

УДК 519.85

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

© 2022 Л.А. Рыбак*, Д.И. Малышев, Е.В. Гапоненко, В.С. Перевузник, А.А. Волошкин

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, Белгород, 308012, Россия

**e-mail: rl_bgtu@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки: 28.11.2022

Принята к публикации: 13.12.2022

Подвижные платформы на основе гексаподов имеют широкую распространенность и используются в различных сферах: динамические тренажеры, роботы-манипуляторы, системы ориентации. При проектировании таких систем используется компьютерное моделирование, и важным вопросом являются создание имитационной модели системы управления гексаподом и оценка возникающих ошибок позиционирования. В статье представлена имитационная модель робота-гексапода, разработанная в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Представлено математическое описание модели гексапода, схема робота в программе MATLAB, а также алгоритм извлечения ошибок между заданными и полученными координатами и углами центра платформы. Показаны диаграммы изменения положения центра платформы, ошибок позиционирования штанг и усилия, приложенные к каждой штанге за определенный период времени для измерения точности позиционирования гексапода.

Ключевые слова: гексапод, платформа Стюарта, линейный привод, MATLAB, Simulink, имитационная модель гексапода.

DOI: 10.26583/vestnik.2022.7

ВВЕДЕНИЕ

Роботы параллельной структуры имеют приоритет по сравнению с традиционными механизмами последовательной структуры [1], основными преимуществами которых является высокая грузоподъемность и скорость перемещения. В статье [2] рассматриваются различные конфигурации механизмов параллельной структуры, методы их синтеза и их свойства. В таких механизмах могут появляться особые положения, при которых движение робота становится невозможным и теряется управляемость, что может привести к аварийной ситуации. Поэтому для исключения особых положений возникает задача анализа рабочего пространства. Существуют граничные особые положения и внутренние особые положения [3]. В работе [4] подробно рассмотрены кинематическое моделирование, анализ особенностей и жесткости параллельного манипулятора 3-DOF.

Известно, что, в отличие от последовательных манипуляторов, прямая кинематическая карта параллельных манипуляторов включает нелинейные уравнения с высокой степенью

связи, вывод решения которых в замкнутом виде является реальной проблемой. Решение в замкнутом виде подробно получено для якобиана механизма, а анализ сингулярности манипулятора выполняется на основе вычисленного якобиана.

Сферы применения параллельных механизмов все время расширяются [5–7]. Обновляемые списки параллельных механизмов представлены в [8–9]. Параллельный механизм типа «гексапод» впервые был использован в 1950-х гг. в устройстве для тестирования шин, разработанном Гауфом. Авиационные симуляторы, основанные на параллельных механизмах, были созданы в 1962 г. Подвижная платформа Гауфа-Стюарта является механизмом с параллельной кинематикой и широко применяется для проектирования роботов-манипуляторов, ориентации поверхностей радиотелескопов, создания динамических стендов для обучения водителей и пилотов самолетов (рис. 1), координатно-измерительных машин [6], а также для испытаний бортовых систем самолетов.

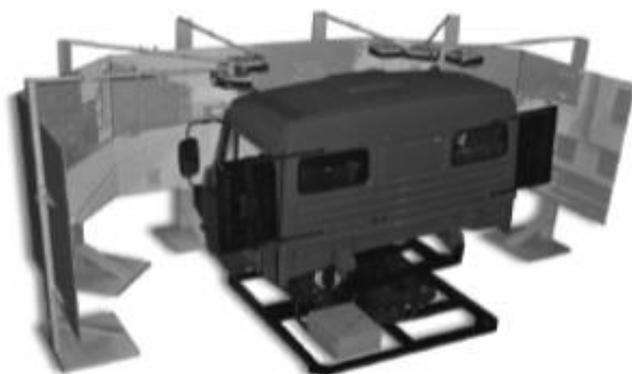
К преимуществам подвижных платформ на базе гексапода можно отнести то, что они об-

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

ладают повышенной подвижностью и помимо угловых ускорений могут имитировать также линейные ускорения в вертикальной, продольной и поперечной плоскостях.

Кинематика шарнирных плоских связей рассмотрена в статье [10], где предложен новый алгоритм кинематики в винтовых координатах, который подходит для разработки числовых программ для прямой и обратной кинематики в одних и тех же процедурах, включая

скорость, перемещение и ускорение, которые предоставляют фундаментальную информацию для динамики соединения. Динамическая платформа подвижности на базе гексапода состоит из неподвижного основания, шести штанг с линейными приводами и подвижной платформы.



а



б

Рис. 1. Автомобильные тренажеры на базе реальных кабин автомобилей:
а) тренажер автомобиля КамАЗ; *б)* тренажер вождения легковых автомобилей

Проектирование подобных механизмов не представляется возможным без использования средств компьютерного моделирования [11], которые дают возможность оценить конструктивные, структурные и алгоритмические решения. Для проектирования динамической платформы подвижности необходимо составить математическую модель [12] с целью оценки качества управления и синтеза регуляторов, выполняющих цели управления. В работе [13] рассмотрен процесс создания имитационной модели системы управления линейным приводом гексапода. В процессе отработки тестовых траекторных воздействий произведен анализ режимов управления при статической нагрузке привода. Была определена максимальная скорость, реализуемая системой управления. Сделан вывод, что применение векторного метода управления шаговым приводом позволяет снизить ошибки в линейном приводе в отличие от пошагового и микрошагового методов.

Основной целью работы являются создание имитационной модели системы управления динамической платформой подвижности

на базе гексапода и оценка возникающих ошибок позиционирования подвижной платформы.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕКСАПОДОМ В СРЕДЕ MATLAB

Для определения ошибок, возникающих в системе управления динамической платформой подвижности на базе гексапода, была создана 3D-модель данного робота в САПР системе Solidworks (рис. 2). Для упрощения моделирования было принято: сферические шарниры считались идеальными, зазоры в конструкции отсутствовали, упругость стержней не учитывалась. На рисунке: 1 – платформа; 2 – основание динамической платформы подвижности. 3D-модель динамической платформы подвижности построена по следующим размерам: диаметр подвижной платформы – 400 мм; диаметр неподвижного основания – 650 мм; длина стержней – 600 мм. При использовании SimMechanics CAD translator 3D-модель динамической платформы подвижности на базе гексапода была импортирована в MATLAB [14].

В программе MATLAB выполнено математическое моделирование динамической платформы подвижности, которая изображена на схеме в виде блока 3 (рис. 3). С платформы передаются данные о положении (position) и скорости (velocity) изменения длин штанг.

Координаты и углы центра верхней платформы $x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \psi_0, \chi_0$ подаются на вход в блок 1 Leg Trajectory. x_0, y_0, z_0 – поступательные перемещения вдоль осей X, Y, Z; $\varphi_0, \psi_0, \chi_0$ – углы поворотов относительно этих осей.

Принимаем следующие значения углов: $\varphi_0 = 0^\circ, \psi_0 = 0^\circ, \chi_0 = 0^\circ$. Проводим перерасчет координат углов и центра платформы в изменение длин штанг платформы подвижности $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$. Схема процесса пересчета приведена на рис. 4. С помощью формул Эйлера углы поворота центра платформы преобразуются в изменения длин штанг [15].

Перемещения, полученные с помощью формул Эйлера, затем суммируются с матри-

цей перемещения I , и результирующие линейные перемещения центра масс платформы преобразуются в изменения длины штанг в блоке 2 (рис. 5).



Рис. 2. 3D-модель динамической платформы подвижности в Solidworks

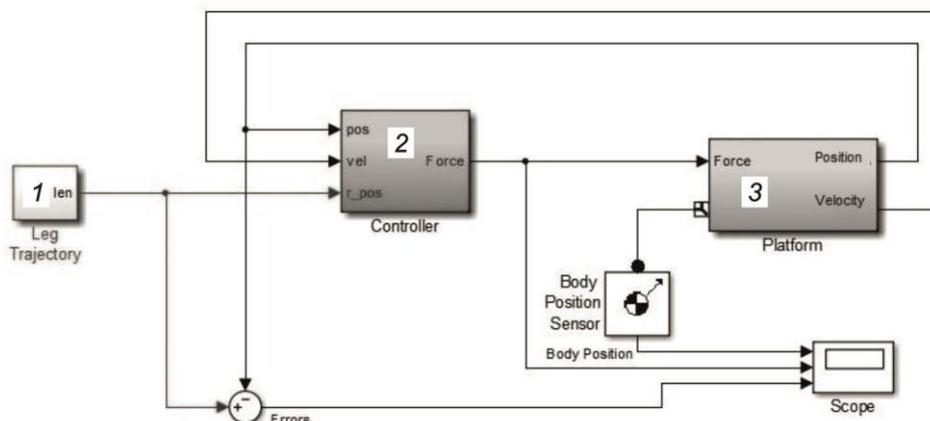


Рис. 3. Схема системы управления динамической платформой подвижности в MATLAB

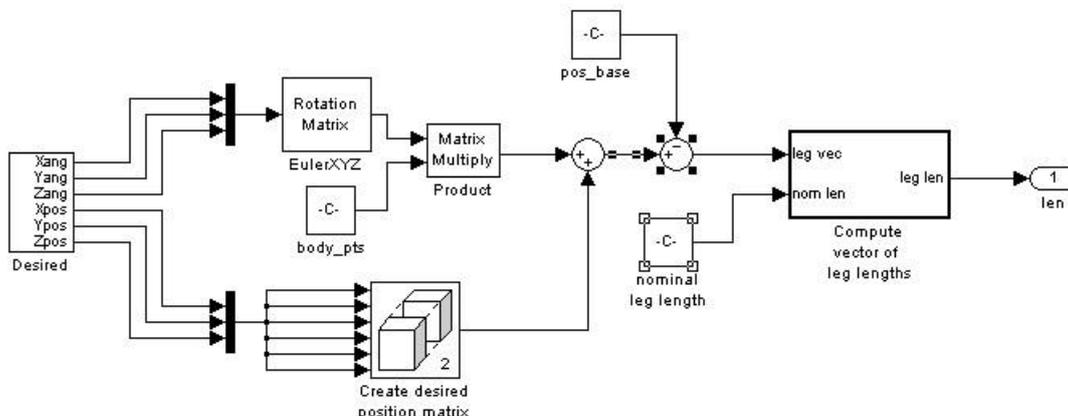


Рис. 4. Схема пересчета координат и углов центра платформы в изменение длин штанг динамической платформы подвижности

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

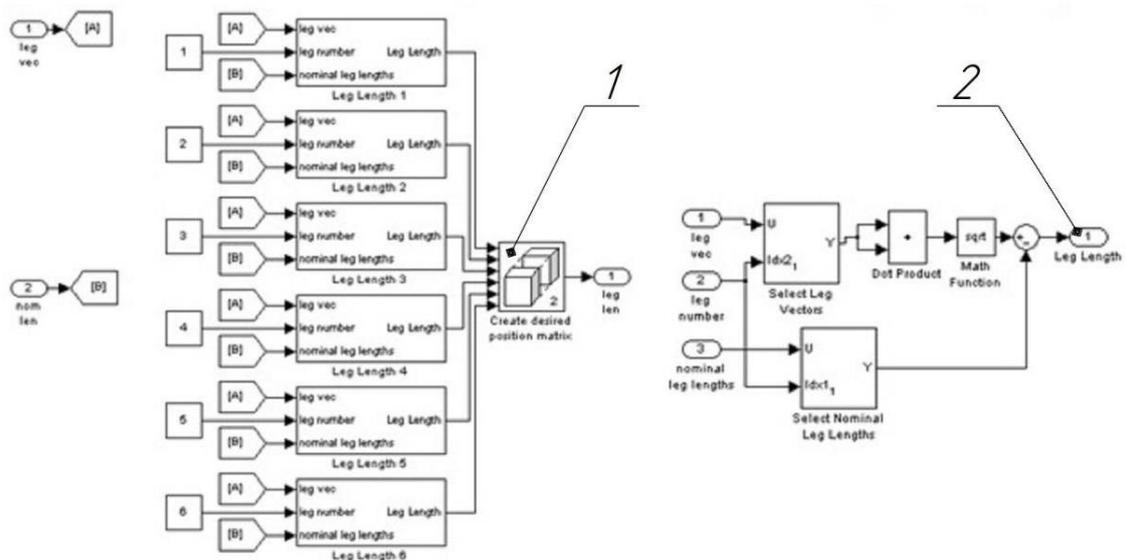


Рис. 5. Схема преобразования линейных перемещений в изменения длин штанг

Длины штанг $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ подаются на двигатели вместе с напряжениями, и на выходе получаем значения длин штанг $l'_1, l'_2, l'_3, l'_4, l'_5, l'_6$. При моделировании полученное требуемое значение длины штанг сравнивается с текущим значением и подается в систему управления, которая генерирует значение силы, приложенной к приводам штанг. Каждая штанга гексапода в программе MATLAB представлена моделью (рис. 6). Блоки ActuatorAssm 1-1 ... ActuatorAssm 6-1 поз. 1 представляют собой модель каждой штанги платформы [16].

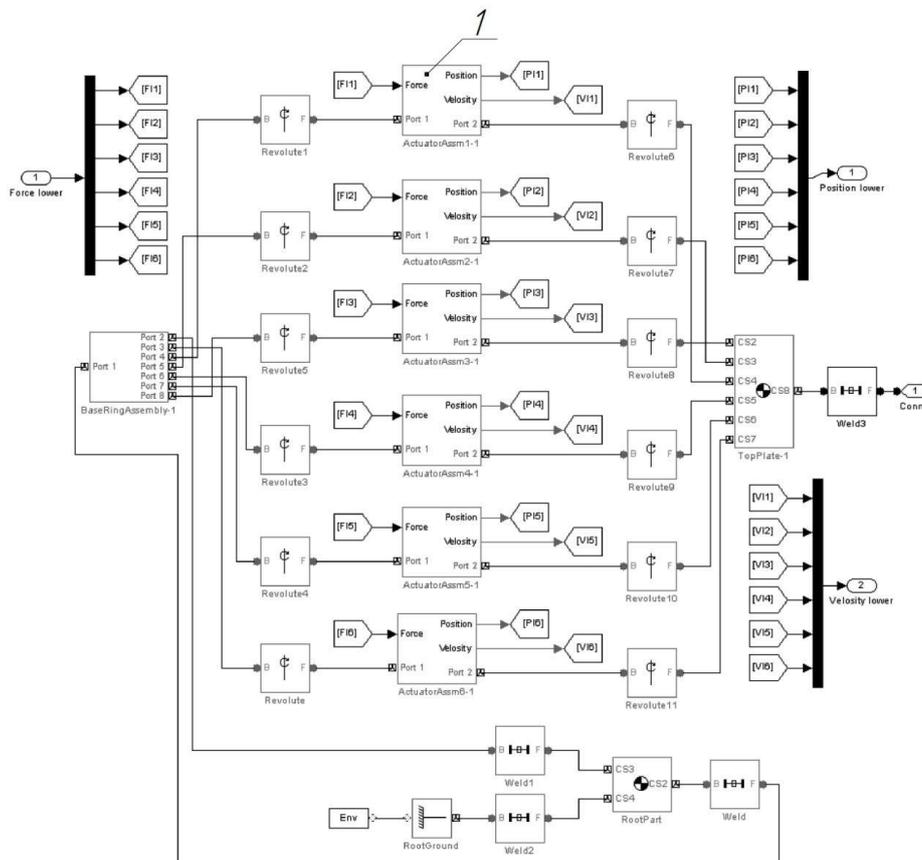


Рис. 6. Схема динамической платформы подвижности в Matlab

Затем измененные значения длин штанг $l_1', l_2', l_3', l_4', l_5', l_6'$ преобразуются в значения координат и углы центра платформы $x_0', y_0', z_0', \varphi_0', \psi_0', \chi_0'$. В этом случае возникают ошибки позиционирования между указанными координатами и углами центра платформы и углами, определенными при моделировании. Алгоритм поиска ошибок показан на рис. 7.

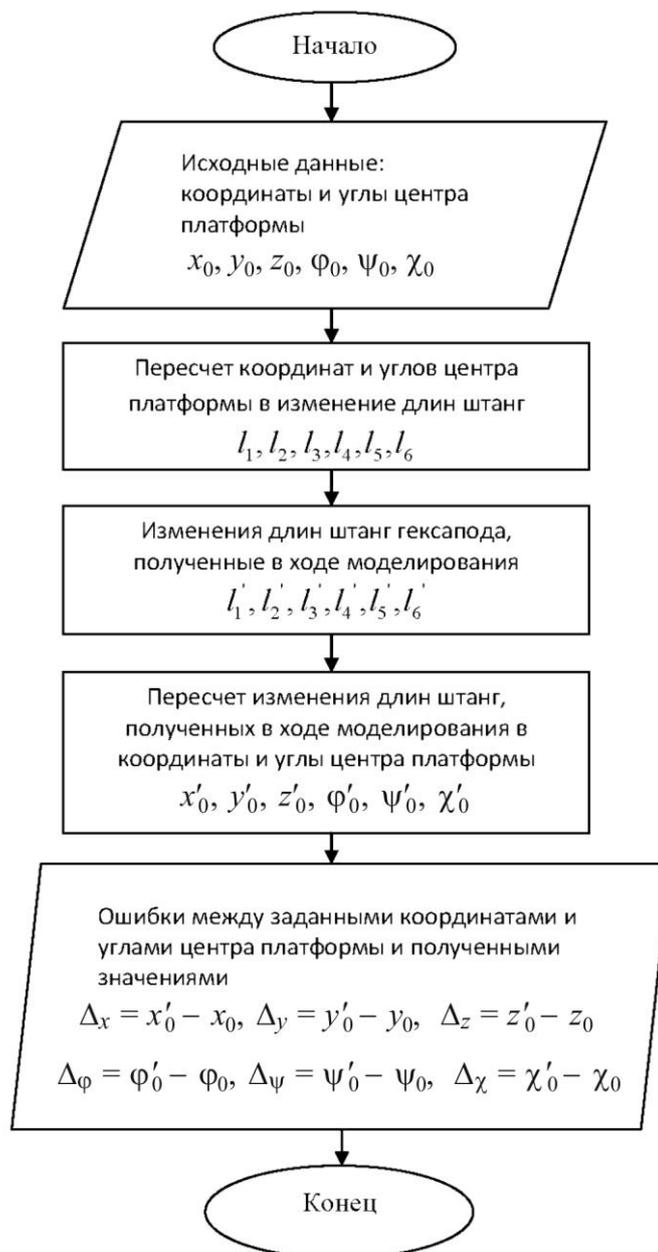


Рис. 7. Алгоритм определения ошибок координат и углов центральной точки платформы

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕКСАПОДА

При моделировании динамической платформы подвижности на базе гексапода были определены следующие зависимости: на рис. 8 показаны графики периодических изменений положения координат центра платформы. x_0', y_0', z_0' обозначены кривые изменения положения центра платформы по координатам x, y, z .

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

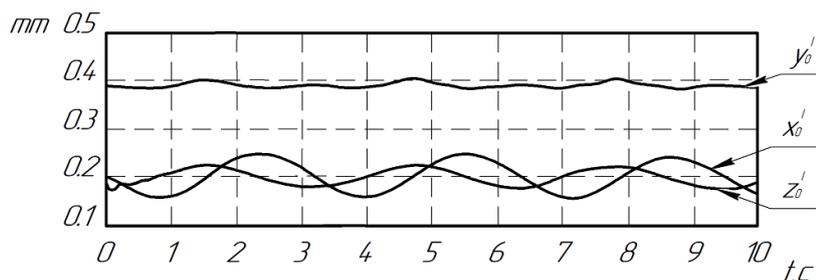


Рис. 8. Зависимость положения координат центра платформы от времени

На рис. 9 приведен график возникновения ошибок позиционирования штанг динамической платформы подвижности в определенный промежуток времени. Кривые Δx , Δy , Δz , $\Delta \phi$, $\Delta \psi$, $\Delta \chi$ показывают ошибки, возникающие между заданными и полученными координатами и углами центра платформы.

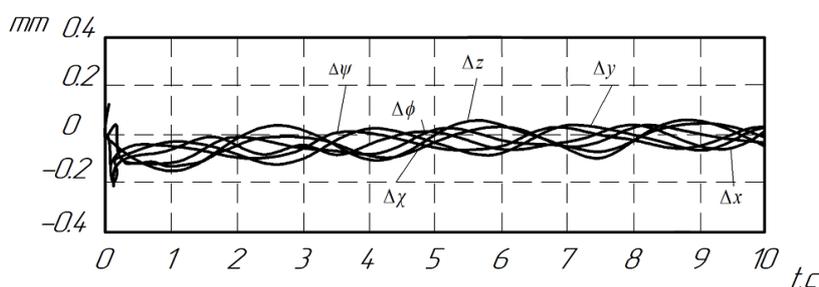


Рис. 9. Ошибки позиционирования штанг динамической платформы подвижности

На рис. 10 изображено изменение усилий, подаваемых на каждую штангу динамической платформы подвижности в определенный промежуток времени. Кривыми $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$, показаны графики усилий, подаваемых на каждую штангу гексапода в диапазоне времени от 0 до 10 с.

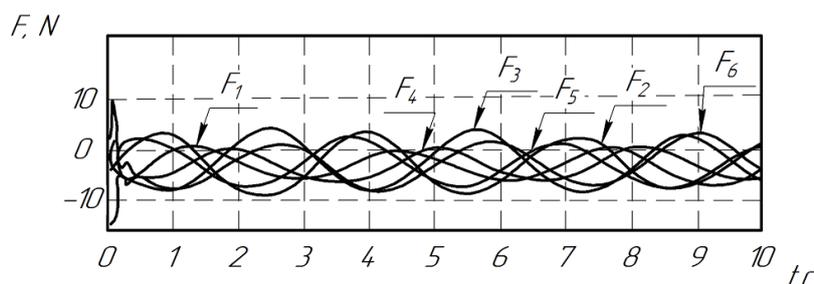


Рис. 10. Зависимость усилий на штангах динамической платформы подвижности от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм определения отклонений между заданными и полученными значениями координат и углов центра динамической платформы подвижности. При моделировании была построена имитационная модель платформы подвижности на базе гексапода в программе MATLAB, построены графики ошибок позиционирования штанг платформы подвижности и силы, приложенные к каждой штанге. Ошибки позиционирования штанг связаны с ошибками системы управления платформы подвижности. В рамках даль-

нейшей работы по достижению оптимального регулирования планируется оптимизировать ПИД-регулятор блока формирования длины штанги, а также скорректировать коэффициенты пропорциональной интегральной составляющей ПИД-регулятора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614, <https://rscf.ru/project/22-29-01614>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merlet J.-P. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000.
2. Lee Chung-Ching, Hervé Jacques. Translation-parallel manipulators with doubly planar limbs // Mechanism and Machine Theory, 2006. Vol. 24(4). P. 433–455, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.06.006.
3. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control // Stanford University: Stanford, CA, USA. 2018. P. 105–108.
4. Sadjadian H., Taghirad Hamid. Kinematic, singularity and stiffness analysis of the hydraulic shoulder: A 3-d.o.f. redundant parallel manipulator // Advanced Robotics. 2006. Vol. 20. P. 763–781, doi: 10.1163/15685530677681366.
5. Birglen L., Gosselin C.M., Pouliot N., B. Mon-sarrat, Laliberté Shade T.A. A new 3-DOF haptic device // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. Vol. 18. № 2. P. 166–175.
6. Rolland L. About parallel robots. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.loria.fr/~rolland/аpropos eng. html>, 2002 (дата обращения: 11.07.2022).
7. Синтез системы управления одно- и двух-секционного манипуляторов с параллельной кинематикой. Л.А. Рыбак, А.В. Чичварин, Ю.А. Мамаев, Е.В. Гапоненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел. 2012. № 2–6 (292). С. 60–68.
8. Bonev I. Bibliography on parallel mechanisms. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.robotics.org>, 2002 (дата обращения: 11.07.2022).
9. Merlet J.-P. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
10. Stewart D.A. Platform with Six Degrees of Freedom // UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings. 1965–1966. Vol. 180 (1). № 15.
11. Шестиосевые координатно-измерительные машины. [Электронный ресурс]. URL: <http://lapic.ru> (дата обращения: 11.07.2022).
12. Bratovanov N. Robot modelling. Motion and off-line programming based on solidworks API // Third IEEE International Conference on Robotic Computing – IRC, 2019. P. 574–579.
13. Wu Z., Wang H., Zhang Y., Ai A. Robot physical modeling based on Matlab/Simulink // Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 2113(1). P. 1–6.
14. Имитационное моделирование системы управления линейным приводом гексапода космического назначения. Ю.А. Жуков, А.В. Мороз, Е.Б. Коротков, В.В. Жукова // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. С. 42–50.
15. Синтез системы управления одно- и двух-секционного манипуляторов с параллельной кинематикой. Л.А. Рыбак, А.В. Чичварин, Ю.А. Мамаев, Е.В. Гапоненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. Т. 292. № 2–6. С. 60–68.
16. Мамаев Ю.А., Рыбак Л.А. Построение математической и имитационной модели динамики гексапода // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. Сб. науч. ст.: в 2 ч. Курск. 2014. Т. 2. С. 294–300.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no. 5, pp. 358–365

**SIMULATION MODEL OF THE CONTROL SYSTEM
OF A DYNAMIC MOBILITY PLATFORM BASED ON A HEXAPODE
FOR TRAINING COMPLEXES**

L.A. Rybak*, D.I. Malyshev, E.V. Gaponenko, V.S. Pervuznik, A.A. Voloshkin
Belgorod State Technological University.
V.G. Shukhov, Belgorod, 308012 Russia

Received August 31, 2022; revised November 28, 2022; accepted December 13, 2022

Mobile platforms based on hexapods are widespread and are used in various fields: dynamic simulators, robot manipulators, orientation systems. When designing such systems, computer modeling is used and an important issue is the creation of a simulation model of the hexapod control system and the assessment of the resulting positioning errors. The article presents a simulation model of a hexapod robot developed in the SolidWorks computer-aided design system. A mathematical description of the hexapod model, a robot diagram in the MATLAB program, as well as an algorithm for extracting errors between the given and received coordinates and angles of the center of the platform are presented. Diagrams of the change in the position of the center of the platform, the positioning errors of the rods and the efforts applied to each rod over a certain period of time to measure the positioning accuracy of the hexapod are shown.

Keywords: hexapod, Stewart platform, linear drive, MATLAB, Simulink, hexapod simulation model

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
ПОДВИЖНОСТИ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

REFERENCES

1. *Merlet J.-P.* Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000.
2. *Lee Chung-Ching, Hervé Jacques.* Translation-parallel manipulators with doubly planar limbs. *Mechanism and Machine Theory*. 2006. V. 24(4). P. 433–455, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.06.006.
3. *Craig J.J.* Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Stanford University: Stanford, CA, USA. 2018. P. 105–108.
4. *Sadjadian H., Taghirad Hamid.* Kinematic, singularity and stiffness analysis of the hydraulic shoulder: A 3-d.o.f. redundant parallel manipulator. *Advanced Robotics*. 2006. Vol. 20. P. 763–781. doi: 10.1163/156855306777681366.
5. *Birglen L., Gosselin C.M., Pouliot N., B. Monsarrat, Laliberté Shade T.A.* A new 3-DOF haptic device. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2002. Vol. 18. № 2. P. 166–175.
6. *Rolland L.* About parallel robots. Available at: http://www.loria.fr/~rolland/apropos_eng.html, 2002 (accessed: 11.07.2022).
7. *Rybak L.A., Chichvarin A. V., Mamaev YU.A., Gaponenko E.V.* Sintez sistemy upravleniya odno- i dvuhsekcionnogo manipulyatorov s parallel'noj kinematikoj [Synthesis of the control system of one- and two-section manipulators with parallel kinematics]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel. № 2–6 (292). P. 60–68.
8. *Bonev I.* *Bibliography on parallel mechanisms*. Available at: <http://www.robotics.org>, 2002 (accessed: 11.07.2022).
9. *Merlet J.-P.* Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
10. *Stewart D.A.* Platform with Six Degrees of Freedom. UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings, 1965–1966. Vol. 180 (1). № 15.
11. *Shestiosevye koordinatno-izmeritel'nye mashiny [Six-axis coordinate measuring machines]*. Available at: <http://lapic.ru> (accessed: 11.07.2022).
12. *Bratovanov N.* Robot modelling. Motion and off-line programming based on solidworks API. Third IEEE International Conference on Robotic Computing – IRC, 2019. P. 574–579.
13. *Wu Z., Wang H., Zhang Y., Ai A.* Robot physical modeling based on Matlab/Simulink. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2113(1). P. 1–6.
14. *Zhukov YU.A., Moroz A.V., Korotkov E.B., Zhukova V.V.* Imitacionnoe modelirovanie sistemy upravleniya linejnym privodom geksapoda kosmicheskogo naznacheniya [Simulation modeling of the control system of a linear hexapod drive for space purposes]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2018. P. 42–50.
15. *Rybak L.A., Chichvarin A.V., Mamaev YU.A., Gaponenko E.V.* Sintez sistemy upravleniya odno- i dvuhsekcionnogo manipulyatorov s parallel'noj kinematikoj [Synthesis of the control system of one- and two-section manipulators with parallel kinematics]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2012. Vol. 292. № 2–6. P. 60–68.
16. *Mamaev YU.A., Rybak L.A.* Postroenie matematicheskoy i imitacionnoj modeli dinamiki geksapoda [Construction of a mathematical and simulation model of hexapod dynamics]. *Vibracionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny*. Sb. nauch. st. Kursk. 2014. Vol. 2. P. 294–300.