Научная статья УДК 621.865.8-8

Методика расчета 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. В статье представлена методика расчета на основе комбинации метода роя частиц (МРЧ) и метода конечных элементов (МКЭ). Такая комбинация позволит наилучшим образом оптимизировать конструктивные характеристики роботовгексаподов. С помощью данной методики появится возможность детального моделирования, а интеграция МКЭ в процесс оптимизации на основе МРЧ создаст условия для системного и всестороннего способа повышения точности и эффективности работы гексапода. Также благодаря внедрению МКЭ-анализа в цикл оптимизации МРЧ алгоритм может эффективно исследовать пространство проектирования, руководствуясь отзывами о производительности, полученными в результате детального структурного анализа. Такое сочетание МРЧ и МКЭ позволяет определить оптимальные конструктивные параметры гексапода, которые отвечают требуемым критериям производительности, таким как вес и жесткость, с учетом основных конструктивных особенностей робота.

Ключевые слова: робот-гексапод, конструкции гексаподов, оптимизация конструкций гексаподов, метод роя частиц, метод конечных элементов, методика расчета гексаподов.

Для цитирования: Старостина Ж. А., Зейн Алдин А. Методика расчета роботовгексаподов с использованием метода роя частиц и метода конечных элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 4 (42).

Original article

Methodology for calculating hexapod robots 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

№ 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

Abstract. The article presents a calculation method based on a combination of the particle swarm method (PSO) and the finite element method (FEM), such a combination will best optimize the design characteristics of hexapods. With the help of this technique, detailed modeling will be possible, and the integration of FEM into the optimization process based on MRF will create conditions for a systematic and comprehensive way to improve the accuracy and efficiency of the hexapod. Also, thanks to the introduction of FEM analysis into the MRF optimization cycle, the algorithm can effectively explore the design space, guided by performance reviews obtained as a result of detailed structural analysis. This combination of MRF and FEM makes it possible to determine the optimal design parameters of the hexapod that meet the required performance criteria, such as weight and stiffness, taking into account the main design features of the robot.

The concept of the calculation method will be able to realize the full potential of the hexapod technology by using the strengths of the FEM in detailed structural analysis and the effectiveness of the MRF method in optimization, this will expand its application in various industries.

Keywords: hexapod-robots, hexapod design features, hexapod design optimization, particle swarm method, finite element method, hexapod calculation and optimization methodology.

For citation: Starostina Zh. A., Zein Aldin A. Methodology for calculating hexapod robots using the particle swarm method and the finite element method // Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2024. N_{2} 4 (42).

Введение

Концепция методики расчета способна реализовать весь потенциал, которым обладает технология гексапод, за счет использования сильных сторон МКЭ в детальном структурном анализе и эффективности метода МРЧ в оптимизации, это расширит ее применение в различных отраслях промышленности.

Интегрируя МКЭ и МРЧ в процессе оптимизации, можно использовать сильные стороны обоих методов. МКЭ предоставляет необходимые возможности структурного анализа для точной оценки производительности каждого потенциального проекта с учетом сложной геометрии, свойств материала и условий нагружения робота-гексапода.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал

Возможности глобального поиска МРЧ позволяют эффективно исследовать пространство проектирования, руководствуясь отзывами о производительности, полученными в результате анализа МКЭ. Алгоритм МРЧ позволяет эффективно ориентироваться в многомерном пространстве проектирования, корректируя параметры проектирования для нахождения оптимальной конфигурации.

Основная часть

Интеграция МКЭ и МРЧ достигается за счет включения МКЭ-анализа в цикл оптимизации МРЧ. На каждой итерации алгоритма МРЧ вызывается функция «evaluate_hexapod» для вычисления веса и жесткости конструкции гексапода с использованием МКЭ. Затем эти значения используются для расчета соответствия конструкции, которое основывается на нормированном весе и жесткости.

Полученный результат в процессе оптимизации является одновременно эффективным и точным, используя преимущества как МКЭ, так и МРЧ для поиска наиболее подходящей конструкции гексапода, с учетом заданных требований и ограничений.

Код для оптимизации дизайна в Python включает в себя следующие блоки:

Блок 1: Инициализация.

Блок 2: Определение параметров МРЧ.

Блок 3: Определение диапазонов проектных переменных.

Блок 4: Инициализация частиц, Блок.

Блок 5: Инициализация скоростей и лучших результатов.

Блок 6: МРЧ Main Loop / главный цикл/.

Блок 7: Отображение оптимизированных результатов.

Блок 8: Визуализация.

№ 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА



Рис. 1. Сходимость роя частиц

Этот график иллюстрирует сходимость алгоритма оптимизации роя частиц, примененного для оптимизации конструкции робота-гексапода. Ось (x) представляет собой номер итерации в диапазоне от 0 до 50, в то время как ось у показывает наилучшее значение пригодности, достигнутое роем на каждой итерации. График начинается с высокого значения пригодности, равного 1,3514 на итерации 0, что указывает на первоначальное наилучшее решение, найденное роем.

Наблюдается быстрое и значительное снижение значения пригодности в течение первых нескольких итераций, особенно между итерациями 0 и 5, что демонстрирует способность алгоритма быстро находить улучшенные решения на ранних стадиях оптимизации.

После этого первоначального резкого спада кривая начинает выравниваться, показывая более постепенное улучшение значения пригодности по мере продвижения итераций. Примерно к 10-й итерации кривая в значительной степени выровнялась, что говорит о том, что алгоритм нашел почти оптимальное решение, и дальнейшие улучшения минимальны. Окончательное наилучшее значение пригодности 0,9244 достигается к

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА Электронный научный журнал

итерации 50, что указывает на конечную точку процесса оптимизации. Плавный, монотонно убывающий характер кривой предполагает стабильное и последовательное улучшение качества решения на протяжении всего процесса оптимизации.

Эта визуализация особенно важна для оптимизации дизайна гексапода, поскольку она демонстрирует эффективность алгоритма МРЧ в поиске улучшенной конфигурации дизайна, потенциально оптимизируя такие параметры, как длина ноги, размер тела или жесткость суставов, для улучшения показателей производительности робота, таких как устойчивость, энергоэффективность, или скорость движения. Быстрая начальная сходимость, за которой следует тонкая настройка в последующих итерациях, характерна для МРЧ и указывает на хороший баланс между исследованием пространства решений и эксплуатацией перспективных областей.

Этот график не только показывает конечный оптимизированный результат, но и дает представление о самом процессе оптимизации, что может иметь решающее значение для уточнения параметров алгоритма или определения подходящего критерия остановки для будущих циклов оптимизации при проектировании гексапода.

На 3D-графике (рис. 3) представлено визуальное сравнение структуры робота-гексапода до и после применения силы, при этом недеформированное состояние показано синим цветом, а деформированное - красным. Деформация намеренно увеличена в 10 раз, чтобы изменения были более заметными. Конструкция гексапода состоит из центрального корпуса с шестью ножками, выступающими наружу и вниз, каждая ножка состоит из двух сегментов.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал



Рис. 2. Деформация гексапода

Наиболее выраженная деформация происходит в центральной части корпуса, которая заметно смещается вниз, что соответствует вертикальному усилию в 1000 Н, приложенному к центру корпуса в коде. Ножки демонстрируют изгиб, особенно заметный в местах их соединения с корпусом и в средней точке, в то время как кончики ног демонстрируют минимальное движение из-за фиксированных граничных условий.

Картина деформации демонстрирует шестикратную симметрию, отражающую геометрическую структуру шестинога и центральную нагрузку. Эта визуализация имеет решающее значение для выявления потенциальных слабых мест в конструкции, особенно в местах соединения корпуса и ног, где могут возникать концентрации напряжений, увеличение жесткости центрального корпуса могло бы стать эффективной стратегией снижения общей деформации. Этот увеличенный вид необходим для четкой визуализации, но он может переоценивать небольшие деформации и не дает количественной информации о фактических величинах смещений. Несмотря на ограничения, этот график служит инструментом для интуитивного понимания поведения гексапода под нагрузкой и может служить руководством для дальнейшего количественного анализа и оптимизации конструкции.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА





Трехмерный точечный график (рис. 3) иллюстрирует количественную визуализацию величин смещений по всей структуре гексапода, предлагая более глубокое понимание, чем предыдущий график. Каждая точка представляет собой узел в конечно-элементной модели, соответствующий ключевым точкам в структуре шестинога, таким как центр тела, суставы ног, средние точки ног и кончики ног. Цвет каждой точки указывает на величину смещения в этом узле, а цветовая шкала справа отображает масштаб в диапазоне от 0 до приблизительно $5,5 \times 10^{-4}$ метров. Точки расположены в соответствии с их первоначальными (недеформированными) координатами, что позволяет четко понять, какие части конструкции подвергаются наибольшему смещению. Центральный узел, представляющий тело, показывает наибольшее смещение, о чем свидетельствует его желтый цвет, в то время когда узлы рядом с телом обычно показывают большие смещения.

Узлы на концах ножек имеют наименьшее смещение, что соответствует установленным граничным условиям, примененным при моделировании. Схема смещения демонстрирует четкую шестикратную симметрию, соответствующую геометрии шестинога и центрально приложенной нагрузке. Эта визуализация обеспечивает точные значения смещения и позволяет проводить количественный анализ деформации конструкции.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА электронный научный журнал



Рис. 4. Приложенные силы

График на рисунке 4 наглядно демонстрирует силы, действующие на конструкцию шестиногого гексапода. Единственная красная стрелка в центре графика представляет единственный вектор приложенной силы, исходящий из координат (0,0,0), который соответствует центру тела, где в коде приложена сила. Стрелка отображает усилие, указанное в функции applied_boundary_conditions.

Длина стрелки пропорциональна величине силы, хотя точный масштаб на графике не указан. Примечательно, что отсутствие каких-либо других стрелок подтверждает, что это единственное внешнее усилие, приложенное к конструкции в этом моделировании. На графике четко показаны оси X, Y и Z, что помогает сориентировать усилие в трехмерном пространстве и служит ориентиром для геометрии гексапода. Стоит отметить, что ось Z масштабирована иначе, чем оси X и Y, для того, чтобы учесть всю длину силовой стрелки в границах графика. Эта визуализация особенно ценна, если рассматривать ее вместе с графиками деформаций, поскольку позволяет инженерам напрямую соотнести приложенную нагрузку с результирующей реакцией конструкции. Простота этого единственного централизованно приложенного усилия объясняет симметричные формы деформации,

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

наблюдаемые на предыдущих графиках, и подчеркивает важность жесткости центрального элемента в общей реакции конструкции.

Этот график играет решающую роль в полном анализе, четко определяя условия нагружения, которые определяют все наблюдаемые деформации и напряжения в конструкции гексапода.



Рис. 5. Распределение смещения или распределение перемещений

На рисунке 5 представлена гистограмма статистического обзора величин смещений во всех узлах гексапода, что дает информацию об общем характере деформации. Ось X представляет величину смещения в диапазоне от 0 до 5,5 × 10⁻⁴ метров, в то время как ось У показывает частоту (количество узлов) для каждого диапазона смещения.

Форма распределения сильно смещена в сторону меньших смещений, при этом большой всплеск, близкий к нулю, указывает на то, что многие узлы испытывают очень малые смещения, вероятно, соответствующие неподвижным концам ножек и другим областям, удаленным от приложенной нагрузки. Самый высокий столбец показывает, что большинство узлов

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА Электронный научный журнал

испытывают минимальное смещение, что согласуется с локализованным характером деформации, показанным на предыдущих графиках.

Маленькие столбцы в крайнем правом углу представляют узлы с наибольшими смещениями, которые, вероятно, соответствуют центру тела и близлежащим узлам, к которым непосредственно приложена сила. Это позволяет проводить количественный анализ, например, определять среднее смещение или определять, какой процент узлов превышает определенный порог смещения.

Такая информация имеет решающее значение для оценки общей жесткости конструкции и выявления потенциальных областей для их улучшения. Например, широкое распределение может указывать на необходимость более равномерной жесткости по всей конструкции, в то время как узкое распределение с несколькими значительными отклонениями может указывать на локальные слабые места, которые нуждаются в усилении. Эта гистограмма, если рассматривать ее вместе с другими графиками, дает полное представление о том, как конструкция гексапода реагирует на приложенную нагрузку, предоставляя информацию для оптимизации конструкции и оценки производительности.

Заключение

Методика расчета конструктивных характеристик гексапода с использованием метода роя частиц и метода конечных элементов позволяет выявлять лучшую модель в полученной группе. Проводя анализ гексапода по ряду критериев (деформация, смещение, прочность и т.д.), получаем несколько моделей, где в полученных моделях можем оптимизировать расположение ножек, распределить наиболее оптимально нагрузку, также определить наилучшие прочностные характеристики корпуса, путем изменения либо геометрических параметров, либо выборов материала, либо изменением приложения нагрузок. При наличии нескольких конкурирующих моделей в одной структуре, соответственно выбираем наилучшую из них, а выбор целевой функции отсекает модели, которые не являются наиболее оптимальными.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

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. 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 NiŃulescu // 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. $-N_{2} 2$ (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.

11. Зейн, А. А. Исторический обзор развития роботов типа гексапод / А. А. Зейн, Ж. А. Старостина // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 9. – С. 415-419. – EDN NVTGVP.

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:

№ 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

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., Gadhave 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).

11. Zeyn A.A., Starostina ZH. A. Innovatsii i investitsii, 2024, no. 9, pp. 415-419.

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 25.11.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 20.12.2024. The article was submitted 25.11.2024; approved after reviewing 27.11.2024; accepted for publication 20.12.2024.

> № 4(42) декабрь 2024

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА