

антенно-волноводного тракта; 2) мощностью шумов антенны при воздействии на нее теплового излучения Земли от атмосферы; 3) мощностью шумов радиоизлучения Солнца и других космических источников; 4) шумовой температурой конвертера, и описывается выражением

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{ус}} + T_{\text{АФТ}} + \left( \frac{T_{\text{атм}} + T_{\text{кос}}}{\eta_{\text{ап}}} \right) + T_{\text{к}}, \quad (8)$$

где  $T_{\text{ус}}$  – определяется входными цепями и типом малошумящего усилителя высокой частоты;  $T_{\text{к}}$  – шумовая температура конвертера;  $T_{\text{АФТ}} = T_0(1 - \eta_{\text{ап}})$ , где:  $T_0 = 290$  К – абсолютная температура;  $T_{\text{атм}}$  – является функцией угла места и частоты;  $T_{\text{кос}}$  – определяется яркостной температурой источника  $T_{\text{я}}$ .

Потери в осадках вычисляются по эмпирической формуле:

$$L_{\text{д}} = aI^b l [\text{дБ}], \quad (9)$$

где:  $I$  – интенсивность выпадения осадков [мм/ч],  $l$  – длина пути сигнала в дождевом слое,  $a$  и  $b$  – вспомогательные коэффициенты.

Таким образом, разработана математическая модель (1)–(9) для энергетического расчета радиолинии на трассе спутник-Земля, позволяющая с помощью компьютерного моделирования определить параметры приемного устройства, обеспечивающие устойчивый прием цифрового спутникового телевизионного сигнала при различных погодных условиях и географических координатах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Песков С. Н., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Теле-Спутник. 2010. № 11. С. 70–75.
2. Конорев, А. Особенности измерения параметров каналов с цифровой модуляцией / А. Конорев // Теле-Спутник. – 2010. – № 9. – С. 14–23.
3. Никитин Н. П., Лузин В. И., Гадзиковский В. И., Марков Ю. В. Телевизионные цифровые системы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. 108 с.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

**И. Н. Щербак, Е. Е. Попко**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

*E-mail: [shcherbak\\_igor@tut.by](mailto:shcherbak_igor@tut.by)*

Экзоскелет – устройство, позволяющее увеличить массу переносимого груза. Первый этап разработки экзоскелета – создание биомеханической модели движений человека. Использованный ранее способ описания движения с использованием углов

Эйлера не позволяет добиться высокой скорости расчетов. В работе предложено описывать изменение положения тела человека с использованием кватернионов. Указанный способ при таких же значениях расчетной ошибки позиционирования позволяет существенно уменьшить объем вычислений.

*Ключевые слова:* экзоскелет; биомеханическая модель; ориентация твердого тела; углы Эйлера; кватернион.

Людям ряда профессий в процессе выполнения своей работы необходимо переносить оборудование и снаряжение большой массы, что приводит к ускоренной утомляемости и снижению мобильности. Одним из способов решения данной задачи является использование экзоскелета [1]. Указанное устройство является копирующим манипулятором и представляет собой жесткий каркас, который повторяет движения человека и позволяет увеличить массу переносимого груза. Еще одним назначением экзоскелета является помощь в медицинской реабилитации людей с травмами опорно-двигательного аппарата. В настоящее время в различных странах мира существует ряд проектов по разработке экзоскелетов [2-4].

Первым этапом разработки экзоскелета является создание биомеханической модели движения человека. В работе [5] была предложена такая модель. Тело человека представлено в виде связанной системы твердых тел. Система состоит из 7 жестких подвижных звеньев: корпус (туловище, голова и руки), два бедра, две голени и две стопы. Звенья соединены в суставы: тазобедренные и голеностопные представлены идеальными шаровыми соединениями, коленные – цилиндрическими. Шаровые соединения имеют три степени подвижности, цилиндрические – одну [6], таким образом подвижность системы равна 14. Для определения положения в пространстве необходимо задать 3 координаты центра масс тела и 3 угла поворота тела относительно неподвижной системы координат. Общее число степеней свободы будет равно 20.

Для описания перемещения тела человека в пространстве необходимо задать траекторию движения 11 точек в неподвижной системе координат

$${}^0r_i(t) = ({}^0r_{ix}(t), {}^0r_{iy}(t), {}^0r_{iz}(t), 1)^T, \quad (1)$$

где  $i$  – номер точки,  $T$  – знак транспонирования [5].

Указанные точки располагаются в центре масс, правом и левом плече, правой и левой стороне бедра, в центрах голеностопных суставов и по две точки на каждой стопе. Данные точки жестко связаны со звеньями и их координаты в подвижных системах остаются неизменными.

Далее, решив обратную задачу кинематики, получим значения обобщенных координатах

$$q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_{20}(t))^T. \quad (2)$$

Обобщенные координаты  $q_i, i = \overline{1,6}$  - определяют положение центра масс тела и ориентацию туловища в пространстве относительно неподвижной системы координат;  $q_i, i = \overline{7,20}$  - определяют поворот звеньев относительно соответствующих осей вращения.

Для изменения ориентации туловища человека в пространстве, движений в тазобедренных и голеностопных суставах необходимо выполнить три последовательных поворота на углы Эйлера относительно соответствующих осей каждого звена. В процессе выполнения моделирования выяснилось, что при использовании вышеуказанного способа описания движения вдоль заданной траектории осуществляется с недостаточной точностью. Максимальная расчетная ошибка позиционирования  $\varepsilon_{\max} \approx 0,5\Delta h$ , где  $\Delta h$  – шаг интерполяции. Необходимость выбора малого шага интерполяции приводит к большому объему вычислений при расчете обобщенных координат. Необходимо найти способ описания движения, который обеспечивает при той же расчетной точности позиционирования меньший объем вычислений.

В работах [6, 7] предлагается способ задания ориентации в пространстве твердого тела с использованием кватернионов. Данный способ позволяет осуществлять вращение твердого тела используя только один поворот относительно оси вращения. В звеньях с тремя степенями подвижности это позволит осуществлять вращение не за три этапа, а за один.

Определим начальное положение всех звеньев с помощью трех единичных ортогональных векторов, которые жестко связаны с каждым звеном

$$b_{x,i}^0 = (1, 0, 0), \quad (3)$$

$$b_{y,i}^0 = (0, 1, 0), \quad (4)$$

$$b_{z,i}^0 = (0, 0, 1), \quad (5)$$

где  $i$  – номер звена.

Зная значение положения точек тела человека (1) определим вектора положения звеньев в конечный момент времени.

$$b_{x,i}^1 = (b_{xx,i}, b_{xy,i}, b_{xz,i}), \quad (6)$$

$$b_{y,i}^1 = (b_{yx,i}, b_{yy,i}, b_{yz,i}), \quad (7)$$

$$b_{z,i}^1 = (b_{zx,i}, b_{zy,i}, b_{zz,i}). \quad (8)$$

Необходимо определить вектора как в неподвижной системе, так и в подвижной, связанной с каждым звеном. Сформируем из векторов (3-8) кватернионы начального и конечного положения звеньев  $P_{x,i}^0, P_{y,i}^0, P_{z,i}^0, P_{x,i}^1, P_{y,i}^1, P_{z,i}^1$ .

По вышеуказанным данным вычислим кватернионы поворотов для каждого звена в подвижной системе координат

$$q_i = (\cos(\alpha_i / 2), u_i \cdot \sin(\alpha_i / 2)), \quad (9)$$

где  $u_i = (u_{x,i}, u_{y,i}, u_{z,i})$  - единичный вектор, определяющий ось вращения в подвижной системе координат, связанной с соответствующим звеном;  $\alpha$  - угол поворота вокруг оси вращения [6, 7].

Кватернионы поворотов (9) обеспечивают повороты соответствующих звеньев из начального положения в конечное. Повороты необходимо осуществлять последовательно: ориентация корпуса в пространстве, повороты бедер, голеней, стоп.

При использовании указанного способа расчета движения максимальная расчетная ошибка позиционирования  $\varepsilon_{\max} \approx 0,08\Delta h$ , что существенно меньше, чем в исходном способе. При этом объем вычислений для расчета одной точки траектории в обоих случаях приблизительно равен.

Использование для расчета положения звеньев в пространстве предложенного способа позволяет при той же ошибки позиционирования уменьшить шаг интерполяции. Это приводит к уменьшению объема вычислений приблизительно в 6 раз.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Карпович С. Е., Межинский Ю. С., Жарский В. В. и др. Основы механики машин и роботов. Минск.: Технопринт, 2002. 155 с.
2. Экзоскелет: пат. 175523 1 Рос. Федерация 3/00 / Петрушина И.Б., Некрасова Л.В., Галимов Э.М.; заявитель и патентообладатель ООО «Республиканский центр робототехники» - № 2016144784; заявл. 15.11.16; опубл. 07.12.17, Бюл. №34.
3. Бедняк С. Г., Еремина О. С. Роботизированные экзоскелеты HUL. В кн.: Сборник научных трудов Sworld. Вып. 2. Т. 1. Одесса. 2014; с. 49–51.
4. Tebueva F. V., Petrenko V. I., Antonov V. O., Gurchinsky M. M. The Method for Determining the Relative Positions of the Operator's Arm for Master-Slave Teleoperation of Anthropomorphic Manipulator // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2018. Vol. 12. № 8. P. 694–704.
5. Лисейчиков Н. И., Садов В. С., Щербак И. Н. Моделирование процессов ходьбы, подъема и переноски груза человеком при разработке его экзоскелета // Электроника Инфо. 2014. № 4.
6. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука. 1973. 320 с
7. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и динамика движения. М.: ФИЗМАТГИЗ. 2006. 289 с.