

**С.Ф. Яцун**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

**Ян Найнг Со**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: boyan.243@gmail.com)

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ЯКОБИАНСКИЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХНОГО РОБОТА

*В работе представлены методы прямой кинематики, обратной кинематики и Якобианский анализ четырехногих роботов. Кинематический анализ – основная проблема шагающего робота. В этом исследовании для каждой ноги четырехногого робота прямая задача кинематики решается с использованием метода Денавита-Хартенберга (D-H), а для решения обратной кинематической задачи используются геометрический и математический методы. Кинематика делится на две категории: прямая кинематика и обратная кинематика. Прямая кинематика, как мы знаем, позволяет установить конечную точку угла ( $\theta_1, \theta_2$  и  $\theta_3$ ). Обратная кинематика используется для вычисления относительных углов, которые достигают желаемого положения и ориентации концевой эффектора относительно базовой рамы. Метод Якобиана является одним из наиболее важных анализов для управления плавностью траектории и вывода динамического уравнения движения робота. Для расчета используется программное обеспечение MATLAB, а для моделирования робота используется Simulink toolbox в программном обеспечении MATLAB. При моделировании в пакете MATLAB рассматривалась одна нога модели, проводился расчет угловой скорости и относительных углов. Функциональная программа MATLAB состоит из различных алгоритмов в зависимости от требований к работам. Получена программа, рассчитывающая угловые скорости звеньев и относительные углы при перемещении из заданного положения в конечное. В данном исследовании приведены различные угловые скорости и углы конечной точки ноги. Основное внимание в работе уделяется механическому дизайну, расчету кинематического анализа, функции Якобиана и экспериментальным данным четырехногих роботов в среде моделирования MATLAB.*

**Ключевые слова:** прямая кинематика; обратная кинематика; якобианский анализ; четвероногие роботы; параметр D-H; MATLAB; моделирование.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-4-32-41

**Ссылка для цитирования:** Яцун С.Ф., Ян Найнг Со. Кинематический и якобианский анализ для четырехногого робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 32-41.

\*\*\*

## Введение

За последние десятилетия мировая робототехника и технологии, связанные с ними, развиваются стремительными темпами, приобретая все большую возможность использования мобильных роботов в различных областях человеческой деятельности. Для решения такого рода задач были разработаны несколько различных типов мобильных роботов, в том числе колесные роботы, гусеничные роботы, шагающие роботы, беспилотные летательные аппараты. В данной работе рассматривается мобильный шагающий робот с четырьмя ногами [1].

Робот с четырьмя ногами обладает множеством преимуществ перед колесными роботами, в том числе большей адаптируемостью к пересеченной местности и превосходной проходимостью [2]. Колесные роботы могут двигаться быстрее четырехногих роботов, но для этого они требуют более плоской поверхности. Таким роботам сложнее дать перемещение по неоднородной и по пересеченной местности. Поэтому область робототехники активно исследуется и развивается. Развитие четырехногих роботов – очень важная и широкая область научных исследований. В настоящее время

четырехногие роботы пользуются популярностью, их структура очень сложна, а так же сложно производить контроль над ходьбой и бегом. Меньше энергопотребление, хорошая стабильность, и движение по неровной и пересеченной местности – главные преимущества четвероногих роботов. Низкая скорость, сложность в построении и управлении, требуют бортовой мощности – это ограничения четырехногих роботов [3].

В последние годы было разработано очень мало четвероногих механизмов [4]. Было выполнено множество усовершенствований с момента появления первого, полностью управляемого компьютером робота “Phoneu Pony”, сделанного в университете Южной Калифорнии в 1966 году [5]. С тех пор дизайн шагающего робота, который использовался в Boston Dynamics, изменился и были выпущены прототипы вездеходных роботов BigDog [6], AlphaDog [7], с конечностями с двумя и тремя степенями свободы, которые были использованы в SCOUT I & II robots [8]. Среди них такие роботы, как BISAM [9], WARP1 [10] и т.д. Четырехногие роботы начали разрабатываться во всем мире. Самая продвинутая нога робота-BidDog была сделана в Boston Dynamics 27 марта 2008 года.

Важнейшими механическими характеристиками робота с четырьмя ногами являются фундаментальная компоновка ноги, контроль положения и ориентации каждой ноги. Поэтому положение и ориентация каждой ноги могут быть определены методами кинематики. Кинематика – это отношения между положениями, скоростями и ускорениями звеньев робота [11]. В четырехногих роботах должна быть стабильность и хорошая кинематическая модель [3].

При создании кинематической модели принимаются следующие допущения:

- а) поверхность соприкасается с чередующейся парой ног;
- б) тело удерживается на постоянной высоте и параллельно плоскости земли во время движения;
- с) предполагается, что центр тяжести тела находится в геометрическом центре тела [12].

Кинематическая модель может создаваться с использованием методов прямой и обратной кинематики системы четырехногих роботов. Этот инструмент использует методы Денавита - Хартенберга (ДН) и Эйлера-Лагранжа, а также функцию Якобиана для расчета кинематических характеристик четвероногих роботов. Кроме того, он автоматически генерирует полезный код для этих моделей, таких как М-файлы, модель Simulink и C/C++ код, что позволяет легко интегрировать его с другими популярными наборами инструментов MATLAB или средами C/C++ [13].

#### Кинематическая модель

Кинематическая задача связана с движением роботов. Она не учитывает силы, которые вызывают движение. Она разделяется на две категории:

- Прямая кинематика.
- Обратная кинематика.

Прямая задача кинематики позволяет вычислить конечную эффекторную координату, зная достигнутые углы в шарнирах. Наиболее часто используемыми методами кинематического моделирования являются методы Денавита-Хартенберга (D-H) и последовательного смещения винтов. В подходе D-H формулируются первые параметры D-H. Имея эти параметры, кинематическую модель можно

описать для любого робота. Напротив, обратная кинематика вычисляет требуемые углы для заданных координат и является более сложной, чем прямая кинематика [14, 17, 18, 19].

Параметры D-H для четырехлинейной роботизированной системы, определенной для назначенных кадров, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр DH для модели четырехногого робота

Порядковый номер	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$L_2$	90	d	$\theta_2$
3	$L_3$	90	0	$\theta_3$

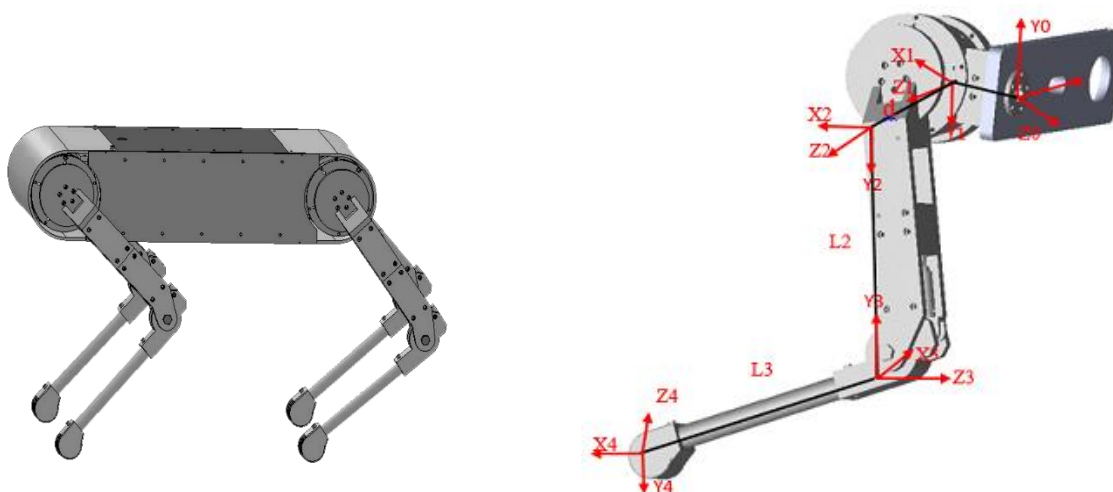


Рис. 1. 3D модель и координаты ноги

Каждая матрица преобразования ( $T_1^0, T_2^1, T_3^2$ ) взята из таблицы 1: параметр DH.

$$T_1^0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$T_2^1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & l_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$T_3^2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 & l_3 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & l_3 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Нам нужно найти матрицу преобразования  $T_3^0$  системы координат ноги робота относительно базовой системы координат, заданной следующим образом:

$$T_3^0 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Таблица 2

Элементы прямой кинематической матрицы

$r11=c\theta1( c\theta2c\theta3- s\theta1s\theta3)$
$r12=c\theta1( c\theta2s\theta3+ c\theta3s\theta2)-s\theta1$
$r13=0$
$px=- ds\theta1+ l2c\theta2c\theta1+ l3c\theta1c(\theta2+\theta3)$
$r21= s\theta1( c\theta2c\theta3- s\theta1s\theta3)$
$r22= c\theta1+s\theta1( c\theta2s\theta3+ c\theta3s\theta2)$
$r23=0$
$py= dc\theta1+ l2s\theta1c\theta2+ l3s\theta1c(\theta2+\theta3)$
$r31= -c\theta2s\theta3- c\theta3s\theta2$
$r32=c\theta2c\theta3-s\theta2s\theta3$
$r33=0$
$pz=- l2s\theta2- l3s(\theta2+\theta3)$

Общий вектор положения одной ноги для модели робота с четырьмя ногами задается

$$\begin{bmatrix} px \\ py \\ pz \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ds\theta1 + l2c\theta2c\theta1 + l3c\theta1c(\theta2 + \theta3) \\ dc\theta1 + l2s\theta1c\theta2 + l3s\theta1c(\theta2 + \theta3) \\ -l2s\theta2 - l3s(\theta2 + \theta3) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $s\theta = \sin(\theta)$ ,  $c\theta = \cos(\theta)$ ,  
 $c(\theta2 + \theta3) = \cos(\theta2) \cos(\theta3) - \sin(\theta2) \sin(\theta3)$  and  $s(\theta2 + \theta3) = \sin(\theta2) \cos(\theta3) + \cos(\theta2) \sin(\theta3)$ .

Поскольку четыре ноги робота симметричны, мы можем вычислить прямую и обратную кинематическую модель для одной ноги, а затем применить ее к оставшимся 3 ногам. Каждая нога имеет 3 степени свободы, поэтому на четыре ноги имеется 12 степеней свободы [12].

### Обратная кинематическая модель

Прямая кинематика, как известно, вычисляет положение конечной точки угла ( $\theta1, \theta2$  и  $\theta3$ ). В данной работе метод Обратной кинематики реализуется в аналитической форме. Обратная кинематика используется для вычисления углов соединения, которые достигают желаемого

положения и ориентации конечного эффектора относительно базовой рамы. Оба исследованных робота имеют два осевых смещения (по оси X и Z). Задача обратной кинематики приводит к наборам совместных углов в зависимости от конфигурации робота [15]. Для каждого рассчитанного, математического выражения, может не быть физического решения. Кроме того, может быть более одного решения для конечной точки для ног в желаемом положении. По этой причине ноги робота (1 и 3) и ноги робота (2 и 4) реализованы в одной и той же кинематической структуре, но в разных конфигурациях [3].

$$\theta_1 = \text{Atan}(px, py) + \text{Atan}(\sqrt{px^2 + py^2 - d^2}, d). \quad (6)$$

$$\theta_2 = \text{Atan}(\sqrt{px^2 + py^2 - d^2}, pz) - \text{Atan}(l2 + l3c3, l3s3). \quad (7)$$

$$\theta_3 = \text{Atan}(D, \sqrt{1 - D^2}) \times (\text{Legs for 2 and 4}). \quad (8)$$

$$\theta_3 = \text{Atan}(D, -\sqrt{1 - D^2}) \times (\text{Legs for 1 and 3}). \quad (9)$$

$$D = (px^2 + py^2 - d^2 + pz^2 - l2^2 - l3^2) / (2 l2 l3). \quad (10)$$

### Якобианская обратная кинематика

Задача обратной кинематики для стационарных или мобильных манипуляторов заключается в вычислении конфигурации манипулятора, соответствующей заданному расположению конечного эффектора в координатном пространстве задач. Как правило, эта проблема решается численно с помощью алгоритмов инверсной кинематики Якобиана, из которых наиболее широко используется алгоритм псевдо-обратного Якобиана [16]. Якобиан является одним из наиболее важных анализов для управления плавностью траектории и выполнения в выводе динамического уравнения движения робота. При управлении роботом для перехода ноги из одного положения в целевое не достаточно просто определить стык и конечную точку ноги по координатам. Поэтому возникает по-

требность высчитать скорость положения конечной точки и угловые скорости рассчитываемой конечности. Матрица Якобиана вычисляется на основе прямого кинематического анализа. По уравнению матрицы Якобиана даны прямые кинематические.

$$\dot{X} = J \dot{\theta} \quad (11)$$

Нога вектора конечной скорости (X) линейно пропорциональна элементам совместного вектора скорости, где матрица пропорциональности  $6 \times n$   $J(q)$  называется матрицей Якоби робота.

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^0(d_3^0 - d_0^0) & R_1^0(d_3^0 - d_1^0) & R_2^0(d_3^0 - d_2^0) \\ R_0^0 & R_1^0 & R_2^0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$J(q) = [J1 \quad J2 \quad J3] \quad (15)$$

$$J1 = \begin{pmatrix} dc(\theta_1) - l2s(\theta_1)c(\theta_2) - l3s(\theta_1)c(\theta_1 + \theta_2) \\ -ds(\theta_1) + l2c(\theta_1)c(\theta_2) + l3c(\theta_1)c(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$J2 = \begin{pmatrix} -l2s(\theta_2)c(\theta_1) - l3c(\theta_1)s(\theta_1 + \theta_2) \\ -l2s(\theta_1)s(\theta_2) - l3s(\theta_1)s(\theta_1 + \theta_2) \\ -l2c(\theta_2) - l3c(\theta_1 + \theta_2) \\ -s(\theta_1) \\ c(\theta_1) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$J3 = \begin{pmatrix} -l3c(\theta_1)s(\theta_1 + \theta_2) \\ -l3s(\theta_1)s(\theta_1 + \theta_2) \\ -l3c(\theta_1 + \theta_2) \\ -s(\theta_1) \\ c(\theta_1) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

### Моделирование четырехногого робота и данные эксперимента

При моделировании в пакете MATLAB рассматривалась одна нога модели, проводился расчет угловой скорости и относительных углов. Функциональная программа MATLAB состоит из различ-

ных алгоритмов в зависимости от требований к работам. Теперь эта функциональная программа выводит угловую скорость и относительный угол для ноги робота с помощью кинематического анализа и метода обратной кинематики Якоби. На рисунке 2 показано моделирование.

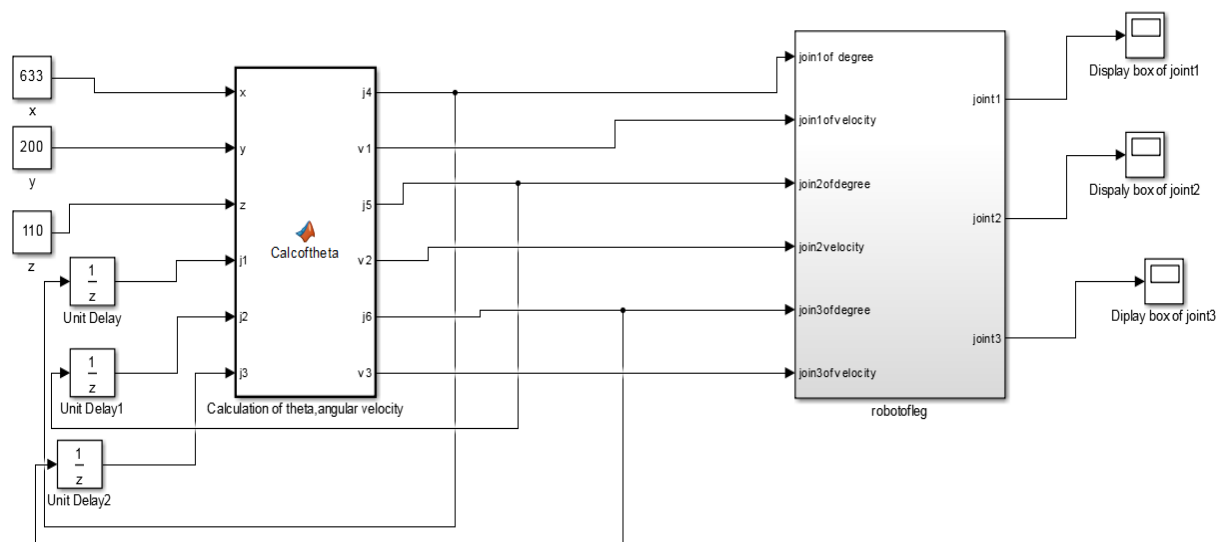
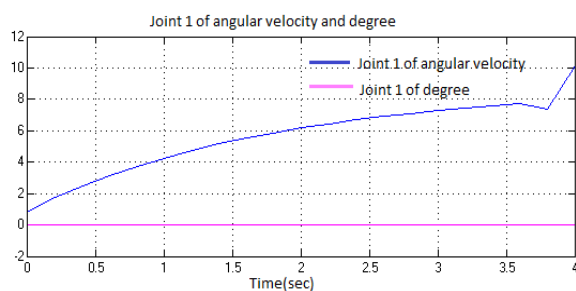
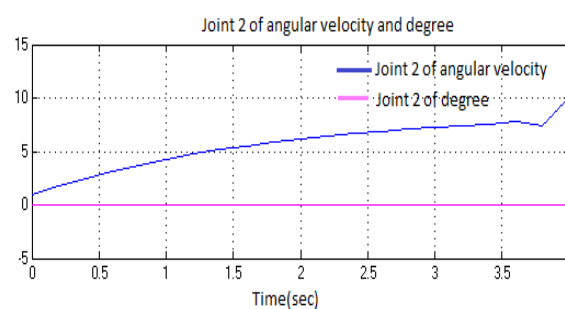


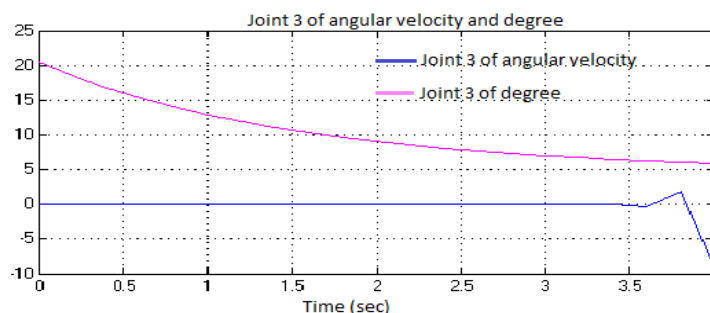
Рис. 2. Моделирование четырехногого робота



а)



б)



в)

Рис. 3. а – угловая скорость и относительный угол 1-й результат; б – угловая скорость и относительный угол 2-й результат; в – угловая скорость и относительный угол 3-й результат

По результатам данного эксперимента, вычислена угловая скорость и относительный угол рассматриваемой конечности в положении конечной точки [628,0,110] и при перемещении в требуемое положение [633,200,110]. На рисунке 3 показаны угловая скорость и относительный угол, измеренные для каждого из звеньев.

### Выводы

В этом исследовании рассмотрены прямая кинематика, обратная кинематика и якобианский анализ робота с четырьмя ногами. Метод Денавита-Хартенберга используется при решении прямой кинематической задачи, аналитическим способом решена обратная кинематическая задача. Якобианский анализ используется для определения конечных положений, скоростей и угловых скоростей звеньев. Кинематический и якобианский анализ проведены с использованием Simulink в программном пакете MATLAB. Программа разработана, чтобы получить значение угловой скорости звеньев и их положений. Результаты представлены в графической форме. В результате программа, представленная в этом исследовании, эффективно выполняет кинематический анализ и звеньев положения конечной точки и угловые скорости звеньев ноги робота. Далее будет проведен динамический анализ, четырехного робота при ходьбе.

### Список литературы

1. Математическое моделирование мобильного гусеничного робота / С.Ф. Яцун, Чжо Пью Вей, А.В. Мальчиков, Е.С. Тарасова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.

2. Gor M. M., Pathak P. M. and J-M Yang., Dynamic Modeling and Simulation of Compliant Legged Quadruped Robot // Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013), IIT Roorkee, India, Dec 18-20 2013, pp 7 – 11.

3. Muhammed Arif Sen, Veli Bakircioglu, and Mete Kalyoncu., Inverse Kinematic Analysis Of A Quadruped Robot // International journal of scientific & technology research. September 2017. Volume 6, issue 09, 2277-8616, Pp. 285 – 289.

4. Zielinska T., John Heng ., Mechanical design of multifunctional quadruped // Mechanism and Machine Theory. 2003. № 38. P. 463 - 478.

5. Song S. M., Waldron K. J., *Machines that walk: The adaptive suspension vehicle*, MIT Press, Cambridge (1989).

6. Mary Anne Simpson., Boston Dynamics: Quadruped Rough Terrain Robot Prototype (2008, March 27). 2017, pp. 1 – 2. URL: <https://phys.org/news/2008-03-boston-dynamics-quadruped-rough-terrain.html>.

7. Nancy Owano ., Boston Dynamics unwraps military robot AlphaDog (w/ video) (2011, October 3). 2017, pp 1 – 2. URL: <https://phys.org/news/2011-10-boston-dynamics-unwraps-military-robot.html>.

8. Robert F. Battaglia., Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary Stair-Climbing // M.E. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, May 1999.

9. K. Berns and W. Ilg ., Mechanical construction and computer architecture of the four-legged walking machine BISAM //

*ASME Transactions on Mechatronics*, 4 (1) (1999) 32-38.

10. C. Ridderstom and J. Ingvast ., Quadrupe posture control based on simple force distribution-a notion and a trial // *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*. Mad, Hawaii, USA (2001). P. 2326-2331.

11. Wai Mar Myint, Theingi., Kinematic Control of Pick and Place Robot Arm // *International Journal of Engineering and Techniques*. July – Aug 2015. Vol. 1. Is. 4. P. 63 – 70.

12. Smita A. Ganjare, V S Narwane and Ujwal Deole., Kinematic Modeling of Quadrupe Robot // *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*. 2013. Vol. 2, is. 4. P. 21 – 26.

13. Emmanuel Dean-Leon, Suraj Nair and Alois Knoll., User friendly MatLab-toolbox for symbolic robot dynamic modeling used for control design 2013. URL: // <http://ieeexplore.ieee.org/document/6491292/>

14. Ahmed Kharidege, Ding Jianbiao, Yajun Zhang., Performance Study of PID and Fuzzy Controllers for Position Control of 6 DOF arm Manipulator with Various Defuzzification Strategies // *MATEC Web of Conferences* **77**, 01011 (2016),pp 1 - 6.

15. Adrian-Florin NICOLESCU, Florentin-Marian ILIE and Tudor-George ALEXANDRU., forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameter's modeling // *Proceedings in Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 10, is. 4. P. 157–164.

16. Krzysztof Tcho'n, *Member IEEE.*, Optimal Extended Jacobian Inverse Kinematics Algorithms for Robotic Manipulators // *IEEE Transactions on robotics*. 2008. Vol. 24, № 6. P. 1440 - 1552.

17. Анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, О.В. Емельянова, А.С. Яцун, Р.Н. Турлапов. Курск, 2015. С. 32 – 37.

18. Яцун С. Ф. Савин С. И., Кинематический анализ многозвенового робота для перемещения в трубопроводах // *Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст. Ч. 2. Курск, 2014. С. 256–266.*

19. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С., Кинематический анализ движения руки в локтевом суставе при реабилитации методами механотерапии // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, №4(4). С. 1215-1220.

*Поступила в редакцию 25.07.18*



UDC 531.1

**S.F. Jatsun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)  
(e-mail: teormeh@inbox.ru)

**Yan Naing Soe**, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk, Russia)  
(e-mail: boyan.243@gmail.com)

## KINEMATIC AND JACOBIAN ANALYSIS APPROACH FOR THE FOUR-LEGGED ROBOT

*This paper presents forward kinematics, inverse kinematics and Jacobian analysis of four-legged robot research. The kinematics analysis is the main problem of the legged robot. The four-legged robots are very complex more than wheeled robots. In this study, the four-legged robot of each leg calculates Denavit-Hartenberg (D-H) method, that is used for forward kinematics and the inverse is used the geometrical and mathematical methods. The Kinematic divided into two categories Forward Kinematic and Inverse Kinematics. The forward kinematic is calculated we knew the leg of endpoint position for the angles ( $\theta_1, \theta_2$  and  $\theta_3$ ). Inverse kinematics is used to compute the joint angles which will achieve a desired position and orientation of the end-effector relative to the base frame. The Jacobian is one of the most important analyses for controlling smooth trajectory planning and execution in the derivation of the dynamic equation of robot motion. For calculation is used MATLAB software and robot modeling is used Simulink toolbox in MATLAB software. A program is obtained that calculate joint of angular velocity and angles to move from the desired position to target position. In this study are given different angular velocity and angle of the endpoint of the leg. The work mainly focuses on mechanical design, calculation of kinematic analysis, Jacobian function and experiment data of four-legged robots in MATLAB simulation.*

**Key words:** Forward kinematics; Inverse kinematics; Jacobian analysis; four-legged robots; D-H parameter, MATLAB; Simulation and Simulink.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-4-32-41

**For citation:** Jatsun S.F., Yan Naing Soe. Kinematic and Jacobian Analysis Approach for the Four-Legged Robot. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 32-41 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. Jacun S.F., Chzho P'o Vej, Mal'chikov A.V., Tarasova E.S. Matematicheskoe modelirovanie mobil'nogo gusenichnogo robota. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6.

2. Gor M. M., Pathak P. M., Yang J.-M., Dynamic Modeling and Simulation of Compliant Legged Quadruped Robot. Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013), IIT Roorkee, India, Dec 18-20 2013, pp 7 – 11.

3. Muhammed Arif Sen, Veli Bakircioglu, and Mete Kalyoncu., Inverse Kinematic Analysis Of A Quadruped Robot. *International journal of scientific & technology research*, september 2017, vol. 6, is. 09, pp. 285 – 289.

4. Zielinska T., John Heng. Mechanical design of multifunctional quadruped. *Mechanism and Machine Theory*, 2003, 38, pp. 463 - 478.

5. Song S. M., Waldron K. J., *Machines that walk: The adaptive suspension vehicle*, MIT Press, Cambridge, 1989.

6. Mary Anne Simpson., Boston Dynamics: Quadruped Rough Terrain Robot Prototype (2008, March 27). 2017, pp 1 – 2. URL: <https://phys.org/news/2008-03-boston-dynamics-quadruped-rough-terrain.html>.

7. Nancy Owano, Boston Dynamics unwraps military robot AlphaDog (w/ video) (2011, October 3). 2017, pp 1 – 2. URL: <https://phys.org/news/2011-10-boston-dynamics-unwraps-military-robot.html>.

8. Robert F. Battaglia. Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary

Stair-Climbing. M.E. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, May 1999.

9. Berns K., Ilg W. Mechanical construction and computer architecture of the four-legged walking machine BISAM. ASME Transactions on Mechatronics, 1999, no. 4 (1), pp. 32-38.

10. Ridderstom C., Ingvast J. Quadruped posture control based on simple force distribution—a notion and a trial. IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Mad, Hawaii, USA, 2001, pp. 2326-2331.

11. Wai Mar Myint, Theingi., Kinematic Control of Pick and Place Robot Arm. International Journal of Engineering and Techniques, July – Aug 2015, vol. 1, is. 4, pp. 63 – 70.

12. Smita A. Ganjare, V S Narwane and Ujwal Deole., Kinematic Modeling of Quardruped Robot. International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME), 2013, vol. 2, iss. 4, pp. 21 – 26.

13. Emmanuel Dean-Leon, Suraj Nair and Alois Knoll., User friendly MatLab-toolbox for symbolic robot dynamic modeling used for control design 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6491292/>.

14. Ahmed Kharidege , Ding Jianbiao, Yajun Zhang ., Performance Study of PID and Fuzzy Controllers for Position Control

of 6 DOF arm Manipulator with Various Defuzzification Strategies. MATEC Web of Conferences 77, 01011 (2016), pp. 1 - 6.

15. Adrian-Florin NICOLESCU, Florentin-Marian ILIE and Tudor-George ALEXANDRU., forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameter's modeling. Proceedings in Manufacturing Systems, 2015, vol. 10, is. 4, pp. 157–164.

16. Krzysztof Tcho'n, Member IEEE., Optimal Extended Jacobian Inverse Kinematics Algorithms for Robotic Manipulators. IEEE transactions on robotics, december 2008, vol. 24, no. 6, pp. 1440 - 1552.

17. Jacun S.F., Savin S.I., Emel'janova O.V. Jacun A.S., Turlapov R.N. Analiz konstrukcij, principy sozdanija, osnovy modelirovanija. Kursk, 2015, pp. 32 – 37.

18. Jacun S. F. Savin S. I., Kinematicheskij analiz mnogozvennogo robota dlja peremeshhenija v truboprovodah. Upravljaemye vibracionnye tehnologii i mashiny. Cb. nauch. st. Ch. 2. Kursk, 2014, pp. 256–266.

19. Jacun, S.F. Tarasova E.S., Kinematicheskij analiz dvizhenija ruki v loktevom sustave pri reabilitacii metodami mehanoterapii. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4(4), pp. 1215-1220.