

Научная статья
УДК 621.865.8-8

Оптимизация конструктивных характеристик роботов-гексаподов с использованием метода роя частиц и метода конечных элементов

Жанна Анатольевна Старостина¹ Алдин Ариж Зейн²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹anstar13@yandex.ru

²areej.zainaldeen.93@gmail.com

Аннотация. Гексаподы, или шестиногие параллельные манипуляторы, находят применение во многих областях, требующих высокой точности и стабильности, таких как аэрокосмическая техника, медицинские приборы и роботизированные системы. Их производительность и надежность могут быть улучшены путем разработки максимально точных моделей и их оптимизации. В статье представлен новый подход, использующий комбинацию PSO с МКЭ для оптимизации конструктивных характеристик гексаподов. Предполагается, что это исследование поможет повысить точность, эффективность и общую производительность гексапода за счет использования возможностей PSO для оптимизации МКЭ и для детального моделирования. В этом исследовании метод конечных элементов и методы оптимизации роя частиц будут интегрированы для оптимизации конструктивных характеристик робота гексапод.

Интеграция модели МКЭ в процесс оптимизации на основе PSO обеспечит системный и всесторонний способ повышения точности, эффективности и общей производительности роботов гексапод. Концепция решения будет способна реализовать весь потенциал, которым обладает технология гексапод, за счет использования сильных сторон МКЭ в детальном структурном анализе и эффективности метода PSO в оптимизации, что позволит расширить ее применение в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: роботы гексапода, особенности конструкции гексаподов, оптимизация конструкций гексаподов, метод роя частиц, метод конечных элементов.

Для цитирования: Старостина Ж. А., Зейн Алдин А. Оптимизация конструктивных характеристик роботов-гексаподов с использованием метода роя частиц и метода конечных элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 4 (42).

Original article

Optimization of the design characteristics of Hexapods using the particle swarm method and the finite element method

Zhanna A. Starostina¹, Aldin A. Zein²,

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹anstar13@yandex.ru

²areej.zainaldeen.93@gmail.com

Abstract. Hexapods, or six-legged parallel manipulators, are used in many areas requiring high precision and stability, such as aerospace engineering, medical devices and robotic systems. Their performance and reliability can be improved by developing the most accurate models and optimizing them. The article presents a new approach using a combination of PSO and FEM to optimize the design characteristics of hexapods. It is expected that this study will help to improve the accuracy, efficiency and overall performance of the hexapod by using the capabilities of the PSO to optimize the FEM and for detailed modeling. In this study, the finite element method and particle swarm optimization methods will be integrated to optimize the design characteristics of the hexapod robot.

It is assumed that the integration of the FEM model into the PSO-based optimization process will provide a systematic and comprehensive way to improve the accuracy, efficiency and overall performance of hexapod robots. The solution concept should be able to realize the full potential of hexapod technology by using the strengths of FEM in detailed structural analysis and the effectiveness of the PSO method in optimization, which will expand its application in various industries.

Keywords: hexapod robots, hexapod design features, hexapod design optimization, particle swarm method, finite element method.

For citation: Starostina Zh. A., Zein Aldin A. Optimization of the design characteristics of Hexapods using the particle swarm method and the finite element method. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. № 4 (42).

Актуальность

Стремительный прогресс в области робототехники и, в частности, появление нового поколения гексаподов или шестиногих параллельных манипуляторов пролили свет на некоторые отрасли промышленности благодаря их исключительной стабильности и точности. Гексаподы являются не только важным семейством роботов – эти системы обладают рядом

существенных преимуществ, например, они способны передвигаться по труднопроходимой местности и поэтому могут использоваться в критических районах, подверженных сейсмическим явлениям.

Присущая гексаподам сложность, особенно с учетом их кинематики, динамики и особенностей, традиционно препятствовала их применению в крупномасштабной промышленности, исключая те виды деятельности, которые требуют очень высокой точности и обработки значительных нагрузок. Традиционные методы проектирования, как правило, чрезмерно упрощают сложные взаимозависимости между многими структурными параметрами и часто приводят к неоптимальным эксплуатационным характеристикам в чувствительных областях применения.

Для улучшения конструктивных характеристик роботов гексаподов в нашем исследовании применены интегрированные методы PSO-МКЭ (Метод роя частиц – Метод Конечных Элементов) путем максимального использования взаимодополняющих компетенций МКЭ и PSO, что позволяет преодолеть недостатки традиционных методов проектирования и делать более реалистичные и подробные прогнозы поведения гексаподов при различных условиях нагружения.

Таким образом, будет создана надежная и гибкая платформа проектирования, которая может значительно повысить точность, эффективность и функциональность систем гексаподов. Основное внимание будет уделено синергетической реализации передовых методов моделирования и оптимизации, которые позволят проектировщикам исследовать обширное пространство проектирования, оценить большое количество вариантов проектирования и определить оптимальную конфигурацию гексапода, которая с максимальной точностью будет соответствовать требуемым критериям производительности. Объединение сильных сторон МКЭ, позволит проводить детальный структурный анализ, возможности PSO по глобальной оптимизации, позволяющие находить очень

сложные взаимосвязи между различными параметрами конструкции и в конечном итоге получать оптимальные конфигурации, соответствующие конкретным промышленным требованиям.

Основная часть

Роботы типа гексапод обладают превосходной стабильностью, точностью и грузоподъемностью, что делает их очень подходящими для применения в аэрокосмической технике, медицинских приборах, при спасении людей в горах, военном производстве. Однако для их полного применения в промышленных условиях, связанных со сложными задачами, такими как точная механическая обработка, или даже с операциями в условиях повышенной напряженности, например в сейсмических зонах, существуют огромные трудности.

В таких условиях, во-первых, уровни нагрузки непостоянны, а во-вторых, они непредсказуемы. Таким образом, обычные гексаподы, отвечающие требованиям к некоторым условиям эксплуатации, безусловно, не учитывают эти факторы, и это может привести к снижению точности, износу или даже выходу из строя при сейсмических, ударных нагрузках, следовательно эффективная динамическая конструкция гексапода является ключом к повышению степени адаптации к занимаемой площади.

Отсутствие прочной и легко адаптируемой конструкции снижает эффективность гексапода в промышленных условиях, где требуется высокая точность и устойчивость к внешним воздействиям. В связи с этим применение МКЭ помогает разбить сложные структурные и механические проблемы на более мелкие, дискретные управляемые элементы, с помощью метода конечных элементов можно будет прогнозировать напряжение, деформацию, чтобы можно было оценить характеристики их конструкции при различных нагрузках и граничных условиях.

Традиционная методология проектирования может не учитывать должным образом сложное взаимодействие между различными

структурными параметрами. В этом отношении данное исследование объединяет PSO с МКЭ, чтобы улучшить процесс оптимизации взаимодействия элементов гексапода.

МКЭ используется в рамках усовершенствованной системы оптимизации PSO для обеспечения существенного повышения точности, эффективности и эксплуатационных характеристик гексаподов в критически важных промышленных приложениях. Более общая цель состоит в том, чтобы спроектировать и затем внедрить надежный гексапод, способный надежно работать в неструктурированной среде; это расширило бы область применения и представило бы его как универсальное решение современных инженерных задач.

Использование усовершенствованной МКЭ-модели гексапод для создания наиболее оптимальных конструкций может более реалистично отображать его конструктивное поведение в различных условиях эксплуатации, оптимизация некоторых ключевых конструктивных параметров гексаподов для достижения желаемых показателей производительности с использованием PSO, подтвердить оптимизированную конструкцию гексаподов с помощью экспериментов и сравнения результатов моделирования. При разработке МКЭ-модели геометрия и построение сетки - это должно включать в себя комплексную МКЭ-модель гексапода. Это может быть разработано в любом инструменте, например таком как Matlab. Необходимо определить геометрию основания, опор, стыков и платформы, а также создать мелкую сетку для детального описания поведения, определить свойства материала, точно указать свойства материала для всех компонентов, составляющих модель, к ним относятся модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность. Определить граничные условия и нагрузки, соответствующие граничные условия и сценарии нагрузок, чтобы обеспечить моделирование условий эксплуатации с помощью статических нагрузок, динамических воздействий и тепловых воздействий.

Оптимизация рою частиц PSO происходит определение параметров, которые необходимо оптимизировать, включая геометрические размеры ножек, положение соединений, распределение материала и конструктивные особенности, например, толщину различных компонентов, далее определяем целевую функцию с точки зрения показателей производительности, например, наименьшая квадратичная деформация, максимальная общая жесткость или наименьший вес.

Реализовать алгоритм PSO можно в любой среде программирования, такой как Python, используя такие библиотеки, как «PySwarm». Это иницирует рой по случайному положению и скорости частиц, за которым следует вычисление целевой функции, и на каждой итерации позиции частиц обновляются на основе позиций, которые оказываются наилучшими для каждой частицы или наилучшими в глобальном масштабе. По сути, он инициализирует рой частиц, каждая из которых представляет одно потенциальное решение со случайным положением и скоростью, соответствующими входным параметрам. Во время каждой итерации частицы обновляют свое положение и значения скорости, основываясь на своем наиболее известном положении и наиболее известном положении своих соседей.

Пригодность каждой частицы оценивается с помощью определенной целевой функции. Целевая функция вычисляет соответствие конструкции шестигранника при моделируемых условиях нагрузки с использованием метода конечных элементов. В ходе этого итеративного процесса в каждом положении частицы будут обновляться, чтобы маневрировать в пространстве решений, и, наконец, все сводится к оптимальному набору конструктивных параметров.

Запуск PSO для получения оптимального набора параметров, отвечает критериям эффективности, необходимо определить сходимость и при необходимости скорректировать для точной и эффективной оптимизации.

Целевая функция для этой оптимизации будет настроена таким образом, чтобы максимизировать общую жесткость конструкции гексапода, следовательно, минимизировать податливость при приложенных нагрузках, что гарантирует, что гексапод сможет выдерживать большие нагрузки без существенной деформации. Математически эта целевая функция может быть выражена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{objective function (целевая функция)} &= \\ &= \frac{1}{\text{global stiffness (глобальная жесткость)}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \end{aligned}$$

где k_i – жесткость i -го элемента конструкции гексапода и общее количество элементов.

Входные параметры для оптимизации

Чтобы повысить жесткость гексапод, различные параметры определены как ключевые конструктивные переменные и заданы в качестве входных данных для алгоритма PSO. К ним относятся:

1. Длина опор (L_1, L_2, \dots, L_6): Сюда входит длина ножек гексапода, которая непосредственно влияет на устойчивость конструкции и распределение нагрузки.
2. Положение сочленений ног (J_1, J_2, \dots, J_6): Положение шарниров левого соединения с основанием и платформой влияет на кинематические и динамические характеристики гексапода.
3. Свойства материалов: модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материалов, используемых для изготовления компонентов гексапода, определяют их упругие и механические свойства.
4. Размеры поперечного сечения: диаметр или другие соответствующие размеры поперечного сечения опор гексапода влияют на момент инерции; следовательно, они влияют на жесткость.

5. Толщина компонентов (T_1, T_2, \dots, T_n): значения толщины различных конструктивных элементов, таких как основание, платформа и соединения, которые влияют на общую жесткость.

Точная МКЭ-модель гексапода может быть использована для прогнозирования характеристик конструкции в различных условиях. В результате такого анализа получаем оптимальный набор конструктивных параметров, улучшающий гексапод для минимальной деформации, максимальной жесткости и снижения веса.

MATLAB станет отправной точкой для этого исследования и сыграет фундаментальную роль в разработке многих аспектов оптимизации гексапода. Кроме того, MATLAB является высокоуровневым языком программирования и средой для численных вычислений, и этот выбор основан на том факте, что предлагаемые методологии могут быть удовлетворительно реализованы на нем. Для моделирования структурного поведения конструкции гексапода при различных условиях нагружения будет проведен конечно-элементный анализ, ставший возможным благодаря мощному программному обеспечению MATLAB. Инструментарий MATLAB optimization toolbox также должен использоваться для обеспечения возможности использования PSO в процессе проектирования, чтобы получить наиболее оптимальную конфигурацию гексапод с высокой эффективностью. Именно поэтому это исследование будет проводиться в среде MATLAB, поскольку она обладает обширной библиотекой математических функций и инструментов для визуализации, которые обеспечивают отличные возможности интеграции с другим программным обеспечением. Интегрированное и эффективное решение для улучшения конструктивных характеристик гексаподов с использованием синергетического применения методов МКЭ и PSO сможет предоставить исследователям среду MATLAB. Исследование направлено на достижение оптимальной конфигурации с использованием PSO в конструкции гексапод,

что значительно повысит точность и стабильность работа-манипулятора и делает его пригодным для использования в таких областях, как аэрокосмическая техника и медицинские устройств, спасение людей.

Заключение

В рамках предлагаемой методики будет разработана усовершенствованная МКЭ-модель конструкции шестигранника, позволяющая достаточно точно представить его сложное структурное поведение. PSO сможет эффективно исследовать пространство проектирования, определяемое тремя параметрами, оценивая множество вариантов проектирования с помощью моделирования методом конечных элементов. Благодаря возможностям FEM для детального анализа и глобальной оптимизации PSO, комплексный подход позволит повысить точность и эффективность работы гексаподов, а также расширит возможности ее применения в суровых условиях, таких как районы землетрясений, космос.

Исследования в этой области улучшат область точного машиностроения и помогут в разработке высокопроизводительных систем гексаподов, способных удовлетворить современные требования в области их применения.

Список источников

1. Акдаг, М. Интегрированный подход к моделированию мехатронной системы применительно к роботу hexapod / М. Акдаг, Х. Карагулле, Л. Малгача // Математика и вычислительная техника в моделировании. –2012. – № 82. – С. 818-835..
2. К Кушнир, А.П. Новые 3D технологии изготовления моделей / А.П. Кушнир, В.Б. Лившиц, Д.С. Кобзев // Информатика и технология: межвузовский сборник научных трудов. Выпуск XIX. – Москва: МГУПИ, 2013. – 263 с.
3. Павловский, В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1-32. – EDN RXRDQD.
4. Sorin, Mănoiu Olaru. Hexapod Robot Leg Dynamic Simulation and Experimental Control using Matlab / Mănoiu Olaru Sorin, Mircea Niñulescu // Proceedings of the 14th IFAC

Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, May 23-25, 2012. – Vol. 45, Issue 6. – P. 818-899. – DOI 10.3182/20120523-3-RO-2023.00335.

5. Si, F. Reverse dynamics of insects using natural orthogonal complement method / F. Si, R. Sinatra // *Journal for Production Systems*. – 2012. – № 2 (21).

6. Kinematic modeling and calibration of a flexure based hexapod nanopositioner / Hongliang Shia, Hai-Jun Sua, Nicholas Dagalakisb, John A. Kramar // *Precision Engineering*. – 2013. – Vol. 37(1). – P. 117-128. – DOI 10.1016/j.precisioneng.2012.07.006.

7. Parameterized finite element modeling and experimental modal testing for vibration analysis of an industrial hexapod for machining / Minh-Nha Pham, Henri Champliaud, Zhaoheng Liu, Ilian Bonev // *Mechanism and Machine Theory*. – 2022. – Vol. 167 (15). – 104502. – DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104502.

8. Tenreiro Machado, J.A. Complex-order particle swarm optimization / J.A. Tenreiro Machado, Seyed Mehdi Abedi Pahnehkolaei, Alireza Alfi // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2021. – 105448. – DOI 10.1016/j.cnsns.2020.105448.

9. Finite Element Analysis for Improved AllTerrain Vehicle Component Design / L.N. Patil, A.A. Patil, K. B. Waghulde [et al.] // *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*. – 2023. – Vol. 10, Issue 03. – P. 1508-1521. – DOI 10.5109/7151699.

10. Зейн, А. А. Кинематическая модель шестиопорного гексапода / А. А. Зейн, Ж. А. Старостина // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2024. – № 3(41). – EDN ISICEK.

References

1. Akdag M., Karagulle H., Malgacha L. *Matematika i vychislitel'naya tekhnika v modelirovanii*, 2012, no. 82, pp. 818-835.

2. Kushnir A.P., Livshits V.B., Kobzev D.S. *Informatika i tekhnologiya: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Vypusk XIX*, Moscow, MGUPI, 2013, 263 p.

3. Pavlovsky V.E. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*, 2013, no. 101, pp. 1-32.

4. Sorin M.O., Nitulescu M. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, 2012*, vol. 45, no. 6, pp. 818-899, DOI 10.3182/20120523-3-RO-2023.00335.

5. Si F., Sinatra R. *Journal for Production Systems*, 2012, no.2 (21).

6. Shia Hongliang, Sua Hai-Jun, Dagalakisb Nicholas, Kramar John A. *Precision Engineering*, 2013, vol. 37(1), pp. 117-128, DOI 10.1016/j.precisioneng.2012.07.006.

7. Minh-Nha Pham, Henri Champliaud, Zhaoheng Liu, Ilian Bonev. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, vol. 167 (15), 104502, DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104502.

8. Tenreiro Machado J.A., Seyed Mehdi Abedi Pahnehkolaei, Alireza Alfi.

Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2021, 105448, DOI 10.1016/j.cnsns.2020.105448.

9. Patil L.N., Patil A.A., Waghulde K.B., Patil S.A., Patil Y.M., Gadhawe S.L., Javanjal V.K, Jadhav S.S. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 2023, vol. 10, iss. 03, pp.1508-1521, DOI 10.5109/7151699.

10. Zeyn A.A., Starostina ZH. A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 3(41).

Рецензент: Г.В. Кустарев, канд. тех. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Старостина Жанна Анатольевна, канд. техн. наук, доц., МАДИ.
Зейн Алдин Ариж, аспирант, МАДИ.

Information about the authors

Starostina Zhanna A., Candidate of Sciences (Technical), associated professor, MADI.
Zein Aldin A., postgraduate, MADI.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 20.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 20.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.