

# Метод реконструкции и параметризации поверхностных моделей компьютерных манекенов на основе их геометрических свойств

С. Грудинин

Факультет автоматизации и вычислительной техники

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

sn\_grudinin@mail.ru

## Аннотация

В статье описан метод построения трехмерной модели манекена из полигональной входной модели для целей параметрического моделирования виртуальных манекенов. Предложенные алгоритмы позволяют на основе геометрических свойств горизонтальных сечений и контуров исходной модели получить параметризованное представление в виде трехмерного каркаса, аппроксимированного набором патчей.

**Ключевые слова:** компьютерный манекен, базовая модель, параметрическое моделирование, геометрические характеристики формы

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большое количество графических систем, решающих задачу проектирования геометрических объектов. Параметризованные твердотельные объекты хорошо представлены в различных CAD-системах (например, AutoCAD, MicroStation, SolidWorks и пр.). Хорошо развиты методы параметрического проектирования, где геометрические модели представляются в виде теоретико-множественных композиций примитивов, активно развивается характеристическое моделирование примитивов [1]. Однако объекты, имеющие сложную геометрическую форму и представляемые в общем виде сеточными моделями, требуют для параметризации специализированных технологий, учитывающих информацию о форме и принятые в предметной области метрические характеристики. К ним относятся объекты естественного происхождения, в том числе и тело человека.

Среди методов поверхностного моделирования человеческого тела можно выделить три основных группы [2]: создание, реконструкция и интерполяция. К первой группе относятся 3D-сканирование и 3D-скульптинг. Во второй группе объединены методы, позволяющие получить модель по набору неструктурированных или частично структурированных данных [3]. Третья группа включает в себя методы, создающие модель путем деформации заданной базовой модели, в соответствии с установленными ограничениями. К этому подходу относится параметрическое моделирование [4]. В отличие от других методов параметрическое моделирование является менее дорогостоящим и вычислительно емким средством, что позволяет интерактивно создавать новые модели, изменяя заданные параметры. Формально такой подход можно описать следующим образом: создание производной модели  $\Omega$  в результате деформации некоторой среднестатистической базовой модели  $\Psi$ , согласно набору заданных параметров  $\rho$ ; таким образом, новая производная модель  $\Omega$  после деформации будет удовлетворять набору параметров  $\rho$  [5].

Дополнительные возможности параметрического моделирования приобретает с развитием средств

трехмерного сканирования и распространением баз данных сканов реальных объектов [6]. Модели, полученные сканированием, содержат обильные эмпирические данные, они могут использоваться, как для выявления закономерностей изменения форм объектов определенного класса (по статистическим данным, собранным с базы данных сканов), так и для создания базовой модели. Подобные решения требуют методов и средств извлечения семантической информации. В связи с этим сегодня актуально решение задач параметризации сложных объектов и генерации новых моделей на основе семантической информации.

Целью настоящей работы является разработка представления и параметризации базовой модели на основе данных о форме объекта, обладающих следующими свойствами:

- наилучшим образом отражающие соответствие формы базовой модели и объекта-оригинала;
- обладающие возможностью деформации при изменении параметров для проектирования производных моделей;
- ограниченные разумным количеством геометрических параметров.

## 2. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

На текущий момент разработано большое количество методов представления поверхности человеческого тела, из которых можно выделить три основных направления: представление в виде слоев, сеток и патчей. Послойное представление [2, 6] определяет модель множеством слоев (горизонтальных сечений), высоты слоев обуславливаются расположением характерных для предметной области параметров или точек. Сеточное представление [7, 8] строится по набору кривых линий, интерполирующих входную модель. Зачастую для моделирования человеческого тела используются четырехугольные сетки, при этом горизонтальные линии равноотстоят друг от друга, а вертикальные пересекают характерные для формы точки. Представление патчами несет в себе больше возможностей для передачи базовой модели особенностей формы исходного объекта, чем точки и кривые. При таком представлении поверхность манекена описывается некоторой сеточной структурой, каждая ячейка которой аппроксимируется гладким поверхностным патчем – трехмерной ограниченной поверхностью [8, 9].

Идея метода, излагаемого в работе, состоит в разделении предметного [10] и геометрического уровней параметризации и построении базовой модели на основании двух геометрических характеристик: точек и уровней, которые содержат в себе информацию о форме объекта. При этом построение базовой модели подразумевает выполнение следующих шагов:

- 1) приведение входной модели к формализованному виду;
- 2) выявление геометрических характеристик формы;

- 3) построение на основе геометрических характеристик четырехугольной сеточной структуры (каркаса);
- 4) аппроксимация ребер каркаса полиномами третьей степени;
- 5) аппроксимация ячеек каркаса линейными поверхностями Кунса.

Геометрическими параметрами в таком представлении выступают координаты характерных точек и значения коэффициентов полиномов. Деформация модели осуществляется путем изменения положения характерных точек, в результате чего происходит перерасчет кривых каркаса и патчей. Обеспечение схожести формы модели с оригинальным объектом достигается использованием при моделировании производных моделей значений коэффициентов полиномов базовой модели. Поверхность Кунса является одной из разновидностей поверхности натяжения и не требует для своего построения параметров, кроме ограничивающих ее кривых.

### 2.1. Представление входной модели

Исходными данными для построения базовой модели является 3D-модель женского манекена стандартной формы, полученная трехмерным сканированием. Входная модель имеет полигональную структуру: множество точек  $t_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ , соединенных в треугольные полигоны  $p_i = (t_{i1}, t_{i2}, t_{i3})$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, 3}$ , где  $N$  – количество полигонов. Модель не имеет внутренних полигонов, пересечений полигонов и отверстий. Задача ориентации модели в пространстве не рассматривается, модель ориентирована известным образом [11]. Входная модель разбивается на множество равноотстоящих друг от друга горизонтальных сечений  $h_i$ , каждое сечение из  $h_i$  содержит одинаковое количество точек  $\{v_{ij}\}$ , отсортированных по полярному углу и также равноотстоящих друг от друга  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M}$ , где  $N$  – количество сечений,  $M$  – количество точек в сечениях. Также сечения  $h_i$  подвергаются симметризации – определению средних значений между левыми и правыми половинами относительно плоскости  $xOz$  и сглаживанию – интерполяции сплайнами третьего порядка [11].

### 2.2. Определение геометрических характеристик

Множество сечений  $h_i$  используется для анализа формы с целью выявления геометрических характеристик – характерных точек (ХТ) и характерных уровней (ХУ). Под характерными понимаются точки  $i$ -го сечения, наилучшим образом, с точки зрения определенного критерия, характеризующие его форму.

Мощным аппаратом для описания характеристик формы является дифференциальная геометрия. В работе используются два схожих между собой критерия: равенство нулю первой производной; равенство нулю второй производной.

С целью снижения вычислительной нагрузки расчеты выполняются для множества полусечений  $h'_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , где  $n$  – количество полусечений. Каждое  $i$ -е полусечение рассматривается как кусочно-линейная функция  $y(x)$  и выражается в параметризованном виде функциями  $x(s)$  и  $y(s)$ . Параметром  $s$  выступает накопленная (суммарная) длина, то есть при  $s_0 = 0$

$$s_j = s_{j-1} + \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $m$  – количество точек в  $i$ -м полусечении.

Для  $x(s)$  и  $y(s)$  определяются пары точек  $f_a(s_a)$  и  $f_b(s_b)$ , между которыми первая производная:

$$f'_j(s) = (f(s_{j+1}) - f(s_j)) / (s_{j+1} - s_j), \quad j = \overline{2, m-1},$$

меняет знак, далее рассчитывается значение параметра  $s$ , при котором первая производная равна нулю:  $(f_a s_b - s_a f_b) / (f_a - f_b)$ . Аналогично определяются точки равенства нулю второй производной. ХТ также признаются точки начала и конца  $i$ -го полусечения, располагающиеся на оси симметрии манекена, соответственно.

В качестве третьего критерия определения ХТ используются так называемые доминантные точки, применяемые во многих приложениях машинного зрения, обработке изображений и распознавания образов. Кратко алгоритм их определения [12] для точек  $i$ -го полусечения из  $h'_i$  можно описать следующим образом:

1) рассчитывается величина:

$$b_{jk_j} = \max(|x_{j-k_j} - 2x_j + x_{j+k_j}|, |y_{j-k_j} - 2y_j + y_{j+k_j}|),$$

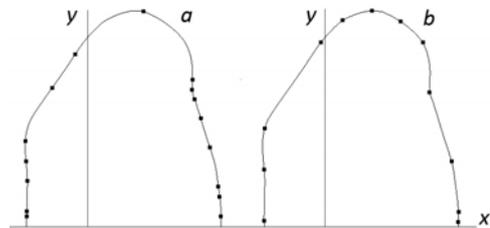
$j = \overline{2, m-1}$ ; при этом  $k_j$  определяется итерационно, начиная с 1, увеличиваясь на 1, пока  $b_{ik} \leq b_{ik+1}$ ;

2) определяется величина:  $bv_j = 1/k_j \sum_{i=1}^{k_j} b_{ji}$ ;

3) выполняется проверка условий:  $bv_j < \varepsilon$ ,  $bv_j < bv_{j-1}$ ,  $bv_j < bv_{j+1}$ ,  $bv_i = bv_{i-1}$ , при  $k_i < k_{i-1}$ ,  $bv_i = bv_{i+1}$ , при  $k_i \leq k_{i+1}$ .

Если хотя бы одно из условий выполняется, то точка не является доминантной. Для  $\varepsilon$  в данной работе, как и в [12], используется значение 0,25.

На рис. 1 представлено полусечение на уровне груди с отмеченными ХТ, определенными по второму и третьему критерию.



**Рис. 1. Полусечение на уровне груди с отмеченными ХТ, определенными с использованием критерия:**  
**(а) равенства нулю второй производной;**  
**(б) доминантных точек**

Исходя из основных особенностей формы манекена – симметричности и протяженности вдоль оси  $Oz$  – модели достаточно хорошо описываются множеством горизонтальных параллельных сечений, которые, в свою очередь, представляют собой гладкие, симметричные фигуры. Поэтому для достижения большей схожести модели с объектом-оригиналом к множеству  $h_i$  добавляются сечения, расположенные на ХУ – уровнях, наилучшим образом, с точки зрения определенного признака, описывающих форму манекена. В работе используются два критерия для определения ХУ: равенство нулю первой производной функции обхвата, равенство нулю первой производной функций контуров.

ХУ определяются по первому критерию путем исследования на экстремум кусочно-линейной функции  $l(z)$ , где аргументом является высота уровня, а значением – периметр минимальной выпуклой оболочки (обхвата) точек

сечения на уровне  $z$ . ХУ второго критерия также определяются исследованием на экстремум кусочно-линейных функций  $f(z)$ ,  $b(z)$ ,  $s(z)$ , определяющих зависимость от высоты сечения  $z$  координат переднего, заднего и бокового контуров, соответственно. Сечения, расположенные на ХУ, добавляются к множеству сечений  $h_i$ , на них также определяются ХТ.

### 2.3. Построение аппроксимирующей поверхности

Под алгоритмом построения каркаса подразумевается соединение точек сечений таким образом, чтобы они образовывали четырехугольную сеточную структуру, в узлах которой находятся ХТ. На вход алгоритма поступает множество полусечений  $h_i$  по  $m$  точек, при этом  $\{p_{ij}\}$  из них характерные. Построение каркаса осуществляется в три этапа: соединение точек трех контуров, построение вертикальных ребер патчей, построение горизонтальных ребер патчей.

*Соединение точек контуров* происходит вертикальными линиями, при этом точки переднего и заднего контуров определяются как начало и конец полусечений; точки бокового контура определяются, как ХТ, имеющие наибольшую координату по оси  $y$  и  $x$ -координату в интервале  $[-L_1, L_1]$ , где  $L_1$  – эмпирически определяемое ограничение.

*Построение вертикальных ребер* патчей происходит путем соединения ХТ в соседних полусечениях. Если ХТ  $a \in \{p_{ij}\}$  имеет в соседнем полусечении ближайшую к ней ХТ  $b \in \{p_{i+1j}\}$  и евклидово расстояние  $E(a,b)$  между ними удовлетворяет условию  $E < L_2$ , то  $a$  и  $b$  соединяются между собой, где  $L_2$  – эмпирически определяемое ограничение.

*Построение горизонтальных ребер* патчей выполняется за счет соединения ХТ по горизонтали по линиям соответствующих полусечений. При этом ХТ  $p_{ij}$  соединяется с соседними ХТ  $p_{ij+1}$  и  $p_{ij-1}$ , если выполняется одно из двух условий:  $p_{ij}$  имеет одно вертикальное соединение (снизу или сверху),  $p_{ij}$  вообще не имеет вертикальных соединений.

Линии каркаса аппроксимируются полиномами третьей степени, при этом каждая линия описывает ломаную  $p$  в пространстве. Вектор-функция, описывающая аппроксимирующую кривую, имеет вид [13]:

$$r(s) = p_0 + q_0s + as^2 + bs^3,$$

$$a = \frac{\Delta p - q_0}{s_n} - bs_n, b = \frac{q_0 + q_n - 2\Delta p}{s_n^2}, \Delta p = \frac{p_n - p_0}{s_n},$$

где  $p_0$  и  $p_n$  – радиус-вектора точек начала и конца ломаной  $p$  (являющиеся ХТ);  $q_0, q_n$  – касательные к ломаной  $p$  в точках  $p_0$  и  $p_n$ , соответственно;  $s$  – накопленная длина ломаной  $p$ ;  $s_n$  – длина ломаной  $p$ .

Касательные  $q_0$  и  $q_n$  определяются с учетом линий каркаса, примыкающих в точках  $p_0$  и  $p_n$ . Расчет касательной  $q_0$  происходит в несколько этапов:

- 1) определяются векторы  $k_0$  в точке  $p_0$  по формуле:  $k_0 = (p_1 - p_0) / (s_1 - s_0)$ ;
- 2) рассчитываются векторы  $k_1, \dots, k_r$  для всех  $r$  линий, примыкающих к точке  $p_0$  по формуле:  $k_i = (p_0 - p^{(i)}) / (s^{(i)}_1 - s_0)$ ,  $i = \overline{1, r}$ , где  $(i)$  – порядковый индекс линии, примыкающей к точке  $p_0$ ;

3) для всех возможных пар векторов из  $\{k_0, \dots, k_r\}$  определяются нормали  $N_0, \dots, N_r$ , направленные от модели, где  $z = r! / 2!(r-2)!$ ;

4) находится средняя нормаль  $N' = \frac{\sum_{j=1}^r N_j}{\left| \sum_{j=1}^r N_j \right|}$ ;

5) рассчитывается проекция  $k_0$  на плоскость, нормалью которой является  $N'$  по формуле  $q_0 = k_1 - N' < k_1, N' >$ .

Аналогичным образом определяется вектор  $q_n$ . Если линия, образующая границу патча, представляет собой отрезок, соединяющий две ХТ, то касательные вектора будут определяться по формулам:  $k_0 = (p_n - p_0) / |p_n - p_0|$ ,  $k_n = (p_0 - p_n) / |p_0 - p_n|$ .

На каждой четырехугольной ячейке каркаса строится линейная поверхность Кунса, которая описывается векторной функцией [14]:

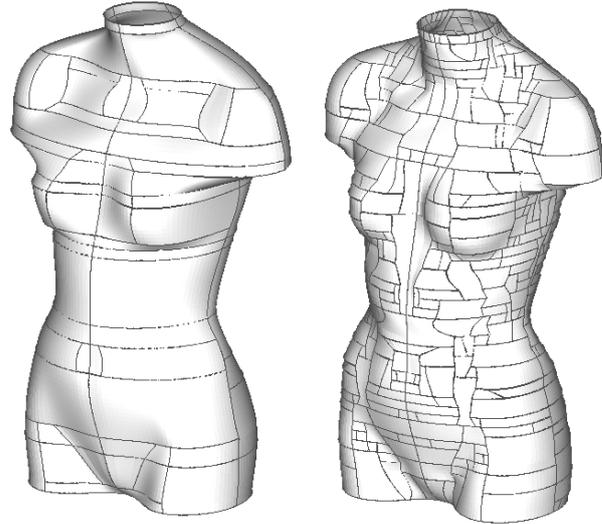
$$r(u, v) = (1-v)p^{(1)}(s_1u) + (1-u)p^{(2)}(s_2v) + vp^{(4)}(s_4v) + up^{(3)}(s_3u) - (1-u)(1-v)p_1 - u(1-v)p_2 - (1-u)vp_3 - uvv_4,$$

$$0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1,$$

где  $p_i$  – радиус-вектор  $i$ -й точки, соединяющей кривые ячейки;  $p^{(i)}$  – вектор-функция  $i$ -й кривой ячейки;  $s_i$  – длина  $i$ -й кривой ячейки;  $i = \overline{1, 4}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены результаты аппроксимации патчами модели манекена с различными критериями определения ХТ и ХУ.



**Рис. 2. Аппроксимированная патчами модель с используемыми в качестве критериев определения ХТ и ХУ: (слева) равенство нулю первой производной и обхватов, (справа) равенство нулю второй производной**

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод построения и параметризации базовой модели заданной структуры по полигональной модели исходного объекта. Рассмотрена оригинальная параметризация модели трехмерного объекта со сложной структурой, сохраняющая геометрическую информацию об объекте. Рассматриваемые алгоритмы могут быть использованы в процессе параметрического моделирования виртуальных манекенов. При этом создание производных моделей будет происходить за счет изменения координат

узловых точек каркаса с последующим пересчетом линий каркаса и аппроксимирующих поверхностей.

Перспективным развитием рассмотренных решений является:

– разработка процесса параметрического моделирования виртуальных манекенов на основе предложенного представления и геометрической параметризации;

– расширение списка исследуемых критериев для определения характеристик формы модели;

– определение зависимостей предметных и геометрических параметров в контексте моделирования манекенов для целей швейной промышленности.

## 5. ССЫЛКИ

- [1] Bronsvort, W. F. Developments in Feature Modelling / R. Bidarra, P.J. Nyirenda // Computer-Aided Design & Applications. – 2006. Vol. 2, № 5. – P. 655 – 664.
- [2] Lin, S.-F. Create a Virtual Mannequin Through the 2-D Image based Anthropometric Measurements and Radius Distance Free Form Deformation / S.-C. Chien // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2011. – Vol. 2, № 4. – P. 60 – 67.
- [3] Reconstruction and Interpretation of 3D Whole Body Surface Images / B. Buxton, L. Dekker, I. Douros, T. Vassilev // Scanning Proceedings. – 2000. – 17 p.
- [4] Фроловский В.Д. Компьютерное проектирование манекенов и одежды. Трехмерные модели и математические методы. Germany, Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 269 с.
- [5] The most comprehensive source for body measurement data [Электронный ресурс]. URL: <http://store.sae.org/caesar/> (дата обращения: 30.06.2014).
- [6] Абдулин П.К., Фроловский В.Д. Сжатие геометрической информации сложных объектов на основе порождающих моделей // Труды 15-й Международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям "ГРАФИКОН - 2005" (20-24 июня 2005 г.). Новосибирск. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. – С. 175 – 178.
- [7] Kasap M., Magnenat-Thalmann N. Skeleton-aware size variations in digital mannequins // The Visual Computer . – 2011. – Vol. 27. – No. 4. – P. 263 – 274.
- [8] Wang C.C.L. Parameterization and parametric design of mannequins // Computer-Aided Design. – 2005. – Vol. 37. – No. 1. – P. 83 – 98.
- [9] Wu, L. A Parameterized Mannequin for Apparel Design / X. Zhang // Journal of Fiber Bioengineering and Informatics (JFBI). – 2008. – Vol. 1, № 2. – P. 117 – 124.
- [10] Грудинин С.Н., Фроловский В.Д. Предметная параметризация виртуальных манекенов // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1(7). – С. 53 – 56.
- [11] Грудинин С.Н., Фроловский В.Д. Параметрическое моделирование и оценка близости виртуальных манекенов // докл. Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – No. 1(22). – С. 62 – 72.

[12] Wu W.-Y. Dominant point detection using adaptive bending value // Image and Vision Computing. – 2003. – Vol. 21. – P. 517 – 525.

[13] Ильин М.Е. Аппроксимация и интерполяция. Методы и приложения: учеб. пос. – Рязань, 2010. – 56 с.

[14] Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. – М.: Изд-во: Физико-математическая литература, 2002. – 472 с.

## Об авторах

Сергей Грудинин, аспирант АВТФ НГТУ.

Его адрес: [sn\\_grudinin@mail.ru](mailto:sn_grudinin@mail.ru)