

Механика

УДК 624.072.33/539.42

Компьютерное моделирование процесса формоизменения структурно-регулярных стержневых систем

П.П. Гайджуров

Донской государственный технический университет

Computer simulation of the forming process in the structurally regular core systems

P.P. Gaidzhurov

Don State Technical University

Трансформируемые стержневые системы нашли широкое применение в конструкциях панелей космических аппаратов и медицине в виде различных стендов. Представляет определенный теоретический интерес развить идею геометрической изменяемости на пространственные стержневые системы сложной формы. Предложена концепция кинематической трансформации плоской формы регулярной стержневой системы в куполообразную. Для численной реализации применен метод конечных элементов в сочетании с модифицированным методом Лагранжа. Для оценки уровня деформированного состояния регулярной стержневой решетки с учетом генетической нелинейности использованы значения продольной деформации в стержнях.

EDN: HDMQRU, <https://elibrary/hdmqru>

Ключевые слова: деформационное моделирование, стержневая система, метод конечных элементов, модифицированный метод Лагранжа, генетическая нелинейность

Transformable rod systems find their wide application in design of the spacecraft panels and in medicine in the form of various benches. Developing an idea of geometric variability in spatial rod systems of the complex shape appears to be of certain theoretical interest. The paper proposes a concept of kinematic forming the regular rod system from a flat position to the dome-shaped. It uses for final implementation the finite element method in combination with the modified Lagrange method. To assess the deformed state level of a regular rod mesh taking into account the genetic nonlinearity, the paper uses values of the rods longitudinal deformation.

EDN: HDMQRU, <https://elibrary/hdmqru>

Keywords: deformation simulation, rod system, finite element method, modified Lagrange method, genetic nonlinearity

Деформационное моделирование — одно из направлений компьютерной графики, позволяющее конвертировать кинематику физически наблюдаемого объекта в виртуальную реальность. Деформируемую модель принято рассматривать с позиций механики деформируемого твердого тела. В соответствии с этой концепцией процесс деформирования некоторого континуума удобно описывать в лагранжевых координатах.

В качестве парадигмы деформируемой модели выступает так называемая змея (snake), форма и геометрические параметры тела которой зависят от перемещений ключевых точек [1–3]. Формально змея — это некоторый контур, заданный параметрически, как правило, кубическим сплайном. Технология аппроксимации исходного контура сплайном основана на процедуре минимизации функционала, ассоциируемого с энергией деформации контура, в границах области p_{rs} , окаймляющей каждую ключевую точку (рис. 1).

Аппроксимацию исходного контура с использованием деформируемой модели типа змеи широко применяют в медико-биологических исследованиях (в компьютерной томографии), а также в приложениях искусственного интеллекта к задачам отслеживания движения и распознавания объекта.

Другой подход к построению геометрически деформируемой модели (Geometric Deformable Model — GDM) основан на концепции расширения виртуального тонкостенного шара (баллона) внутри границ сканируемого объекта [4] (рис. 2). В качестве математического аппарата в технологии GDM использован метод конечных элементов в форме метода перемещений. Баллон моделируют конечными элементами (КЭ) в виде тонкостенных трехузловых пластин.

Геометрическую форму баллона в момент времени t представляют в параметрическом виде [5, 6]

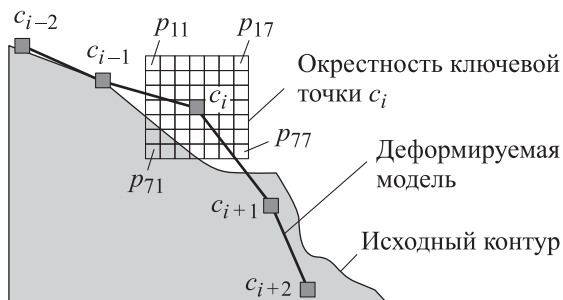


Рис. 1. Деформируемая модель типа змеи

$$R(u, v, t) = [\psi_x(u, v, t), \psi_y(u, v, t), \psi_z(u, v, t)],$$

где ψ_x , ψ_y и ψ_z — аппроксимирующие кубические сплайн-функции вдоль осей x , y и z ; u, v — безразмерные переменные, $u \in [0, 1]$, $v \in [0, 1]$.

В процессе сканирования внутренней полости исследуемого объекта каждый узел конечно-элементной модели притягивается к точке ограничивающего контура в направлении нормали [7] (рис. 3). Текущее деформированное состояние КЭ в полной мере определяется метрическим тензором [4, 7, 8]

$$g(R(u, v, t)) = \frac{\partial R}{\partial u} \frac{\partial R}{\partial v}.$$

Согласно данным работы [4], адаптационный алгоритм построен так, чтобы на каждом шаге в узлах конечно-элементной сетки выполнялось условие

$$C(x, y, z) =$$

$$\alpha_0 D(x, y, z) + \alpha_1 I(x, y, z) + \alpha_2 T(x, y, z) \geq 0, \quad (1)$$

где $C(x, y, z)$ — функция цели, связанная с текущим положением узловой точки модели; α_0 , α_1 , α_2 — весовые коэффициенты; $D(x, y, z)$ —

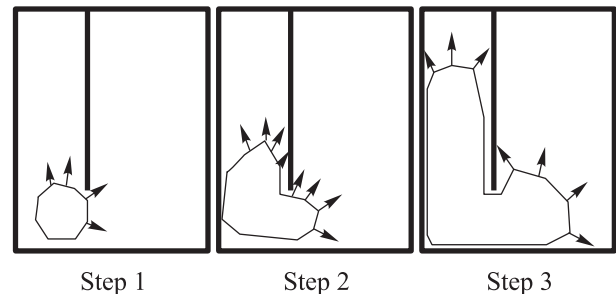


Рис. 2. Пример применения технологии GDM для построения геометрически деформируемой модели



Рис. 3. Модель баллона, деформируемая точечным усилием

потенциал деформации (монотонно убывающая или возрастающая функция); $I(x, y, z)$ — функция ограничений, информирующая узел конечно-элементной сетки о том, что он может находиться в контакте с вокселем (элементом раstra объекта); $T(x, y, z)$ — функция топологической информации, предотвращающая проникновение узлов конечно-элементной модели через границу объекта.

Условие (1) заставляет модель деформироваться до тех пор, пока все вершины не достигнут границы сканируемого объекта.

Другим направлением деформационного моделирования является анализ поведения пространственных стержневых конструкций, испытывающих в процессе эксплуатации большие линейные и угловые перемещения при малых деформациях. В этом случае численное решение геометрически нелинейной задачи основано на итерационной процедуре Ньютона — Рафсона и методе корректирующих дуг, суть которого состоит в адаптивном корректировании шага нагружения при приближении к точке бифуркации и после ее прохождения [9, 10].

При расчете стержневой системы методом конечных элементов с учетом больших перемещений используют матрицу касательных жесткостей, построение которой базируется на минимизации потенциала энергии деформации [9]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{y}} = \mathbf{P}^{(e)},$$

где U — потенциальная энергия деформации КЭ; $\mathbf{y}$ и $\mathbf{P}^{(e)}$ — векторы перемещений и обобщенных внешних сил КЭ.

Для демонстрации решения в геометрически нелинейной постановке рассмотрим тестовый пример из работ [9, 11]. Гибкий криволинейный брус прямоугольного поперечного сечения 1×1 м, радиусом 100 м с углом раствора дуги 45° , жестко закрепленный на конце ($x = 0, y = 0, z = 0$), подвергают изгибу из плоскости сосредоточенной силой $F_z = 100$ Н. Координаты свободного конца стержня в исходном положении [70,71; 70,71; 0] м. Механические характеристики материала стержня: модуль упругости $E = 10$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0$.

Результаты расчета криволинейного бруса, выполненные с помощью нелинейного решателя программного комплекса ANSYS [12], приведены на рис. 4. Брус разбивали на шестнадцать пространственных КЭ балочного типа BEAM4.

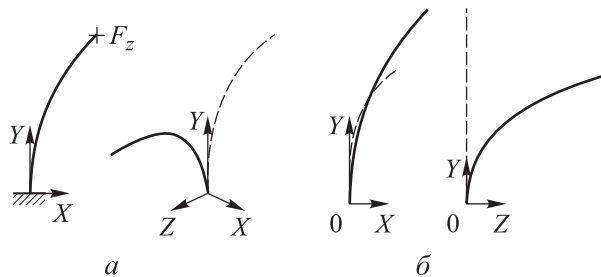


Рис. 4. Результаты расчета криволинейного бруса с помощью нелинейного решателя программного комплекса ANSYS:

a — исходное состояние бруса;

б — визуализация деформации бруса относительно исходного положения (штриховая линия)

По данным [9, 11], получены координаты смещения точки приложения нагрузки [46,84; 15,56; 53,66] м, по результатам решения в среде ANSYS — [46,9; 15,6; 53,6] м, т. е. значения смещений достаточно близки.

Так как описанные концепции деформационного моделирования узкоспециализированные, их нельзя распространить на задачи строительной механики, связанные с исследованием кинематически трансформируемых стержневых систем.

Цель исследования — разработка методики конечно-элементного моделирования регулярных стержневых конструкций с учетом формоизменения исходной геометрии.

Материалы и методы. Исследуем регулярную стержневую систему (РСС), показанную в исходном (недеформированном) состоянии на рис. 5, с учетом управляемого смещения контурных узлов 1–6. На вынесенных фрагментах буквами «L» и «B» обозначены решетки, образованные шарнирно-стержневыми (ферменными) и балочными КЭ соответственно. В обоих случаях узловые платформы S будем моделировать практически недеформируемыми балочными КЭ.

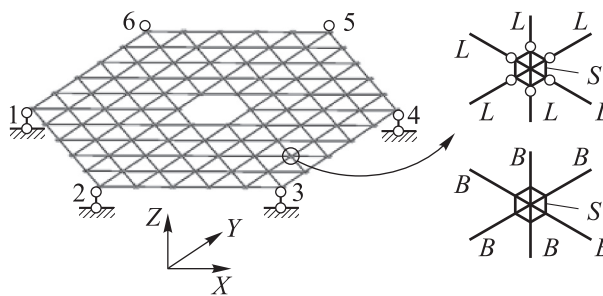


Рис. 5. Конечно-элементная модель РСС в исходном состоянии

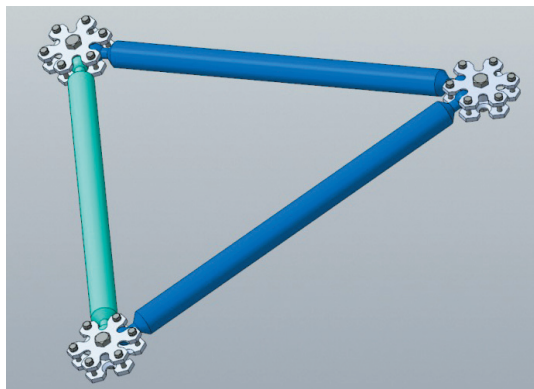


Рис. 6. Модель узлового соединения

Отличительной особенностью такой расчетной схемы от приведенной в работе [13], является наличие узловой платформы S , моделируемой стержнями с модулем упругости, который в 100 000 раз больше, чем у соединительных стержней. С конструктивной точки зрения введение платформ S позволяет условно учесть узловые соединения реальных РСС.

Пример модели узлового соединения приведен на рис. 6 [14]. Этот узел является сборно-разборным с одним центральным и шестью периферийными болтовыми соединениями, обеспечивающими относительную подвижность стержней решетки.

Для исследования процесса формоизменения РСС применим модифицированный метод Лагранжа [15], суть которого заключается в дискретном приращении смещений контурных узлов и перестроении формы конечно-элементной сетки в текущем начальном базисе с учетом полученных узловых перемещений. В литературе по строительной механике такой вид нелинейности называют генетическим [15]. Для программной реализации данной концепции воспользуемся языком программирования APDL [12], встроенным в программный комплекс ANSYS Mechanical.

При кинематическом квазистатическом формоизменении в стержнях конструкции будут возникать внутренние усилия, обусловленные гравитационным воздействием и структурными связями. Для оценки уровня деформированного состояния конечно-элементной модели будем использовать значения продольной деформации в стержнях решетки.

Результаты исследования. В качестве объекта исследования рассмотрим гексагональную в плане РСС из алюминиевого сплава (рис. 7).

Длины стержней, образующих регулярную решетку конструкции, составляют 0,4 м. Радиус описанной окружности платформы S равен 0,05 м. Модуль упругости алюминиевого сплава

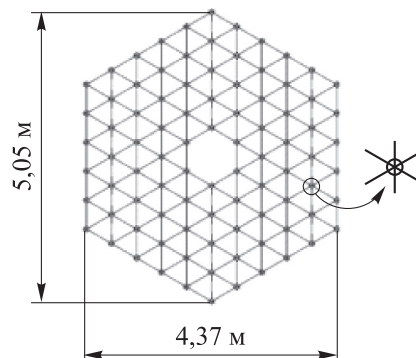


Рис. 7. Конечно-элементная модель РСС с исходными размерами

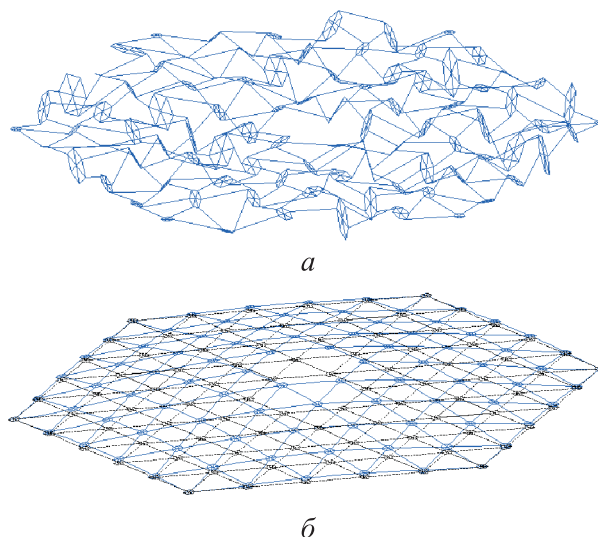


Рис. 8. Конечно-элементные модели первой формы собственных колебаний РСС, образованных ферменными КЭ (а) и балочными КЭ (б)

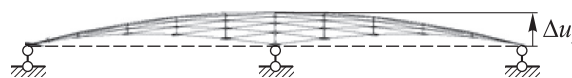


Рис. 9. Конечно-элементная модель стартового положения РСС

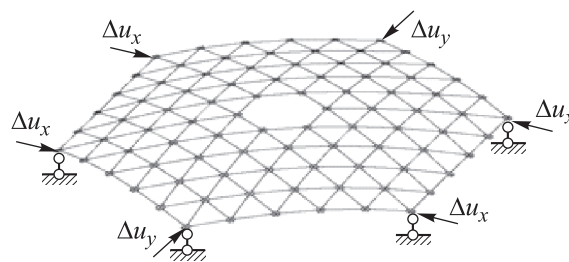


Рис. 10. Конечно-элементная модель дискретных смещений контурных узлов РСС вдоль осей X и Y

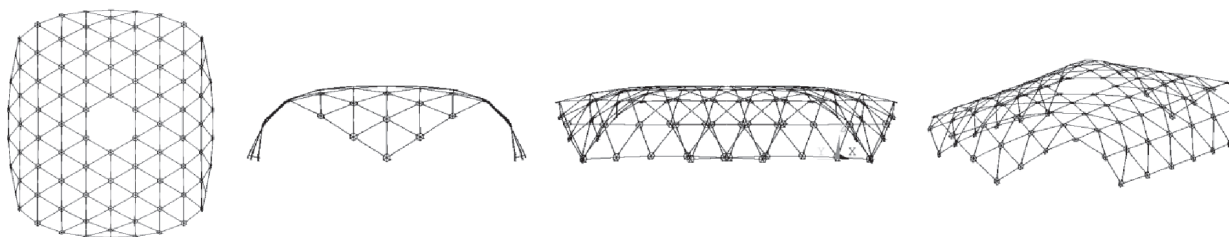


Рис. 11. Результаты конечно-элементного моделирования процесса трансформации формы РСС после пятидесяти шагов

$E = 7,2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$, плотность $\gamma = 2885$ кг/м³. Стержни решетки и платформ S имеют трубчатое сечение с наружным диаметром 18 мм и толщиной стенки 1,5 мм.

С помощью модального анализа выполним проверку конечно-элементных моделей РСС, образованных ферменными и балочными КЭ, на наличие смещений как жесткого целого. Результаты моделирования первой формы собственных колебаний таких моделей приведены на рис. 8, а и б.

Видно, что РСС, смоделированная ферменными КЭ, является кинематически изменяемой, так как допускает вращение жестких платформ. Поэтому далее будем использовать только балочные КЭ.

Необходимо понимать, что процесс трансформации из положения, когда координаты всех узлов $z_i = 0$, не приведет к ожидаемому подъему РСС, т. е. трансформацию следует начинать (стартовать) с заранее подготовленной куполообразной формы (рис. 9). Принимаем за стартовую стрелу подъема $\Delta u_z = 0,1$ м.

Выполним анализ кинематического формоизменения РСС, находящейся в стартовом положении, при дискретных смещениях контурных узлов вдоль осей X и Y (рис. 10). Полагаем,

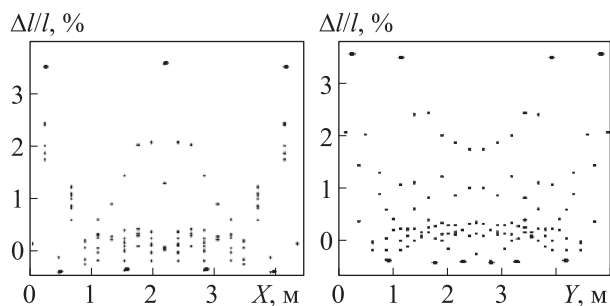


Рис. 12. Точечные диаграммы изменения продольной деформации в стержне решетки $\Delta l/l$ при смещении контурных узлов вдоль осей X (а) и Y (б)

что шаги по перемещениям Δu_x и Δu_y являются синхронными и равными 0,01 м.

Результаты конечно-элементного моделирования процесса трансформации формы РСС после пятидесяти шагов — смещений контурных узлов вдоль осей X и Y — показаны на рис. 11. Стрела подъема в центральной точке

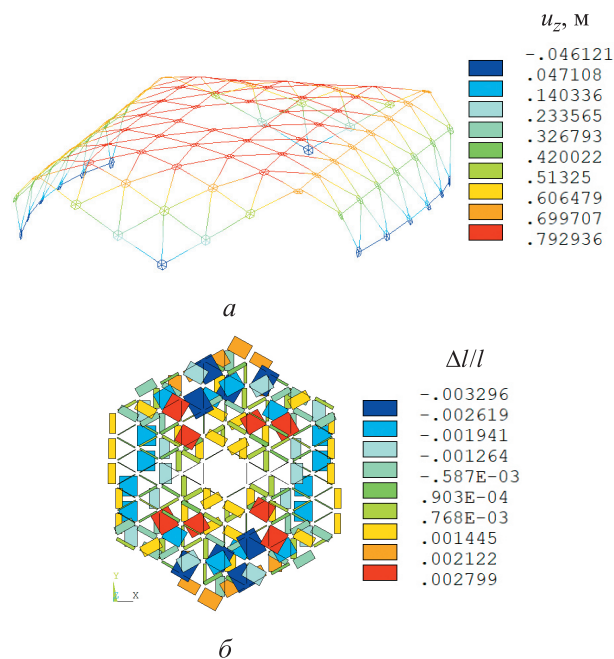


Рис. 13. Результаты моделирования параметров формоизменения РСС с помощью нелинейного решателя:
а — вертикальных перемещений u_z ;
б — продольной деформации $\Delta l/l$

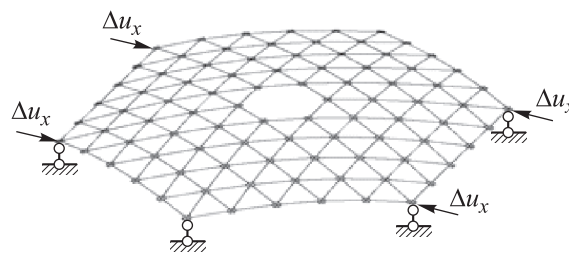


Рис. 14. Схема трансформации РСС при дискретных смещениях $\Delta u_x = 0,01$ мм только вдоль оси X

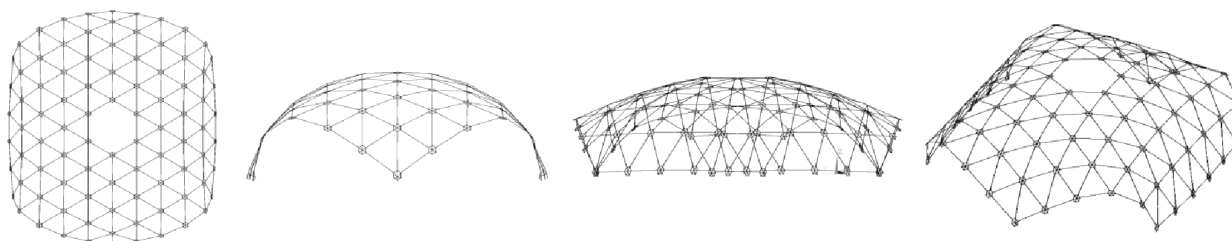


Рис. 15. Результаты моделирования процесса формоизменения РСС после 50 шагов трансформации с помощью предлагаемой методики

после окончания трансформации составила 0,92 м. Точечные диаграммы изменения продольной деформации в стержне решетки $\Delta l/l$ при смещении контурных узлов вдоль осей X и Y приведены на рис. 12. Здесь Δl — изменение длины стержня; l — его начальная длина.

Как видно из рис. 12, при такой схеме трансформации наиболее нагруженными будут стержни, примыкающие к контурным узлам. Экстремальному значению $\Delta l/l = 3,5\%$ соответствует удлинение стержня $\Delta l = 0,4 \cdot 0,035 = 0,014$ м. Естественно, такая продольная деформация выходит за рамки линейной теории, и в реальной конструкции для соответствующих стержней решетки необходимо предусмотреть компенсаторы для такого запредельного удлинения. В качестве последних могут выступать телескопические компенсаторы с односторонними цанговыми захватами.

Результаты решения аналогичной задачи, выполненные с помощью нелинейного решателя комплекса ANSYS Mechanical, приведены на рис. 13. Здесь также использовано стартовое положение решетки и заданы кинематические граничные условия в виде одномоментных смещений контурных узлов, составляющих 0,5 м.

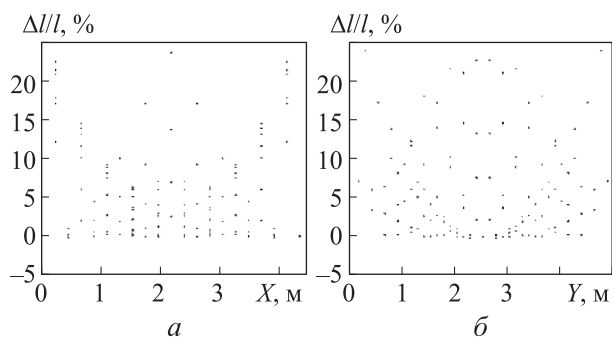


Рис. 16. Точечные диаграммы изменения продольной деформации в стержне $\Delta l/l$ после пятидесяти смещений контурных узлов вдоль осей X (а) и Y (б)

Расчет выполнен с учетом больших перемещений (Large Displacement Static).

Сравнивая картины решетки в деформированном состоянии, показанные на рис. 11 и 13, устанавливаем их качественное совпадение. Вместе с тем значение максимальной стрелы подъема при одномоментной трансформации $f_{\max} = 0,79$ м меньше, чем при дискретном формоизменении ($f_{\max} = 0,92$ м). Также наблюдаются существенные качественные и количественные различия в распределении продольных деформаций в стержнях решетки. Причем при дискретном формоизменении экстремальное значение $\Delta l/l$ более чем в 10 раз превышает таковое, полученное с помощью нелинейного решателя (см. рис. 13).

Таким образом, при моделировании процесса трансформации формы РСС следует использовать предлагаемую методику дискретного формоизменения в сочетании с пошаговой корректировкой и перестроением конечно-элементной сетки с учетом полученных узловых перемещений.

Рассмотрим схему трансформации РСС при дискретных смещениях $\Delta u_x = 0,01$ мм только вдоль оси X (рис. 14).

Результаты моделирования процесса формоизменения РСС после 50 шагов трансформации с помощью предлагаемой методики показаны на рис. 15. Стрела подъема в полюсной точке после окончания трансформации составила 1,3 м. Соответствующие точечные диаграммы изменения продольной деформации в стержне $\Delta l/l$ приведены на рис. 16, а и б.

Сравнение куполообразных форм РСС при равномерном обжатии вдоль осей X и Y (см. рис. 11) и при деформации только в направлении X (см. рис. 14) позволяет заключить, что во втором случае имеет место большая округленность поверхности. Вместе с тем максимальное значение продольной деформации $\Delta l/l$, определенное по предлагаемой

методике (см. рис. 15) почти в семь раз больше, чем полученное с помощью нелинейного решателя (см. рис. 12).

Вывод

Разработана методика конечно-элементного моделирования трансформации плоской формы РСС в куполообразную путем дискретного смещения контурных узлов решетки. В качестве критерия, ограничивающего процесс формоиз-

менения конструкции, предложено использовать продольные деформации стержней.

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана Ф.Д. Сорокину, чья критическая оценка представленных материалов и конструктивные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества статьи.

Литература

- [1] Perrin D.P., Smith C.E. Rethinking classical internal forces for active contour models. *CVPR*, 2001, vol. 2, pp. 615–620, doi: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.991020>
- [2] Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: active contour models. *Int. J. Comput. Vision*, 1988, vol. 1, no. 4, pp. 321–331, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00133570>
- [3] McInerney T., Terzopoulos D. Deformable models in medical image analysis: a survey. *Med. Image Anal.*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 91–108, doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(96\)80007-7](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(96)80007-7)
- [4] Miller J.V., Breen D.E., Lorensen W.E. et al. Geometrically deformed models: a method for extracting closed geometric models from volume data. *SIGGRAPH'91*, 1991, vol. 25, no. 4, pp. 217–226, doi: <https://doi.org/10.1145/122718.122742>
- [5] Terzopoulos D., Fleischer K. Deformable models. *Vis. Comput.*, 1998, vol. 4, no. 6, pp. 306–331, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01908877>
- [6] Terzopoulos D., Platt J., Barr A. et al. Elastically deformable models. *Comput. Graph.*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 205–214, doi: <https://doi.org/10.1145/37402.37427>
- [7] McInerney T., Terzopoulos D. A dynamic finite element surface model for segmentation and tracking in multidimensional medical images with application to cardiac 4D image analysis. *Comput. Med. Imaging Graph.*, 1995, vol. 19, no. 1, pp. 69–83, doi: [https://doi.org/10.1016/0895-6111\(94\)00040-9](https://doi.org/10.1016/0895-6111(94)00040-9)
- [8] Terzopoulos D., Witkin A., Kass M. Constraints on deformable models: recovering 3D shape and nonrigid motion. *Artif. Intell.*, 1988, vol. 36, no. 1, pp. 91–123, doi: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(88\)90080-X](https://doi.org/10.1016/0004-3702(88)90080-X)
- [9] Попов В.В., Сорокин Ф.Д., Иванников В.В. Разработка конечного элемента гибкого стержня с отдельным хранением накопленных и дополнительных поворотов для моделирования больших перемещений элементов конструкций летательных аппаратов. *Труды МАИ*, 2017, № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76832>
- [10] Battini J.M., Pacoste C. Co-rotational beam elements with warping effects in instability problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 2002, vol. 191, no. 17–18, pp. 1755–1789, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00352-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00352-8)
- [11] Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д. Особенности применения вектора Эйлера для описания больших поворотов при моделировании элементов конструкций летательных аппаратов на примере стержневого конечного элемента. *Труды МАИ*, 2018, № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98753>
- [12] ANSYS *mechanical APDL tutorials*. URL: <http://www.worldcolleges.info/sites/default/files/me1.pdf> (дата обращения: 15.06.2024).
- [13] Гайджуров П.П., Исхакова Э.Р., Савельева Н.А. Исследование напряженно-деформированного состояния регулярной шарнирно-стержневой конструкции при кинематически ориентированном изменении формы. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 38–47.
- [14] Царитова Н.Г., Бузало Н.А. Шарнирный узел пространственной стержневой конструкции регулярной структуры. Патент РФ 2586351. Заявл. 12.01.2015, опубл. 10.06.2016.

- [15] Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. *Анализ конструкций с изменяющейся расчетной схемой*. Москва, СКАД СОФТ, АСВ, 2015. 148 с.

References

- [1] Perrin D.P., Smith C.E. Rethinking classical internal forces for active contour models. *CVPR*, 2001, vol. 2, pp. 615–620, doi: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.991020>
- [2] Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: active contour models. *Int. J. Comput. Vision*, 1988, vol. 1, no. 4, pp. 321–331, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00133570>
- [3] McInerney T., Terzopoulos D. Deformable models in medical image analysis: a survey. *Med. Image Anal.*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 91–108, doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(96\)80007-7](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(96)80007-7)
- [4] Miller J.V., Breen D.E., Lorensen W.E. et al. Geometrically deformed models: a method for extracting closed geometric models form volume data. *SIGGRAPH'91*, 1991, vol. 25, no. 4, pp. 217–226, doi: <https://doi.org/10.1145/122718.122742>
- [5] Terzopoulos D., Fleischer K. Deformable models. *Vis. Comput.*, 1998, vol. 4, no. 6, pp. 306–331, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01908877>
- [6] Terzopoulos D., Platt J., Barr A. et al. Elastically deformable models. *Comput. Graph.*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 205–214, doi: <https://doi.org/10.1145/37402.37427>
- [7] McInerney T., Terzopoulos D. A dynamic finite element surface model for segmentation and tracking in multidimensional medical images with application to cardiac 4D image analysis. *Comput. Med. Imaging Graph.*, 1995, vol. 19, no. 1, pp. 69–83, doi: [https://doi.org/10.1016/0895-6111\(94\)00040-9](https://doi.org/10.1016/0895-6111(94)00040-9)
- [8] Terzopoulos D., Witkin A., Kass M. Constraints on deformable models: recovering 3D shape and nonrigid motion. *Artif. Intell.*, 1988, vol. 36, no. 1, pp. 91–123, doi: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(88\)90080-X](https://doi.org/10.1016/0004-3702(88)90080-X)
- [9] Popov V.V., Sorokin F.D., Ivannikov V.V. A flexible rod finite element with separate storage of cumulated and extra rotations for large displacements of aircraft structural parts modeling. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76832> (in Russ.).
- [10] Battini J.M., Pacoste C. Co-rotational beam elements with warping effects in instability problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 2002, vol. 191, no. 17–18, pp. 1755–1789, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00352-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00352-8)
- [11] Nizametdinov F.R., Sorokin F.D. Euler vector application specifics for large turns description while flying vehicles structural elements modeling on the example of a rod finite element. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98753> (in Russ.).
- [12] ANSYS mechanical APDL tutorials. URL: <http://www.worldcolleges.info/sites/default/files/me1.pdf> (accessed: 15.06.2024).
- [13] Gaydzhurov P.P., Iskhakova E.R., Savelyeva N.A. et al. Study of stress-strain states of a regular hinge-rod constructions with kinematically oriented shape change. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 38–47.
- [14] Tsaritova N.G., Buzalo N.A. *Sharnirnyy uzel prostranstvennoy sterzhnevoy konstruktсии regul'yarnoy struktury* [Hinge joint of spatial beam structure of regular structure]. Patent RU 2586351. Appl. 12.01.2015, publ. 10.06.2016. (In Russ.).
- [15] Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. *Analiz konstruktsiy s izmenyayushcheysoy raschetnoy skhemoy* [Structure analysis with changing design scheme]. Moscow, SKAD SOFT Publ., ASV Publ., 2015. 148 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.06.2024

Информация об авторе

ГАЙДЖУРОВ Петр Павлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений». Донской государственный технический университет (344003, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Гагарина, 1, e-mail: gpp-161@yandex.ru).

Information about the author

GAIDZHUROV Pyotr Pavlovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures. Don State Technical University (344003, Rostov-on-Don, Russian Federation, Gagarin Sq., Bldg.1, e-mail: gpp-161@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гайджуров П.П. Компьютерное моделирование процесса формоизменения структурно-регулярных стержневых систем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 3–11.

Please cite this article in English as:

Gaidzhurov P.P. Computer simulation of the forming process in the structurally regular core systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 3–11.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию М.С. Селезневой**

«Динамический системный синтез моделей алгоритмического обеспечения навигационных комплексов летательных аппаратов»

Рассмотрены навигационные комплексы современных беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов. Представлены модели погрешностей навигационных комплексов и схемы их алгоритмической коррекции. Исследованы линейные и нелинейные алгоритмы оценивания, управления, комплексирования и построения прогнозирующих моделей, применяемые для повышения точности навигационной информации. Разработаны адаптивный нелинейный фильтр Калмана, редуцированный нелинейный алгоритм управления и алгоритм самоорганизации с комплексным ансамблем критериев селекции. Для дальнейшего совершенствования алгоритмического обеспечения навигационных комплексов предложена концепция динамического системного синтеза моделей, используемых в алгоритмах коррекции. Разработаны численные критерии степени наблюдаемости, управляемости переменных состояния моделей и критерии степени параметрической идентифицируемости, использованные для формирования моделей с улучшенными качественными характеристиками. При построении самоорганизующихся моделей использован способ управления ансамблем критериев селекции, обеспечивающий формирование моделей с желаемым качеством в зависимости от целевого применения моделей в различных режимах полета. Представлено алгоритмическое обеспечение навигационного комплекса летательного аппарата авианосного базирования.

Для специалистов в области навигации и систем управления летательными аппаратами.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>