

ПРОЦЕДУРНЫЕ МЕТОДЫ СКИННИНГА ГУМАНОИДНЫХ ПЕРСОНАЖЕЙ

Р. Р. Газизов¹ [0000-0002-8349-264X], А. В. Шубин² [0000-0002-6203-3268]

^{1,2} *Институт информационных технологий и интеллектуальных систем
Казанского (Приволжского) федерального университета;*

¹gazizov782@gmail.com, ²shubin.aleksey.kpfu@gmail.com

Аннотация

Процедура установки вершинных весов – очень трудоёмкая и сложная задача для любого художника трёхмерных моделей. Поэтому применение процедурных методов для облегчения этой процедуры является очень важным.

В статье проведён анализ различных методик скиннинга и выявлены их преимущества и недостатки. Описаны наиболее частые варианты дефектов скиннинга, возникающие при использовании стандартных подходов. Проведён анализ инструментария для скиннинга в среде трёхмерного моделирования Maya. Предложены методы решения некоторых из имеющихся проблем, но не подразумевающие процедурного решения. Также на основе нейронных сетей в качестве дополнительного инструмента для программы Maya предложена идея собственного решения. Этот инструмент позволит преодолеть большинство недостатков других методов и ускорить процесс скиннинга модели.

Ключевые слова: *трёхмерное моделирование, вершинные коэффициенты, оснастка, процедурные методы, нейронные сети.*

ВВЕДЕНИЕ

Многие предметы нашего повседневного окружения демонстрируют упругое поведение при контакте с более жесткими объектами (например, кошка идет по подушке, рука прижата к окну, мягкий мяч прыгает на стойке ворот) – иначе говоря, происходят сплющивание внутри области контакта и выпучивание при перераспределении объема за ее пределами. Такие эффекты сжатия и выпучивания необходимы для передачи правдоподобных деформаций в различных ситуациях, таких как анимационные фильмы, визуальные эффекты или видеоигры. Они особенно важны в анимации персонажей, например, когда художники ставят

перед собой задачу передать действия персонажа на окружающую среду или на другого персонажа (хватание, толкание, нажатие и т. д.). Таким образом, деформации при контакте часто требуются на практике, однако существующие инструменты компьютерной графики остаются пока мало пригодными для художественного использования в таких ситуациях.

Трёхмерный объект со скелетом и костями по сути представляет собой отдельные компоненты геометрии, которые соединены друг с другом с помощью такого скелета. Скелет в свою очередь работает при помощи рига. Риг¹ – это набор зависимостей между управляющими и управляемыми элементами, которые созданы таким образом, чтобы управляющих элементов было меньше, чем управляемых. Основная задача, выполняемая при помощи риггинга, – упрощение процесса анимирования объекта.

Риггинг² – это подготовка персонажа к анимации. Важным недостатком риггинга является то, что он плохо работает для анимации деталей поверхности и может занять очень много времени для реализации сложных проектов.

Для подобных случаев есть различные инструменты, позволяющие проводить автоматический риггинг. В программе Maya доступен *Quick Rig tool*, который имеет возможность быстро создать риг для стандартного меша, а при помощи подробной инструкции [1] имеется возможность сделать риг точнее и лучше.

Проблема автоматического риггинга состоит в том, что не всегда скелет модели получается правильным, то есть данный функционал можно использовать лишь тогда, когда это позволяет модель. Большой проблемой риггинга может быть неправильный скиннинг модели. Скиннинг³ – это процесс привязки точек трёхмерной модели к специально созданным для этого контактам-костям (см. рис. 1). Они оказывают влияние на вершины (или вертексы⁴) модели, двигая их в 3D-пространстве соответствующим образом.

¹ Риг (от англ. rig) – стенд.

² Риггинг (от англ. rigging) – оснастка.

³ Скиннинг (от англ. skinning) – покрывать кожей.

⁴ Вертекс (от англ. vertex – вершина) – точки из которых строится поверхность трёхмерной модели.

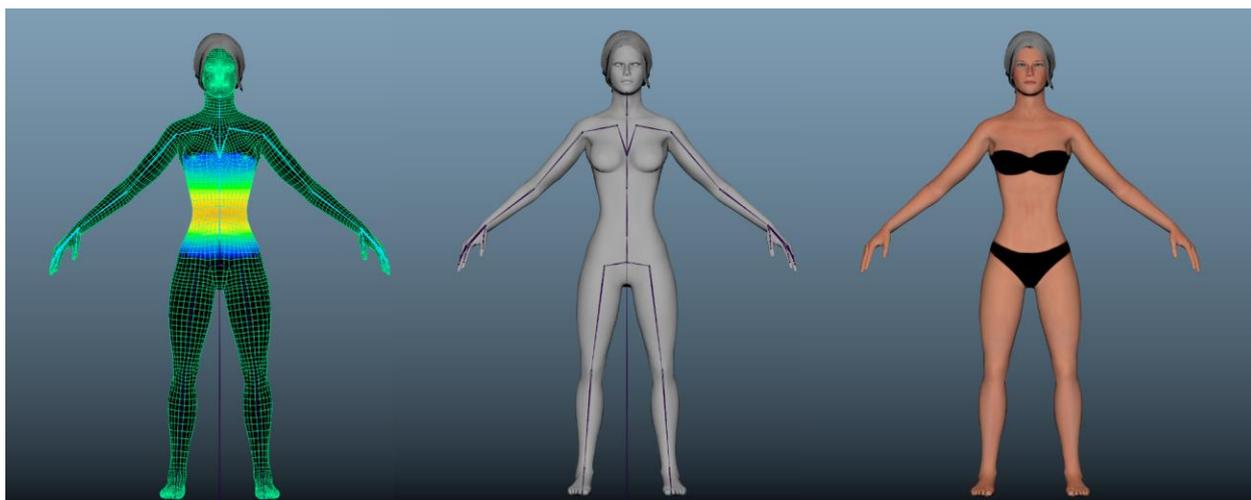


Рис. 1. Пример распределения весовых коэффициентов на трёхмерной модели (слева)

По сути при скиннинге для всех вертексов модели даются функциональные зависимости, как и какая кость влияет на модель: при вращении сустава вертексы, на которые действует кость, будут перемещаться по поверхности сферы с радиусом, равным расстоянию от вертекса до привязанной кости, на угол вращения, умноженный на коэффициент веса. Соответственно, если вес равен нулю, то кость на вертекс никак не влияет; если же вес равен единице, то производится полное вращение по радианам. Кроме того, не только вращение кости влияет на вертексы – перемещение работает схожим образом. Вертексы будут повторять перемещение кости, но их векторы будут умножаться на коэффициент влияния (вес).

Тщательный ручной скиннинг с использованием лишь стандартных инструментов часто бывает утомительным и затратным по времени. Среди стандартных методов установки весов можно назвать:

- ввод весов каждой из множества вершин и костей при помощи таблиц;
- использование ограничителей (envelope);
- раскрашивание веса точек модели «кистью».

Со временем скиннинг становился проще не только с расширением инструментария – появились алгоритмы, позволяющие автоматически распределить вес на нужные кости. Такой тип скиннинга называется *процедурным*. К сожалению, на данный момент, несмотря на большое число различных инструментов, многие из

них не предоставляют качественного автоматизированного решения и оставляют художнику задачу исправления результата до достижения надлежащего уровня.

Настоящая работа призвана выявить большинство проблем скиннинга персонажа, чтобы впоследствии предложить некоторый автоматизированный способ их решения.

ПРЕДЫДУЩИЕ РАБОТЫ

Классический подход к решению проблем правильного задания деформации при контакте модели опирается на физические свойства упругих объектов, чтобы явно моделировать их поведение [2]. Очевидным преимуществом таких алгоритмов является их физическая точность при условии, что художникам удастся найти физические параметры, которые обеспечивают искомое поведение. На практике это требует обширной подготовки и навыков, а также частых проб и ошибок даже у эксперта по моделированию. Физическая точность может быть даже недостатком для постановок, которые стремятся к мультяшным, преувеличенным деформациям [3]. Кроме того, основным ограничением симуляций в интерактивном контексте является их зависимость от времени, что не позволяет использовать их на этапе монтажа или анимации.

Для анимации персонажей физически обоснованные подходы [4–7] обходят это ограничение, используя квазистатическое моделирование, не зависящее от времени. Хотя деформации удаленных контактов все еще зависят от пути, пройденного до состояния столкновения, они требуют существенных вычислительных затрат, поскольку большой набор нелинейных уравнений, описывающих моделируемый процесс, должен решаться итеративно, и поэтому такие подходы все еще не подходят для живого взаимодействия с пользователем. В качестве альтернативы, если использовать более простые модели на основе положения [8, 9], можно поддерживать локальные столкновения с интерактивной скоростью [10–12]. Несмотря на то, что эти методы могут помочь исправить артефакты скиннинга, такие как локальные самопересечения поверхности вблизи соединений, они не предназначены для представления удаленных контактов между частями тела или с внешними объектами.

Альтернативные решения, находящиеся на противоположной стороне методологического спектра, – это ручные подходы, полностью контролируемые художником, например, основанные на формах смещения, свободной форме [13, 14] или деформации пространства позы [15]. Их главное преимущество – простота: они обеспечивают мгновенную обратную связь с художниками, которые затем сами создают убедительные деформации. На практике эффекты выпуклости остаются редкостью в производстве, потому что задача создания деформаций и их анимации вручную требует значительного количества времени даже у опытных художников. Что еще хуже – каждая деформация специфична для формы объектов и их фактических контактов, поэтому ее нельзя повторно использовать в других ситуациях (например, от кадра к кадру).

Для анимации персонажей специальные техники скиннинга обеспечивают локальное или глобальное сохранение объема [16–18], и можно даже избежать самопересечений поверхностей [19], но это требует временной интеграции и предлагает ограниченный, косвенный художественный контроль через нарисованные веса. Неявный скиннинг [20, 21] также может обрабатывать локальные деформации поверхности (кожи) между соседними сочленениями, не прибегая к моделированию, благодаря неявному объемному представлению персонажа. Однако его операторы на основе градиента трудно поддаются художественной обработке, а удаленные контакты слишком дороги для интерактивной обработки.

В общем контексте трехмерных упругих объектов было предложено лишь несколько альтернативных подходов. Среди них нужно выделить работу [22], где деформатор обновляется автоматически на основе клетки, чтобы разрешить столкновение жесткого объекта с упругим, при этом примерно сохраняя объем, заключенный в клетке. Это обеспечивает некоторый контроль жесткости упругого объекта, а деформатор свободен от временных зависимостей, но достигает промежуточных характеристик только с помощью дорогого итерационного алгоритма на GPU. Кроме того, поскольку он требует промежуточного объемного представления, данный метод приводит к глобальным, грубым деформациям, а не к локализованному выпучиванию поверхности.

Другой метод [23] использует геометрический каркас, который решает вопросы пересечения поверхностей интерактивно во время геометрического моделирования, но включает в себя вычислительно сложную численную оптимизацию с ограничениями и не допускает художественного управления деформацией.

Параллельный метод [24] показал улучшенные результаты для конкретного случая деформации на основе «рукоятки» As-Rigid-As-Possible (ARAP) [25], но в остальном обладает аналогичными ограничениями.

Работа [26] предлагает подход к деформации, который позволяет художнику управлять вершинами и эффектами выпуклости.

Процедурные деформаторы, такие как плагин iCollide из Autodesk Maya или деформатор столкновений из Cinema4D, частично решают названные задачи, предлагая мгновенную деформацию с контролем профиля выпуклости. Как описано в работе [27], такие деформаторы состоят из двух основных этапов. Во-первых, они определяют точки упругого объекта, находящиеся внутри жесткого объекта, и проецируют их в ближайшее положение на жесткой поверхности, таким образом полностью сворачивая область пересечения. Во-вторых, упругая поверхность вне области пересечения деформируется по нормали пропорционально глубине взаимопроникновения. Поскольку объем в области пересечения не учитывается, названный инструмент может дать неправдоподобные результаты. Более того, при таком подходе вся пара пересекающихся поверхностей остается в контакте: в результате невозможно добиться эффектов, показанных на рис. 1, а во время анимации могут возникнуть нестабильности, что потребует от художников корректировки параметров во времени, что непрактично.

Применение физически обоснованных методов в процессе создания весовых коэффициентов позволяет значительно повысить правдоподобность движений персонажа. Моделирование на основе физических представлений позволяет вывести анимацию на основе скелета за рамки чисто кинематического подхода за счет имитации вторичных движений, таких как покачивание, сохранение объема и эффекты контактной деформации [28]. Эти вторичные движения обогащают визуальное восприятие анимации и необходимы для создания привлекательной анимации персонажей. Несмотря на такие реалистичные эффекты, физическое моделирование требует больших вычислительных затрат и является сложным,

поэтому в интерактивных приложениях его обычно избегают. Кроме того, физические методы требуют вмешательства человека для создания входных данных, которые описывают физические состояния, прежде чем соответствующая задача может быть решена компьютерной программой. В большинстве случаев такая подготовка является трудоемкой, и художник должен овладеть знаниями как данного программного обеспечения, так и физических представлений, лежащих в основе рассматриваемого явления.

ПРОБЛЕМЫ СКИННИНГА

Для связи трехмерной геометрии с костями используют вершины. Понятие веса позволяет задать, как та или иная кость будет влиять на вершины геометрии модели. Чем сильнее влияние кости на вершину, тем сильнее вершина будет следовать за костью при ее трансформации. И, соответственно, чем слабее влияние кости на вершину, тем меньше она будет зависеть от трансформации кости. Такая система дает возможность создавать эффекты реалистичной деформации геометрии модели. Плавно назначенные веса создают красивые и, главное, реалистичные изгибы в районе суставов персонажа.

В результате правильного назначения веса каждая кость должна оказывать влияние только на тот участок геометрии, который ближе всего к ней находится. Также должен быть обеспечен естественный и плавный переход в участках суставов и естественных изгибов тела модели. Если вес был назначен неверно, то часто можно заметить резкие, «ломанные» движения конечностей. Пример: подняв ногу модели, мы можем увидеть, как вместе с ней потянутся и другие вершины геометрии, например, головы, что не приемлемо. Поэтому обсуждаемый процесс требует времени, внимания и усердия.

Скиннинг в Maya может быть автоматически произведен при помощи большого набора внутреннего инструментария. Подбор соответствующего метода и правильных параметров может обеспечить относительно лёгкий и быстрый скиннинг, но, к сожалению, зачастую алгоритмы стандартных методов являются довольно простыми, что приводит к появлению различных артефактов и проблем. Наиболее известные из них представлены ниже.

Перераспределение весов

Одна из основных проблем автоматического скиннинга – перераспределение весов для получения правильной, реалистичной деформации. Вес кости задается в пределах от 0 до 1, где 0 – это отсутствие влияния, а 1 – максимальное влияние. Возможно также и частичное влияние, если установить дробные числа в указанном интервале. Важно, чтобы суммарный вес вершины был равен 1, то есть, если вершина имеет вес 0,7 для одной кости, то оставшиеся 0,3 веса должны быть распределены между оставшимися костями. Но зачастую использование автоматических методов приводит к неравномерному распределению веса либо может привести к новым артефактам.

Есть вариант, когда оставшийся вес распределяется на так называемую корневую кость⁵, что зачастую является крайним вариантом. Нередко для решения данной проблемы и получения качественной анимации художнику приходится потратить немало времени на ручную проверку и калибровку весов, что особенно заметно при работе с конечностями, имеющими большое количество последовательно соединённых костей (как, например, у хвоста или щупальца персонажа, имеющих большую подвижность).

Установка весов для новых моделей

Несмотря на то, что некоторые модели могут иметь одинаковое количество конечностей, общую морфологию и расположение движущихся частей, художнику, приступая к работе с каждой новой моделью, приходится корректировать веса заново. Дело в том, что даже при всей своей функциональной схожести модели могут отличаться по пропорциям, форме, длине и ширине конечностей, а также другим параметрам, что означает наличие новой геометрии, следовательно, расположение и количество вертексов модели, что в итоге обязывает художника тратить дополнительное время на ручную калибровку.

⁵ Корневая (от англ. root – корень) кость – старшая кость всего ригга в иерархии, перемещающая ее, мы будем перемещать персонаж по сцене.

Необходимость в дополнительной ручной доработке

Несмотря на то, что существует большое количество разнообразных автоматизированных методов, чтобы ускорить или облегчить работу художника, их результат зачастую связан с большим количеством ошибок. Таким образом, практически любой современный инструмент без дальнейшей корректировки опытным художником не сможет дать полноценного, правдоподобного результата, что означает, что практически любой метод автоматизации и ускорения процесса скиннинга на самом деле не является полностью автоматическим.

Установка ненулевых весов на лишние точки

Данный артефакт проявляется при использовании автоматических методов, основанных на удалённости вертекса от заданной кости. Дело в том, что в учёт не идёт то, что некоторые вертексы могут быть частью другой конечности, напрямую не связанной с рассматриваемой (см. рис. 2). В случае невнимательного применения подобных методов скиннинга без последующего своевременного обнуления весов лишних вертексов можно получить нереальные зависимости, такие как, например, участки головы, следующие за движением ноги или руки.

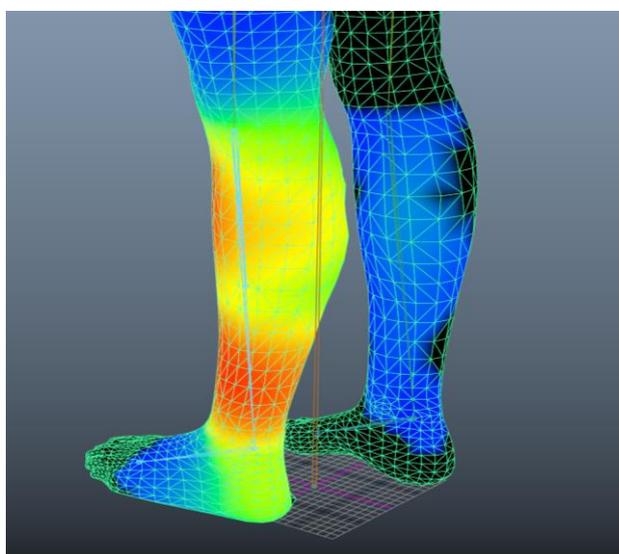


Рис. 2. Артефакт с распределением весовых коэффициентов

Артефакт «конфетная обертка»

Этот вариант более специфичен и связан скорее не с перемещением, а с вращением суставов при использовании стандартных методов скиннинга, что приводит к эффекту «конфетной обертки». Такой эффект связан с тем, что при использовании автоматических методов вращаемая кость «тащит» за собой связанные с костью вертексы, образуя таким образом подобие конфетной обёртки. Использование подобных методов может быть хорошо применено для моделирования перемещения, однако при вращении некоторые вертексы могут начать сжиматься, что вызывает артефакт потери объема в модели, когда определенную часть «сдавило» (см. рис. 3).

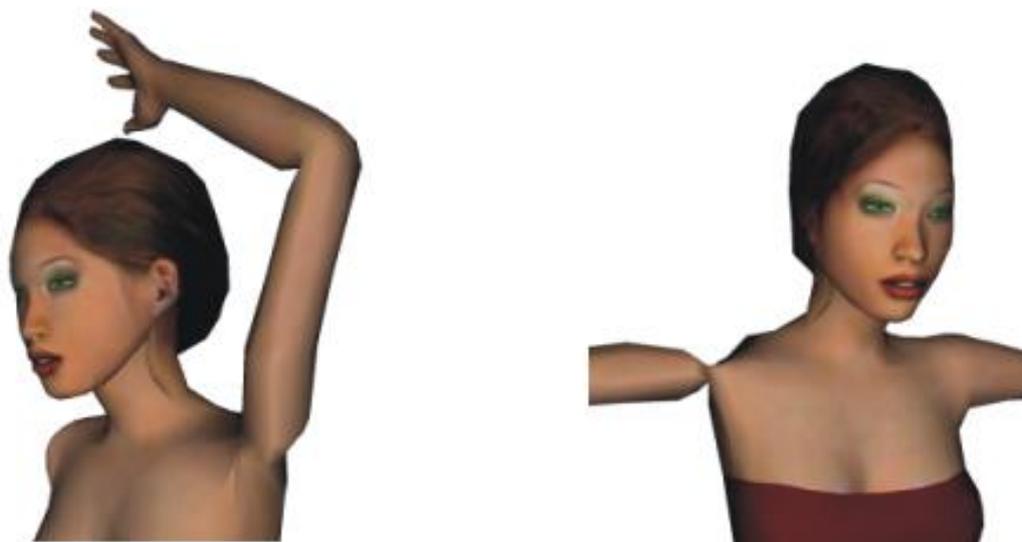


Рис. 3. Эффект сжатия при вращении

Артефакт с раздуванием суставов при сгибании

Подбор соответствующего метода автоматического скиннинга позволяет избавиться от некоторых проблем, упомянутых выше. Однако бывают случаи, когда метод, решая одну из проблем, может создать другую. Один из таких случаев – дефект раздувания суставов при сгибании (см. рис. 4), когда, например, область плечевого сустава человека влияет также и на подмышку, что вызывает эффект, когда при поднятии руки вертикально вверх она вместо растяжения «выдергивается» из тела персонажа, так как поворачивается вместе с рукой.

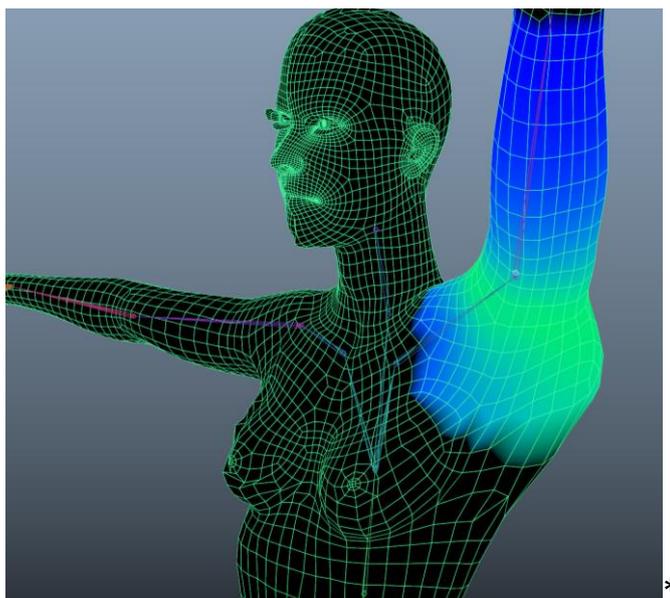


Рис. 4. Артефакт в плечевом суставе при автоматическом скиннинге (слева)

Невозможность автоматического создания вторичной и сложной анимаций

Многие автоматические методы скиннинга являются чисто кинематическими и лишены вторичных эффектов движения, таких как покачивание жировых тканей и эффекты контактной деформации, то есть не могут передать реалистичную сложную деформацию. Упомянутые движения обогащают визуальное восприятие модели и необходимы для создания привлекательной анимации персонажей.

Основная проблема создания правдоподобных деформаций заключается в удовлетворении противоречивых требований интерактивности и правдоподобия в реальном времени. Правдоподобность требует достижения высокой детализации деформации, что означает передачу полного спектра желаемых эффектов, а именно: покачивания, сохранения объема, выпуклости мышц и деформации при контакте с кожей. Для создания таких деформаций требуется как минимум на порядок больше вычислительного времени, чем в существующих интерактивных системах деформации.

РУЧНЫЕ МЕТОДЫ СКИНИНГА

Процесс скиннинга художники начинают с простого: выбирают одну часть модели, доводят её «до ума» и после этого переходят к следующей. Зачастую

предварительно создаются простые анимации для рига и перемещения всех используемых суставов, а затем внимательно изучается и проверяется влияние весов. Такая практика позволит сразу увидеть, где художник столкнулся с проблемами деформации и неверным влиянием суставов на модель, чтобы затем исправить их. Но, конечно же, такая практика не автоматизирована и может занять большое количество времени.

Стандартные методы установки весов

Вес можно задавать различными способами. Его можно назначать каждой вершине и кости вручную, используя таблицу весов, но это зачастую бывает неудобно и долго. Хотя, иногда, только такой подход решает проблему точного назначения веса. Также весовые коэффициенты можно задавать, используя ограничители – виртуальные оболочки, позволяющие определить зону влияния кости. Такой подход является более понятным, но всё еще не всегда удобным. Для многих самым удобным способом назначения и распределения веса является его рисование. В этом случае мы вручную раскрашиваем вес точек модели при помощи кисти. Это дает возможность легко и быстро назначать вес, позволяет очень просто прорабатывать участки перехода веса (места, где вес распределяется между несколькими суставами).

Названные методы являются наиболее распространёнными в работе художников трёхмерных моделей, но скорость и качество работы зависят напрямую от опыта специалиста, так как эти методы не являются автоматизированными.

Отзеркаливание весов

Тщательный риггинг часто бывает утомительным и время затратным, а потому отзеркаливание весов может сэкономить часы работы. Например, при расставленных весах на левой руке повторение всего процесса для правой руки не только станет тратой времени впустую, но и, вероятно, приведёт к несоответствиям, которые можно сразу не заметить. Отзеркаливание весов, то есть копирование их из одной симметричной конечности на другую, позволяет всего за несколько минут сделать в точности аналогичный скиннинг другой половины конечностей без необходимости проводить тот же самый объём работы вручную.

Названный метод отлично подходит для симметричных моделей, таких как реальные животные, но в иных случаях, когда моделируемое существо может иметь асимметричные морфологию или конечности, этот метод никаким образом не поможет ускорить работу.

Метод обертки

При создании моделей с похожей геометрией есть возможность уменьшить объём работы при помощи копирования весов вершин с модели-обёртки. Для этого нужно создать низко полигональную⁶ версию модели, затем вручную привязать эту версию к скелету, провести полноценный скиннинг и, наконец, скопировать веса на изначальную версию этой модели при помощи инструментов среды моделирования. После этого необходимо исправить возможные появившиеся ошибки, однако время, затраченного на скиннинг, будет уменьшено.

К сожалению, несмотря на очевидное преимущество применения данного метода, при использовании низко полигональной обёртки теряется часть информации, так как при использовании меньшего числа полигонов копирование весов на обёртку может быть менее сглаженным или вовсе некорректным из-за нехватки вертексов.

Данный метод может помочь и при скиннинге модели, которая разделена на множество объектов. При создании для модели обёртки, которая объединит все объекты вместе и будет использована для скиннинга, появится единый объект, на котором и будет происходить распределение весов.

Также при работе со скином фактически редактируется влияние каждой кости на вертексы модели, поэтому во избежание сложностей необходимо удостовериться, что все вертексы модели сшиты. В противном случае скиннинг таких участков модели образует дыры, которые зачастую можно увидеть только при раскраске весов, что означает, что процесс скиннинга придется переделывать заново.

К сожалению, применение метода обёртки является сложным и требует от художника большого числа манипуляций, что может привести к большому числу ошибок.

⁶ Полигон (от англ. polygon – многоугольник) – область в пространстве, которая образует поверхность модели.

Добавление дополнительных костей

Существует также ручной способ исправления артефактов со скручивани-ями путём добавления суставов вращения. Например, вместо того, чтобы скручи-вать один сустав на 180 градусов, можно разделить кость на четыре, и каждый получившийся сустав скрутить на 45 градусов. При таком решении полученные су-ставы будут также влиять на вращение, делая его намного более сглаженным, по-этому нужно аккуратно применять данный способ, чтобы исключить нежела-тельные эффекты.

Похожий приём может использоваться для борьбы с потерей объёма: в ме-стах сгиба суставов (плечи, локти и колени) можно добавить по дополнительному суставу спереди и сзади сустава сгиба. Тогда при сгибе конечности они будут «от-талкиваться» от основного сустава и частично предотвращать потерю объёма в складках.

Все подходы, описанные выше, рутинные и не предлагают качественного автоматизированного решения.

СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СКИННИНГА (МАУА)

Скиннинг в Maya может быть реализован сразу несколькими подходами, например, через стандартный вариант автоматического скиннинга BindSkin или технологию nCloth. Последняя используется в основном для обработки физиче-ского описания одежды, но за счет тонких настроек ее можно использовать и для скиннинга модели персонажа с более реалистичными движениями кожи и мышц. К сожалению, данный вариант менее универсальный и плохо подойдет для ани-мации моделей для видеоигр, так как ориентирован на однотипную продолжаю-щуюся анимацию и в лучшем случае подойдет в качестве метода анимации мо-делей для CG⁷-видеороликов внутри редактора трёхмерной графики.

В свою очередь, BindSkin предлагает обычный набор атрибутов, предостав-ляя, тем не менее, довольно обширный функционал (см. рис. 5).

⁷ Computer Graphics (англ.) – это техника создания изображений на компьютере.

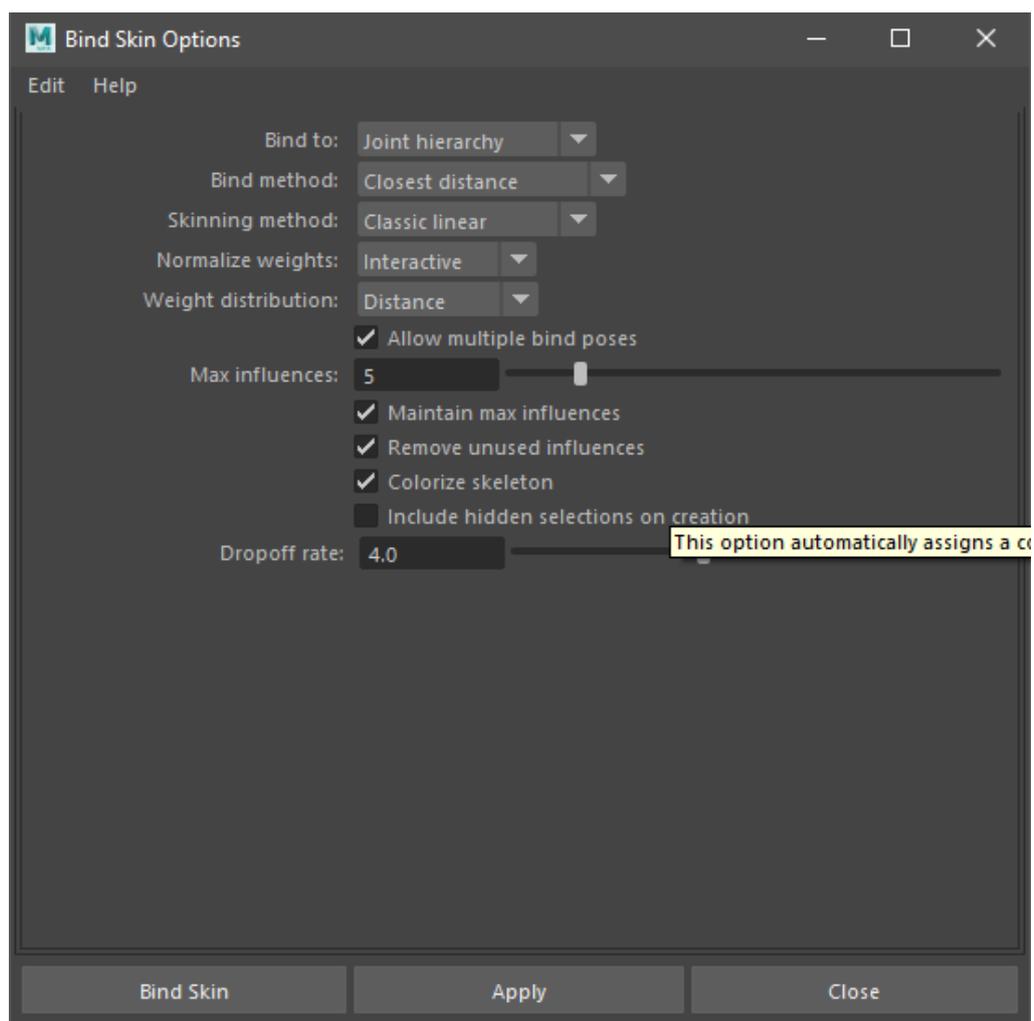


Рис. 5. Привязки меша к скелету в Maya

Методы привязки

1. Методы на основе расстояния

Параметр называется *Bind method*. Он отвечает за метод, который регулирует выбор подходящих вертексов, после чего им назначается значение веса. Метод, указанный в этом параметре, влияет на алгоритм процедурного скиннинга напрямую и, по сути, составляет чуть ли не третью часть всей алгоритмики процедурного скиннинга.

Распределение веса может происходить несколькими способами:

- *Closest Distance* – относительно расстояния вертекса до каждого из суставов в привязке. Чем дальше сустав находится от вертекса, тем меньше он на него влияет.

- *Closest In Hierarchy* – относительно расстояния, но сначала ближе всего по иерархии, а потом уже по расстоянию.

Проблемой этих методов является то, что несмотря на математически справедливое распределение, чаще всего настолько простой алгоритм вызывает артефакты в риге персонажей, и их приходится исправлять вручную. Например, чаще всего в риге человека область плечевого сустава влияет еще и на подмышку, что вызывает эффект раздувания суставов, когда при поднятии руки вертикально вверх подмышечная область вместо растяжения «выдергивается» из тела персонажа, поворачиваясь вместе с рукой.

2. Карта теплоты

Heat Map – метод, который является более продвинутым, так как исходит из следующей концепции.

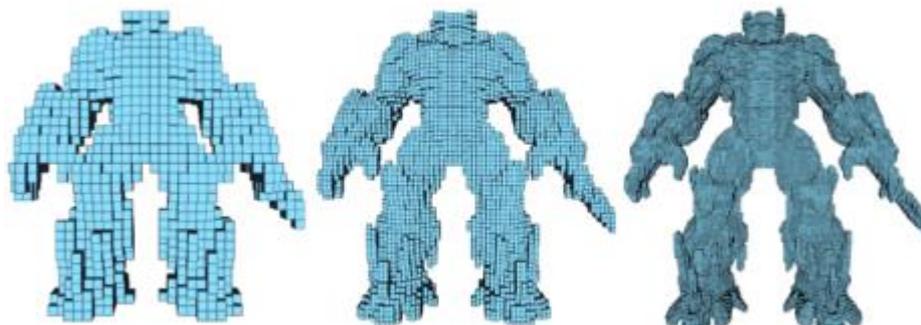
Существует такое подпространство фигуры, которое можно описать как внутреннюю полость модели, определяемую тем, что если выпустить любой луч из точки этого подпространства, то при попадании на поверхность модели он попадет на обратную сторону грани. Но вместо начальной точки в алгоритме используются непосредственно суставы: если сустав находится снаружи модели, он никак на нее не влияет. Если же он внутри модели, то влияет только на те вертексы, для которых отрезок между вертексом и суставом не выходит из модели (не пересекает ни одну из граней, кроме той, на которую попал). Это более универсальный алгоритм, так как он позволяет, например, избавиться от артефакта при анимации персонажа, когда участок, принадлежащий одной ноге, перемещается за второй.

3. Геодезическая привязка вокселями

Geodesic Voxel Binding – геодезическая привязка при помощи вокселей. Этот метод более грубый в сравнении с остальными, но позволяет работать с не совсем правильными моделями, которые содержат нулевые грани, ребра и т. д. Данный метод делает из модели ее воксельную копию⁸, после чего на основе расстояния до вершин вокселя строит свою сетку, в которой каждому вертексу присваивается значение на основе расстояния от вертекса до вершин того вокселя, в котором

⁸ Воксельная копия модели – вариант модели, состоящей из одних кубов-вокселей и примерно повторяющей изначальную форму.

вертекс находится. Также добавляется новый атрибут Resolution⁹, который отвечает за воксельную детализацию. Чем выше Resolution, тем меньше воксели и тем больше очертания воксельной копии схожи с реальной моделью (см. рис. 6). При уменьшении разрешения топология персонажа может изменяться, что изменяет минимальное расстояние между вокселями, падающими на кости, и не внешними вокселями.



Рису. 6. Воксельные представления трехмерных моделей с разной детализацией [29].

Но и последние два метода не решают всех проблем со скиннингом, так как, например, тот же артефакт с раздуванием суставов все равно будет присутствовать как при использовании карты теплоты, так и при геодезической привязке вокселями. Поэтому для каждого случая нужно выбирать свой подходящий метод скиннинга, конечный результат которого пришлось бы меньше исправлять.

Методы сглаживания

При необходимости инструмент Bind Skin дополнительно поддерживает применение сглаживания при автоматической установке весов.

Простой скиннинг: каждая вершина меша привязывается к одной конкретной кости скелета (см. рис. 7, б). При таком подходе скин персонажа моделируется как единая непрерывная сетка. Каждая вершина в сетке привязана ровно к одному суставу в скелете, и когда скелет позиционируется, вершины трансформируются матрицей пространства их суставов. Техника простого скиннинга подходит для моделей с низкой детализацией, но явно недостаточна для персонажей

⁹ Resolution (англ.) – параметр, отвечающий за количество и плотность кубов в воксельной копии.

более высокого качества. На практике алгоритм простого скиннинга может работать для персонажей с 500 или даже 1000 полигонами, если соблюдать осторожность при размещении вершин и прикреплении костей. Простого скиннинга может быть достаточно для персонажей с низкой детализацией, но для более высокого качества он слишком ограничен, поэтому требуется лучшее решение.

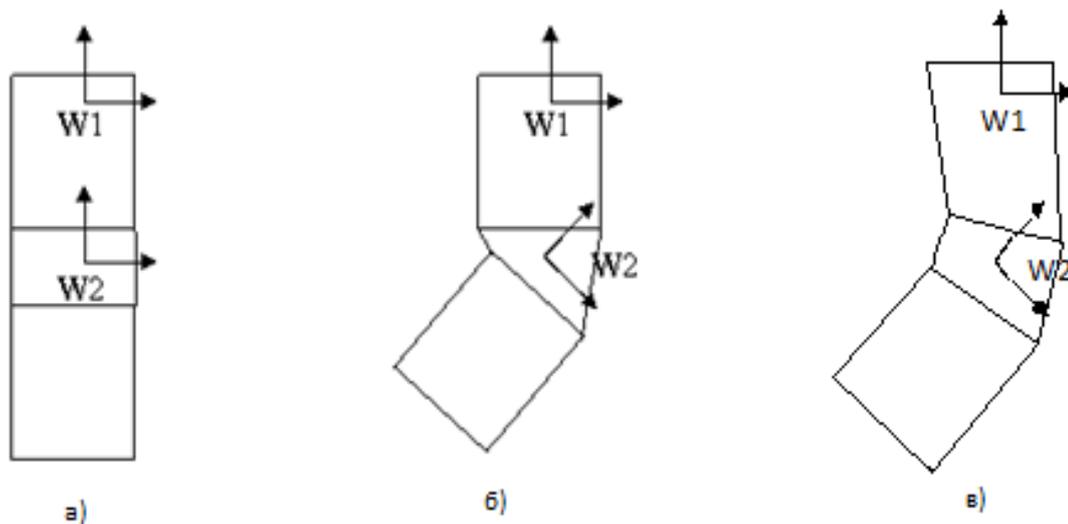


Рис. 7. Различные варианты привязки (а – разогнутое колено, б – согнутое колено с простым скиннингом, в – согнутое колено со сглаженным скиннингом)

Применение методов сглаживания расширяет концепции, используемые в простом скиннинге. При «гладком» скиннинге каждая вершина сетки может быть присоединена к нескольким суставам, каждый из которых влияет на вершину с разными силой или весом (см. рис. 7 в). Окончательное преобразованное положение вершины представляет собой средневзвешенное значение начального положения, преобразованного каждым из присоединенных суставов. Например, вершины в колене персонажа могут быть частично привязаны к тазобедренному суставу (управляющему верхней частью бедра) и коленному суставу (управляющему икрой). Многие вершины должны быть привязаны только к одному или двум суставам, и редко бывает необходимо привязать вершину более чем к четырем [30].

Скиннинг на основе линейного смешивания (linear blend skinning): на каждую вершину могут оказывать влияние несколько костей, у каждой кости есть значение веса для каждой связанной с ней вершиной. Этот способ помогает создавать более реалистичные анимации и является классическим видом скиннинга.

С методом линейного смешивания связано несколько артефактов анимации. Поскольку он не заботится о сохранении объёма, при слишком сильном сгибании суставов геометрия модели может проходить сквозь саму себя, а на местах, близких к суставу, может появиться выпуклость. Аналогично, при скручивании сустава может появиться артефакт «конфетная обертка», когда модель в месте скручивания будет более суженной, чем вся другая соседняя поверхность.

Скиннинг на основе двойного кватерниона: преобразует матрицы вращения в кватернионы и нормализует их. Этот метод не требует изменений в модели и помогает исправить артефакты с потерей объёма при сгибании и скручивании конечностей. К сожалению, метод является более нагруженным, так как на каждый вертекс приходится больше инструкций, обрабатывающих его, из-за применения сразу нескольких методов: сначала вычисляется линейное результирующее, после чего находится угловое результирующее (на какой угол отклонился объект), после этого финальный вектор для перемещения объекта строится по линейному результирующему вектору, который нормируется до радиуса окружности вращения, и углу.

Таким образом, ни один из стандартных методов автоматического скиннинга не даёт качественного результата и обязывает художника в ручном порядке исправлять полученный результат. Безусловно, применение стандартных методов ускоряет работу художника, так как ему не нужно изначально расставлять веса вручную, но при этом такой инструмент не может в полной мере автоматизировать данный процесс.

ПРОЦЕДУРНЫЕ МЕТОДЫ СКИННИНГА

Шаблоны скиннинга

Один из предлагаемых подходов подразумевает использование абстракций для скиннинга, что позволяет повторно использовать поведение скиннинга для схожих суставов и на схожих персонажах. Такая абстракция воплощена в виде шаблонов скиннинга, которые определяют поведение вертексов при деформации для общих типов суставов.

Шаблоны скиннинга реализуют деформации на основе клетки [31], что обеспечивает гибкое пространство проектирования, в котором можно многократно использовать заготовленные модели поведения скиннинга.

Под клеткой понимается управляющая сетка с фиксированной топологией, которая подгоняется под геометрию персонажа. Хотя методы, основанные на клетках, позволяют плавно деформировать геометрию кожи, позиционирование клетки требует ручного манипулирования вершинами клетки. Скелет управляет движением вершин клетки с помощью техники скиннинга, основанной на примерах, благодаря чему клетка плавно деформирует модель персонажа. Клетка имеет простую структуру, которая слабо отделена от модели персонажа, что облегчает задачу разработки деформационного поведения, которое можно использовать совместно. Деформации на основе клетки могут быть эффективно вычислены, поддерживая тем самым интерактивное переключение шаблонов скиннинга. Полуавтоматический этап подгонки используется для обеспечения того, чтобы деформационное поведение клетки оставалось одинаковым при применении к различным геометриям. Например, шаблон для скиннинга мышечного бугра (см. рис. 8), управляемого локтем, позволяет добиться качественно одинаковых деформаций мышечного бугра как для худых рук, так и для полных.

Шаблон скиннинга позволяет достичь определенного эффекта скиннинга, например, выпуклости мышц или сгибания локтя без защемления. Также данный метод позволяет быстро изучить различные модели поведения скиннинга, чего не хватает в традиционных моделях скиннинга. Шаблоны скиннинга могут использоваться пользователями совместно, поскольку они не представлены в виде конкретной модели.

В случае использования такого метода совместно с технологиями нейронной сети художник сможет применять данное решение для автоматического создания рига персонажей со сложной сеткой, таким образом освобождая себя от трудоёмкой ручной работы, благодаря чему остаётся лишь проконтролировать и при наличии ошибок исправить конечный результат.

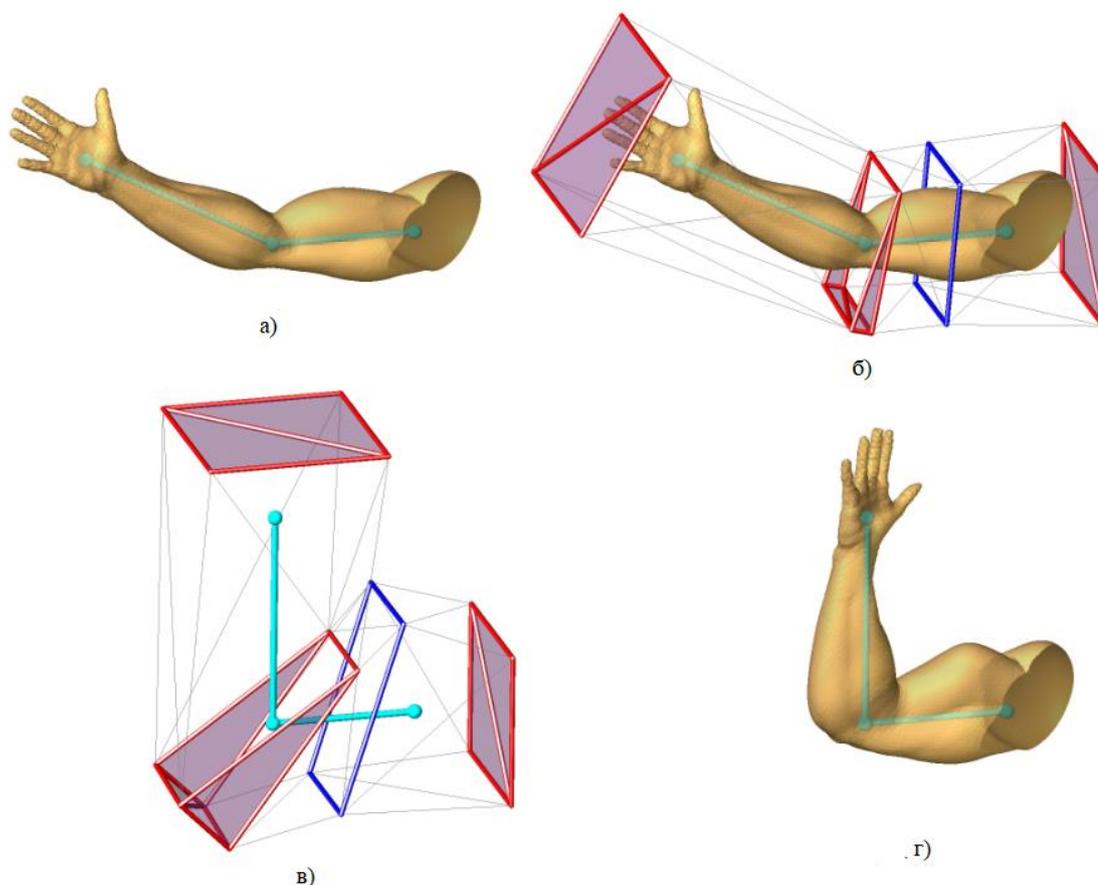


Рис. 8. Скиннинг на основе клетки: (а) первоначальная геометрия модели; (б) установка изначальной клетки; (в) деформирование клетки; (г) полученный результат с учётом реалистичной деформации мышц.

К сожалению, данная технология не позволяет автоматически создавать вторичную анимацию при движении персонажа, что является значимым минусом и обязывает художника провести работу над созданием более реалистичных движений.

Вторичный скиннинг

Вторичные анимационные эффекты – важная часть при создании достоверной анимации, которая обеспечивает реалистичность движения модели. Данные эффекты также добавляются на этапе скиннинга.

Один из предлагаемых вариантов подразумевает добавление вторичных эффектов поверх стандартного скиннинга, что позволит стилизовать движение модели под руководством художника [32].

Такой метод использует в качестве исходных данных готовую сетку с геометрией, скелетом, весами и анимацией скелета. Далее генерируется деформация сетки, которая подчеркивает и стилизует уже реализованное движение, вызванное движением скелета, при помощи расчёта линейных и угловых скоростей вдоль скелетной иерархии. Используя преимущества иерархической природы скелета, можно аппроксимировать динамические деформации, которые в противном случае были бы недоступны без ручного ввода опытным аниматором или применения дорогостоящего физического моделирования.

Основная идея заключается в том, что иерархия скелета, встроенная в расчет скиннинга, предоставляет достаточно информации для разложения движения сетки на значимые, легко управляемые отрезки перемещения, которые могут быть автоматически связаны с деформациями. Этот подход противопоставляется существующим инструментам моделирования, таким как деформаторы в стандартном пакете анимационного программного обеспечения, которые требуют ручной настройки и создания ключевых кадров квалифицированным художником для каждой анимации, что отнимает много времени и является громоздким.

Несмотря на то, что общая структура скиннинга скорости поддерживает широкий набор деформаций, мы продемонстрируем полезность двух специфических характерных деформаций, которые называем "squashiness" (сминаемость) и "floppiness" (болтаемость). Комбинирование этих эффектов позволяет имитировать, улучшать и стилизовать поведение, выглядящее физически реалистичным, в рамках стандартного анимационного конвейера для персонажей с произвольной кожей.

Величина этих двух эффектов деформации может быть тонко настроена с помощью скалярных весовых параметров для отражения различных свойств физических материалов и может быть определена как атрибуты на вершины, «нарисованные» на сетке художником. Вместе с небольшим набором интерфейсных контроллеров это позволяет просто управлять интуитивно понятным пространством возможного поведения деформации, например, для создания эффектов, которые кажутся сделанными из разнородных материалов.

Несмотря на то, что данный метод позволяет во многом уменьшить работу художника по передаче модели более реалистичных движений и сократить

время разработки анимации на многие часы, этот метод всё ещё требует первоначальных манипуляций по созданию изначального движения, скелета и весов. Обсуждаемый метод хорошо применим в качестве одного из этапов комплексного решения для создания анимации, когда изначальные веса устанавливались бы в качестве более раннего этапа при помощи другого автоматизированного метода.

Автоматическая система RigNet

Предсказание формы скелета и кожи анимационного персонажа на основе произвольной статической 3D-сетки – амбициозная задача. Подход к автоматическому риггингу в идеале должен учитывать интуицию аниматоров относительно движущихся частей и деформации. Подход, основанный на обучении, хорошо подходит для этой задачи, особенно если он способен обучаться на большом и разнообразном наборе риггидных моделей.

Такой метод использует нейронную сеть для решения задачи и позволяет автоматически на основе готовой модели прогнозировать скелет модели, а затем провести этап установки весов. Таким образом, данный метод полностью решает задачу риггинга, в том числе реализует этап скиннинга.

Метод предсказывает как форму скелета, так и скиннинг, которые соответствуют ожиданиям аниматора. В отличие от предыдущих работ, в которых на входные 3D-сетки накладывались predetermined шаблоны скелета с фиксированным количеством суставов и топологией, наш метод формирует скелеты, более приспособленные к основной структуре артикуляции входных данных. В отличие от подходов к оценке позы, разработанных для определенных классов фигур, таких как люди или руки, данный подход не ограничен категоризацией фигур или фиксированной структурой скелета. Нейронная сеть представляет собой общую модель предсказания форм скелета и кожи, способную проводить риггинг различных персонажей.

Хотя аниматоры в основном согласны с топологией скелета и расположением суставов для вводимого персонажа, существует также некоторая неоднозначность как в отношении количества, так и точного расположения суставов. Это зависит от того, насколько реалистично точно следует сделать деформацию. Например, в зависимости от замысла анимации, рука может быть представлена с помощью одного лучезапястного сустава или с более тонким разрешением с

иерархией кистевых суставов. Сочленения позвоночника и хвоста могут быть представлены с помощью различного количества суставов. Таким образом, еще одной задачей метода риггинга является обеспечение простого и прямого контроля уровня детализации выходного скелета.

Архитектура подхода RigNet представлена в виде трёх модулей [33], которые последовательно выполняют процедуру риггинга:

Первый модуль – это графовая нейронная сеть, обученная предсказывать соответствующее количество суставов и их расположение при помощи смещения геометрии модели в направлении мест предполагаемого расположения суставов, что позволяет передать реалистичность движений персонажа. Поскольку окончательный скелет может зависеть от предпочтений художников и их задач, наш метод также позволяет пользователю вводить дополнительный параметр для управления уровнем детализации выходного скелета. Например, некоторые приложения, например, моделирование толпы, могут не требовать риггинга мелких деталей (например, руки или пальцев), в то время как в других приложениях, таких как игры от первого лица, риггинг подобных деталей наиболее востребован. Управляя этим параметром, можно вводить меньшее или большее количество суставов для создания разного уровня детализации выходного скелета.

Второй модуль учится предсказывать, какие пары суставов должны быть соединены между собой. Для создания более верной структуры учитывается не только расположение суставов между собой, но и общая геометрия модели путем создания иерархической структуры (анимационные скелеты избегают циклов в качестве выбора дизайна), соединяющей суставы. При построении структуры костей используется алгоритм минимально связывающего дерева, который определяет приоритет наиболее вероятных костей. Приоритезация начинается с корневой кости, которую определяет другая часть модуля.

После создания скелета, заключительным этапом предлагаемой архитектуры является предсказание веса скиннинга для каждой вершины сетки для завершения процесса риггинга. Чтобы выполнить скиннинг, сначала извлекается представление сетки, отражающее пространственные отношения вершин сетки по отношению к скелету. Это представление вдохновлено предыдущими методами скиннинга [34], которые вычисляют влияние костей на вершины в соответствии с объемным геодезическим расстоянием между ними. Это представление

сетки обрабатывается через графовую нейронную сеть, которая выдает веса скиннинга для каждой вершины.

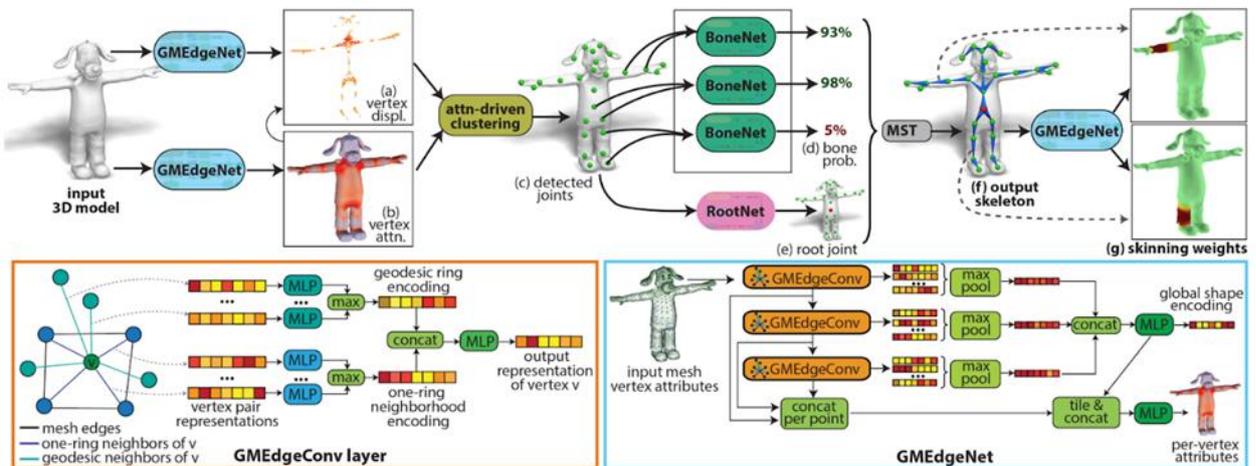


Рис. 9. Конвейер метода RigNet

Таким образом, полный цикл обработки модели при помощи метода RigNet выглядит так, как показано на рис. 9:

A. Учитывая входную 3D-модель, графовая нейронная сеть GMEdgeNet предсказывает смещения вершин по отношению к соседним суставам.

B. Другой модуль GMEdgeNet с отдельными параметрами предсказывает функцию внимания над сеткой, которая указывает на области, более значимые для предсказания расположения суставов (более красные значения указывают на более сильное внимание – смещенные вершины также окрашены в соответствии с этим вниманием).

C. Под влиянием внимания к сетке модуль кластеризации обнаруживает суставы, показанные зелеными шариками.

D. Учитывая обнаруженные суставы, нейронный модуль BoneNet предсказывает вероятность того, что каждая пара суставов будет соединена.

E. Другой модуль RootNet выделяет корневой сустав.

F. Алгоритм минимального связующего дерева MST (Minimum Spanning Tree) использует результаты BoneNet и RootNet для формирования анимационного скелета.

G. Наконец, модуль GMEdgeNet выводит веса скиннинга на основе предсказанного скелета.

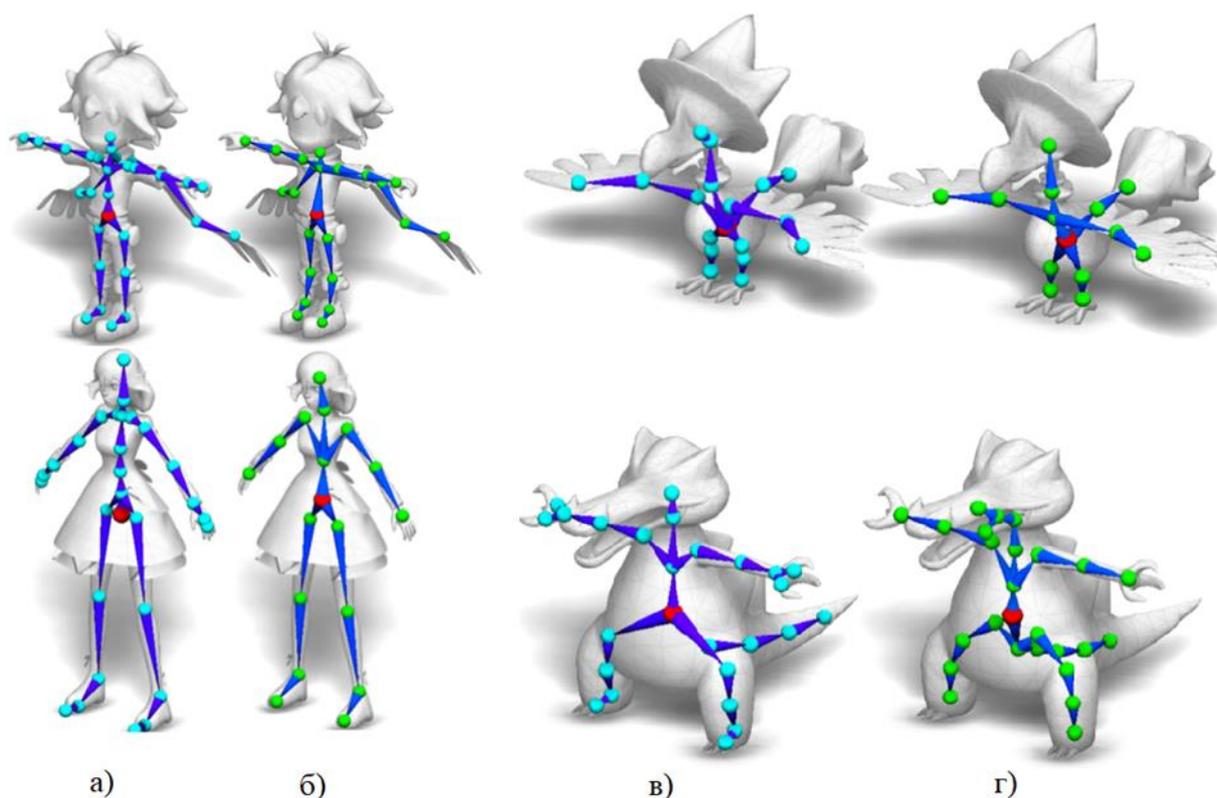


Рис. 10. Примеры результатов работы RigNet

Представленная модификация метода сквозного автоматизированного создания анимационных ригов позволяет автоматически развешивать кости трехмерных моделей (см. рис. 10). Несмотря на это, RigNet имеет некоторые ограничения:

- RigNet использует поэтапный подход к обучению. В идеале потери при скиннинге могли бы передаваться обратно на все этапы сети для улучшения совместного прогнозирования. Однако это подразумевает дифференциацию объемных геодезических расстояний и оценку скелетной структуры, что является сложной задачей.
- Набор данных имеет ограничения. Он содержит один риг на модель. Многие риги часто не включают кости для мелких деталей, таких как ступни, пальцы, одежда и аксессуары, что делает обученную модель менее предсказуемой для этих суставов.

- Обогащение набора данных большим количеством моделей может повысить производительность, хотя это может сделать отображение более многовариантным, чем сейчас.

Предлагаемый подход

Применение искусственного интеллекта и нейронных сетей имеет большие перспективы в рабочих процессах компьютерной графики и позволяет сделать утомительные задачи делом прошлого.

Предлагаемое решение представляет собой плагин для программы Autodesk Maya. Благодаря наличию Maya Python API с поддержкой разработки на языке Python, имеется возможность подключения и использования современных библиотек для обучения нейронных сетей. Наиболее популярными такими библиотеками на данный момент являются TensorFlow, Theano, Torch, CNTK, Keras.

Предполагаемое решение подразумевает комплексный функционал по полноценному риггингу гуманоидного персонажа:

- Создание масштабируемого скелета гуманоидного персонажа на основе готовой трёхмерной модели или облака точек в нескольких вариантах.
- Процедурный скиннинг с привязкой полученных костей к вершинам моделей на основе обучения нейронной сети качественными примерами.
- Запись и загрузка анимаций из облака точек, технологии захвата движения или видео в редактор Maya для их дальнейшего использования.

Предполагается, что данная система будет использовать Maya Python API, Keras в качестве фронтэнда¹⁰, а TensorFlow – в качестве фреймворка для машинного обучения. TensorFlow является одной из наиболее популярных библиотек для обучения нейронных сетей и имеет возможность создавать рекуррентные, свёрточные сети и другие. Кроме этого, данное решение имеет возможность распараллеливания вычислений по архитектуре CUDA, что позволяет увеличить производительность обучения на графических процессорах Nvidia. В свою очередь, Keras – простой и удобный инструмент, изначально поддерживаемый TensorFlow, что позволяет упростить разработку. Эта связка позволит обучить нейронную сеть для предсказания деформаций на геометрии с помощью машинного обучения.

¹⁰ от англ. frontend – презентационная часть программной системы, её пользовательский интерфейс и связанные с ним компоненты.

Предлагаемый подход позволит решить задачу создания весовых коэффициентов и их аппроксимации при помощи метода глубокого обучения.

Для первоначальных результатов по внедрению анимации для глубокого обучения нейронной сети планируется использовать данные с сервиса Adobe Mixamo. Онлайн-сервисы Mixamo включают магазин анимации с загружаемыми трехмерными моделями и анимационными последовательностями. Анимации были созданы в Mixamo с использованием захвата движения и очищены аниматорами ключевых кадров, что может говорить о высокой точности данных для обучения, что немаловажно для получения качественного результата. Таким образом, гуманоидный риг научится перемещаться в пространстве с помощью установленной демонстрации.

Дальнейшее использование инструмента

Планируется внедрение полученной анимации в редактор Maya, что позволит вносить прямые и быстрые корректировки прямо на ходу, что, как уже было указано выше, может быть обременительной задачей даже для опытных художников трёхмерных моделей, но при чутком контроле художника качество результата будет улучшаться.

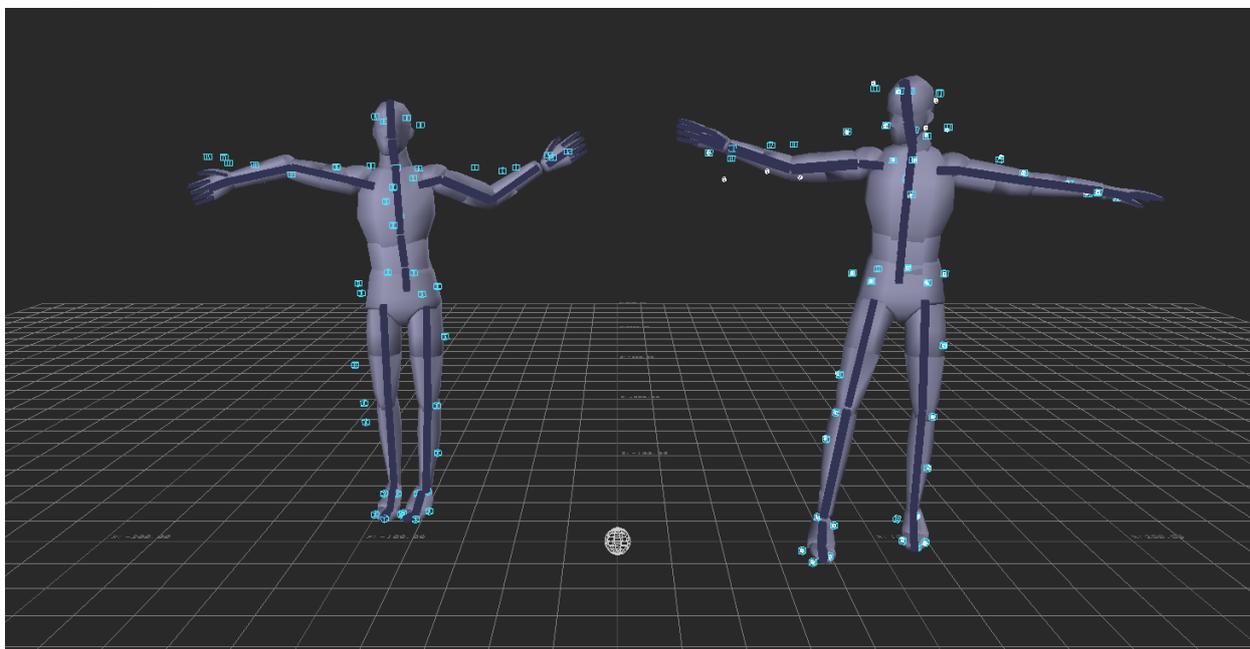


Рис. 11. Создание скелета трёхмерной модели при помощи вводного облака точек

Также предлагается расширить метод для решения задач по извлечению скелета для распознавания или реконструкции облака точек (см. рис. 11), рассмотрев подход с несколькими разрешениями, которые будут уточнять скелет от более общего, грубого – к более детальному. В качестве входных данных могут быть использованы обработанные данные захвата движения, скелетная анимация или видеоматериал.

Подключение автоматического скиннинга с глубоким обучением нейронной сети к инструментарию сценарного прототипирования на основе естественного текста [35, 36] позволит значительно расширить получаемый результат: в такой прототип игры можно будет поиграть, используя не только трехмерные локации, построенные на основе текстовых описаний, но и включить персонажей с реалистичными анимациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процедура скиннинга – один из ключевых этапов создания анимации для трёхмерных персонажей. От результата выполнения данного этапа напрямую зависит качество будущих анимаций, именно поэтому этот этап и занимает большое количество времени и сил.

Статья описывает множество различных методов и подходов к скиннингу, как ручных, так и автоматических, включая подходы с использованием нейронных сетей. На данный момент эти подходы являются передовыми и помогают ускорить работу художников, но всё ещё не дают полноценного комплексного решения. Процедурные методы скиннинга направлены на то, чтобы облегчить художникам решение стоящей задачи, оставив им лишь итоговую калибровку мелких недочётов. В будущем описанная технология позволит создавать полноценные анимации без помощи специалиста по трёхмерной графике. В связи с этим предложена идея формирования такого инструмента, который мог бы в будущем упростить рассматриваемый процесс, оставив художникам лишь подбор необходимых параметров и выбор наиболее корректного результата.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Create an automatic character rig for a mesh // Autodesk Maya. Support and learning. 2020. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/Maya-CharacterAnimation/files/GUID-6CAEA6C2-D4F9-422D-8E0F-522171B47C35-htm.html> (дата обращения 14.07.2022).
2. Nealen A., Müller M., Keiser R., Boxerman E., Carlson M. Physically Based Deformable Models in Computer Graphics // Computer Graphics Forum. 2006. Vol. 25. No. 4. P. 809–836.
3. Lasseeter J. Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation // SIGGRAPH Comput. Graph. 1987. Vol. 21. No. 4. P. 35–44.
4. Gao M., Mitchell N., Sifakis E. Steklov–Poincaré Skinning // In Proceedings of the ACM SIG-GRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA'14). Eurographics Association. 2014. P. 139–148.
5. McAdams A., Zhu Y., Selle A., Empey M., Tamstorf R., Teran J., Sifakis E. Efficient Elasticity for Character Skinning with Contact and Collisions // ACM Trans. Graph. 2011. Vol. 30. No. 4. P. 37:1–37:12.
6. Smith B., Goes F.D., Kim T. Stable Neo-Hookean Flesh Simulation // ACM Trans. Graph. 2018. Vol. 37. No. 2. P. 12:1–12:15.
7. Teng Y., Otaduy M.A., Kim T. Simulating Articulated Subspace Self-contact // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 4. P. 106:1–106:9.
8. Bender J., Müller M., Macklin M. Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics // In EG 2015-Tutorials. 2015. 32 p. URL: <https://diglib.eg.org/handle/10.2312/egt.20151045.t3> (дата обращения 14.07.2022).
9. Bouaziz S., Martin S., Liu T., Kavan L., Pauly M. Projective Dynamics: Fusing Constraint Projections for Fast Simulation // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 4. P. 154:1–154:11.
10. Rumman N.A., Fratarcangeli M. Position-Based Skinning for Soft Articulated Characters // Computer Graphics Forum. 2015. Vol. 34. No. 6. P. 240–250.
11. Deul C., Bender J. Physically-Based Character Skinning // In Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPhys). Eurographics Association. 2013. 11 p. URL: <http://diglib.eg.org/handle/10.2312/PE.vriphys.vriphys13.025-034> (дата обращения 14.07.2022).

12. *Komaritzan M., Botsch M.* Projective Skinning // Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 12:1–12:19.
13. *Nieto J.R., Susín A.* Cage based deformations: a survey // In Deformation models. Springer. 2013. P. 75–99.
14. *Sederberg T.W., Parry S.R.* Free-form Deformation of Solid Geometric Models // SIGGRAPH Comput. Graph. 1986. Vol. 20. No. 4. P. 151–160.
15. *Lewis J.P., Cordner M., Fong N.* Pose Space Deformation: A Unified Approach to Shape Interpolation and Skeleton-driven Deformation // In Proceedings of SIGGRAPH '00. ACM. 2000. P. 165–172.
16. *Kavan L., Sorkine O.* Elasticity-inspired Deformers for Character Articulation // ACM Trans. Graph. 2012. Vol. 31. No. 6. P. 196:1–196:8.
17. *Rohmer D., Hahmann S., Cani M.P.* Exact Volume Preserving Skinning with Shape Control // In Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '09). ACM, 2009. P. 83–92.
18. *Funck W.V., Theisel H., Seidel H.* Volume-preserving Mesh Skinning // Vision, Modelling, and Visualization 2008. Proceedings. 2008. P. 409–414.
19. *Angelidis A., Singh K.* Kinodynamic Skinning Using Volume-preserving Deformations // In Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '07). Eurographics Association, 2007. P. 129–140.
20. *Vaillant R., Barthe L., Guennebaud G., Cani M.P., Rohmer D., Wyvill B., Gourmel O., Paulin M.* Implicit Skinning: Real-time Skin Deformation with Contact Modeling // ACM Trans. Graph. 2013. Vol. 32, No. 4. P. 125:1–125:12.
21. *Vaillant R., Guennebaud G., Barthe L., Wyvill B., Cani M.P.* Robust Iso-surface Tracking for Interactive Character Skinning // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 6. P. 189:1–189:11.
22. *Aldrich G., Pinskiy D., Hamann B.* Walt Disney Anim. Studios. Collision-Driven Volumetric Deformation on the GPU // In Eurographics (Short Papers). 2011. P. 9–12.
23. *Harmon D., Panozzo D., Sorkine O., Zorin D.* Interference-aware Geometric Modeling // ACM Trans. Graph. 2011. Vol. 30. No. 6. P. 137:1–137:10.
24. *Li Y., Barbič J.* Multi-Resolution Modeling of Shapes in Contact // Symposium on Computer Animation (SCA). 2019.

25. Wang W. A Collision Deformer for Autodesk Maya / Master's thesis // Texas A & M University. 2015. 54 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/147244178.pdf> (дата обращения 14.07.2022).

26. Brunel C., Bénard P., Guennebaud G. A time-independent deformer for elastic contacts // ACM Transactions on Graphics. 2021. Vol. 40. No. 4. Art. 3459879.

27. Wang Y., Jacobson A., Barbič J., Kavan L. Linear Subspace Design for Real-time Shape Deformation // ACM Trans. Graph. 2015. Vol. 34. No. 4. P. 57:1–57:11.

28. Aburumman N., Fratarcangeli M. State of the Art in Skinning Techniques for Articulated Deformable Characters // International Conference on Computer Graphics Theory and Applications. Rome. 2016. Vol. 1. P. 198–210. <https://doi.org/10.5220/0005720101980210>.

29. Dionne O., De Lasa M. Geodesic voxel binding for production character meshes // In Proceedings SCA 2013: 12th ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, 2013. P. 173.

30. Rotenberg S. Skin / Chapter in course CSE169 // Computer Science & Engineering. 2016. URL: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp16/cse169-a/readings/3-Skin.html> (дата обращения 14.07.2022).

31. Ju T., Zhou Q., V.D. Panne M., Cohen-Or D., Neumann U. Reusable Skinning Templates Using Cage-based Deformations // ACM Trans. Graph. 2008. Vol. 27. No. 5. Art. 122. 10 p. URL: https://www.cse.wustl.edu/~taoju/research/skinning_final2.pdf (дата обращения 14.07.2022).

32. Rohmer D., Tarini M., Kalyanasundaram N., Moshfeghifar F., Cani M., Zordan V. Velocity Skinning for Real-time Stylized Skeletal Animation // Computer Graphics Forum. 2021. Vol. 40. No. 2. P. 549–561. <https://doi.org/10.1111/cgf.142654>.

33. Zhan X., Yang Z., Evangelos K., Chris L., Karan S. RigNet: Neural Rigging for Articulated Characters // ACM Trans. Graph. 2020. Vol. 39. No. 4. P. 1–14.

34. Liu L., Zheng Y., Tang D., Yuan Y., Fan C., Zhou K. NeuroSkinning: Automatic Skin Binding for Production Characters with Deep Graph Networks // ACM Trans. Graph. 2019. Vol. 38. No. 4. P. 1–12.

35. Sahibgareeva G., Kugurakova V. Branched Structure Component for a Video Game Scenario Prototype Generator // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3066. P. 101–111.

36. Sahibgareeva G., Bedrin O., Kugurakova V. Visualization Component for the Scenario Prototype Generator as a Video Game Development Tool // CEUR. Proceedings of the 22nd Conference on Scientific Services & Internet (SSI-2020). 2020. Vol. 2784. P. 267-282.

PROCEDURAL METHODS FOR SKINNING HUMANOID CHARACTERS

R. R. Gazizov¹ [0000-0002-8349-264X], A. V. Shubin² [0000-0002-6203-3268]

^{1,2} Institute of Information Technologies and Intelligent Systems, Kazan (Volga Region) Federal University, ul. Kremlyovskaya, 35, Kazan, 420008

¹gazizov782@gmail.com, ²shubin.aleksey.kpfu@gmail.com

Abstract

The procedure for setting vertex weights is a very time consuming and difficult task for any 3D model artist. Therefore, the use of procedural methods to facilitate this procedure is very important.

This article analyzes various skinning techniques and identifies their advantages and disadvantages. The most frequent variants of skinning defects that arise when using standard approaches are described. The analysis of tools for skinning in the Maya 3D modeling environment has been carried out. Methods for solving some of the existing problems are proposed, but do not imply a procedural solution. Also, on the basis of neural networks, an idea of their own solution was proposed as an additional tool for the Maya program. This tool will overcome most of the disadvantages of other methods and speed up the skinning process of the model.

Keywords: 3D modeling, vertexes, rigging, neural networks.

REFERENCES

1. Create an automatic character rig for a mesh // Autodesk Maya. Support and learning. 2020. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/>

caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/Maya-CharacterAnimation/files/GUID-6CAEA6C2-D4F9-422D-8E0F-522171B47C35-htm.html.

2. Nealen A., Müller M., Keiser R., Boxerman E., Carlson M. Physically Based Deformable Models in Computer Graphics // Computer Graphics Forum. 2006. Vol. 25. No. 4. P. 809–836.

3. Lasseeter J. Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation // SIGGRAPH Comput. Graph. 1987. Vol. 21. No. 4. P. 35–44.

4. Gao M., Mitchell N., Sifakis E. Steklov–Poincaré Skinning // In Proceedings of the ACM SIG-GRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA'14). Eurographics Association. 2014. P. 139–148.

5. McAdams A., Zhu Y., Selle A., Empey M., Tamstorf R., Teran J., Sifakis E. Efficient Elasticity for Character Skinning with Contact and Collisions // ACM Trans. Graph. 2011. Vol. 30. No. 4. P. 37:1–37:12.

6. Smith B., Goes F.D., Kim T. Stable Neo-Hookean Flesh Simulation // ACM Trans. Graph. 2018. Vol. 37. No. 2. P. 12:1–12:15.

7. Teng Y., Otaduy M.A., Kim T. Simulating Articulated Subspace Self-contact // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 4. P. 106:1–106:9.

8. Bender J., Müller M., Macklin M. Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics // In EG 2015-Tutorials. 2015. 32 p. URL: <https://diglib.eg.org/handle/10.2312/egt.20151045.t3> (дата обращения 14.07.2022).

9. Bouaziz S., Martin S., Liu T., Kavan L., Pauly M. Projective Dynamics: Fusing Constraint Projections for Fast Simulation // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 4. P. 154:1–154:11.

10. Rumman N.A., Fratarcangeli M. Position-Based Skinning for Soft Articulated Characters // Computer Graphics Forum. 2015. Vol. 34. No. 6. P. 240–250.

11. Deul C., Bender J. Physically-Based Character Skinning // In Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPhys). Eurographics Association. 2013. 11 p. URL: <http://diglib.eg.org/handle/10.2312/PE.vriphys.vriphys13.025-034>.

12. Komaritzan M., Botsch M. Projective Skinning // Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 12:1–12:19.

13. Nieto J.R., Susín A. Cage based deformations: a survey // In Deformation models. Springer. 2013. P. 75–99.

14. Sederberg T.W., Parry S.R. Free-form Deformation of Solid Geometric Models // SIGGRAPH Comput. Graph. 1986. Vol. 20. No. 4. P. 151–160.

15. Lewis J.P., Cordner M., Fong N. Pose Space Deformation: A Unified Approach to Shape Interpolation and Skeleton-driven Deformation // In Proceedings of SIGGRAPH '00. ACM. 2000. P. 165–172.

16. Kavan L., Sorkine O. Elasticity-inspired Deformers for Character Articulation // ACM Trans. Graph. 2012. Vol. 31. No. 6. P. 196:1–196:8.

17. Rohmer D., Hahmann S., Cani M.P. Exact Volume Preserving Skinning with Shape Control // In Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '09). ACM, 2009. P. 83–92.

18. Funck W.V., Theisel H., Seidel H. Volume-preserving Mesh Skinning // Vision, Modelling, and Visualization 2008. Proceedings. 2008. P. 409–414.

19. Angelidis A., Singh K. Kinodynamic Skinning Using Volume-preserving Deformations // In Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '07). Eurographics Association, 2007. P. 129–140.

20. Vaillant R., Barthe L., Guennebaud G., Cani M.P., Rohmer D., Wyvill B., Gourmel O., Paulin M. Implicit Skinning: Real-time Skin Deformation with Contact Modeling // ACM Trans. Graph. 2013. Vol. 32, No. 4. P. 125:1–125:12.

21. Vaillant R., Guennebaud G., Barthe L., Wyvill B., Cani M.P. Robust Iso-surface Tracking for Interactive Character Skinning // ACM Trans. Graph. 2014. Vol. 33. No. 6. P. 189:1–189:11.

22. Aldrich G., Pinskiy D., Hamann B. Walt Disney Anim. Studios. Collision-Driven Volumetric Deformation on the GPU // In Eurographics (Short Papers). 2011. P. 9–12.

23. Harmon D., Panozzo D., Sorkine O., Zorin D. Interference-aware Geometric Modeling // ACM Trans. Graph. 2011. Vol. 30. No. 6. P. 137:1–137:10.

24. Li Y., Barbič J. Multi-Resolution Modeling of Shapes in Contact // Symposium on Computer Animation (SCA). 2019.

25. Wang W. A Collision Deformer for Autodesk Maya / Master's thesis // Texas A & M University. 2015. 54 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/147244178.pdf>.

26. Brunel C., Bénard P., Guennebaud G. A time-independent deformer for elastic contacts // ACM Transactions on Graphics. 2021. Vol. 40. No. 4. Art. 3459879.

27. Wang Y., Jacobson A., Barbič J., Kavan L. Linear Subspace Design for Real-time Shape Deformation // ACM Trans. Graph. 2015. Vol. 34. No. 4. P. 57:1–57:11.

28. Aburumman N., Fratarcangeli M. State of the Art in Skinning Techniques for Articulated Deformable Characters // International Conference on Computer Graphics Theory and Applications. Rome. 2016. Vol. 1. P. 198–210.

<https://doi.org/10.5220/0005720101980210>.

29. Dionne O., De Lasa M. Geodesic voxel binding for production character meshes // In Proceedings SCA 2013: 12th ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, 2013. P. 173.

30. Rotenberg S. Skin / Chapter in course CSE169 // Computer Science & Engineering. 2016.

URL: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp16/cse169-a/readings/3-Skin.html>.

31. Ju T., Zhou Q., V.D. Panne M., Cohen-Or D., Neumann U. Reusable Skinning Templates Using Cage-based Deformations // ACM Trans. Graph. 2008. Vol. 27. No. 5. Art. 122. 10 p. URL: https://www.cse.wustl.edu/~taoju/research/skinning_final2.pdf.

32. Rohmer D., Tarini M., Kalyanasundaram N., Moshfeghifar F., Cani M., Zordan V. Velocity Skinning for Real-time Stylized Skeletal Animation // Computer Graphics Forum. 2021. Vol. 40. No. 2. P. 549–561. <https://doi.org/10.1111/cgf.142654>.

33. Zhan X., Yang Z., Evangelos K., Chris L., Karan S. RigNet: Neural Rigging for Articulated Characters // ACM Trans. Graph. 2020. Vol. 39. No. 4. P. 1–14.

34. Liu L., Zheng Y., Tang D., Yuan Y., Fan C., Zhou K. NeuroSkinning: Automatic Skin Binding for Production Characters with Deep Graph Networks // ACM Trans. Graph. 2019. Vol. 38. No. 4. P. 1–12.

35. Sahibgareeva G., Kugurakova V. Branched Structure Component for a Video Game Scenario Prototype Generator // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3066. P. 101–111.

36. Sahibgareeva G., Bedrin O., Kugurakova V. Visualization Component for the Scenario Prototype Generator as a Video Game Development Tool // CEUR. Proceedings of the 22nd Conference on Scientific Services & Internet (SSI-2020). 2020. Vol. 2784. P. 267-282.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ГАЗИЗОВ Рим Радикович – старший преподаватель Института информационных технологий и интеллектуальных систем (ИТИС) Казанского федерального университета (КФУ). Область научных интересов: компьютерная графика, 3D-моделирование, анимации, виртуальная реальность.

Rim Radikovich GAZIZOV – senior lecturer, assistant of the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems, Kazan Federal University. Research interests: computer graphics, 3D modeling, 3D animation, VR.

e-mail: gazizov782@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8349-264X



ШУБИН Алексей Витальевич – лаборант кафедры программной инженерии Института ИТИС КФУ. Сфера научных интересов – разработка видеоигр, игровой дизайн.

Aleksey Vitalevich SHUBIN – lab assistant at the Department of Software Engineering of the Institute of ITIS KFU. Research interest – videogame development, game design.

e-mail: shubin.aleksey.kpfu@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6203-3268

Материал поступил в редакцию 15 сентября 2022 года