

УДК 621.316.726.078

ЛУКАШОВ С. И., НАПРАСНИКОВ В. В., БОГАЧУК А. М.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С БОЛЬШИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПОДХОДА

Белорусский национальный технический университет

В статье на примере конструкции пальца манипулятора, взаимодействующего с захватываемой деталью, рассмотрена методика решения контактных задач, с учетом нелинейных свойств материала пальца на основе модели Муни-Ривлина. Представлены результаты многокритериальной оптимизации этой конструкции.

Ключевые слова. Метод конечных элементов, робототехника, эластомеры, многокритериальная оптимизация.

Введение

В настоящее время промышленная робототехника становится неотъемлемой частью любого производства, существенную роль в этом сыграли так называемые промышленные роботы.

Одной из основных составных частей промышленного робота является манипулятор. Манипулятор – это управляемый механизм (или машина), который предназначен для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, и оснащён рабочим органом.

Манипуляторы применяются для функционирования в среде, отличающейся опасностью или не доступной для людей. Помимо того, эти устройства используются в качестве вспомогательных роботов в промышленном производстве и в медицинской практике – во время создания протезов. Одним из наиболее популярных манипуляторов в наше время считается механическая «рука».

Возможным вариантом реализации манипулятора типа «рука» может быть конструкция на основе пневматических пальцев (рис. 1) [1].

К преимуществам манипуляторов такой конструкции можно отнести возможность транспортировки хрупких, легкодеформируемых предметов.

Основой манипулятора типа «рука» являются пневматические пальцы. Пневматический палец представляет собой гибкий стержень с полыми камерами (рис. 2).

Деформация такой конструкции достигается путем нагнетания сжатого газа в полости под давлением.

Когда палец прихватывает деталь, возникает область контакта между пальцем и деталью, трение в которой обеспечивает формирование прижимного усилия. Возникает вопрос о выборе таких геометрических параметров и ма-



Рис. 1. Манипулятор типа «рука» на основе пневматических пальцев

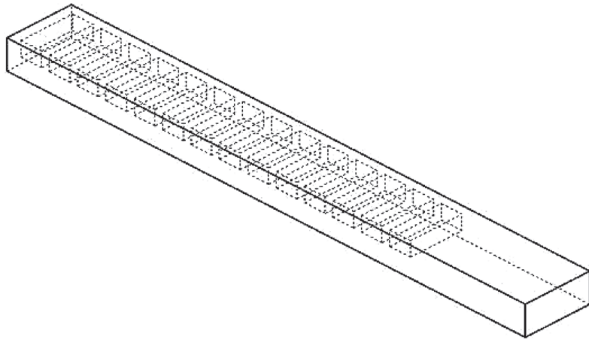


Рис. 2. Пневматический палец

териала конструкции пальца манипулятора, которые обеспечили бы для него максимальное прижимное усилие.

Таким образом, актуальной является задача о построении математической параметризованной модели пальца манипулятора и дальнейшей оптимизации робототехнической конструкции. Одним из современных подходов к решению этой задачи является использование метода конечных элементов.

Подготовка конечно-элементной модели

Метод конечных элементов является сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями [2].

Элементы бывают одномерными, плоскими и пространственными, с прямолинейными или криволинейными сторонами. Вдоль каждой из них может быть два или более узлов. Во всех узлах задаются обобщенные координаты y_k , называемые узловыми смещениями, совокупность которых для данного элемента запишем в виде матрицы:

$$\{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}^T, \quad (1)$$

где N – общее число узловых смещений элемента; T – означает транспонирование матрицы.

Узловые смещения могут представлять собой компоненты вектора перемещения узлов вдоль осей координат, а также углы поворота элемента в узловых точках. В пределах каждого элемента для компонент вектора перемещения \vec{u} любой точки M задают аппроксимацию через узловые смещения, которые являются неизвестными величинами:

$$u_i(M) = \Phi_{ik}(M)y_k, \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

или в матричной записи

$$\{u\} = \{\Phi\} \{y\}, \quad (3)$$

и векторной форме

$$\vec{u} = \Phi_{ik} \vec{e}_k y_k = \Phi_k y_k = \{\Phi\} \{y\}, \quad (4)$$

где величины $\Phi_{ik}(M)$ называются *функциями формы элемента* и выражают связь между узловыми смещениями и перемещением точки тела.

В качестве функций формы обычно используют полиномы, вне элемента данные функции полагаются равными нулю.

$$\Phi_k = \Phi_{ik} \vec{e}_i, \quad \{\Phi\} = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N\}, \quad (5)$$

где \vec{e}_i – единичные орты.

Здесь и далее, если не оговорено особо, используется *правило суммирования* по повторяющимся индексам, то есть запись вида $a_i b_i$ необходимо воспринимать как сумму $\sum a_i b_i$.

Соотношения (2) подставляются в уравнения равновесия тела, из которых и определяются узловые смещения $\{u\}$ для каждого элемента [2].

Модель материала Муни-Ривлина

Использование модели материала Муни-Ривлина позволяет добиться нелинейности в поведении модели [3]. Таким образом, данная модель хорошо подходит для исследования поведения эластомеров, из которых изготавливаются палец манипулятора.

Основной характеристикой модели материала Муни-Ривлина является удельная энергия деформирования (6):

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + d^{-1} (J - 1)^2, \quad (6)$$

где I_i – i -е инварианты девиатора деформации; C_{10} , C_{01} – коэффициенты модели, материальные константы; J – детерминант матрицы градиента деформации; d – коэффициент несжимаемости материала (7);

$$d = \frac{1 - 2\vartheta}{C_{10} + C_{01}}, \quad (7)$$

где ϑ – коэффициент Пуассона.

Величина W удовлетворяет требованию симметрии относительно главных деформаций l_1 , l_2 , и l_3 , что объясняется изотропностью недеформированного материала. Инварианты тензора деформаций представляются в виде (8–10):

$$I_1 = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2, \quad (8)$$

$$I_2 = l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_3^2 l_1^2, \quad (9)$$

$$I_3 = l_1^2 l_2^2 l_3^2, \quad (10)$$

Для эластомеров при этом выполняется равенство (11):

$$I_3 = 1, \quad (11)$$

Напряжения Коши в резине (12):

$$\sigma_{\text{шо}} = -p\delta_{ij} + 2\frac{\partial W}{\partial I_1}C_{ij} - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}C_{ij}^{-1}, \quad (12)$$

где p – давление; C_{ij} – главные инварианты; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера.

Для определения значений коэффициентов C_{10} и C_{01} в выражении (6) в данной работе использовались экспериментальные диаграммы деформирования.

Выполнение оптимизации

Для выбора параметров конструкции, обеспечивающих получение максимальной интегральной силы удерживания была проведена многокритериальная оптимизация.

К варьируемым параметрам оптимизации относятся геометрия пальца, а также давление газа в полостях конструкции. Критериями являются: максимальная интегральная сила прижима пальца к детали (данный критерий подвергнется максимизации) и максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в материале пальца (данный критерий подвергнется минимизации).

Так как основным критерием оптимизации является максимальная интегральная сила при-

жима пальца к детали, то необходимо дополнить геометрию, добавив объект, представляющий захватываемую деталь.

После добавления захватываемой детали настоящая задача будет иметь статус контактной.

При создании геометрической модели захватываемой детали следует располагать ее таким образом, чтобы она находилась в начальной фазе соприкосновения с пальцем. Это позволит в дальнейшем решателю сократить количество рассчитываемых итераций перед контактом, что в свою очередь уменьшит время расчета на каждом шаге оптимизации (рис. 3).

При задании контактной пары рекомендуется руководствоваться перечисленными ниже правилами:

1) Если одна поверхность (А) является плоской или вогнутой, а другая поверхность (В) является острым ребром или выпуклостью, то поверхность А должна быть целевой.

2) Если обе контактирующие поверхности выпуклые, то в качестве целевой поверхности принимается поверхность с меньшим радиусом кривизны.

3) Если обе поверхности являются плоскими, выбор контактной и целевой произволен.

4) Если первая контактная поверхность имеет острое ребро, а другая не имеет его, то первая принимается в качестве контактной поверхности.

5) Если одно из контактирующих тел абсолютно жесткое, то его поверхность принимается целевой.

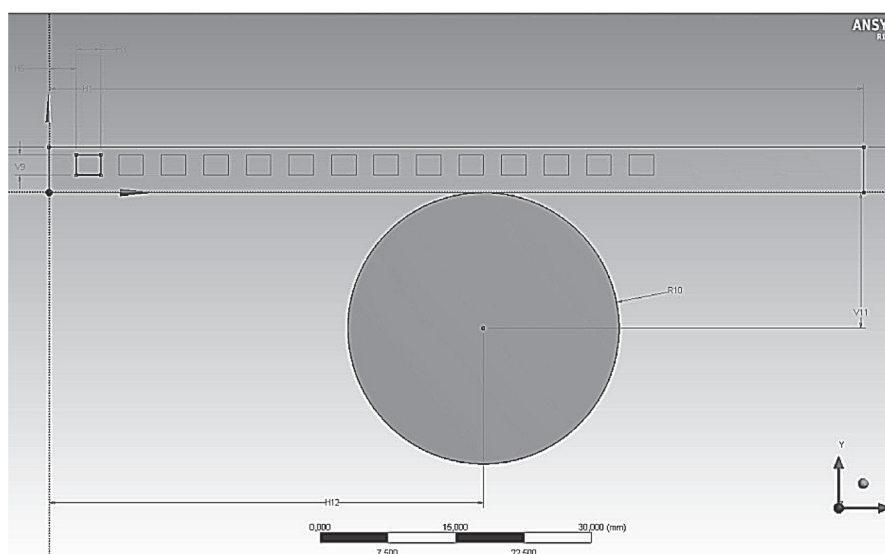


Рис. 3. Расположение захватываемой детали относительно пальца

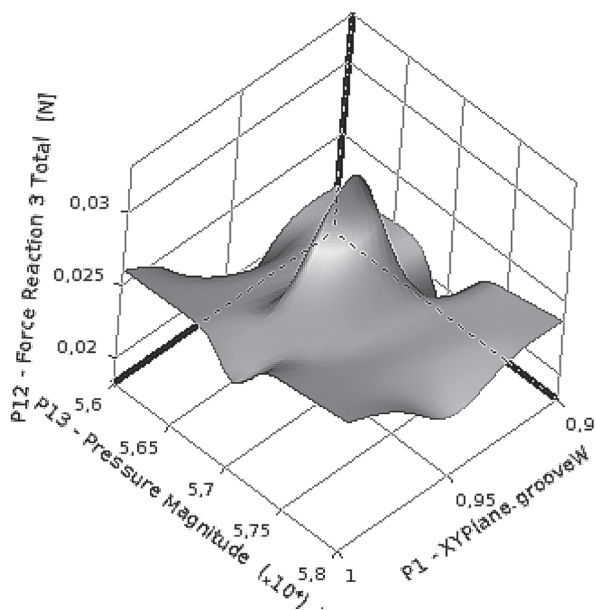


Рис. 4. Поверхность отклика для двух параметров

На основании вышеперечисленного было принято решение использовать в качестве целевого тела захватываемую деталь.

Оптимизация начинается с расчета опорных точек. Они необходимы для построения поверхности отклика. Учитывая количество параметров оптимизации и потенциальную сложность поверхности отклика, было решено использовать кригинг как способ построения поверхности отклика.

Кригинг – это вид обобщенной линейной регрессии, использующей статистические параметры для нахождения оптимальной оценки близости экспериментальных данных в смысле минимального среднеквадратического отклонения при построении поверхностей. С точки зрения общей статистики кригинг заключается в минимизации дисперсии ошибки измерения, которая является функцией от измеряемых весов. Минимизация данной дисперсии уменьшает среднюю квадратическую ошибку

отклонения оцененного значения от возможного. Достигается это путём приравнивания к нулю первой производной ошибки относительно каждого неизвестного веса. В итоге выводится система уравнений, решением которой является вектор весов.

На рис. 4 изображена полученная в результате расчетов поверхность отклика. Двумя варьируемыми параметрами в данном случае принимались давление в полости пальца и ширина полости. Выходным параметром являлось интегральное прижимное усилия по зоне контакта.

Далее были заданы веса критериев и выбран алгоритм оптимизации. Для расчета многокритериальных задач оптимизации в ANSYS существует два алгоритма: Screening и Multi-objectiveGeneticAlgorithm (MOGA).

Screening – это простейший метод оптимизации, осуществляющий перебор точек возможных решений.

Multi-objectiveGeneticAlgorithm – это многокритериальный эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Он является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи с использованием методов естественной эволюции, таких как наследование, мутации, отбор и кроссинговер. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе [4].

Для проведения оптимизации был выбран алгоритм MOGA поскольку он позволяет

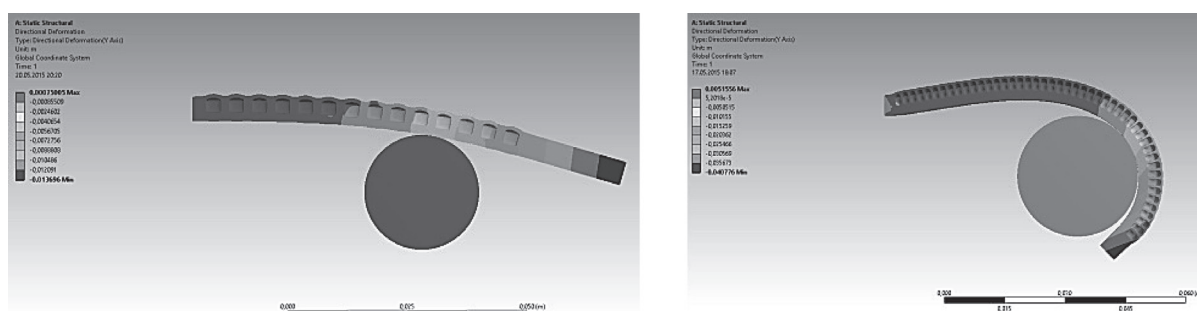


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние пальца до оптимизации (слева) и после оптимизации (справа)

найти экстремум функции за меньшее число итераций по сравнению с алгоритмом Screening.

Результаты расчета конструкции с использованием оптимизированных параметров и до оптимизации, изображены на рис. 5.

На представленных рисунках хорошо видно, что зона контакта пальца с прихватываемой деталью существенно увеличилась, что приводит к увеличению интегрального прижимного усилия.

Сравнение значений критериев до и после оптимизации приведено в таблице.

Значения критериев до и после оптимизации

Критерий	До оптимизации	После оптимизации
Эквивалентное напряжение	1,0702e + 5 Па	2,0101e + 5 Па
Интегральное усилие в контакте	0,434 e – 2 Н	4,066e – 2 Н

Выводы

Как следует из результатов оптимизации, интегральное усилие в зоне контакта пальца с прихватываемым объектом было значительно увеличено, при этом значение эквивалентного напряжения в материале конструкции пальца, хотя и увеличилось, но не превысило допустимого предела для используемого эластомера.

В результате оптимизации модифицировав геометрические параметры полостей пальца и давления газа, нагнетаемого в полости пальца, удалось увеличить интегральное прижимное усилие в контакте более чем в девять раз. Ослабление конструкции при этом не критично, так как максимальное эквивалентное напряжение в материале пальца после оптимизации составило 2,0101e+ 5 Па, что меньше допустимого для эластомеров.

Литература

1. Huei-Huang, L. Finite elements simulations with ANSYS Workbench 14 / L. Huei-Huang. – Kansas: SDC, 2012. – 602 p.
2. Сабоинадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов в САПР. М.: Мир, 1989. – 190 с.
3. Рубцов Б. Г. Теоретическое руководство ANSYS 5.3 / Б. Г. Рубцов, И. Р. Идрисова. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 117 с.
4. Steven, S. The Algorithm Design Manual / S. Steven. – Springer: CRC Press, 2008. – 184 p.

Поступила 25.07.15.

После доработки 20.09.15

S. I. Lukashov, V. V. Naprasnikov, A. M. Bogacuk

RESEARCH OF THE ROBOTIC DESIGN WITH LARGE DEFLECTIONS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

In this article, methods of solving the contact problem based on Mooney Rivlin model including material nonlinearities are considered in the context of the manipulator finger reacting with the capture part. The results of multiobjective optimization of the construction are presented.