

Использование контрольных кластеров для корректирования деформации антропоморфных полигональных моделей

Елена Гридчина, Дмитрий Заставной
Факультет математики, механики и компьютерных наук
Южный федеральный университет
Ростов-на-Дону, Россия
helen.gridchina@gmail.com, dzast@sfedu.ru

Александр Букатов, Борис Заставной
Южно-Российский региональный центр
информатизации, Южный федеральный университет,
Ростов-на-Дону, Россия
{baa, zast}@sfedu.ru

Аннотация

В работе представлен новый метод для создания анимации антропоморфных персонажей, основанный на выполнении корректировки вершин модели после применения базовой трансформации вершин на основе скелетной анимации LBS (Linear Blend Skinning). Корректируемые вершины объединяются в группы, называемые контрольными кластерами, для которых задаются эталонные формы. Вычисление трансформаций для прочих вершин модели выполняется на основе интерполяции при помощи кардинальных сплайнов.

Ключевые слова: Скелетная анимация, Контрольный кластер, Кардинальные сплайны.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сфере компьютерной графики продолжают активные исследования в области разработки методов реалистичной деформации трёхмерных моделей антропоморфных персонажей [4, 7], что, в частности, объясняется некоторыми недостатками традиционно используемых методов анимации [1].

Базовым способом деформации полигональной поверхности модели является традиционный метод скелетной анимации Linear Blend Skinning (LBS). Эффективным методом, компенсирующим нежелательные артефакты LBS, является технология Pose Space Deformation (PSD) [6], которая сочетает создание анимации модели при помощи традиционной LBS и блендинга; данный метод широко используется в настоящее время, но является весьма трудоёмким [5].

В настоящей статье рассматривается метод корректировки скелетной анимации, который можно рассматривать как дальнейшее развитие идеи PSD. Предлагаемый метод основан на использовании предложенных авторами контрольных кластеров. В данной статье этот метод рассмотрен для двумерного случая и может быть обобщён для случая трёхмерных полигональных моделей.

2. МОДЕЛЬ ПЕРСОНАЖА В LBS

Модель антропоморфного персонажа (далее — модель) в двумерном пространстве представляет собой многоугольник P . V_P — множество всех вершин модели P . С моделью P связан скелет, который представляет собой иерархическую структуру костей $S = \{\vec{b}_i\}$. С каждым узлом структуры \vec{b}_i связана своя локальная система координат и двумерное преобразование. Двумерное преобразование сустава i может быть описано матрицей W_i 3×3 , описывающей трансформацию (вращение, перемещение и масштабирование). Кости скелета образуют иерархию: каждая

дочерняя кость наследует трансформации родительской кости. В процессе привязки модели P к скелету, каждой вершине модели $\vec{v} \in V_P$ ставится в соответствие набор весов всех костей скелета $\{w_i\}$, $\sum_i w_i = 1$, где w_i — вес i -ой кости. Вес кости определяет степень влияния кости на перемещение вершины модели. Положения (собственные трансформации) костей скелета в позе привязки будем обозначать $\{B_i\}$. Таким образом, трансформированное положение отдельной вершины при произвольной конфигурации скелета $\{W_i\}$ рассчитывается по формуле:

$$\vec{v}' = LBS(\vec{v}) = \sum_i w_i W_i B_i^{-1} \vec{v} \quad (1)$$

При высокой вычислительной эффективности и универсальности этот традиционный подход скелетной анимации LBS характеризуется рядом нежелательных артефактов (дефектов), в том числе, например, потерей объёма, что приводит к значительному снижению реалистичности получаемой анимации. Один из типичных нежелательных артефактов LBS традиционно называется “collapsing elbow” (буквально — “сплюсывающийся локоть”) (см. Рис. 1).

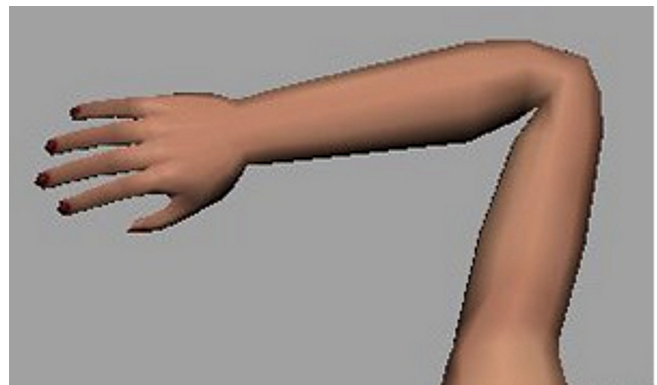


Рис 1: Некорректная деформация модели при сгибе в локте.

3. МЕТОД КОНТРОЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ

Для придания требуемой реалистичности модели, деформированной на основе метода LBS, предлагается выполнять для вершин, трансформации которых являются неудовлетворительными, некоторые дополнительные корректирующие трансформации. Для этой цели авторами статьи разработан оригинальный метод контрольных кластеров (МКК). Предлагаемый метод принадлежит к введённой группе корректирующих методов и использует информацию о контрольных кластерах, состоящих из групп

вершин модели, для корректировки модели после применения базовых трансформаций LBS.

3.1 Понятие контрольного кластера

Кластером (двумерной) модели s_{ij} будем называть пару вершин $\langle \vec{v}_i, \vec{v}_j \rangle$, $i \neq j$, $\vec{v}_i, \vec{v}_j \in V_P$. Для моделей с оснасткой (“rigging”) (т.е. с заданным скелетом $S = \{\vec{b}_i\}$ и весами) будем рассматривать такие кластеры s_{ij} , что в позе привязки модели $\exists \vec{b}_k, \vec{b}_l \in B \mid (\vec{v}_i \vec{v}_j, \vec{b}_k \vec{b}_l) = 0$, где кость \vec{b}_k является дочерней по отношению к кости \vec{b}_l в иерархической структуре скелета S .

Контрольные кластеры создаются для тех вершин модели, для которых трансформация на основе LBS демонстрирует нежелательные артефакты; для таких кластеров задаются эталонные положения вершин. Для корректировки LBS используются пары $\langle X^i, S^i \rangle$, где X^i — конфигурация скелета, а S^i — набор контрольных кластеров модели. Вершины модели, целиком привязанные к одной кости (то есть $\exists \vec{b}_k \in S \mid w_k = 1$) помещаются в контрольный кластер автоматически.

Вершины модели, не входящие в контрольные кластеры, будем далее неформально называть *свободными*.

Метод контрольных кластеров должен производить корректировку положений всех вершин модели для каждого кадра анимации. Сначала корректируются координаты вершин контрольных кластеров, затем положения свободных вершин модели рассчитываются на основе полученных координат вершин контрольных кластеров.

3.2 Расчёт текущего положения вершин контрольных кластеров

Для вершин контрольных кластеров вычисляются сдвиги в локальной системе координат кости \vec{b}_j по формуле $\vec{d}_j = LBS^{-1}(\vec{v}, \vec{b}_j) B_j^{-1} \vec{v}_0$, где \vec{v}_0 — положение вершины в позе привязки, $\vec{v} \in s \in S^i$ — эталонное положение вершины в позе X^i . Если текущая конфигурация скелета совпадает с конфигурацией X^i , то текущее положение вершины контрольного кластера \vec{v}' вычисляется по формуле

$$\vec{v}' = LBS(\vec{v}_0, \vec{d}) = \sum_j w_j W_j (B_j^{-1} \vec{v}_0 + \vec{d}_j). \quad (2)$$

Вычисление сдвига для вершины контрольного кластера для промежуточной конфигурации скелета $X \neq X^i$ проводится аналогично технологии PSD:

$$\vec{d}_i = \sum_{i=0}^{N-1} \omega_i \varphi(\|X^i - X\|), \quad (3)$$

где $\|X^i - X^j\|$ — евклидово расстояние между конфигурациями модели X^i и X^j ; $\varphi(x)$ — гауссова радиальная базисная функция; ω_i — веса соответствующих конфигураций X^i наборов контрольных кластеров.

3.3 Вычисление текущего положения свободных вершин

Трансформация свободных вершины выполняется на основе данных о её текущем LBS-положении с учётом информации о ближайших контрольных кластерах. Координаты вершины, полученные с помощью LBS, корректируются таким образом, чтобы они находились в соответствии с координатами вершин контрольных кластеров, что обеспечивает корректирование нежелательных артефактов LBS.

Для интерполяции трансформаций свободных вершин используются кардинальные сплайны, которые являются обобщением сплайнов Катмулла-Рома [3]. Данный вид сплайнов подходит для решаемой задачи, так как кардинальный сплайн имеет непрерывную первую производную и, вообще говоря, разрывную вторую. Непрерывность по первой производной обеспечивает гладкость модели, разрывность по второй производной даёт достаточную гибкость в использовании сплайна. Кроме того, кардинальный сплайн является локальным — влияние каждой контрольной точки распространяется лишь на некоторую окрестность кривой. Данные свойства сплайна позволяют вычислять деформацию приемлемым образом для таких традиционно проблемных с точки зрения анимации областей модели, как сгибы в локте.

3.3.1 Выбор типа параметризации

Поведение кривой, построенной при помощи кардинального сплайна, в значительной степени зависит от типа её параметризации [8]. При выборе параметризации для настоящего метода были рассмотрены равномерная параметризация, параметризация по длине хорды, а также центростремительная параметризация (параметризация квадратного корня).

При использовании равномерной параметризации могут проявиться такие нежелательные артефакты, как узловые точки, что недопустимо при работе с анимируемыми моделями. При параметризации по длине хорды могут возникать самопересечения и точки возврата, которые исключены в случае применения центростремительной параметризации. К достоинствам центростремительной параметризации также относится то, что она даёт кривую, расположенную ближе к управляющему многоугольнику, чем кривые, полученные с помощью двух других способов параметризации.

В описываемом методе используется параметризация по длине хорды, что мотивируется следующим. Во-первых, кривизна сегмента кривой между контрольными точками при использовании данного типа параметризации больше в сравнении с другими типами, что позволяет достичь большей реалистичности при построении моделей органических объектов, так как не будет приводить к потере объёма. Во-вторых, хордовая параметризация доставляет наилучшую обусловленность линеаризованной системе уравнений продолжения, и в данном смысле считается лучшей из рассмотренных [2]. Таким образом, в методе используется параметризация $t_{i+1} = t_i + |\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i|$, где \vec{p}_i, \vec{p}_{i+1} — опорные точки сплайна.

3.3.2 Определение параметров сплайна

Значение кардинального сплайна в текущей точке \vec{p}_i зависит от значений функции в четырёх соседних, опорных точках (двух точках слева и двух точках справа) и от значения параметра натяжения. Обозначим их $\vec{p}_{i-2}, \vec{p}_{i-1}, \vec{p}_{i+1}, \vec{p}_{i+2}$ и q соответственно. Таким образом, производная в опорной точке будет рассчитываться по следующей формуле

$$m_k = (1 - q) \frac{\vec{p}_{k+1} - \vec{p}_{k-1}}{t_{k+1} - t_{k-1}}. \quad (4)$$

Рассмотрим также множество контрольных вершин, полученных на предыдущем шаге алгоритма, $V_C = \{\vec{v}_{j_k}\}_k \mid j_{k_1} < j_{k_2}, k_1 < k_2, V_C \subset V_P$. Для соседних контрольных вершин $\vec{v}_{j_n}, \vec{v}_{j_{n+1}} \in V_C \mid j_{n+1} \neq j_n + 1$

необходимо вычислять с помощью интерполяции сплайном положение всех промежуточных вершин. В этом случае $\vec{p}_{i-1} = \vec{v}_{j_n}, \vec{p}_{i+1} = \vec{v}_{j_{n+1}}$. При этом выбор опорных точек сплайна $\vec{p}_{i-2}, \vec{p}_{i+2}$ не является столь же определённым. Как правило, $\vec{p}_{i-2} = \vec{v}_{j_{n-1}}, \vec{p}_{i+2} = \vec{v}_{j_{n+2}}$. Но некоторые вершины модели P могут представлять собой специальный случай. Например, в случае работы с частью модели, обе вершины одного крайнего сечения модели не должны влиять на построение кривой (быть $\vec{p}_{i+1}, \vec{p}_{i+2}$ соответственно), так как это приведёт к нежелательным деформациям модели. В случае если контрольная вершина \vec{p}_{i+1} является специальной, т.е. в модели нет вершины \vec{p}_{i+2} , дополнительная опорная вершина строится методом отражения $\vec{p}_{i+2} = \vec{p}_{i+1} + (\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_{i-1})$.

С помощью параметра натяжения $q \in [-1, 1]$ контролируется кривизна сегмента сплайна. В методе контрольных кластеров в качестве значения по умолчанию принимается $q = -0.5$ (подробнее см. раздел 5).

4. СРАВНЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ С LBS И PSD

Разработанный метод контрольных кластеров, с одной стороны, является универсальным, так как в его основе лежит универсальный метод LBS. С другой стороны, метод позволяет добиться реалистичности деформаций, компенсируя нежелательные артефакты LBS за счёт использования эталонных положений вершин кластеров. В общем случае описанный метод даёт аниматору меньший контроль над получаемой анимацией, чем метод PSD. Однако, при необходимости, можно задать контрольные кластеры таким образом, чтобы все вершины модели входили в какой-либо из кластеров. При таких условиях метод контрольных кластеров будет работать аналогично PSD, предоставляя аниматору полный контроль над создаваемой анимацией. Следовательно, в определённом смысле описанный метод можно считать обобщением PSD. Однако, по сравнению с PSD, метод контрольных кластеров позволяет указывать эталонные положения не для всех вершин модели, а лишь для проблемных областей модели, что позволяет существенно уменьшить объём работ, выполняемых аниматором. Кроме того, описанный подход позволяет использовать малое количество пар <конфигурация скелета, набор эталонных вершин>, что также способствует снижению трудоёмкости процесса подготовки модели к анимации.

5. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

В качестве демонстрационного примера рассматривается плоская модель цилиндра (упрощенная модель “руки”) с оснасткой (см. рис. 2). Очевидно, проблемной зоной модели является область сгиба цилиндра (т.е. “локтя”). В качестве контрольного кластера выбираются точки, расположенные в области “сочленения” двух костей, точнее говоря, с формальной точки зрения, в области оси вращения, в данном случае совпадающей со второй костью; вершины в этой области имеют веса привязки к костям (0.5, 0.5).

Далее задаются пары <конфигурация скелета, набор контрольных кластеров модели>. Для данной демонстрационной модели достаточно задать всего одну такую пару. Для этого можно воспользоваться эталонным положением вершин кластера, взятым из PSD-формы модели.

Далее необходимо задать значение параметра натяжения q . При значениях $q > 0$ сгиб локтя выглядит “угловатым” и неестественным (см. рис. 3.1а). При отрицательных значениях параметра q сегменты кривой характеризуются большей

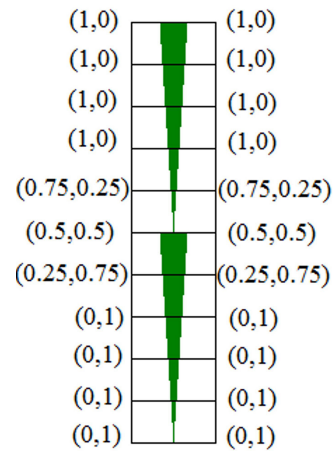


Рис 2: Модель цилиндра со скелетом из двух костей. В скобках указаны веса костей относительно каждой вершины модели по схеме (<вес родительской кости>, <вес дочерней кости>).

кривизной, что позволяет добиться большей реалистичности (см. рис. 3.1б,в). При этом для значений параметра q близких к -1 модель демонстрирует потерю объёма при определённых положениях дочерней кости (см. рис. 3.2в). Как следствие, $q = -0.5$ принимается в качестве значения параметра натяжения по умолчанию.

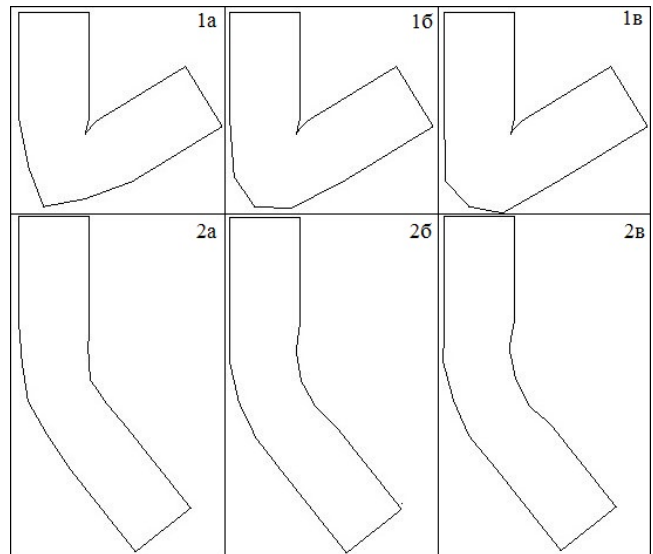


Рис 3: Метод контрольных кластеров с различными значениями параметра натяжения q : 1а, 2а – $q = 0.5$; 1б, 2б – $q = -0.5$; 1в, 2в – $q = -1.0$.

Для сравнения результатов работы LBS, PSD и метода контрольных кластеров была создана анимация с вращением дочерней кости модели. Рассматривается модель с двумя конфигурациями скелета модели (см. рис. 4). Потеря объёма при отработке сгиба методом LBS видна как в первом, так и во втором случае. В то же время технология PSD и метод контрольных кластеров не демонстрируют подобных искажений. При этом при угле сгиба, превышающем угол сгиба в конфигурации скелета, соответствующей PSD-форме

модели, PSD будет проявлять нежелательные артефакты, наследуемые от LBS. Для их устранения будет необходимо смоделировать ещё одну PSD-форму, соответствующую большому сгибу. Метод контрольных кластеров (МКК) при таких условиях будет проявлять большую гибкость: в месте сгиба будет создаваться *точка возврата* (точка, в которой кривая изменяет своё направление), что характерно для антропоморфных моделей, на которые рассчитан метод (см. рис. 5).

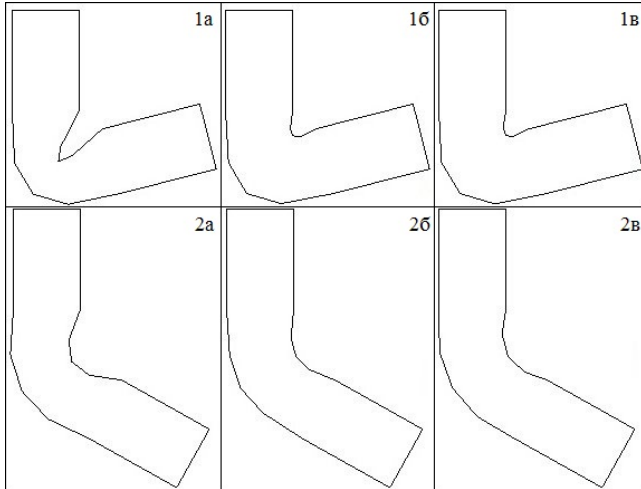


Рис 4: Результаты работы методов скелетной анимации при обработке сгиба: 1а, 2а — LBS; 1б, 2б — PSD; 1в, 2в — метод контрольных кластеров.

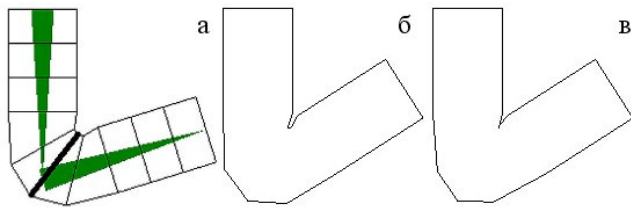


Рис 5: Результаты поворота дочерней кости на больший угол. а — эталонная PSD-форма с контрольным кластером, выделенным жирным; б — PSD; в — метод контрольных кластеров.

Таким образом, метод контрольных кластеров позволяет достичь результатов, сравнимых с результатами PSD, используя меньший объём вводимых аниматором данных. Для получения приемлемой анимации рассматриваемой модели методом PSD требуется задать минимум 2 PSD-формы и, соответственно, эталонное положение 6 вершин для каждой из 2 конфигураций скелета; в то время как при использовании МКК достаточно задать эталонное положение 2 вершин для одной конфигурации скелета. То есть, при использовании МКК для данной демонстрационной модели аниматору требуется задать в 6 раз меньше данных, чем при использовании PSD.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод контрольных кластеров (МКК) для анимации моделей антропоморфных персонажей является корректирующим методом деформации моделей, полученным на основе LBS, и развивающим идеи PSD.

Введено оригинальное понятие контрольного кластера, на основе которого разработан способ компенсации дефектов трансформации, получаемой при применении базового метода LBS. Метод контрольных кластеров требует, в отличие от PSD, создания и хранения эталонных форм кластеров только для проблемных областей модели. Практическая значимость разработанного метода заключается в существенном сокращении объёма работ, выполняемых аниматором. За счёт большей гибкости по сравнению с PSD метод контрольных кластеров позволяет получить анимацию, сравнимую по качеству с результатами PSD, при использовании меньшего количества вводимых аниматором данных.

Предложенный метод разработан для двумерных моделей. Обобщение данного подхода для случая трёхмерных полигональных моделей, а также способы задания контрольных кластеров для таких моделей требуют дополнительных исследований.

7. ССЫЛКИ

- [1] Букатов А. А., Гридчина Е. Е., Заставной Д. А. Методы скелетной анимации для трансформации полигональных поверхностей трёхмерных моделей [Электронный ресурс] // *Инженерный вестник Дона*. — 2012. — № 3. — С. 59–74. [Электронный журнал]. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_3_11.pdf_897.pdf (дата обращения 10.06.2013).
- [2] Кузнецов Е. Б., Якимович А. Ю. Наилучшая параметризация в задачах приближения кривых и поверхностей // *Ж. вычисл. математ. и математич. физики*. — 2005. — Т. 45, № 5. — С. 760–774.
- [3] E. Catmull and R. Rom, “A class of local interpolating splines,” *Computer Aided Geometric Design*, New York: Academic Press, 1974, pp. 317–326.
- [4] A. Jacobson, I. Baran, L. Kavan, J. Popović, and O. Sorkine, “Fast automatic skinning transformations,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 4, pp. 77:1–77:10, Jul., 2012.
- [5] G. S. Lee and F. Hanner, “Practical experiences with pose space deformation,” in *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*, New York: ACM, 2009, pp. 43:1–43:1.
- [6] J.P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong, “Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton driven deformation,” in *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing, 2000, pp. 165–172.
- [7] R. Vaillant, L. Barthe, G. Guennebaud, M. Cani, D. Rohmer, B. Wyvill, O. Gourmel, and M. Paulin, “Implicit skinning: real-time skin deformation with contact modeling,” in *Proc. of ACM SIGGRAPH 2013*. Forthcoming. Jul., 2013.
- [8] C. Yuksel, S. Schaefer, and J. Keyser, “On the parameterization of Catmull-Rom curves,” in *ACM Joint Conference on Geometric and Physical Modeling (SPM '09)*, New York: ACM, 2009, pp. 47–53.