

УДК 004.946

МЕТОД СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СБОРКЕ ИЗДЕЛИЙ*

И.Е. ЛАНДОВСКАЯ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: nairy@rambler.ru

В статье представлен метод соединения деталей при компьютерной сборке изделий из ткани. Ткань рассматривается как система взаимодействующих частиц, которые размещены в точках пересечения продольных и поперечных нитей полотна. Исходными данными для построения сеточной модели детали является ее контур (выкройка), который в общем случае представляет собой произвольный многоугольник. Сетка, которой представлена модель тканого материала, должна быть равномерной и иметь квадратную форму ячейки, чтобы действующие силы, возникающие в моделируемом изделии, были приближены по модулю и направлению к силам, возникающим в реальном материале при его деформациях. При моделировании используются физические методы, а именно метод частиц; для решения системы дифференциальных уравнений используется схема с перешагиванием. При таком подходе компьютерная модель ткани способна воспроизводить в виртуальном мире все деформации реальных материалов с достаточно высокой точностью. Предлагаемый подход соединения деталей изделия, представленных равномерной сеткой с квадратной формой ячейки, включает в себя такие этапы, как нахождение месторасположения частиц связей у соединяемых деталей, разработка модели поведения частиц связей в процессе сборки, определение зон напряженности материала после сборки. Метод позволяет производить сборку изделий как на поверхности твердотельного многогранного объекта, так и в его отсутствие. В подтверждение эффективности представленного метода приведены детали базовой конструкции и результаты сборки изделия из хлопчатобумажной лоскутной ткани на поверхности твердотельного многогранного объекта, представляющего собой манекен женской фигуры.

Ключевые слова: метод соединения деталей изделия, компьютерное моделирование ткани, дискретизация деталей произвольной формы, равномерная сетка, расположение частиц связей на контуре детали, поведение частиц связей при сборке, метод частиц, схема с перешагиванием

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-146-156

* Статья получена 03 июня 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мощности современных компьютеров и программные средства для них позволяют человеку создавать и моделировать буквально любые интересующие его процессы. Задача визуализации тканей стала особенно актуальной с развитием киноиндустрии, где компьютер все чаще используется для создания кино- и мультфильмов. Не менее важными областями, где востребовано компьютерное моделирование тканых материалов, являются дизайн интерьеров, индустрия моды, создание компьютерных игр.

Несмотря на востребованность, задача моделирования поведения тканых материалов до сих пор не решена в полной мере и остается одной из наиболее сложных задач компьютерной графики. Проблема заключается в том, что ткань является обманчиво простым объектом реального мира, но в действительности же процесс взаимодействия материала с окружающей средой достаточно сложно описать с помощью математических формул.

На данный момент существует множество работ [5–9, 11–15], посвященных проблеме моделирования ткани. Однако в этих работах авторы, как правило, не уделяют достаточного внимания соединению деталей, хотя этот этап неотъемлемо является частью процесса сборки изделий из тканых материалов и неоспоримо влияет на итоговый вид получаемого изделия.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из успешно развивающихся на сегодняшний день подходов является моделирование тканых материалов с использованием метода частиц [4]. При таком подходе плотно принято рассматривать как систему взаимодействующих частиц (узлов), которые размещены в точках пересечения продольных и поперечных нитей ткани (рис. 1).

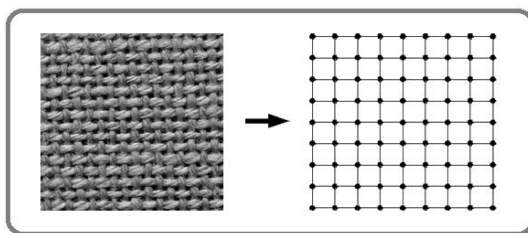


Рис. 1. Дискретная модель ткани

Движение всей системы можно описать обобщенными перемещениями в трехмерном пространстве:

$$r_{ij}(t) = \{x_{ij}(t), y_{ij}(t), z_{ij}(t)\},$$

где $x_{ij}(t)$, $y_{ij}(t)$, $z_{ij}(t)$ – координаты частицы в трехмерном пространстве, t – время.

На каждом временном слое ищут положения узлов в пространстве. При этом каждая из частиц обладает некоторой массой, находится в гравитационном поле, взаимодействует с окружающей средой и соседними частицами [2]. Тогда уравнение движения частицы P_{ij} имеет следующий вид:

$$m_{ij}r''_{ij} = m_{ij}g - m_{ij} \cdot c_{ij}r'_{ij} + \sum_{kl \in R_{ijkl}} F_{int}(r_{ij}, r_{kl}),$$

где m_{ij} – масса частицы; c_{ij} – константа демпфирования; $c_{ij}r'_{ij}$ – потери энергии, связанные с взаимодействием частицы с окружающей средой; g – ускорение свободного падения. Последняя составляющая уравнения движения представляет собой результирующую силу взаимодействий между частицами; R_{ijkl} – множество индексов узлов, связанных с узлом P_{ij} .

Для решения системы следует воспользоваться схемой с перешагиванием (leapfrog scheme) [10]. Это обусловлено тем, что для воспроизведения на компьютере реального поведения материала, число частиц в моделируемом полне должно быть велико, и к тому же каждое дополнительное вычисление силы требует больших временных затрат. Схема с перешагиванием является методом второго порядка точности и в сравнении с классическим явным методом Эйлера обладает большей устойчивостью, что позволяет на порядок увеличить шаг интегрирования:

$$V_{n+1} = V_n + hM^{-1}F(r_n, V_n),$$

$$r_{n+1} = r_n + hV_{n+1},$$

где r_n и V_n – векторы положений и скоростей частиц на n -м шаге интегрирования; h – шаг интегрирования; $F(r, V)$ – вектор-функция, описывающая действие внутренних и внешних сил на ткань; M – матрица инерции – диагональная матрица, описывающая распределение масс частиц ткани.

2. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Исходными данными для построения сеточной модели является контур детали (выкройки), который в общем случае представляет собой произвольный многоугольник [3]. На рис. 2 показан результат наложения на произвольную деталь равномерной прямоугольной сетки, в узлах которой будут расположены частицы моделируемой ткани. Стоит отметить, что сетка ткани обязательно должна быть равномерной и иметь квадратную форму ячейки, так как только в этом случае действующие силы, возникающие в моделируемом полотне, будут приближены по модулю и направлению к силам, возникающим в реальном материале при его деформациях [1]. На рис. 2 также хорошо видна основная проблема представления ткани равномерной квадратной сеткой – сильное искажение исходного контура детали. Можно измельчить сетку в несколько раз, но это приведет к неоправданному возрастанию вычислительных затрат и полностью все равно не сможет решить проблему искажения контура. Следовательно, необходимо проводить соединение деталей так, чтобы в процессе моделирования не искажать пределы изначально заданных контуров деталей.

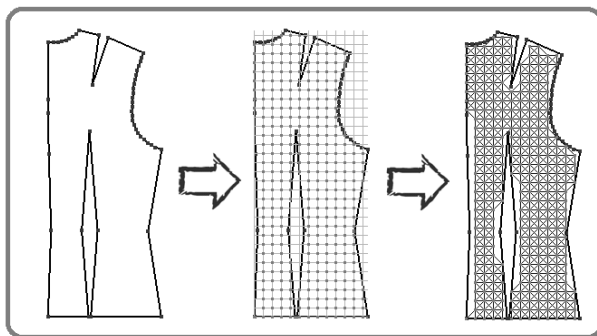


Рис. 2. Пример представления контура детали сеткой частиц

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТОДА СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Так как равномерная сетка никогда не сможет в точности повторить контуры моделируемой детали, то в местах соединений следует представить деталь как совокупность контура и сетки ткани. При этом на контуре каждой детали должны быть размещены частицы связи с другой деталью, отвечающие за соединение этих деталей в процессе сборки (рис. 3).

Точки соединения размещаются на контуре детали от начала соединения на равном расстоянии друг от друга, которое определяется как

$$R_s^p = l_s^p \frac{\min(b^I, b^II)}{\max(l_s^I, l_s^{II})}, \quad p = I, II,$$

где R_s^p – расстояние между частицами связей на контуре p -й детали; b^I, b^{II} – длина ребра ячейки сети у первой и второй соединяемых деталей соответственно; l_s^I, l_s^{II} – длина соединения первой и второй деталей соответственно (определяется как длина контура детали, по которому должно проходить соединение).

Сами координаты расположения точек связей на контуре детали можно определить, решив систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{sv_n}^p - x_i^p}{x_{i+1}^p - x_i^p} = \frac{y_{sv_n}^p - y_i^p}{y_{i+1}^p - y_i^p} = \frac{z_{sv_n}^p - z_i^p}{z_{i+1}^p - z_i^p}, \\ R_{ii+1}^p = \sqrt{(x_{i+1}^p - x_i^p)^2 + (y_{i+1}^p - y_i^p)^2 + (z_{i+1}^p - z_i^p)^2}, \\ R_{nsi}^p = \sqrt{(x_i^p - x_{ns}^p)^2 + (y_i^p - y_{ns}^p)^2 + (z_i^p - z_{ns}^p)^2}, \\ \sqrt{(x_i^p - x_{sv_n}^p)^2 + (y_i^p - y_{sv_n}^p)^2 + (z_i^p - z_{sv_n}^p)^2} = R_s^p(n-1) - R_{nsi}^p, \\ \sqrt{(x_{i+1}^p - x_{sv_n}^p)^2 + (y_{i+1}^p - y_{sv_n}^p)^2 + (z_{i+1}^p - z_{sv_n}^p)^2} = R_{ii+1}^p - (R_s^p(n-1) - R_{nsi}^p), \\ R_{nsi}^p \leq R_s^p(n-1) < \sqrt{(x_{i+1}^p - x_{ns}^p)^2 + (y_{i+1}^p - y_{ns}^p)^2 + (z_{i+1}^p - z_{ns}^p)^2}, \quad p = I, II, \end{array} \right.$$

где $a_i^p(x_i^p, y_i^p, z_i^p)$ и $a_{i+1}^p(x_{i+1}^p, y_{i+1}^p, z_{i+1}^p)$ – точки начала и конца отрезка контура p -й детали, на котором должна находиться n -я частица связи;

$x_{sv_n}^P, y_{sv_n}^P, z_{sv_n}^P$ – координаты n -й частицы связи, расположенной на контуре p -й детали, $n = \overline{1, N_s}$, N_s – количество частиц связей в соединении.

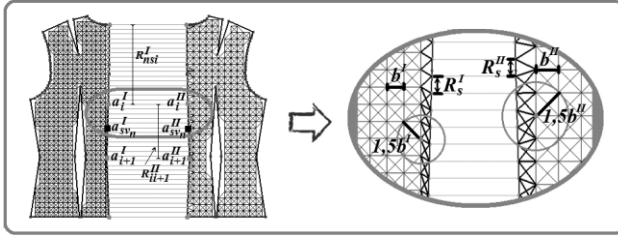


Рис. 3. Соединение двух деталей изделия

При таком подходе получается, что и у первой, и у второй деталей в местах соединения контуров всегда располагается одинаковое количество частиц связей. Эти частицы должны иметь жесткие связи с крайними частицами сетки ткани, чтобы в процессе сборки не изменялись размеры деталей. Точки ткани, которые будут иметь связи с частицами на контуре, должны удовлетворять условию

$$\sqrt{\left(x_{sv_n}^P - x_t^P\right)^2 + \left(y_{sv_n}^P - y_t^P\right)^2 + \left(z_{sv_n}^P - z_t^P\right)^2} \leq 1,5b^P, \quad p = \text{I, II},$$

где x_t^P, y_t^P, z_t^P – координаты крайней частицы сетки ткани p -й детали; $t \in T$, T – множество индексов крайних частиц ткани у p -й детали; b^P – длина ребра ячейки сети p -й детали.

В процессе сборки итоговая длина соединения вычисляется исходя из длин соединяемых деталей:

$$l_s = \min(l_s^{\text{I}}, l_s^{\text{II}}),$$

где l_s^{I} – длина соединения первой детали; l_s^{II} – длина соединения второй детали. А расстояние между частицами связей p -й соединяемой детали в состоянии равновесия должно составлять:

$$R_s = \min(R_s^{\text{I}}, R_s^{\text{II}}),$$

где R_s^{I} – расстояние между частицами связей на контуре первой детали, R_s^{II} – расстояние между частицами связей на контуре второй детали.

Таким образом, описанный метод позволяет соединять как детали с равной длиной соединения по контуру, так и детали, которые имеют разную длину соединения. Результаты сборки двух деталей с разной длиной соединения по контуру представлен на рис. 4.

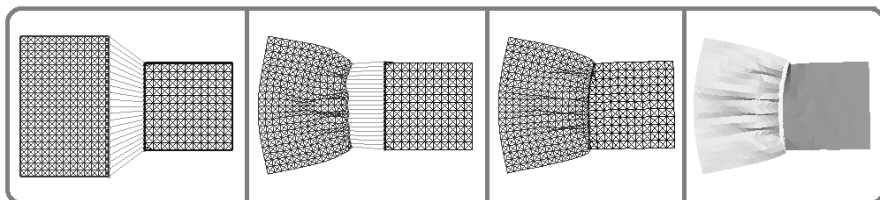


Рис. 4. Сборка деталей с разной длиной соединения по контуру

В процессе моделирования учитываются коэффициенты среды, такие как сила тяжести, сопротивление воздуха, сила трения об объект и прочие, что придает процессу большую реалистичность. Итоговый результат сборки базовой конструкции представлен на рис. 5 и 6.

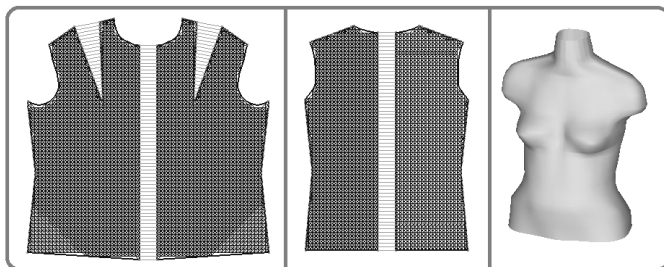


Рис. 5. Детали базовой конструкции перед сборкой и манекен

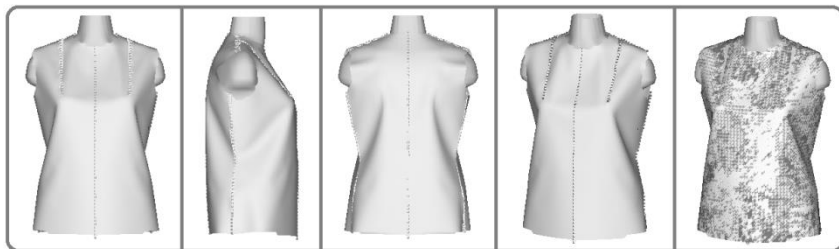


Рис. 6. Результат сборки базовой конструкции из хлопчатобумажной лоскутной ткани и выделение цветом зон напряженности материала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальность работы заключается в предложенном методе соединения деталей изделия. Он является тем необходимым звеном в цепочке моделирования, которое позволяет приблизить виртуальные деформации материала к реальным, позволяя соединять детали, представленные равномерной прямоугольной сеткой, что при обычном соединении деталей «частица ткани – частица ткани» вызывало деформацию контура деталей, а следовательно, растяжение и складки ткани в тех областях, где нарушались границы контура.

Результаты, описанные в работе, представляют интерес для специалистов в области создания систем автоматизации геометрического моделирования и проектирования, систем виртуальной реальности и компьютерной помощи для специалистов швейной промышленности, а также дизайнеров одежды и мебельного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландовская И.Е., Ландовский В.В., Фроловский В.Д. Моделирование изделий из тканых материалов с учетом их деформационных свойств // Современное состояние естественных и технических наук: сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции. – М.: Спутник+, 2014. – С. 76–81.
2. Ландовский В.В., Фроловский В.Д. Исследование методов интегрирования дифференциальных уравнений в задаче моделирования поведения ткани на основе метода частиц // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2006. – Т. 9. – С. 287–298.
3. Baraff D., Witkin A. Large steps in cloth simulation // Computer graphics and interactive techniques: proceedings of the 25th annual conference (SIGGRAPH'98), Orlando, Florida, USA, 19–24 July 1998. – New York: ACM, 1998. – P. 43–54. – doi: 10.1145/280814.280821.
4. Breen D, House D. A physically-based model of woven cloth // The Visual Computer. – 1992. – Vol. 8, iss. 5/6. – P. 264–277. – doi: 10.1007/BF01897114.
5. Chen B, Govindaraj M. A parametric study of fabric drape // Textile Research Journal. – 1996. – Vol. 66, N 1. – P. 17–24. – doi: 10.1177/004051759606600103.
6. Drape prediction by means of finite-element analysis / J.R. Collier, B.J. Collier, G. O'Toole, S.M. Sargand // Journal of the Textile Institute. – 1991. – Vol. 82, N 1. – P. 96–107. – doi: 10.1080/00405009108658741.

7. *De Jong S., Postle R.* A general energy analysis of fabric mechanics using optimal control theory // *Textile Research Journal*. – 1978. – Vol. 48, N 3. – P. 127–135. – doi: 10.1177/004051757804800302.
8. *Eberhardt B., Weber A., Strasser W.* A fast, flexible, particle system model for cloth draping // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1996. – Vol. 16, iss. 5. – P. 52–59. – doi: 10.1109/38.536275.
9. *Eischen J.W., Deng S., Clapp T.G.* Finite-element modeling and control of flexible fabric parts // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1996. – Vol. 16, iss. 5. – P. 52–59. – doi: 10.1109/38.536277.
10. *Hockney R.W., Eastwood J.W.* Computer simulation using particles. – New York: McGraw-Hill, 1981. – 523 p.
11. *Karnopp D.* Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems // *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*. – 1985. – Vol. 107, iss. 1. – P. 100–103. – doi: 10.1115/1.3140698.
12. *Provot X.* Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior / Wayne A. Davis and Przemyslaw Prusinkiewicz // *Proceedings of Graphics Interface'95*. – Qu'ebec, Canada, 1995. – P. 147–154.
13. *Terzopoulos D., Fleischer K.* Deformable models // *The Visual Computer*. – 1988. – Vol. 4. – P. 306–331.
14. *Volino P., Magnenat-Thalmann N.* Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation // *Proceeding Computer Graphics International (CGI'01)*, Hong Kong, China, 3–6 July 2001. – Hong Kong, 2001. – P. 265–272. – doi: 10.1109/CGI.2001.934683.
15. *Weil J.* The synthesis of cloth objects // *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. – 1986. – Vol. 20, iss. 4. – P. 49–54. – doi: 10.1145/15922.15891.

Ландовская Ирина Евгеньевна, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета по направлению 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Основное направление научных исследований – компьютерное моделирование поведения тканых материалов. E-mail: nairy@rambler.ru

Item connection method at the product computer assembling*

I.E. Landovskaya

Novosibirsk State Technical University, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: nairy@rambler.ru

Item connection method during the fabric product's computer assembling is presented in the paper. The fabric is considered as a system of interacting particles which placed in the direct and cross-cut cross points of the sheets' fiber. The item outline (pattern) is used as an initial data to construct item grid model. That outline has the form of any polygon. The grid has to be uniform with square-shaped cells so the active forces occurring in the simulating product were brought in modulus and direction to the forces of the real material that occurs with its deformation. Physical methods such, as particle method, are used for simulation. To solve the differential equation system the leapfrog scheme is used. Because of such approach the fabric computer model can virtually with high accuracy to reproduce all deformations of real materials. Proposed product items connection method consist of such steps as identification of the bonding particles location for connecting items, development of the bonding particles behavior during assembling process model and finding the material tension areas after assembly. Method allows carrying out the product assembling on the solid object's surface and without it. To confirm the method effectiveness the details of basic construction and results of cotton fabric product assembly on the solid plane-bounded object surface are presented. The object is female figure's mannequin.

Keywords: product items connection method, fabric computer simulation, sampling of the free-form items, uniform mesh, bonding particles location on the item profile, binding particles behavior during assembling, particle method, leapfrog scheme

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-146-156

REFERENCES

1. Landovskaya I.E., Landovsky V.V., Frolovskii V.D. [Simulation of products from fabric materials taking into account its deformation properties]. *Sovremennoe sostojanie estestvennyh i tekhnicheskikh nauk. Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The current state of natural and engineering sciences. Sourcebook XVII International scientific and practical conference]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2014, pp. 76–81. (In Russian)
2. Landovsky V.V., Frolovsky V.D. Issledovanie metodov integrirovaniya differentsial'nykh uravnenii v zadache modelirovaniya povedeniya tkani na osnove metoda chastits [Investigation of the techniques of the difference equation integration in the problem of the simulation of the fabric materials behavior by particle method]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki – Numerical Analysis and Applications*, 2006, vol. 9, pp. 287–298. (In Russian)

* Received 03 June 2015.

3. Baraff D., Witkin A. Large steps in cloth simulation. *Computer graphics and interactive techniques: proceedings of the 25th annual conference (SIGGRAPH'98)*, Orlando, Florida, USA, 19–24 July 1998, pp. 43–54. doi: 10.1145/280814.280821
4. Breen D., House D. A physically-based model of woven cloth. *The Visual Computer*, 1992, vol. 8, iss. 5–6, pp. 264–277. doi: 10.1007/BF01897114
5. Chen B., Govindaraj M. A parametric study of fabric drape. *Textile Research Journal*, 1996, vol. 66, no. 1, pp. 17–24. doi: 10.1177/004051759606600103
6. Collier J.R., Collier B.J., O'Toole G., Sargand S.M. Drape prediction by means of finite-element analysis. *Journal of the Textile Institute*, 1991, vol. 82, no. 1, pp. 96–107. doi: 10.1080/00405009108658741
7. De Jong S., Postle R. A general energy analysis of fabric mechanics using optimal control theory. *Textile Research Journal*, 1978, vol. 48, no. 3, pp. 127–135. doi: 10.1177/004051757804800302
8. Eberhardt B., Weber A., Strasser W. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, vol. 16, iss. 5, pp. 52–59. doi: 10.1109/38.536275
9. Eischen J.W., Deng S., Clapp T.G. Finite-element modeling and control of flexible fabric parts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, vol. 16, iss. 5, pp. 71–80. doi: 10.1109/38.536277
10. Hockney R.W., Eastwood J.W. *Computer simulation using particles*. New York, McGraw-Hill, 1981. 523 p.
11. Karnopp D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems. *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, 1985, vol. 107, iss. 1, pp. 100–103. doi: 10.1115/1.3140698
12. Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *Proceedings of Graphics Interface 95*, Qu'ebec, Canada, May 1995, pp. 147–154.
13. Terzopoulos D., Fleischer K. Deformable models. *The Visual Computer*, 1988, vol. 4, pp. 306–331.
14. Volino P., Magnenat-Thalmann N. Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation. *Proceeding Computer Graphics International (CGI'01)*, Hong Kong, China, 3–6 July 2001, pp. 265–272. doi: 10.1109/CGI.2001.934683
15. Weil J. The synthesis of cloth objects. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, vol. 20, iss. 4, pp. 49–54. doi: 10.1145/15922.15891