

УДК 004.925.83

СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

И.Е. Ландовская, В.Д. Фроловский, В.В. Ландовский
Новосибирский государственный технический университет

В статье рассматривается метод соединения деталей при компьютерной сборке изделий из ткани на поверхности твердотельного многогранного объекта. Для представления поверхности тканого материала в пространстве используются физические методы, а именно метод частиц: ткань представляет собой систему взаимосвязанных частиц, движение которых описывается законами механики. Процесс моделирования представляет собой решение системы дифференциальных уравнений с начальными условиями и нахождение траекторий движения частиц с использованием схемы с перешагиванием. Предлагаемый подход включает основные этапы компьютерного моделирования (дискретизация деталей произвольной формы, выявление основных внутренних взаимодействий между частицами модели, нахождение месторасположения частиц связей у соединяемых деталей, определение зон напряженности материала после сборки). Описаны методы экспериментального исследования деформационных свойств тканых материалов. Приведены выражения для расчета сил деформации, возникающих между частицами дискретной модели ткани, учитывающие экспериментально полученные данные. В доказательство соответствия поведения представленной компьютерной модели ткани и реальных образцов материалов приводятся данные экспериментов. В подтверждение результативности метода соединения деталей изделия при сборке на поверхности твердотельного объекта приведены результаты примерки базовой конструкции на виртуальный и реальный объекты, показано выделение цветом зон напряженности материала.

Ключевые слова: метод соединения деталей, компьютерное моделирование ткани, метод частиц, дискретизация деталей произвольной формы, деформационные коэффициенты материала, схема с перешагиванием.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-61-74

Введение

Всегда было ясно, что тканые материалы имеют уникальные свойства, которые позволяют им деформироваться в значительной степени по-другому, чем листам других материалов, например, бумаги или металлической фольги. Особые возможности деформации ткани были отмечены и известны всегда, но не были никогда полностью поняты с научной или инженерной точки зрения. Поэтому моделирование ткани считается одним из сложнейших аспектов компьютерной графики, так как сама ткань является обманчиво простым объектом реального мира. В действительности же процесс взаимодействия материала с окружающей средой достаточно сложно описать с помощью математических формул.

Современные средства компьютерной графики позволяют решать множество задач моделирования сложных поверхностей. Однако в задачах моделирования естественного поведения поверхностей тканей по-прежнему остается много открытых вопросов. Как будет выглядеть ткань с определенными свойствами на определенном объекте? Как с изменением свойств ткани изменяется ее драпировка? Важным в этой задаче является не только достижение наибольшей визуальной

реалистичности, но, возможно в большей степени, обеспечение соответствия модели физическим характеристикам ткани, соответствия моделируемых деформаций реальным.

Уже не одно столетие ученые разных континентов пытаются создать модель тканого материала, которая будет отражать все свойства реального полотна. Одна из первых попыток создания модели ткани была предпринята еще в конце XIX века русским математиком и механиком П. Чебышёвым. С того времени было предложено множество методов деформационного моделирования поверхностей тканей в пространстве, которые в основном можно разделить на три группы: физические, геометрические и гибридные. Каждая группа методов имеет свои плюсы и минусы, но наиболее эффективными в плане повторения поведения реальных материалов оказались физические методы.

В физических методах ткань, как правило, представляет собой систему взаимосвязанных частиц, движение которых описывается законами механики. А процесс моделирования сводится к решению системы дифференциальных уравнений с начальными условиями и нахождению траекторий движения частиц. Одним из первых использование такого подхода предложил D. Terzopoulos [1]. Хорошо известны работы в области физического моделирования ткани, таких авторов как D. Baraff и A. Witkin [2], P. Volino [3], U. Ascher [4], D. Breen и D. House [5], X. Provot [6].

К сожалению, в работах по моделированию ткани авторы не уделяется достаточного внимания соединению деталей, хотя этот этап неотъемлемо является частью процесса сборки изделий из тканых материалов и неоспоримо влияет на итоговый вид получаемого изделия. Кроме того, многие исследователи, особенно зарубежные, используют метод получения деформационных коэффициентов ткани, основанный на системе Kawabata [7], но для большинства российских ученых эта система является недоступной, и, как следствие, разработки в области моделирования ткани в нашей стране ведутся недостаточно интенсивно.

Таким образом, основной задачей данной работы является разработка метода соединения деталей при компьютерной сборке изделий. В то же время, так как модель ткани должна учитывать деформационные свойства реального материала, необходимо:

- 1) выбрать форму ячейки сети для построения сеточной модели тканого материала;
- 2) предложить метод получения коэффициентов дифференциальных уравнений для моделирования тканых материалов на отечественном оборудовании;
- 3) определить, какие выражения следует использовать для расчета сил деформации, возникающих между частицами дискретной модели ткани, чтобы учесть экспериментально полученные данные.

1. Моделирование тканых материалов

В ткани тонкие волокна скручены в нити, и эти нити более или менее жестко сплетены во взаимосвязанную сеть. Компоненты сети удерживаются вместе трением, а поведение ткани зависит от типа волокна (хлопчатобумажное, шелк, шерсть и т.д.), веса волокна, плотности сплетения, типа сплетения и т. д. Очевидным фактом является и то, что порядок расположения нитей относительно друг друга остается неизменным даже при существенных деформациях, а сама деформация ткани представляет собой только изменение формы и размеров ячеек [5]. Отсюда следует предположение рассматривать ткань как систему частиц, которые размещены в точках пересечения продольных и поперечных нитей (рис. 1).

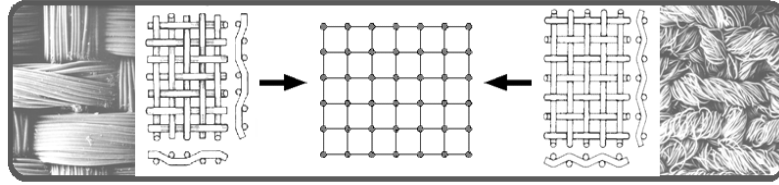


Рис. 1 – Представление различных структур тканых материалов в виде дискретной модели

Fig. 1 – Fabric materials various structures discrete model representation

Пределом детализации модели ткани является сетка с шагом, сравнимым с толщиной нити, но следует учитывать и тот факт, что время моделирования возрастает пропорционально увеличению количества частиц, которыми представлена сетка тканого материала. Поэтому при проведении экспериментов следует подобрать параметры дискретизации, при которых модель будет достаточно детализирована, чтобы точно воспроизвести важные физические эффекты, и все же не настолько подробно, чтобы сделать расчеты неосуществимыми.

Одним из важнейших этапов построения модели является определение законов взаимодействия частиц, для этого необходимо рассмотреть деформационные свойства ткани и определить наиболее важные взаимодействия.

2. Деформационные свойства материалов

Основные взаимодействия, которые происходят на уровне нити, это растяжение-сжатие; изгиб и сдвиг [7]. Учитывая, что ткань достаточно легкая и масса ткани в удаленных узлах оказывает пренебрежимо малое влияние на каждую рассматриваемую частицу, предположим, что на каждую внутреннюю частицу влияют 12 соседних частиц. На рис. 2 взаимодействия растяжения-сжатия, сдвига и изгиба обозначены связями 1, 2 и 3 соответственно.

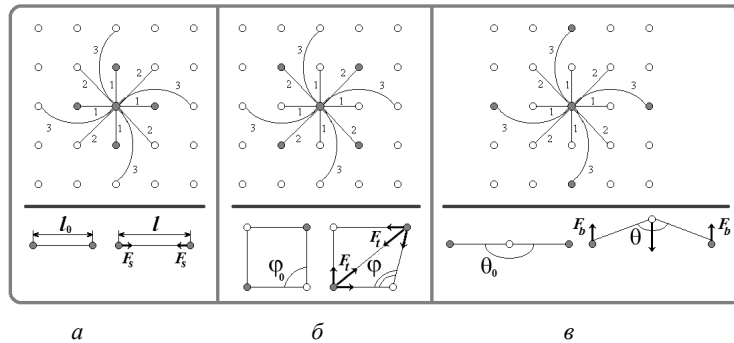


Рис. 2 – Типы взаимодействий:

a – растяжение-сжатие; *б* – сдвиг; *в* – изгиб

Fig. 2 – Interaction types:

a – compression-stretching; *b* – trellising; *c* – bending

Введем обозначения: $F_{s,ijkl}$ – сила взаимодействия растяжения-сжатия, с которой частица P_{kl} воздействует на частицу P_{ij} ; $F_{t,ijkl}$, $F_{b,ijkl}$ – силы взаимодействий сдвига и изгиба соответственно.

Взаимодействие растяжения-сжатия имеет место, когда расстояние между двумя соседними частицами (см. рис. 2, а, связи 1) отличается от расстояния между ними в состоянии покоя. В случае растяжения-сжатия направление сил очевидно, так как во взаимодействии учитываются положения только двух частиц. Силу, возникающую при взаимодействиях растяжения-сжатия на n -м шаге интегрирования между соседними частицами P_{ij} и P_{kl} , $k = i \pm d$, $l = j \pm p$, $d, p \in \{0; 1\}$, $d \neq p$, можно получить, используя выражение

$$F_{s,ijkl} = \frac{F_{spr}(L)}{S_{pr}} S_{yas},$$

где $F_{spr}(L)$ – сила, возникающая в пробе материала, при растяжении его вдоль нити основы или утка на L процентов (величина силы определяется исходя из диаграммы «нагрузка-удлинение» материала (рис. 3) в соответствии с ГОСТ 3813–72 отдельно для нитей основы и нитей утка); S_{pr} – площадь пробы (размеры проб для шерстяных и полушерстяных тканей – 50×100 мм, для всех остальных – 50×200 мм); S_{yas} – площадь ячейки сети модели, которой представлен тканый материал.

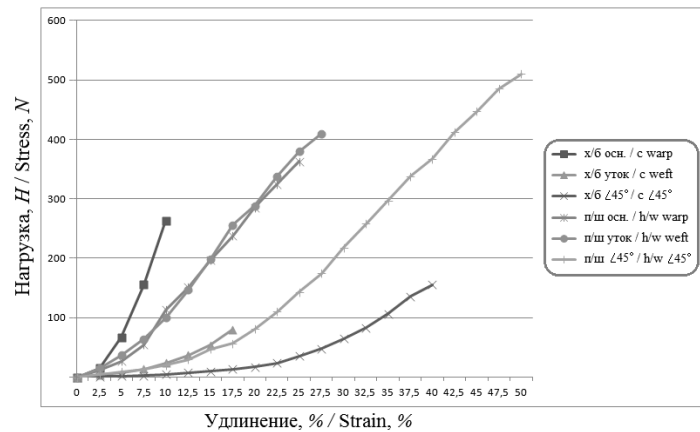


Рис. 3 – Диаграмма «нагрузка-удлинение» хлопчатобумажной и полушерстяной тканей

Fig. 3 – «Stress-strain» diagram of the cotton and half-woolen fabric

Результирующая сила взаимодействия растяжения-сжатия для частицы P_{ij} определяется как сумма:

$$F_{s,ij} = \sum_{kl \in R_{s,ijkl}} F_{s,ijkl},$$

где $R_{s,ijkl}$ – множество индексов частиц, связанных с частицей P_{ij} взаимодействием растяжения-сжатия.

Взаимодействие сдвига (см. рис. 2, б, связи 2) можно выразить через взаимодействие растяжения-сжатия частиц, образующих диагональ ячейки. Силу, возникающую при взаимодействии сдвига на n -м шаге интегрирования между соседни-

ми частицами P_{ij} и P_{kl} , $k = i + d$, $l = j + p$, $d, p \in \{-1, 1\}$, можно получить, используя выражение

$$F_{t,ijkl} = \frac{F_{tpr}(L)}{S_{pr}} S_{yas},$$

где $F_{tpr}(L)$ – сила, возникающая в пробе материала, при растяжении его под углом 45° к нити основы на L процентов (величина силы определяется исходя из диаграммы «нагрузка-удлинение» материала (см. рис. 3) в соответствии с ГОСТ 3813–72).

Результирующая сила взаимодействия сдвига для частицы P_{ij} определяется как сумма:

$$F_{t,ij} = \sum_{kl \in R_{t,ijkl}} F_{t,ijkl},$$

где $R_{t,ijkl}$ – множество индексов частиц, связанных с частицей P_{ij} взаимодействием сдвига.

Последний вид взаимодействия – взаимодействие изгиба (см. рис. 2, в, связи 3) можно выразить как функцию угла, образованного тремя последовательными частицами, лежащими на одной прямой (нити). Сила, возникающая при взаимодействии изгиба на n -м шаге интегрирования между частицами P_{ij} и P_{kl} , $k = i \pm d$, $l = j \pm p$, $d, p \in \{0, 2\}$, $d \neq p$, определяется исходя из выражения

$$F_{b,ijkl} = \frac{EI_{pr}}{b^2(1-v^2)N} \Delta\theta,$$

где EI_{pr} – жесткость пробы материала при изгибе (EI , Н·м²); b – длина ребра ячейки сети, $\Delta\theta$ – угол между двумя ребрами (угол изгиба нити); v – значение коэффициента Пуассона для данного материала; N – количество ячеек сети модели ткани, которые поместятся по ширине пробы (размеры пробы составляют 160×30 мм).

Результирующую силу взаимодействия изгиба для частицы P_{ij} определим как сумму:

$$F_{b,ij} = \sum_{kl \in R_{b,ijkl}} F_{b,ijkl} + \sum_{sr \in R_{b,ijsr}} (-F_{b,ijsr}),$$

где $R_{b,ijkl}$ – множество индексов частиц, связанных с частицей P_{ij} взаимодействием изгиба, а $R_{b,ijsr}$ – множество индексов частиц, для которых частица P_{ij} является узлом, через который происходит изгиб.

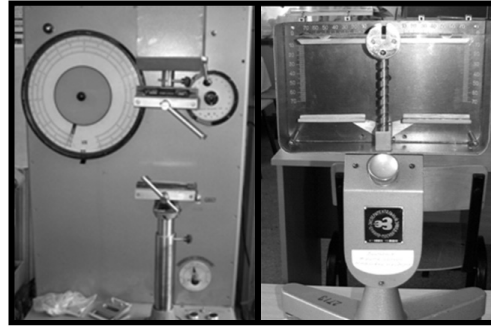
В итоге получаем $F_{int,ij}$ – внутреннюю силу – суммарный результат всех внутренних сил, действующих на частицу:

$$F_{int,ij} = \sum_{kl \in R_{s,ijkl}} F_{s,ijkl} + \sum_{kl \in R_{t,ijkl}} F_{t,ijkl} + \sum_{kl \in R_{b,ijkl}} F_{b,ijkl} + \sum_{sr \in R_{b,ijsr}} (-F_{b,ijsr}),$$

где $R_{s,ijkl}$, $R_{t,ijkl}$, $R_{b,ijkl}$ – множество индексов частиц, связанных с частицей P_{ij} взаимодействиями растяжения-сжатия, сдвига и изгиба соответственно,

а $R_{b,ijsr}$ – множество индексов частиц, для которых частица P_{ij} является узлом, через который происходит изгиб.

Испытания материалов для получения характеристик деформации растяжения-сжатия и сдвига проводят на разрывной машине РТ-250 (рис. 4, а), а для получения характеристик изгиба – на приборе ПТ-2 (рис. 4, б) согласно ГОСТ 3813–72 и ГОСТ 10550–93 соответственно.



а

б

Рис. 4 – Измерительные приборы:

а – разрывная машина РТ-250; б – прибор ПТ-2

Fig. 4 – Measuring instruments:

а - strength testing machine RT-250; б – PT-2

3. Математическая 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 [8]. Тогда уравнение движения частицы P_{ij} имеет следующий вид:

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

где m_{ij} – масса частицы; c_{ij} – константа демпфирования; составляющая $-c_{ij}r_{ij}'$ – представляет собой 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) [9]. Это обусловлено тем, что для воспроизведения на компьютере реального поведения материала число частиц в моделируемом полотне 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.

Начальные условия: $r|_{t_0} = r_0, V|_{t_0} = 0, F_{int}|_{t_0} = 0$.

4. Дискретизация деталей произвольной формы

Существует множество разновидностей форм сеток, которыми может быть представлена модель ткани: равномерная сетка, частично равномерная сетка, неравномерная сетка и др. Так как диаграмма «нагрузка-удлинение» содержит данные растяжения проб вдоль основы, утка и под углом в 45° к основе, то логично предположить, что и в компьютерной модели представления ткани между частицами должны возникать силы, аналогичные по направлению их действия. Из всех возможных вариантов дискретизации ткани наиболее подходящим в этом случае является представление ткани сеткой с равномерной квадратной формой ячеек. Правильность выбранной модели дискретизации ткани и расчета коэффициентов деформации, а также отсутствие зависимости модели от размеров ячейки сетки подтверждают результаты экспериментов, представленные на рис. 5.

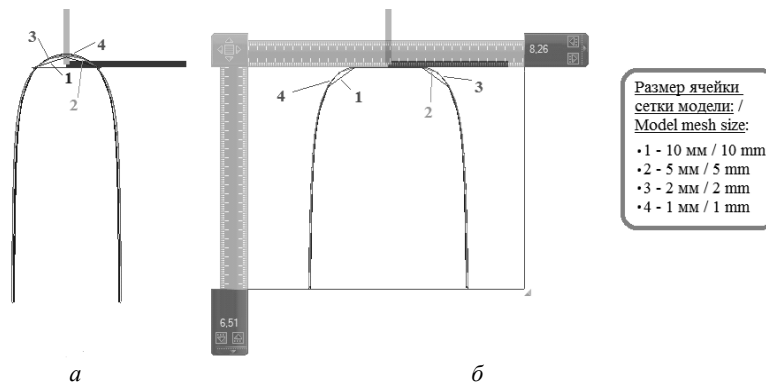


Рис. 5 – Провисание проб с разным размером ячеек сетки:

a – без внешних воздействий; *b* – закрепленных грузом на опорной площадке

Fig. 5 – Dangling of the samples with different mesh sizes:

a – without external loads; *b* – fixed load on the base platform

На рис. 5, *b* показаны результаты эксперимента, который воспроизводит изгиб хлопчатобумажной ткани для лоскутного шитья ($EI_{pr} = 1370 \text{ мкН} \cdot \text{см}^2$, $l_{pr} = 65 \text{ мм}$ – длина свешивающихся концов проб) при измерении коэффициента

изгиба ткани по основе на приборе ПТ-2 согласно ГОСТ 10550–93 для проб с различным размером ячеек сетки.

Исходными данными для построения сеточной модели является контур детали (выкройки), который в общем случае представляет собой произвольный многоугольник. На рис. 6 показан результат наложения на произвольную деталь равномерной прямоугольной сетки, в узлах которой будут расположены частицы моделируемой ткани.

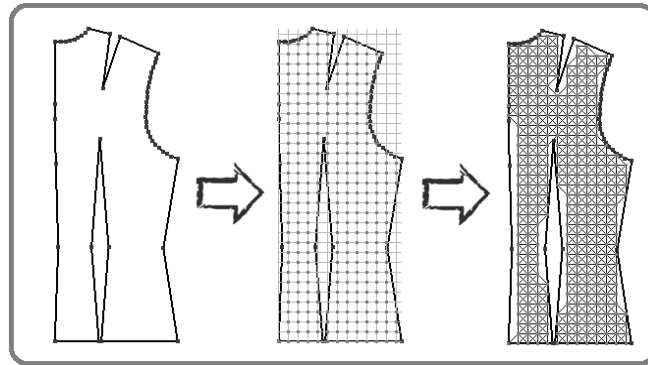


Рис. 6 – Пример представления контура детали сеткой частиц

Fig. 6 – Example of the item profile representation by the particles' mesh

На рис. 6 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, только немного уменьшит ее визуально. Следовательно, необходимо проводить соединение деталей так, чтобы в процессе моделирования не искажать пределы изначально заданных контуров деталей.

5. 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.

Пусть $a_{ns}^I(x_{ns}^I, y_{ns}^I, z_{ns}^I)$ и $a_{ks}^I(x_{ks}^I, y_{ks}^I, z_{ks}^I)$ – точки контура первой соединяемой детали, которые являются началом и концом соединения соответственно, а $a_{ns}^{II}(x_{ns}^{II}, y_{ns}^{II}, z_{ns}^{II})$ и $a_{ks}^{II}(x_{ks}^{II}, y_{ks}^{II}, z_{ks}^{II})$ – точки контура второй соединяемой детали, которые также являются началом и концом соединения. Тогда длина соединения p -й детали определяется как длина контура этой детали, по которому должно проходить соединение:

$$l_s^p = \sum_{i=ns+1}^{ks} \sqrt{(x_i^p - x_{i-1}^p)^2 + (y_i^p - y_{i-1}^p)^2 + (z_i^p - z_{i-1}^p)^2}, \quad p = I, II.$$

Точки соединения размещаются на контуре детали от начала соединения на равном расстоянии друг от друга, которое определяется из выражения (1). Сами координаты расположения точек связей на контуре детали можно определить, решив систему уравнений (2). При этом получается, что и у одной, и у второй детали в местах соединения контуров всегда располагается одинаковое количество частиц связей.

$$R_s^p = l_s^p \frac{\min(b^I, b^{II})}{\max(l_s^I, l_s^{II})}, p = I, II, \quad (1)$$

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.

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

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.

Частицы, через которые происходит соединение деталей, 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:

$$\sqrt{(x_{sv_n}^p - x_i^p)^2 + (y_{sv_n}^p - y_i^p)^2 + (z_{sv_n}^p - z_i^p)^2} \leq 1,5b^p, p = I, II,$$

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:

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

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

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

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

Направление стягивающей силы $F_{st}^p(x_{st}^p, y_{st}^p, z_{st}^p)$, приложенной к n -й частице связи p -й детали при сборке можно определить как

$$x_{st}^p = \frac{x_{sv_n}^I + x_{sv_n}^{II}}{2}; \quad y_{st}^p = \frac{y_{sv_n}^I + y_{sv_n}^{II}}{2}; \quad z_{st}^p = \frac{z_{sv_n}^I + z_{sv_n}^{II}}{2}.$$

При моделировании на частицы связей, кроме стягивающих сил, действуют те же силы, что и на частицы ткани, а между частицами связей детали возникают взаимодействия растяжения-сжатия и изгиба, описанные в разделе «Деформационные свойства материалов» данной статьи. Коэффициенты деформации для частиц связей определяются теми же методами, что и коэффициенты деформации самого материала.

Значительным плюсом данного метода является то, что размеры ячеек сеток соединяемых деталей могут в значительной степени различаться между собой, как показано на рис. 7, а.

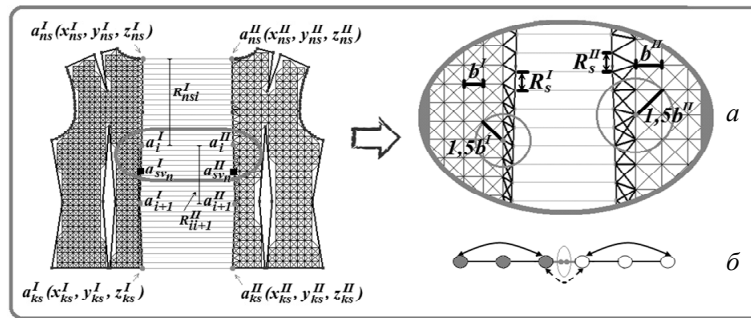


Рис. 7 – Соединение двух деталей изделия:

а – вид спереди; б – вид сверху

Fig. 7 – Connection of the product's two items:

а – face view; б – top view

Связи, характеризующие изгиб ткани, действуют через узел, поэтому после сборки изделия влияние одной детали на другую отсутствует (см. рис. 7, б). Эти взаимодействия учитываются отдельно, исходя из известного набора связей частиц соединения с крайними точками ткани детали.

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. 8.

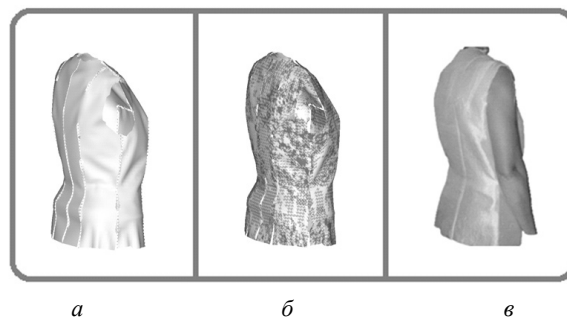


Рис. 8 – Результаты сборки базовой конструкции:

a – виртуальное изделие; *б* – выделение цветом зон напряженности материала; *в* – примерка на реальную модель

Fig. 8 – Results of the base design assembling:

a – virtual product; *b* – highlighting of the tension areas; *c* – fitting on the real model

Заключение

Изложенные в работе методы и алгоритмы не раз доказывали свою эффективность на практике при сборке различных моделей одежды. Для проверки описанных методов и моделей был разработан комплекс программных средств, позволяющий производить все этапы компьютерного моделирования сборки изделий из ткани, а также проводить численную и визуальную оценку эффективности сборки через итоговый расчет растяжений и выделение цветом зон напряженности материала.

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. Также уникальностью работы можно считать объединение методов экспериментального исследования деформационных свойств тканых материалов на конкретной измерительной аппаратуре и математического моделирования на компьютере с использованием полученных данных без каких-либо сложных преобразований.

Описанные методы и модели могут с успехом быть применены в легкой промышленности, дизайне, компьютерных играх и анимации, а также во многих других смежных отраслях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Terzopoulos D., Fleischer K.** Deformable models // *The Visual Computer*. – 1988. – Vol. 4, iss. 6. – P. 306–331. – doi: 10.1007/BF01908877.
2. **Baraff D., Witkin A.** Large steps in cloth simulation // *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'98*, Orlando, Florida, 19–24 July, 1998. – New York, USA, 1998. – P. 43–54. – doi: 10.1145/280814.280821.
3. **Volino P., Magnenat-Thalmann N.** Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation // *Proceedings of Computer Graphics International Conference (CGI'01)*, Hong Kong, 3–6 July 2001. – Los Alamitos, California, 2001. – P. 265–272. – doi: 10.1109/CGI.2001.934683.
4. **Ascher U.M., Boxerman E.** On the modified conjugate gradient method in cloth simulation // *The Visual Computer*. – 2003. – Vol. 19, iss. 7. – P. 526–531. – doi: 10.1007/s00371-003-0220-4.
5. **Breen D.E., House D.H., Getto P.H.** A physically based particle model of woven cloth // *The Visual Computer*. – 1992. – Vol. 8, iss. 5. – P. 264–277. – doi: 10.1007/BF01897114.
6. **Provot X.** Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior // *Proceedings of Graphics Interface Conference, Quebec, Canada, May 1995*. – New York, USA, 1995. – P. 147–154.
7. **Kawabata S.** The standardisation and analysis of hand evaluation: technical report. – Osaka, Japan: The Textile Machinery Society of Japan, 1980. – 97 p.
8. **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, № 3. – С. 287–298.
9. **Hockney W., Eastwood J.** Computer simulation using particles. – New York: CRC Press, 1988. – 540 p.

PART CONNECTION IN COMPUTER SIMULATION OF THE FABRIC PRODUCT FITTING TAKING INTO ACCOUNT THEIR DEFORMATION PROPERTIES

Landovskaya I.E., Frolovsky V.D., Landovsky V.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

A part arrangement method in computer-aided fitting of fabric items on the surface of a polyhedral object is considered in the paper. To represent the surface of a fabric in space physical methods such as the particle method are to be used. A fabric is a system of interconnected particles and the movement of these particles can be described by the laws of motion. The simulation process consists of solving a differential equation system with boundary (initial) conditions and finding the particle paths by using the leapfrog scheme. The proposed approach includes the main steps of computer simulation (sampling of the free-shape items, identification of the main internal interactions of the model particles, finding the connected particle location for the items, revealing the fabric tension areas after fitting). Experimental methods for studying fabric deformation properties are described. Expressions for calculating deformation forces that occur between the particles of the fabric discrete model taking into account experimental data are presented. Experimental data are given to demonstrate the correspondence of the proposed fabric computer model behavior and real material samples. To show the items connection method efficiency during assembling on the solid object surface the results of fitting on virtual and real objects are presented. The tension areas of the fabric are given in color.

Keywords: part connection method, fabric computer simulation, particle method, sampling of the free-shape items, fabric deformation rates, leapfrog scheme.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-61-74

REFERENCES

1. Terzopoulos D., Fleischer K. Deformable models. *The Visual Computer*, 1988, vol. 4, iss. 6, pp. 306–331. doi: 10.1007/BF01908877

2. Baraff D., Witkin A. Large steps in cloth simulation. *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'98*, Orlando, Florida, 19–24 July, 1998, pp. 43–54. doi: 10.1145/280814.280821
3. Volino P., Magnenat-Thalmann N. Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation. *Proceeding of Computer Graphics International Conference (CGI'01)*, Hong Kong, 3–6 July 2001, pp. 265–272. doi: 10.1109/CGI.2001.934683
4. Ascher U.M., Boxerman E. On the modified conjugate gradient method in cloth simulation. *The Visual Computer*, 2003, vol. 19, iss. 7, pp. 526–531. doi: 10.1007/s00371-003-0220-4
5. Breen D.E., House D.H., Getto P.H. A physically based particle model of woven cloth. *The Visual Computer*, 1992, vol. 8, iss. 5, pp. 264–277. doi: 10.1007/BF01897114
6. Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *Proceedings of Graphics Interface Conference*, Qu'ebec, Canada, May 1995, pp. 147–154.
7. Kawabata S. *The standardisation and analysis of hand evaluation*. Technical report. Osaka, Japan, The Textile Machinery Society, 1980. 97 p.
8. Landovskii V.V., Frolovskii V.D. Issledovanie metodov integrirovaniya differentsial'nykh uravnenii v zadache modelirovaniya povedeniya tkani na osnove metoda chastits [Integration methods in the problem of modelling a fabric based on the particles method]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki – Siberian Journal of Numerical Mathematics*, 2006, vol. 9, iss. 3, pp. 287–298. (In Russian)
9. Hockney W., Eastwood J. *Computer simulation using particles*. New York, CRC Press, 1981. 540 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ландовская Ирина Евгеньевна – родилась в 1987 году, окончила Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), с 2011 года аспирант кафедры автоматизированных систем управления НГТУ. Область научных интересов: компьютерное моделирование поведения тканых материалов. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nairy@rambler.ru).

Landovskaya Irina Evgenievna (b. 1987) – graduated from the Novosibirsk State Technical University (NSTU), Postgraduate Student of Automated Control System Department of the NSTU. Area of research: computer-aided simulation of the fabric materials behavior. She is author of 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nairy@rambler.ru).



Фроловский Владимир Дмитриевич – родился в 1952 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование и автоматизация процессов геометрического проектирования. Опубликовано 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: frolovskij@corp.nstu.ru).

Frolovsky Vladimir Dmitrievich (b. 1952) – Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor at the Automated Control System Department in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the simulation and geometric design process automation. He is author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: frolovskij@corp.nstu.ru).



Ландовский Владимир Владимирович – родился в 1980 году, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование процессов сборки трехмерных изделий из плоских заготовок. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: landovskij@corp.nstu.ru).

Landovsky Vladimir Vladimirovich (b. 1980) – Candidate of Science (Eng.), associate professor at the Automated Control System Department in Novosibirsk State Technical University. Research interests: process simulation of the assembling the three-dimensional products from the flat parts. He is author of 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: landovskij@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 29 июля 2015 г.
Received July 29, 2015*

To Reference:

Landovskaya I.E., Frolovsky V.D., Landovskii V.V. Soedinenie detalei pri komp'yuternom modelirovanii sborki izdelii iz tkanykh materialov s uchetom ikh deformatsionnykh svoistv [Part connection in computer simulation of the fabric product fitting taking into account their deformation properties]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 61–74. doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-61-74