

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

УДК 004.932

ISSN 1995-5499

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2020.1/2598>

Поступила в редакцию 02.12.2019

Подписана в печать 15.03.2020

## ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ НЕРИГИДНОЙ РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТА ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

© 2020 К. В. Климов 

*Воронежский государственный университет  
Университетская пл., 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация*

**Аннотация.** Одной из задач в области компьютерной графики является задача поиска соответствий между трехмерными моделями (задача неригидной регистрации). Особый интерес представляет регистрация результатов трехмерного сканирования человеческого лица, с последующим использованием результатов регистрации для создания анимации. Существует множество алгоритмов регистрации, однако, большинство из них плохо работает в случаях, когда входные модели сильно отличаются друг от друга. В частности, при регистрации трехмерных моделей нейтрального и кричащего лица. В данной работе предлагается модификация итеративного алгоритма ближайших точек, приспособленная для высокоточной регистрации сильно отличающихся трехмерных моделей. Ключевыми компонентами алгоритма являются: гибридная модель деформации, основанная на графе деформации, для захвата мелких деталей и модель деформации на основе специальным образом подготовленных моделей, которые грубо задают возможные деформации целевой модели.


**Ключевые слова:** трехмерное сканирование, неригидная регистрация, итеративный алгоритм ближайших точек, численные оптимизации.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых динамично развивающихся областей человеческой деятельности, за последние десятилетия стала индустрия компьютерной графики (computer-generated imagery — CGI). Сейчас уже невозможно представить себе фильм без использования компьютерных спецэффектов, и со временем они становятся все более и более достоверными. Зачастую, целые сцены воссоздаются без использования реальных объектов, и сейчас, в большинстве случаев, они неотличимы от реальности. Одной из самых важных задач в компьютерной графике является достоверное

изображение человеческого лица, и человеческой мимики. Например, в сценах, когда актера заменяет каскадер, компьютерная графика позволяет заместить лицо каскадера лицом актера. Графика позволяет частично заменить физический грим, и таким образом сэкономить время и дать актеру большую свободу движений. Компьютерная графика позволяет состарить или омолодить актера, а в некоторых случаях, вставить в сцену актера, которого уже нет в живых. К сожалению, достоверно смоделировать человеческое лицо вручную очень сложно даже в статичном выражении, не говоря уже об анимации.

Самым популярным способом решить данную задачу является использование так называемого трехмерного сканирования. Трехмерным сканированием называют процесс

 Климов Кирилл В.  
e-mail: ra22341@ya.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

получения информации о форме и облике реального сканируемого объекта. Результат трехмерного сканирования часто называют *сканом*.

Сканирующие установки могут выдавать результат в разных форматах, например в виде облака точек, воксельных таблиц, и т. д. Но самым распространенным форматом для хранения и обработки трехмерных сканов и моделей является полигональная модель (*polygonal mesh*). Полигональная трехмерная модель состоит из вершин в трехмерном пространстве, и многоугольников (полигонов) построенных на этих вершинах. Многоугольники, имеющие общие вершины, аппроксимируют поверхность моделируемого объекта. Информация о связности вершин между собой называется топологией. Как правило, большинство сканирующих систем ничего не знают о том, какой именно объект они сканируют, поэтому, они создают нерегулярную топологию, обычно состоящую из треугольников. Так же, сканы, зачастую, имеют очень большой размер — порядка миллионов полигонов, т. к. требуется захватывать как можно больше информации об объекте. Кроме этого, получаемые модели содержат много шумов, из-за недостатков сенсоров, или сканирующих алгоритмов.

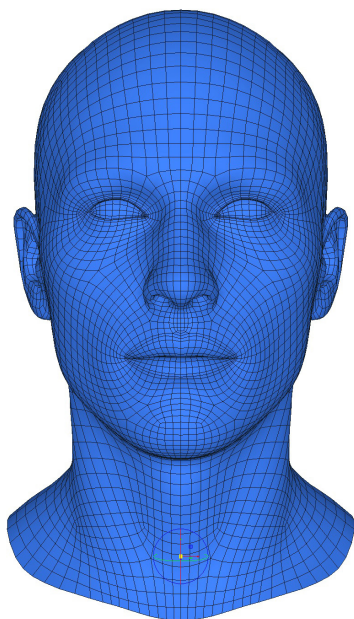


Рис. 1. Базовая модель с топологией созданной вручную  
[Fig. 1. Base model which was created manually]

На практике, такие модели практически невозможно использовать для задач компьютерной графики. Большой размер модели требует много ресурсов для процесса рендеринга, а шумы снижают качество получаемой картинки. Но самой главной проблемой является топология. На практике, требуется топология, отвечающая следующим требованиям. Во-первых, топология должна иметь регулярную структуру, при этом отражающую потенциальные деформации объекта. Например, затылочная область способна деформироваться только в очень ограниченном диапазоне, поэтому на эту часть следует выделять небольшое число полигонов. С другой стороны, деформации губ могут быть очень разнообразны, поэтому в области губ плотность полигонов должна быть велика. На рис. 1 можно увидеть пример требуемой топологии. Во-вторых, для задач анимации, все модели должны иметь одинаковую топологию. Более того, топология должна быть консистентной между разными выражениями лица. К примеру, если вершина номер 20 находится на кончике носа в нейтральном выражении, то на выражении с улыбкой, вершина номер 20 должна оставаться на кончике носа. Поэтому, сырые сканы переводят в одну топологию с сохранением семантики вершин. Этот процесс называют ретопологией. Ретопологию можно делать вручную, однако такой процесс занимает несколько часов работы высокооплачиваемого специалиста. К тому же, в задаче реконструкции мимики человек не способен достичь требуемой точности. Поэтому, для ретопологии сканов все чаще прибегают к алгоритмам неригидной регистрации трехмерных полигональных моделей. Регистрация подразумевает поиск соответствий между вершинами исходной модели (базовой модели) и вершинами целевой модели (как правило, результата трехмерного сканирования).

Существует множество способов выполнить регистрацию, однако, большинство из них плохо подходит для регистрации моделей, которые сильно отличаются друг от друга, например модели нейтрального человеческого лица, и скана лица с сильно открытым ртом. На рис. 2 можно увидеть пример такого скана.

Таким образом, проблема точной регистрации мимики человеческого лица является одной из самых актуальных проблем в области компьютерной графики.



Рис. 2. Целевой скан человеческого лица в экстремальном выражении  
[Fig. 2. Target scan of extreme face expression]

Целью данной работы является разработка нового алгоритма неригидной регистрации, который позволял бы проводить высокоточную регистрацию объектов способных сильно деформироваться, в первую очередь лиц.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 1.1. Анализ предыдущих работ

В общем случае, задача регистрации трехмерных полигональных моделей является некорректно поставленной, т. к. существует множество различных способов задать соответствия между моделями. Более того, форма одного и того же объекта может быть аппроксимирована различными наборами точек с разной топологией. Это делает бессмысленным поиск соответствий между точками моделей. На практике, соответствия устанавливаются между точками одной модели (исходная модель), и поверхностью другой модели (целевая модель).

подавляющее большинство современных алгоритмов регистрации трехмерных моде-

лей основаны на так называемом итеративном алгоритме ближайших точек — Iterative Closest Point — ICP [1]. На вход алгоритму подается две модели — исходная и целевая. Ключевая идея ICP заключается в разбиении процесса регистрации на два шага. На первом шаге, для каждой точки исходной модели производится поиск ближайшей точки целевой модели. На втором шаге, исходная модель деформируется таким образом, чтобы ее точки переместились как можно ближе к найденным точкам на целевой модели. Затем повторяется первый шаг, но уже с учетом нового положения вершин. Процесс повторяется до сходимости, или до достижения максимального числа шагов. Результатом работы итеративного алгоритма ближайших точек является деформированная исходная модель.

То, как может деформироваться исходная модель, определяет качество и устойчивость регистрации. Алгоритм деформации в данной работе будем называть моделью деформации. В самом простом варианте, могут использоваться ригидные трансформации, т.е. только поворот и перенос исходной полигональной модели [1]. Такую регистрацию называют ригидной. Ригидная регистрация, как правило, очень устойчива к шуму, однако она требует, чтобы исходная и целевая модели имели практически идентичную форму, и поэтому не подходит для регистрации объектов, чья форма может сильно изменяться, к примеру, для регистрации человеческих лиц.

За последние годы было разработано множество различных моделей деформации [2–4], пригодных для неригидной регистрации. Под неригидной регистрацией будем понимать такой алгоритм регистрации, который допускает деформации, которые нельзя описать глобальным поворотом и переносом исходной модели. Большинство из таких моделей оперирует положением вершин исходной полигональной модели, что потенциально позволяет захватывать настолько много деталей, насколько это позволяет разрешение исходной полигональной модели.

Самым популярным примером модели деформации оперирующей положением вершин является так называемая модель As-



Rigid-As-Possible (ARAP) деформации [3]. Для того чтобы сделать процесс регистрации устойчивым, в данной модели вводится специальная регуляризация (гладкость модели). Идея регуляризации заключается в том, что окрестности вершин исходной модели должны быть похожи по форме на свои изначальные верши. As-Rigid-As-Possible алгоритмы достаточно просты в использовании, и позволяют производить качественную регистрацию в тех случаях, когда исходная модель находится достаточно близко к целевой. К сожалению, данный подход плохо работает в тех случаях, когда изначальная модель находится далеко от целевой. Так же, она плохо работает с моделями высокого разрешения, т. к. в этом случае, ARAP модель плохо контролирует глобальную форму полигональной модели.

Последняя проблема может быть решена с использованием модели деформации на основе графа деформации (Embedded deformation graph) [4]. Данный алгоритм строит на основе топологии исходной модели ее упрощенную версию (собственно сам граф деформации), которая определяет то, как будет деформироваться исходная модель. С каждой вершиной графа ассоциируется ригидная трансформация. Финальное положение исходной вершины определяется как взвешенное среднее трансформаций всех вершин графа, которые на нее влияют. В отличие от ARAP граф деформации позволяет работать с полигональными моделями любого разрешения. Для сохранения гладкости деформированной модели, граф деформации требует, чтобы его соседние вершины имели похожие трансформации. К сожалению, граф деформации рассчитан на случаи, когда гладкость модели, в процессе регистрации, нарушается равномерно. Однако, при регистрации человеческого лица с широко открытым ртом, требуется, чтобы уголок рта деформировался сильно, а остальная часть модели слабо.

Для случаев, когда требуется регистрация однообразных объектов с неравномерными деформациями, можно использовать информацию об уже зарегистрированных (вручную) объектах для того, чтобы сообщить алгоритму регистрации о возможных дефор-

мациях. Например, это может быть сделано с использованием метода главных компонент (PCA) [5]. Идея заключается в том, чтобы деформировать исходную модель путем линейного смешивания исходных компонент. В случае, когда нет возможности собрать статистику, вместо PCA можно использовать так называемые блендшейпы (blendshapes) [6]. Блендшейпы представляют собой варианты исходной модели в экстремальной форме. Например, для нейтрального лица в качестве блендшейпов могут выступать лицо с улыбкой, лицо с закрытыми глазами и т. д. Как правило, блендшейпы создаются вручную. Такая модель деформации хорошо подходит для регистрации моделей непохожих друг на друга но, к сожалению, она не подходит для захвата мелких деталей.

Очевидной идеей является использование сразу двух моделей деформации. Например, в [7] сначала используется модель на основе блендшейпов, для получения хорошей инициализации, а затем, результат регистрации используется в качестве входа алгоритма регистрации с использованием ARAP. К сожалению, такой подход не позволяет исправить ошибки регистрации, допущенные на первом шаге, а так же, обладает всеми проблемами присущими алгоритмам на основе ARAP.

В данной работе предлагается подход, развивающий идеи [7] с применением идей из [4].

## 1.2. Описание базового алгоритма

Перед тем, как перейти к описанию предложенного алгоритма, следует описать алгоритм ICP более подробно. В общем случае, шаг алгоритма ICP требует поиска минимума следующей функции:

$$E(p) = E_{data}(p) + \lambda_{smooth} E_{smooth}(p), \quad (1)$$

где  $E_{data}(p)$  — слагаемое, отвечающее за то, насколько деформированная модель похожа на целевой скан,  $E_{smooth}(p)$  — слагаемое, отвечающее за то, насколько текущая деформация исходной модели нарушает гладкость,  $\lambda_{smooth}$  — вес гладкости,  $p$  — параметры деформации. В общем случае,  $E_{smooth}(p)$ ,  $p$  задаются моделью деформации,  $\lambda_{smooth}$  подбирается экспе-

риментально, или на основе метрики, если она доступна.

Конкретный вид  $E_{data}(p)$  может отличаться, в зависимости от конкретной модификации алгоритма ICP. В самом простом случае это может быть расстояние от точек исходной модели, до точек скана:

$$E_{data}^{point}(p) = \sum_i \|v_i(p) - v'_i\|, \quad (2)$$

где  $v_i(p)$  — текущее положение деформированной вершины исходной модели, конкретный вид данной функции зависит от модели деформации,  $v'_i$  — положение вершины целевой модели,  $\|x\|$  — некоторая норма. В большинстве случаев, используется квадрат евклидова расстояния —  $\|x\| = \sum_i x_i^2$ , но в некоторых работах используют робастные нормы [8], [9].

Расстояние от точки к точке не всегда является оптимальным выбором, алгоритм ICP может вести себя нестабильно в случае, когда на целевом скане мало вершин, поэтому, вместо формулы (2) часто используют расстояние от точки до плоскости [10]:

$$E_{data}^{plane}(p) = \sum_i (v_i(p) - v'_i)^T n'_i, \quad (3)$$

где  $n'_i$  — нормаль вершины целевого скана.

Не смотря на то, что выбор функции оценки схожести исходной модели на скан  $E_{data}(p)$  важен, зачастую именно выбор модели деформации, определяющей  $p$ ,  $E_{smooth}(p)$ ,  $v(p)_i$  оказывает ключевое влияние на качество регистрации.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Алгоритм неригидной регистрации на основе гибридной модели деформации

Алгоритм, предложенный в данной работе, опирается на элементы моделей деформации из [4] и [5].

Первая часть предложенного алгоритма опирается на так называемые блендшейпы. Блендшейпами, в компьютерной графике называют трехмерные модели конкретного объекта, в некоторых, конечных положениях. Например, для лица, это могут быть модели в разных выражениях: закрытые глаза, открытый рот, и т. д. На рис. 3. Можно увидеть примеры таких блендшейпов. Все блендшейпы должны быть в одной топологии. Благодаря этому, можно линейно смешивать их друг с другом, получая новые выражения. Например, имея блендшейп с закрытыми глазами и блендшейп с открытым ртом, можно получить новое выражение — открытый рот с закрытыми глазами.

Фактически, используя блендшейпы можно задать возможные деформации регистрируемой модели.

В качестве параметров, в модели деформации на основе блендшейпов выступают веса, с которыми они смешиваются. Вершины деформированной модели получают с использованием следующей формулы:



Рис. 3. Примеры блендшейпов  
[Fig. 3. Examples of blendshape models]

$$v(w)_i^{blend} = v_i^n + \sum_k w_k (v_i^k - v_i^n), \quad (4)$$

где  $v_i^n$  — вершина нейтральной модели,  $v_i^k$  — вершина блендшейпа с индексом  $k$ ,  $w_k$  — вес соответствующего блендшейпа.

Очевидно, что не все возможные веса блендшейпов будут давать правдоподобную деформированную модель. Например, блендшейп с улыбкой примененный с весом 2, скорее всего, даст модель не похожую на лицо совсем. Поэтому есть смысл регуляризовать значение веса. В целях упрощения задачи оптимизации, в данной работе к весам применялась регуляризация Тихонова.

$$E_{smooth}^{blend}(w) = \sum_k w_k^2. \quad (5)$$

К сожалению, модель деформации на основе блендшейпов хорошо захватывает крупные деформации (например, открытие рта), но плохо справляется с захватом мелких деталей, например, морщин. Для решения этой проблемы в данной работе, модель на основе блендшейпов усиливается моделью на основе графа деформации.

Идея графа деформации [4] является логичным развитием идей As-Rigid-As-Possible (ARAP) моделей [3]. ARAP модели разрешают перемещать каждую вершину исходной модели независимо, но при этом требуют, чтобы взаимное положение каждой вершины деформированной модели образовывало фигуру, похожую на ту, которая была образована изначальными положениями вершин. Такая модель позволяет захватывать мелкие детали, но, к сожалению, она плохо работает на моделях с большим числом вершин, т.к. она плохо сохраняет глобальную форму исходной модели. Граф деформации позволяет обойти данную проблему, путем формирования специальной структуры, управляющей деформацией исходной модели.

Из вершин исходной модели специальным образом выбирается подмножество вершин, равномерно распределенных по поверхности исходной модели. В данной работе, будем называть выбранные вершины *нодами*, для того, чтобы избежать путаницы. Между нодами, некоторым образом строятся ребра, как правило, ребрами соединяются близкие к

друг другу ноды. Для каждой исходной вершины выбираются ближайшие ноды и вес, с которым они влияют на исходную вершину. Алгоритм выбора нод, задания связей между ними и поиск нод влияющих на вершины подробно описан в [4].

С каждой нодой графа деформации ассоциируется ригидная деформация, финальное положение вершин деформированной исходной модели определяется как взвешенное средние деформаций всех нод влияющих на данную вершину. В качестве параметров модели деформации  $p$  выступают значения поворота и переноса каждой ноды  $r = \{r_i\}, t = \{t_i\}$ . В данной работе, поворот параметризовался ортонормальной матрицей, однако можно использовать любую другую параметризацию, включая кватернионы [11].

В зависимости от того, насколько детальная деформация требуется, можно выбирать разное количество управляющих нод — малое для грубых деформаций, и большое для мелких.

Положение деформированной вершины можно рассчитать следующим образом:

$$v(r, t, v_i)_i^{graph} = \sum_{j \in G(i)} w_{i,j}^{graph} (R(r_j)(v_i - x_j) + x_j + t_j), \quad (6)$$

где  $v_i$  — исходное положение вершины,  $G(i)$  — множество индексов нод влияющих на вершину  $i$ ,  $w_{i,j}^{graph}$ , вес, с которым нода  $j$  влияет на вершину  $i$ ,  $x_j$  — исходное положение ноды  $j$ ,  $R(r_j)$  функция вычисляющая матрицу поворота, из параметризации  $r_j$ . Значения  $r, t$  являются оптимизируемыми переменными.

Для обеспечения гладкости деформации требуется, чтобы соседние ноды обладали похожими деформациями. Это достигается путем использования следующего слагаемого в функции ошибки:

$$E_{smooth}^{graph}(r, t) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} R(r_i)(x_j - x_i) + x_i + t_i - x_j - t_j, \quad (7)$$

где  $N(i)$  — множество нод, инцидентных с нодой  $i$ .

Граф деформации позволяет гибко захватывать мелкие и крупные детали регистрируемой модели, однако, он не способен захва-



тывать неравномерные деформации, которые могут возникать, например, при регистрации скана лица с закрытым глазом (т. к. закрытие глаза нейтральной модели вызовут сильное нарушение гладкости). Эту проблему можно обойти, соединив граф деформации с блендшейпами — блендшейпы позволят определить возможные деформации с неравномерным нарушением гладкости, а граф позволит захватить мелкие детали.

Таким образом, финальная функция вычисляющая положение вершины будет выглядеть следующим образом:

$$v(w, r, t)_i^{hybrid} = v\left(r, t, v(w)_i^{blend}\right)_i^{graph}, \quad (8)$$

где  $r$ ,  $t$ ,  $w$  — оптимизируемые параметры.

В качестве слагаемого отвечающего за гладкость, можно использовать просто сумму функций (7) и (5)

$$E_{smooth}^{hybrid}(w, r, t) = E_{smooth}^{blend}(w) + E_{smooth}^{graph}(r, t). \quad (9)$$

Для поиска минимума функции (1) с учетом предложенных (8) и (9) в данной работе, как и во многих других работах, посвященных задаче неригидной регистрации [9], [12] используется алгоритм Гаусса — Ньютона [13]. Для работы в случаях, когда используются робастные нормы, можно использовать модификацию метода Гаусса — Ньютона с использованием техники *iteratively reweighted least squares* (IRLS) [14]. Используемый метод оптимизации требует взятия производной функции ошибки, и функции невязок в произвольных точках. Для того чтобы избежать ошибок, связанных с взятием производной аналитически, в данной работе применялись алгоритмы автоматического дифференцирования [15].

## 2.2. Вычислительный эксперимент

К сожалению, в общем случае, задача регистрации трехмерных полигональных моделей является некорректно поставленной. Из-за этого, задача объективной численной оценки качества работы алгоритма становится очень нетривиальной. Для задачи регистрации человеческих тел существует база данных FAUST [16], в которой есть плотные

соответствия между различными телами, и которая может быть в теории использована для тестирования алгоритмов регистрации. К сожалению, для применения предложенного алгоритма к задаче регистрации человеческих тел, требуется его модификация, в частности моделирование движение конечностей, наподобие того, как это сделано в алгоритме SCAPE [17]. Такая модификация выходит за рамки данного исследования.

Тем не менее, все еще существуют метрики, позволяющие частично оценить свойства предложенного алгоритма. В первую очередь это время работы алгоритма на одном скане. Наиболее интересным параметром предложенного алгоритма является число блендшейпов, т. к. с одной стороны оно напрямую влияет на качество работы алгоритма, с другой стороны, большое число блендшейпов сильно снижает скорость работы алгоритма, т. к. растет число операций требуемых для расчета невязок и производных, и растет число переменных. Так же, важно понимать, что создание блендшейпов требует работы профессионального специалиста по трехмерному моделированию.

На рис. 4 можно увидеть, как меняется время работы алгоритма от числа блендшейпов. Важно отметить, что в случае, когда среди блендшейпов нет модели похожей на целевой скан, сходимость и качество алгоритма может сильно пострадать. Поэтому, для вычислительного эксперимента, вместо того, чтобы использовать блендшейпы в сыром виде, были использованы компоненты PCA (*principal component analysis*) с наибольшими значениями дисперсии. Таким образом, качество регистрации и скорость сходимости будет меньше зависеть от конкретного целевого скана. Тест проводился на CPU Intel i7-8700K с использованием многопоточности. Исходная топология содержит приблизительно 5000 вершин.

Из данного вычислительного эксперимента, можно сделать вывод, что скорость работы полученного метода практически линейно зависит от числа используемых блендшейпов. Соответственно для случаев, когда время работы критично, есть смысл использовать

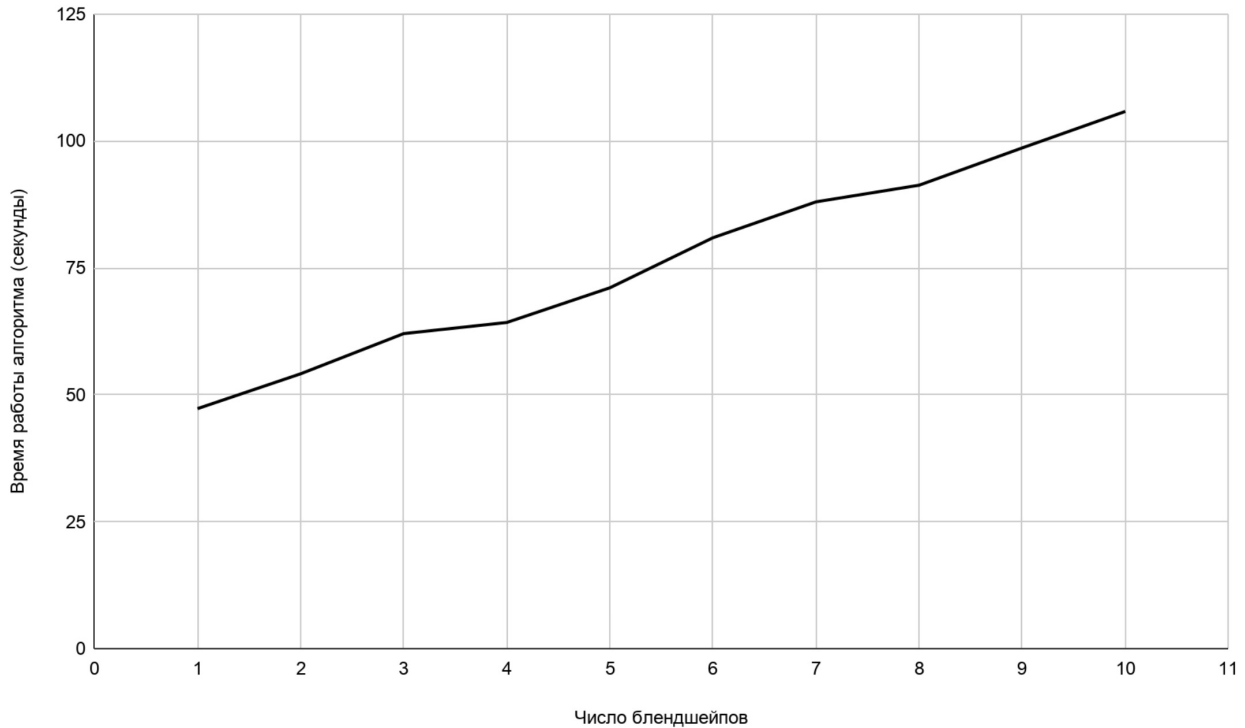


Рис. 4. Среднее время работы предложенного алгоритма, в зависимости от числа блендшейпов  
[Fig. 4. Dependence of the running time of the algorithm on the number of blendshapes]

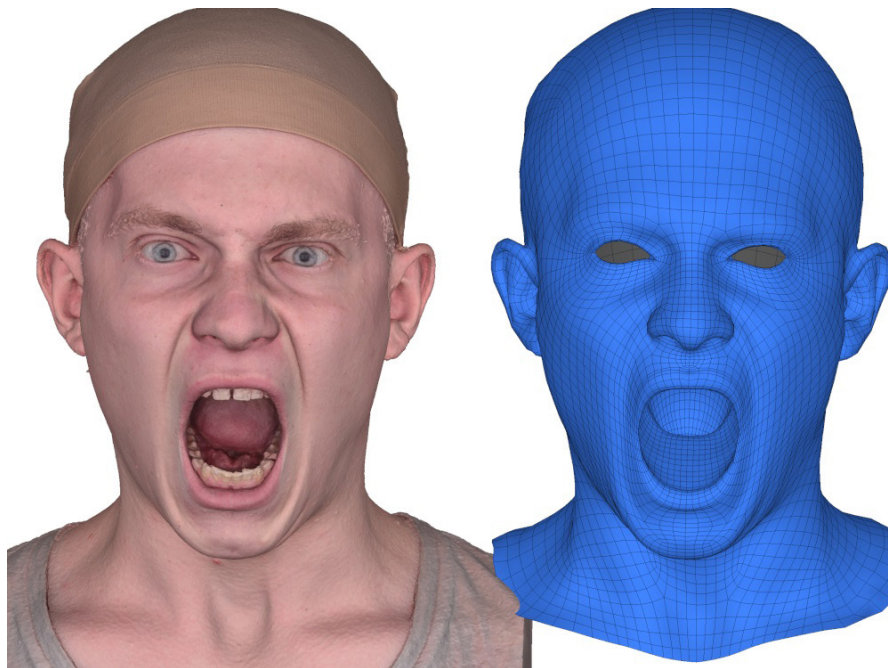


Рис. 5. Результат работы предложенного алгоритма  
[Fig. 5. Output of proposed algorithm on extreme expression]

как можно меньше блендшейпов. Следует отметить, что на практике, конкретное время выполнения алгоритма может отличаться, в зависимости от используемой топологии и реализации алгоритма. Однако зависимость времени работы от числа используемых блендшейпов будет сохраняться.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен новый алгоритм неригидной регистрации, на основе гибридной модели деформации. На рис. 5 можно увидеть результат работы предложенного алгоритма на примере неригидной реги-



страции человеческого лица в экстремальной эмоции. В качестве исходной модели использовалась модель, изображенная на рис. 1. Полученные результаты могут быть использованы для создания высококачественной лицевой анимации для видеоигр и кино.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rusinkiewicz, S.* Efficient Variants of the ICP Algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // 3D Digital Imaging and Modeling — Stanford University, 2001 — P. 145–150. DOI: 10.1109/IM.2001.924423
2. *Botsch, M.* On Linear Variational Surface Deformation Methods / M. Botsch, O. Sorkine // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2008. — V. 14. — P. 213–230. DOI: 10.1109/TVCG.2007.1054
3. *Sorkine, O.* As-rigid-as-possible surface modeling / O. Sorkine, M. Alexa // SGP '07 Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing. — 2007. — P. 109–116. DOI: 10.1145/1281991.1282006
4. *Sumner, R.* Embedded Deformation for Shape Manipulation / R. Sumner, J. Schmid, M. Pauly // ACM SIGGRAPH. — 2007 — № 80. DOI: 10.1145/1275808.1276478
5. *Blanz, V.* A morphable model for the synthesis of 3D faces / V. Blanz, T. Vetter // SIGGRAPH 1999. — P. 187–194. DOI: 10.1145/311535.311556
6. *Cao, C.* Stabilized real-time face tracking via a learned dynamic rigidity prior / C. Cao [et al] // SIGGRAPH Asia 2018. V 37. DOI: 10.1145/3272127.3275093
7. *Bhat, K.* High Fidelity Facial Animation Capture and Retargeting With Contours / K. Bhat [et al] // Eurographics Symposium on Computer Animation. — 2013. — P. 7–14. DOI: 10.1145/2485895.2485915
8. *Bouaziz, S.* Sparse iterative closest point / S. Bouaziz [et al] // Eurographics 2013. P. 113–123. DOI: 10.1111/cgf.12178
9. *Bouaziz, S.* Modern techniques and applications for real-time non-rigid registration / S. Bouaziz [et al] // SIGGRAPH ASIA 2016. DOI: 10.1145/2988458.2988490
10. *Low, K.* Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration. — Режим доступа: [https://www.comp.nus.edu.sg/~lowkl/publications/lowk\\_point-to-plane\\_icp\\_techrep.pdf](https://www.comp.nus.edu.sg/~lowkl/publications/lowk_point-to-plane_icp_techrep.pdf) (Дата обращения: 02.05.2019).
11. *Horn, B.* Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions / B. Horn // Journal of the Optical Society of America A. — 1987. — V 4(4). — P. 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629
12. *Fyffe, G.* Multiview stereo on consistent face topology / G. Fyffe [et al] // Computer Graphics Forum. — 2017. — P. 16–45. DOI: 10.1111/cgf.13127
13. *Nocedal J.* Numerical Optimizations / J. Nocedal, S. Wright. — Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, 2006. — 683 с.
14. *Verboon, P.* Major optimization with iteratively reweighted least squares: A general approach to optimize a class of resistant loss functions.
15. *Neidinger, R.* Introduction to Automatic Differentiation and MATLAB Object-Oriented Programming. — Режим доступа: <http://www.neidinger.net/SIAMRev74362.pdf> (Дата обращения: 17.05.2019)
16. *Bogo, F.* FAUST: Dataset and evaluation for {3D} mesh registration / F. Bogo, J. Romero, M. Black // CVPR 2014. DOI: 10.1109/CVPR.2014.491
17. *Anguelov, D.* SCAPE: Shape Completion and Animation of People / D. Anguelov, D. Koller, S. Thrun // SIGGRAPH 2005. — Los Angeles, California, 2005. — P. 408–416. DOI: 10.1145/1073204.1073207

**Климов Кирилл В.** — аспирант, кафедра программирования и информационных технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.

E-mail: ra22341@ya.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9770-5781>

## A HYBRID DEFORMATION MODEL FOR THE NON-RIGID REGISTRATION OF 3D SCANS

© 2020 K. V. Klimov✉

*Voronezh State University  
1, Universitetskaya Square, 394018 Voronezh, Russian Federation*

**Abstract.** 3D model matching (non-rigid registration) is one of the most important problems in computer graphics. Of particular interest is the non-rigid registration of 3D facial scans, which are then used in animations. There are a lot of non-rigid registration algorithms, but most of them cannot function adequately when the input models differ greatly. This happens, for example, when it is necessary to register a neutral face and a screaming face. In this article we suggest an iterative algorithm for finding the closest pair of points modified in order to provide for the highly accurate registration of 3D models which differ greatly. The key components of the proposed algorithm are a hybrid deformation model based on an embedded deformation graph which can capture small details, and a blendshape allowing a single mesh to deform to achieve numerous pre-defined shapes.

**Keywords:** 3D scanning, non-rigid registration, iterative closest point, numerical optimizations.

### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

### REFERENCES

1. *Rusinkiewicz S., Levoy M.* Efficient Variants of the ICP Algorithm. 3D Digital Imaging and Modeling. Stanford University. 2001. P. 145–150. DOI: 10.1109/IM.2001.924423
2. *Botsch M., Sorkine O.* On Linear Variational Surface Deformation Methods. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2008. V. 14. P. 213–230. DOI: 10.1109/TVCG.2007.1054
3. *Sorkine O., Alexa M.* As-rigid-as-possible surface modeling. SGP '07 Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing. 2007. P. 109–116. DOI: 10.1145/1281991.1282006
4. *Sumner R., Schmid J., Pauly M.* Embedded Deformation for Shape Manipulation.

tion. ACM SIGGRAPH. 2007. No 80. DOI: 10.1145/1275808.1276478

5. *Blanz V., Vetter T.* A morphable model for the synthesis of 3D faces. SIGGRAPH 1999. P 187–194. DOI: 10.1145/311535.311556

6. *Cao C. [et al]* Stabilized real-time face tracking via a learned dynamic rigidity prior // SIGGRAPH Asia 2018. V 37. DOI: 10.1145/3272127.3275093

7. *Bhat K. [et al]* High Fidelity Facial Animation Capture and Retargeting With Contours. Eurographics Symposium on Computer Animation. 2013. P. 7–14. DOI: 10.1145/2485895.2485915

8. *Bouaziz S. [et al]* Sparse iterative closest point. Eurographics 2013. P. 113–123. DOI: 10.1111/cgf.12178

9. *Bouaziz S. [et al]* Modern techniques and applications for real-time non-rigid registration. SIGGRAPHASIA2016. DOI: 10.1145/2988458.2988490

10. *Low K.* Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration. – Available at: [https://www.comp.nus.edu.sg/~lowkl/publications/lowk\\_point-to-plane\\_icp\\_techrep.pdf](https://www.comp.nus.edu.sg/~lowkl/publications/lowk_point-to-plane_icp_techrep.pdf) (accessed: 02.05.2019).

11. *Horn B.* Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. Journal of

✉ Klimov Kirill V.  
e-mail: ra22341@ya.ru

the Optical Society of America A. 1987. V 4(4). P. 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629

12. *Fyffe G. [et al]* Multiview stereo on consistent face topology. Computer Graphics Forum. 2017. P. 16–45. DOI: 10.1111/cgf.13127

13. *Nocedal J., Wright S.* Numerical Optimizations. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, 2006. 683 p.

14. *Verboon, P.* Majorization with iteratively reweighted least squares: A general approach to optimize a class of resistant loss functions.

15. *Neidinger, R.* Introduction to Automatic Differentiation and MATLAB Object-Orient-

ed Programming. – Available at: <http://www.neidinger.net/SIAMRev74362.pdf> (accessed: 17.05.2019)

16. *Bogo F., Romero J., Black M.* FAUST: Dataset and evaluation for {3D} mesh registration. CVPR 2014. DOI: 10.1109/CVPR.2014.491

17. *Angelov D., Koller D., Thrun S.* SCAPE: Shape Completion and Animation of People. SIGGRAPH 2005. Los Angeles, California, 2005. P. 408–416. DOI: 10.1145/1073204.1073207

**Klimov Kirill V.** — graduate student, Department of Programming and Information Technologies, Computer science faculty of Voronezh State University.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9770-5781>

E-mail: [ra22341@ya.ru](mailto:ra22341@ya.ru)