирным углам [119, 129].

Выводы

В данной работе представлена математическая модель АША как массовой механической системы. Структурно рассматриваемый аппарат представляется как система шарнирно связанных твердых тел с 18 степенями свободы: 6 степеней свободы, соответствующих движению АША в трехмерном пространстве как свободной механической системы и по 6 степеней свободы, соответствующих относительным движениям звеньев в шарнирах каждой из двух конечностей.

Уравнения (5.1) с учетом конкретизации входящих в них слагаемых и параметров представляют собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Эти уравнения принимают во внимание действующие на звенья АША силы и моменты: инерционные, центробежные, кориолисовы, гравитационные. При заданных в явном виде обобщенных силах интегрированием данной системы уравнений можно получить действительный закон движения АША. Следует, однако, отметить, что с вычислительной точки зрения уравнения движения в форме Лагранжа-Эйлера чрезвычайно неэффективны. Так, в [4] показано, что общая вычислительная трудоемкость численного интегрирования системы уравнений движения в форме Лагранжа-Эйлера возрастает пропорционально вследствие весьма большого количества «холостых» операций, введенных ради придания структуре уравнений большей алгебраической выразительности. Поэтому основной сферой применения рассмотренных уравнений является не прямое их интегрирование, а оценка величин коэффициентов динамического влияния, что является ценной возможностью при разработке и анализе системы управления АША.

Список использованной литературы

1. Y. Hurmuzlu, "Dynamics of bipedal gait-Part 1: objective functions and the contact event of a planar five-link biped," J. Appl. Mech., 1993.
2. B. Yuksel, "Towards the enhancement of biped locomotion and control techniques," Univ. Técnica Medio Oriente, no. August, p. 307, 2008.
3. J. S. Bay and H. Hemami, "Modeling of a neural pattern generator with coupled nonlinear oscillators," IEEE Trans. Biomed. Eng., 1987.
4. T. Zielińska, "Coupled oscillators utilised as gait rhythm generators of a two-legged walking machine," Biol. Cybern., 1996.
5. L. Jalics, H. Hemami, and Y. F. Zheng, "Pattern generation using coupled oscillators for robotic and biorobotic adaptive periodic movement," Proc. Int. Conf. Robot. Autom., 1997.
6. H. Benbrahim and J. a Franklin, "Autonomous Systems Biped dynamic walking using reinforcement learning," Rob. Auton. Syst., 1997.
7. Y. Kurematsu, T. Maeda, and S. Kitamura, "Autonomous trajectory generation of a biped locomotive robot using neuro oscillator," in IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings, 1993.
8. L. S. Brotman and A. N. Netravali, "Motion interpolation by optimal control," ACM SIGGRAPH Comput. Graph., 1988.
9. F. M. Silva and J. A. T. Machado, "Kinematic Aspects of Robotic Biped Locomotion Systems," Proc. 1997 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 1997.
10. C. L. Shih, "Ascending and descending stairs for a biped robot," IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans., 1999.
11. Q. Huang et al., "A high stability, smooth walking pattern for a biped robot," Icara, 1999.
12. Q. Huang et al., "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE Trans. Robot. Autom., 2001.
13. W. Li, G. Zheng, B. Nie, H. Zhao, and M. Huang, "Gait Planning for Soccer-Playing Humanoid Robots," Lect. Notes Electr. Eng., 2011.