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

С. Грудинин
Факультет автоматики 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 Ω в результате деформации некоторой среднестатистической базовой модели Ψ, согласно набору заданных параметров ρ; таким образом, новая производная модель Ω после деформации будет удовлетворять набору параметров ρ [5].

Дополнительные возможности параметрическое моделирование 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 обусловливаются 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 $s_0 = 0$

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

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:

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

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 $b_{ik} \le b_{ik+1}$;

2) определяется величина: $bv_j = \frac{1}{k_j}\sum_{t=1}^{k_j} b_{jt}$;

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 $k_i \le k_{i+1}$.

Если хотя бы одно из условий выполняется, то точка не является доминантной. Для ε 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.

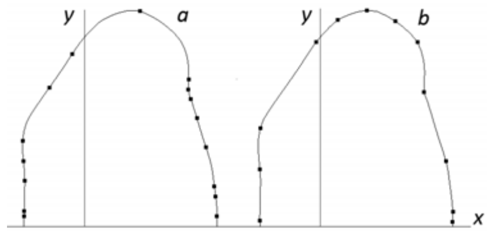

Рис. 1. Полусечение на уровне груди с отмеченными ХТ, определенными с использованием критерия: (a) равенства нулю второй производной; (b) доминантных точек

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 обхватов, равенство нулю первой производной функций контуров.

ХУ определяются по первому критерию путем исследования на экстремум кусочно-линейной функции $t(z)$, 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]:

$$r(s) = p_0 + q_0 s + as^2 + bs^3,$$

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

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 $k_1,\ldots,k_r$ для всех r линий, примыкающих к точке p_0 по формуле: $k_i = (p_0 - p^{(i)}{}_1) / (s^{(i)}{}_1 - s_0)$, $i = \overline{1,r}$, где (i) – порядковый индекс линии, примыкающей к точке p_0;

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

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

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: $k_0 = (p_n - p_0)/|p_n - p_0|$, $k_0 = (p_0 - p_n)/|p_0 - p_n|$.

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

$$r(u,v) = (1-v)p^{(1)}(s_1 u) + (1-u)p^{(2)}(s_2 v) + vp^{(4)}(s_4 v) + up^{(3)}(s_3 u) - \\ -(1-u)(1-v)p_1 - u(1-v)p_2 - (1-u)vp_3 - uvp_4, \\ 0 \le u \le 1,\ 0 \le v \le 1,$$

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.

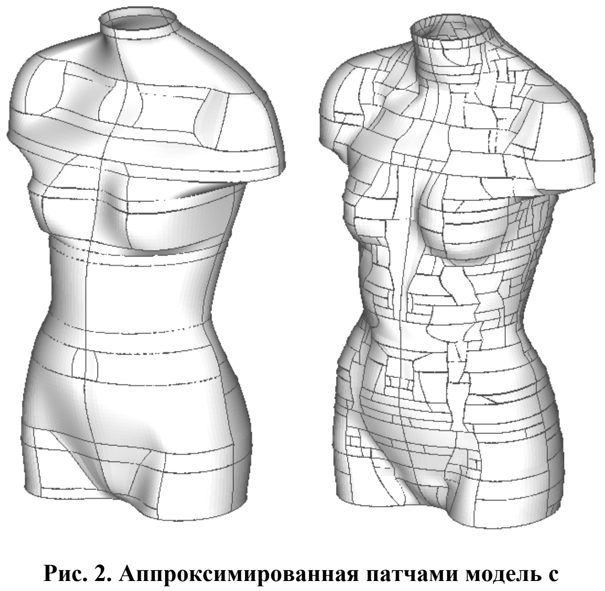

Рис. 2. Аппроксимированная патчами модель с используемыми в качестве критериев определения ХТ и ХУ: (слева) равенство нулю первой производной и обхватов, (справа) равенство нулю второй производной

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] Bronsvoort, 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