

УДК 519.6:514.74

Реализация алгоритма наложения тканевых изделий на параметрические поверхности с помощью масс-пружинной модели

Богод Дмитрий Анатольевич^(*)

dmitry.bogod@yandex.ru

Фазлов Илья Ратмирович

ifazlov@mail.ru

Хоменков Захар Васильевич

x14511b@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Реализована и исследована математическая модель процесса динамической укладки ткани на поверхность сложной формы с использованием метода масс-пружин. Предусмотрена возможность изменения длины волокна ткани. Работа алгоритма продемонстрирована для модели сферы, представленной в виде параметрического уравнения. Показано, что алгоритм позволяет реалистично моделировать наложение ткани и находить места ее складок и растяжений. Разработан программный модуль на языке C++ (с элементами Python), реализующий дискретную масс-пружинную модель, обладающий гибкой архитектурой и расширяемым графическим интерфейсом.

Ключевые слова: наложение ткани, драпировка ткани, модель масс-пружин, NURBS представление, тканевые материалы

Implementation of an algorithm for draping fabric products onto parametric surfaces using a mass-spring model

Bogod Dmitry Anatolyevich^(*)

dmitry.bogod@yandex.ru

Fazlov Ilya Ratmirovich

ifazlov@mail.ru

Khomenkov Zakhar Vasilyevich

x14511b@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A mathematical model of the process of dynamic laying of fabric on a complex surface using the mass-spring method has been implemented and studied. The ability to change the length of the fabric fiber is provided. The operation of the algorithm is demonstrated for a sphere model presented as a parametric equation. It is shown that the algorithm allows for realistic modeling of fabric laying and finding places of its folds and stretches. A software module has been developed in C++ (with Python elements) that implements a discrete mass-spring model, has a flexible architecture and an extensible graphical interface.

Keywords: fabric overlay, fabric draping, mass spring model, NURBS representation, fabric materials

Введение. В статье рассматривается процесс укладки тонких гибких текстильных материалов на трехмерные объекты со сложной геометрией. Основное внимание уделяется анализу поведения ткани при контакте с неподвижными поверхностями, включая формирование складок, степень

провисания и уровень натяжения материала. Особое значение в работе уделено воздействию внешних факторов, таких как гравитационное притяжение и силы демпфирования, которые оказывают существенное влияние на характеристики взаимодействия ткани с поверхностью.

Методы и материалы. Существует несколько подходов к численному моделированию поведения ткани на компьютере: методы, основанные исключительно на информации о геометрии тела, дискретные модели на основе частиц, масс-пружинные модели, методы конечных элементов (FEM), а также методы сглаженных частиц (SPH) [1, 2].

В области компьютерной анимации одним из самых популярных методов моделирования поведения ткани является модель масс-пружин. Этот подход основан на представлении ткани в виде специальной сетки, состоящей из отдельных узлов, которые соединяются между собой пружинными элементами.

Принцип работы данной модели заключается в том, что ткань разбивается на множество дискретных точек (узлов), соединенных между собой пружинами. Эти пружины обладают особыми свойствами: они сопротивляются как растяжению, так и изгибу материала. Каждая пружина характеризуется определенным коэффициентом упругости, который определяет ее жесткость [3].

Важной особенностью модели является то, что все узлы обладают массой и подчиняются фундаментальным законам физики. Это позволяет точно воспроизводить динамику движения ткани под воздействием различных сил.

Результаты. В своей базовой реализации метод масс-пружин представляет каждую элементарную ячейку ткани в виде простой сетки взаимосвязанных узлов, соединенных несколькими связями, показанными на рис. 1.

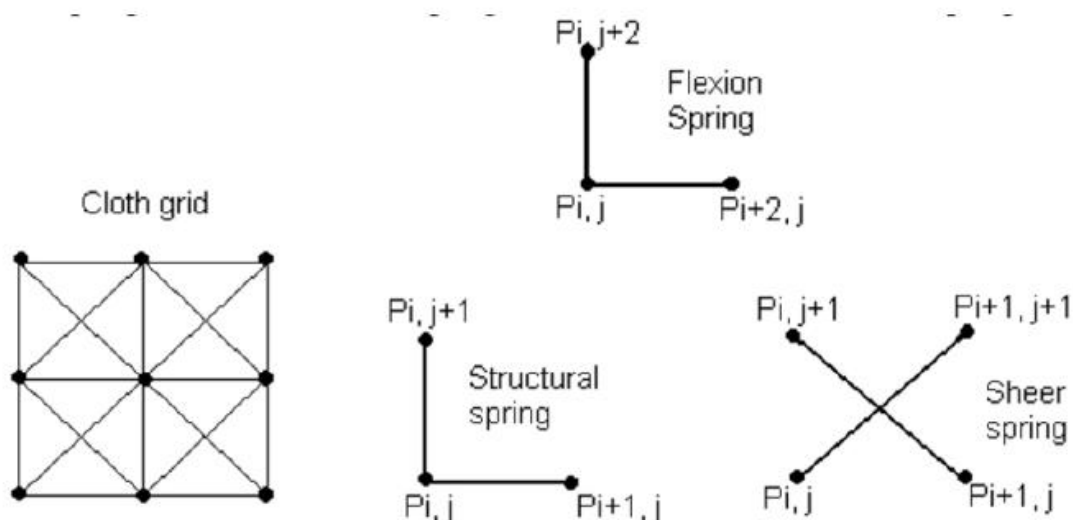


Рис. 1. Виды пружин в модели

В рамках данного метода моделирования каждый узел ткани подвергается воздействию внутренних пружинных сил. Эти силы направлены на то,

чтобы вернуть расстояния между узлами к их первоначальному, недеформированному состоянию.

Механизм действия основан на том, что пружины стремятся восстановить исходную форму материала. При деформации ткани каждая пружина пытается сократить или растянуть расстояние между узлами до их естественного положения. Расчет суммарной силы для каждого узла производится путем сложения всех воздействий от пружин, которые с ним соединены. Это позволяет учесть комплексное влияние всех пружинных связей на поведение конкретного узла в структуре ткани [4]. Такой подход обеспечивает реалистичное воспроизведение процесса деформации и восстановления формы текстильного материала при различных воздействиях:

$$F_{\text{внутр}}(i, j) = - \sum_{(k, l) \in R} k (\overline{P_{l, j} P_{k, l}} - \| \overline{P_{l, j} P_{k, l}} \|_0) \cdot \frac{\overline{P_{l, j} P_{k, l}}}{\| \overline{P_{l, j} P_{k, l}} \|},$$

где k — жесткость пружины; R — набор 8 точек вокруг точки P ; $\| \overline{P_{l, j} P_{k, l}} \|_0$ — недеформированное расстояние между точками $P_{l, j}$ и $P_{k, l}$.

В дискретной форме (частицы, узлы сетки) решается система уравнений:

$$m_i \frac{d^2 p_i}{dt^2} = F_i^{\text{внутр}} + F_i^{\text{внеш}},$$

где p_i — координата i -го узла (частицы); m_i — его масса; $F_i^{\text{внутр}}$ — суммарная внутренняя сила (от упругих связей с другими узлами, сопротивление изгибу и др.); $F_i^{\text{внеш}}$ — внешние силы (гравитация, трение, реакции препятствий). В непрерывных моделях $F_i^{\text{внутр}}$ получают из вариационного принципа: задан функционал энергии $E_{\text{общ}} = \int (W_{\text{деформ}} + W_{\text{грав}}) dV$, где интегрируется по объему (площади) ткани плотность энергии деформации и гравитационная энергия. Минимум этого функционала соответствует состоянию равновесия (статической форме ткани).

Взаимодействие с твердыми объектами является ключевым аспектом при моделировании процесса укладки ткани. В процессе расчетов необходимо учитывать силы реакции и ограничения, которые не позволяют узлам ткани проникать сквозь поверхность объекта [5].

В программе предусмотрено несколько основных методов реализации такого взаимодействия: метод штрафа, при котором вводится упругое отталкивание при попытке проникновения; метод барьерного потенциала; метод явных геометрических проекций.

Важным фактором является учет трения между тканью и объектом. При моделировании использовалось нулевого проскальзывания, при котором ткань как бы прилипает к поверхности при касании.

Приведем пример работы алгоритма на примере наложения квадратного участка ткани на модель сферы. Зададим 400 узлов для ткани, шаг интегрирования 0,01 с, время моделирования 10 с, коэффициент жесткости 150. Позиции узлов ткани в начальный и конечный моменты времени приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

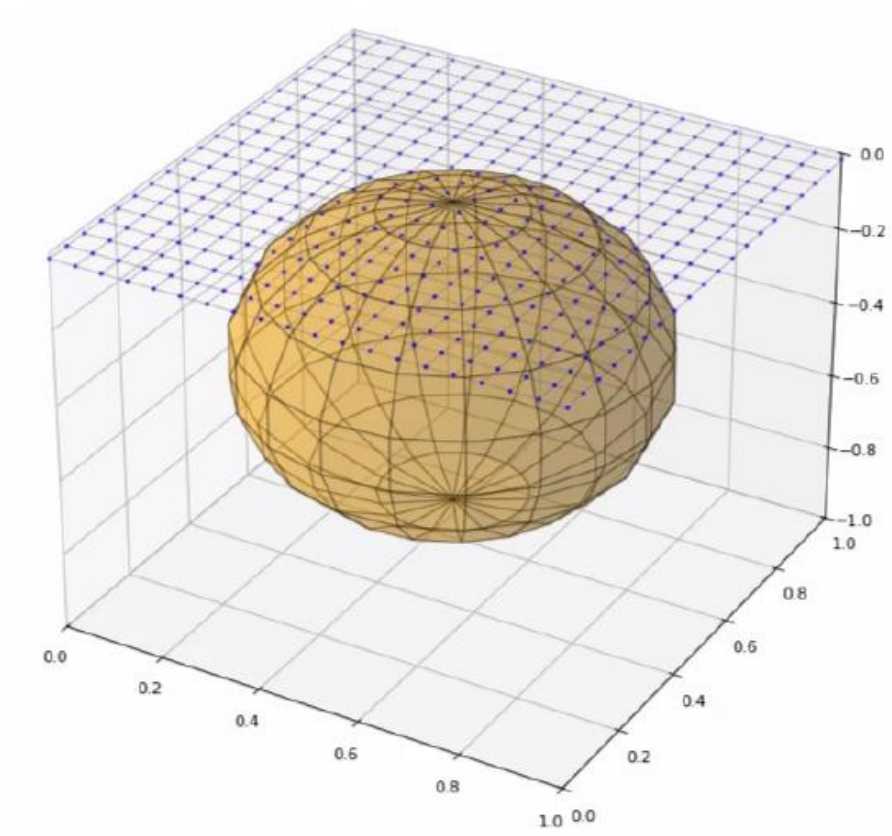


Рис. 2. Позиция узлов ткани в начальный момент времени

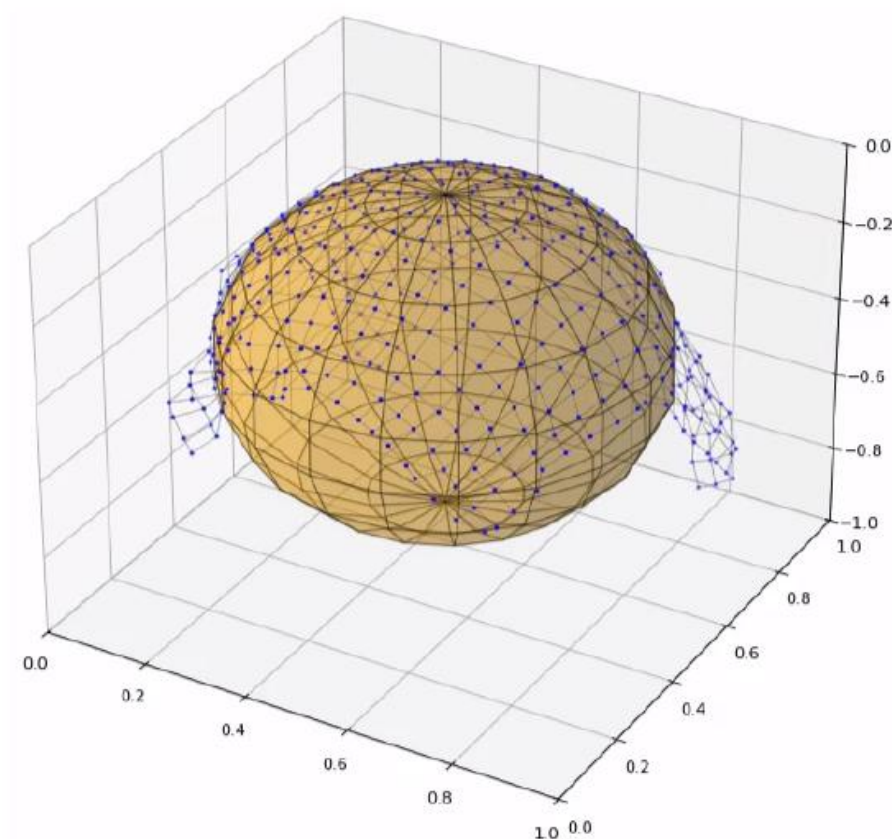


Рис. 3. Позиция узлов ткани в конечный момент времени

Обсуждение полученных результатов. В ходе проверки было установлено, что система симуляции демонстрирует стабильную работу при любых значениях допустимых физических параметров. Полученные результаты моделирования полностью соответствуют реальному поведению текстильных материалов как с точки зрения физических законов, так и в плане визуального восприятия. Это подтверждает высокую точность и достоверность разработанного программного решения.

Заключение. Реализован метод масс-пружин моделирования наложения тканевых материалов на параметрические поверхности. В качестве ключевого компонента алгоритма используется представление ткани виде набора узлов и связей между ними. Гибкость архитектуры и наличие расширяемого графического интерфейса позволяют использовать программу как основу для внедрения новых физических моделей (учет анизотропии, пластичности, сложных граничных условий), а также для интеграции с внешними CAD/CAE-системами.

Список источников

- [1] Bo Y., Tianguo J., Fengyang B., Jianguang L. A Geometry information-based fishnet algorithm for woven fabric draping in liquid composite molding. *Materials science*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 513–521
- [2] Van der Weeen F. Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces. *International journal for numerical methods in engineering*, 1991, vol. 31, no. 7, pp. 1415–1426,
- [3] Ландовская И.Е., Ландовский В.В. Компьютерное моделирование ткани. *Инновации в науке*, 2013, № 24, с. 31–39.
- [4] Sakaguchi Y., Minoh M., Ikeda K. PARTY: Physical Environment of Artificial Reality for Dress Simulation (I) — A Dynamically Deformable Model of Dress. *Trans. Soc. of Electronics, Information and Communications. Graphics and CAD*, 1991, vol. 54, pp. 25–32.
- [5] Ландовская И.Е., Ландовский В.В., Фроловский В.Д. Взаимодействие тканых материалов с многогранными твердотельными объектами при компьютерном моделировании. *Приволжский научный вестник*, 2015, № 1 (41), с. 30–34.