

<https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.626-637>
УДК 004.92

Оригинальная статья

Алгоритм визуализации объемных пор и морщин на основе карты смещений

А. С. Сырых, С. Н. Медведев*

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация

Адрес: 394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1

* s_n_medvedev@mail.ru

Аннотация

Введение. Статья посвящена разработке алгоритма визуализации реалистичного микрорельефа кожи, фокусируясь на создании объемных пор и морщин. Реалистичное представление кожи имеет критическое значение в таких областях, как анимация, видеоигры и кинематография, где крупные планы требуют точной передачи текстуры кожи. Традиционно создание таких деталей выполнялось вручную, что требовало значительных временных затрат.

Материалы и методы. В данной работе предложен процедурный подход с использованием карт смещений, что позволяет ускорить процесс и повысить масштабируемость создания текстур пор и морщин, а также гибко настраивать их параметры. Представлен обзор литературы по тематике моделирования морщин, в котором особое внимание уделено подходам, использующим карты нормалей и смещений.

Результаты исследования. Представленный в статье метод начинается с инициализации карты смещений высокого разрешения, на которой последовательно создаются текстуры пор и морщин с использованием математических функций. Поры визуализируются как круговые углубления с плавными переходами от центра к краям, а морщины моделируются как линейные структуры, параметры которых включают глубину и ширину. Для достижения естественности в текстуру добавляется шум Перлина, который придает нерегулярность и делает поры и морщины более естественными.

Обсуждение и заключение. В заключение работы представлены результаты эксперимента с настройкой параметров. Предложенный алгоритм обеспечивает точный контроль над параметрами пор и морщин, такими как глубина, ширина и параметр спада, что позволяет добиться высокой степени реалистичности. Эффективность и масштабируемость делают данный метод подходящим для создания реалистичных текстур микрорельефа лица.

Ключевые слова: моделирование микрорельефа, процедурная генерация, карта смещений, поры, морщины

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сырых А. С., Медведев С. Н. Алгоритм визуализации объемных пор и морщин на основе карты смещений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2024. Т. 20, № 3. С. 626-637. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.626-637>

© Сырых А. С., Медведев С. Н., 2024



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



Современные
информационные
технологии
и ИТ-образование

Том 20, № 3. 2024

ISSN 2411-1473

sitito.cs.msu.ru

Algorithm for Visualizing Volumetric Pores and Wrinkles Based on a Displacement Map

A. S. Syryh, S. N. Medvedev*

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Address: 1 University square, Voronezh 394018, Russian Federation

* s_n_medvedev@mail.ru

Abstract

Introduction. The article proposes an approach to developing an algorithm for visualizing realistic skin micro-relief, focusing on the creation of volumetric pores and wrinkles. Realistic skin representation is crucial in fields such as animation, video games, and cinematography, where close-up shots require accurate skin texture rendering. Traditionally, creating such detailed textures was a manual and time-consuming process.

Materials and Methods. This paper proposes a procedural approach using displacement maps, which accelerates the process and enhances the scalability of pore and wrinkle texture generation while allowing flexible parameter adjustments.

Results. The method presented in the article begins with initializing a high-resolution displacement map, on which pore and wrinkle textures are sequentially created using mathematical functions. Pores are visualized as circular depressions with smooth transitions from center to edge, while wrinkles are modeled as linear structures with parameters including depth and width. To achieve a natural appearance, Perlin noise is applied to the texture, introducing irregularities that make pores and wrinkles more lifelike.

Discussion and Conclusion. The article concludes with the results of an experiment with parameter adjustments. The proposed algorithm allows precise control over pore and wrinkle parameters, such as depth, width, and falloff, enabling a high degree of realism. Its efficiency and scalability make this method suitable for generating realistic facial micro-relief textures.

Keywords: micro-relief modeling, procedural generation, displacement map, pores, wrinkles

Conflict of interests: The authors declares no conflict of interest.

For citation: Syryh A.S., Medvedev S.N. Algorithm for Visualizing Volumetric Pores and Wrinkles Based on a Displacement Map. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2024;20(3):626-637. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.626-637>



1. Введение

Реалистичная визуализация человеческого лица – одна из самых сложных и важных задач в компьютерной графике¹, особенно когда речь идет о таких мелких, но важных деталях, как поры и морщины кожи. Эти элементы микрорельефа играют ключевую роль в восприятии лица как естественного и живого, что особенно важно для анимации, видеоигр и фильмов [1]. Одним из возможных способов достичь реалистичной визуализации человеческого лица – нарисовать вручную текстуры с морщинами и порами. Однако это очень долгий процесс даже для одного лица, не говоря уже о десятках или сотнях лиц в фильмах или играх.

Для достижения точности и скорости создания может быть использован другой подход, основанный на процедурной генерации². Процедурная генерация – метод формирования текстур, геометрических форм и иных визуальных элементов посредством алгоритмических процессов, исключающих необходимость участия пользователя. Процедурные методы позволяют задавать набор параметров, которые контролируют внешний вид элементов, а затем с их помощью автоматически генерировать нужные структуры [2].

Без точной передачи пор и морщин даже самое детализированное лицо может выглядеть плоским и искусственным, поскольку будет не хватать той текстурной сложности, которая характерна для реальной кожи.

В кино и игровой индустрии часто используются крупные планы лица, на которых видны мельчайшие детали кожи. Отсутствие реалистичной текстуры может испортить впечатление и сделать персонажа менее убедительным.

Таким образом, ставится задача визуализации микрорельефа человеческого лица (пор и морщин) путем создания карты смещений.

Визуализация должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Изменяемость глубины поры и ее радиуса в соответствии с введенным законом.
2. Изменяемость глубины, ширины и радиуса морщины в соответствии с введенным законом.
3. Детерминированность, то есть при одном и том же входе иметь один и тот же выход.

2. Обзор существующих технологий

Задача моделирования трехмерного человеческого лица включает в себя разные аспекты. Это и точная передача геометрии и форм, выражение эмоций, учет наложения и соединения губ, зубов, век, учет полостей, мелких деталей и корректного освещения. И каждая из этих подзадач исследуется на протяжении многих лет, совершенствуя подходы и реализации. Однако моделированию кожи с ее морщинами и порами и визуализации мелких деталей на трехмерном объекте уделено не так много внимания в научной литературе.

Стоит отметить изучение проблемы моделирования скла-

док и морщин в других практических областях. В статье [3] предложена модель образования геологических складок в неоднородном по толщине слое, которая показала приемлемые результаты для дальнейшего её использования. В статье [4, 5] рассматриваются различные модели, изучающие поведение бумаги и картона специального вида при различных механических воздействиях. Стоит отметить глубокую проработку моделей в каждом из представленных исследований, но и отметить факт отсутствия полноценной 3d-визуализации объектов. К тому же в данных исследованиях важная роль отводится точности моделирования, без учета вычислительных затрат, требуемых для расчета и визуализации. Работа [6] посвящена обнаружению складок и морщин на тканях для автоматизации их обработки роботом. Предлагается метод распознавания в реальном времени на основе алгоритма YOLOv5 с обучением на предварительно созданном наборе данных. Итоговые результаты позволили роботу-автомату производить необходимые манипуляции с тканями с предварительным выравниванием складок. В [7] предлагается подход распознавания морщин с размытыми границами для изображений с различным разрешением уже на лицах людей.

Работа [8] посвящена реконструкции трехмерного лица на основе большого набора изображений различных специально созданных наборов лиц. Ключевой идеей является предварительное обучение только на синтетических данных, которые могут обобщать сложные выражения лиц и отображать новые типы с мелкими деталями.

Моделированию морщин на коже также посвящены различные работы, как российских, так и зарубежных авторов [9-16]. В работе [10] представлен метод на основе кривых для создания морщин на эталонных позах, которые включены в алгоритм взвешенного сопоставления для генерации деформации морщин (ткани или кожи) на анимированном персонаже. Работа [9] опирается на вязкоупругое поведение кожи.

Энергетический подход на основе управляемой кривой для создания морщин на нежестких объектах представлен в [11]. Другой энергетический подход применен в статье [12]. Подходы, основанные на энергии в отличие от геометрии, решают важную проблему с самопересечением складок, что является их явным преимуществом.

Часть методов моделирования морщин и пор основывается на изменении и настройки накладываемых текстур и изображений на 3d-объект [13, 14]. Такие подходы больше связаны с грамотным сопоставлением геометрии лица и обработанными различными методами изображениями. Так, например, в [15] представлен метод извлечения морщин с двухмерного изображения при помощи различных методов цифровой обработки изображений (эквализация, оператор Кэнни, удаление шумов, повышение резкости) и переносом на трехмерный объект по созданным кривым на основе функций форм: формы поперечного сечения, функция затухания глубины (DAF) и функция затухания ширины (WAF).

Подробнее остановимся на некоторых работах, идеи которых

¹ Sennewald Ch. A., Baillie C. Effective Security Management. Elsevier Inc., Butterworth-Heinemann, 2020. 424 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01734-2>

² Procedural Generation: An Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://kentpawson123.medium.com/procedural-generation-an-overview-1b054a0f8d41> (дата обращения: 07.06.2024).



легли в основу моделей и алгоритмов и, как итог, полученных результатов представленной статьи.

Одним из первых моделей реалистичной визуализации человеческой кожи были представлены в работе³.

В основе модели, которая основана на теории диффузного приближения, лежит концепция многослойного рассеивания света, которая позволяет учесть, как свет проникает в поверхность кожи, рассеивается внутри и выходит обратно.

В отличие от обычного поверхностного отражения, которое можно описать законами Френеля, подповерхностное рассеивание требует учета рассеянного компонента света, который влияет на мягкость и реалистичность визуализируемых объектов.

Когда используется подповерхностное рассеивание, такие мелкие неровности поверхности, как поры и морщины тоже должны быть правильно освещены, чтобы достичь реалистичности. В работе⁴ предложили подход, где диффузное рассеивание и карты нормалей работают вместе, обеспечивая плавные переходы света и теней даже в сложных областях с рельефными деталями⁵ [17-19]. Это означает, что свет, проходящий через кожу, будет взаимодействовать с этими мелкими деталями, создавая визуально правдоподобный эффект. Формула выхода света при подповерхностном рассеивании:

$$L_0(p, \omega_0) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} S(p, \omega_i, \omega_0) L_i(p, \omega_i)(n', \omega_i) d\omega_i, \quad (1)$$

где n' – нормаль, скорректированная с учетом карты нормалей,

$S(p, \omega_i, \omega_0)$ – функция подповерхностного рассеивания, описывающая, как свет распространяется под поверхностью,

L_i – входная интенсивность света,

L_0 – входная интенсивность света,

ω_i, ω_0 – входное и выходное направление света.

Результат работы можно наблюдать на рис. 1.

К преимуществам метода можно отнести:

- обеспечение реалистичного эффекта глубины кожи;
- учет многослойного рассеивания света, что создает мягкие переходы освещения.

А к недостаткам:

- вычислительная сложность;
- отсутствие прямого создания мелких деталей (микрорельефа) кожи.

Другой подход генерации микрорельефа кожи предложили авторы [20]. Методы, описанные ими, включают использование карты смещений (*displacement maps*)⁶ для воспроизведения текстуры кожи [21-22].

Генерация пор и морщин разделена на 2 этапа:

1. Параметризация пор и морщин.
2. Генерация пор со случайным распределением.



Рис. 1. Результат работы подповерхностной функции рассеивания

Fig. 1. The result of the subsurface scattering function

Source: d'Eon E., Luebke D. Chapter 14. Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering [Electronic resource]. In: Nguyen H. (ed.) GPU Gems 3. Addison-Wesley Professional, 2007. Available at: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems3/part-iii-rendering/chapter-14-advanced-techniques-realistic-real-time-skin> (accessed 07.06.2024).

Для точного контроля внешнего вида пор и морщин используются различные параметры, такие как глубина, ширина, форма и частота размещения. Авторы описывают метод, в котором для каждого элемента микрорельефа задаются параметры, влияющие на его внешний вид. Морщины моделируются с использованием гауссовской функции, которая задаёт их вид в поперечном сечении:

$$f(x) = Ae^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где A – максимальная глубина морщины, σ – ширина морщины и плавность изменения ее формы, x – поперечное расстояние от центра морщины.

Для моделирования пор используется метод случайного распределения по поверхности. Каждая пора моделируется как круговая область с определённым радиусом, и значения смещения задаются так, чтобы создать плавный переход от центра поры к её краям:

$$d_{pore}(r) = d_{max}(1 - \frac{r}{R})^2, \quad (3)$$

где $d_{pore}(r)$ – значение смещения для поры в зависимости от расстояния r от её центра,

d_{max} – максимальное смещение в центре поры (глубина поры),

R – радиус поры.

Эта квадратичная функция позволяет имитировать форму поры с плавным углублением, уменьшающимся к краям, что делает поры менее заметными на расстоянии и реалистичными при близком рассмотрении.

³ d'Eon E., Luebke D. Chapter 14. Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering [Электронный ресурс] // GPU Gems 3 ; ed. by H. Nguyen. Addison-Wesley Professional, 2007. URL: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems3/part-iii-rendering/chapter-14-advanced-techniques-realistic-real-time-skin> (дата обращения: 07.06.2024).

⁴ Там же.

⁵ Gosselin D. Real-Time Skin Rendering [Электронный ресурс]. URL: <https://web.engr.oregonstate.edu/~mjb/cs557/Projects/Papers/> (дата обращения: 07.06.2024).

⁶ Displacement maps [Электронный ресурс]. URL: <https://help.autodesk.com/view/MAYAUL/2024/ENU/?guid=GUID-E7A03E4E-8C9A-4B62-8218-28FC063A82AB> (дата обращения: 07.06.2024).



Следует заметить, что подход [20] не предусматривает явных связей между порами и морщинами. Поры размещаются случайным образом, а их форма определяется локальными параметрами. Это упрощает процесс генерации и делает его более гибким для использования в случаях, когда не требуется сложная взаимосвязанная текстура. Однако поры и морщины остаются независимыми, что может сделать текстуру менее органичной и менее реалистичной, если требуется сложная сеть морщин и связей. Также это может привести к тому, что некоторые поры окажутся слишком близко друг к другу или создадут нежелательные паттерны поведения, если не предусмотреть дополнительные ограничения.

К преимуществам метода можно отнести:

- обеспечение детализированного рельефа кожи, с добавлением правдоподобных пор и морщин.
- гибкость в настройке параметров, которая позволяет детализировать текстуру в зависимости от задачи.
- не вычислительно затратный.

А к недостаткам:

- независимое моделирование пор и морщин может привести к неестественному виду, если не учитывать взаимосвязь между ними.
- создание повторяющегося поведения пор и морщин.

Подход⁷ нацелен на генерацию и визуализацию складок на одежде. Метод моделирует складки как функции высоты на поверхности, используя карту смещений:

$$d(u, v) = \sum_i A_i \cdot f_i(u, v), \quad (4)$$

где $d(u, v)$ – высота в координате (u, v) ,

A_i – амплитуда каждой складки,

$f_i(u, v)$ – функция формы -ой складки, определяющая форму этой складки.

Для придания складкам уникальности и не идеального вида, функция формы $f_i(u, v)$ вычисляют при помощи шумов. Авторы используют шум Перлина⁸.

$$f_i(x, y) = \text{Perlin}(x \cdot \text{freq}_i, y \cdot \text{freq}_i), \quad (5)$$

где freq_i – частота шума для -ой складки.

Амплитуда A_i определяет глубину каждой складки. Она может быть задана вручную или вычислена автоматически.

$$A_i = A_{\max} \cdot g(x, y), \quad (6)$$

где $g(x, y)$ – функция плавного затухания амплитуды.

К преимуществам метода можно отнести:

- обширный контроль над параметрами глубины и частоты, что позволяет быстро адаптировать складки для разных материалов и детализировать текстуру в зависимости от задачи.

А к недостаткам:

- вычислительная сложность;
- тяжелая адаптация к другим практическим областям из-за физической привязанности к тканям.

В [23, 24] предложили подход генерации складок на одежде с использованием физических параметров. Их метод использует параметры материала для создания складок (жесткость, эластичность и т.д.). Основой метода является уравнение синусоидальной функции, где амплитуда, частота и фазовый сдвиг зависят от характеристик материала.

Сами складки описываются как периодические синусоидальные деформации на поверхности, которые можно задать с помощью функции.

$$\omega(x, y) = A \sin(kx + \varphi), \quad (7)$$

где $\omega(x, y)$ – вертикальное смещение поверхности в точке (x, y) ,

A – амплитуда складки, которая определяет ее максимальную высоту,

k – частота синусоиды, определяющая количество складок на единицу длины (чем выше частота, тем больше складок на поверхности),

φ – фазовый сдвиг, который контролирует начальную позицию складки.

В работе [23] параметры A , k и φ изменяются в зависимости от свойств материала (жесткость K и эластичность E).

Амплитуда (A) складки зависит от силы натяжения и эластичности материала. Мягкие и эластичные материалы, как правило, образуют более глубокие складки при деформации, тогда как жесткие материалы формируют мелкие складки. Связь между амплитудой и эластичностью выражается как:

$$A = \frac{F}{E}, \quad (8)$$

где F – сила натяжения,

E – модуль упругости материала.

Частота (k) обратно пропорциональна жесткости (K) материала, поскольку более жесткие материалы склонны образовывать более частые и мелкие складки. Эта зависимость может быть описана следующим образом:

$$k = \frac{1}{\sqrt{K}}, \quad (9)$$

И, наконец, фазовый сдвиг (φ) контролируется случайными значениями или начальными условиями деформации.

После этого создается карта смещений, где каждое значение зависит от локальных параметров материала. Смещение для пикселя (u, v) задается следующим образом:

$$d(u, v) = A(u, v) \sin(k(u, v)u + \varphi(u, v)), \quad (10)$$

К преимуществам метода можно отнести:

- физическая достоверность: складки соответствуют естественному поведению ткани;
- подходит для материалов с разными свойствами мягкости.

А к недостаткам:

- вычислительная сложность;
- требование точной настройки свойств материала, что увеличивает сложность.

В [25] разработали метод, который добавляет складки на одежду.

Моделирование складок основывается на комбинации карты смещений и карты нормалей. Карта смещений описывает рельеф складок, которая впоследствии трансформируется в карту нормалей для описания взаимодействия складок со светом.

Сначала происходит расчет формы складок при помощи карты смещений. Каждая складка описывается радиусом (R) и максимальной глубиной (A). Результирующее смещение вычисляется по формуле:

$$d(u, v) = A_{\max} \cdot \left(1 - \frac{u^2 + v^2}{R^2}\right)^2, \quad (11)$$

⁷ A measurement-based skin reflectance model for face rendering and editing / T. Weyrich [et al.] // MERL Technical Report (TR2005-071), July 2005 [Электронный ресурс]. URL: <https://vcg.seas.harvard.edu/publications/a-measurement-based-skin-reflectance-model-for-face-rendering-and-editing> (дата обращения: 07.06.2024).

⁸ Perlin noise [Электронный ресурс] // Khan Academy, 2024. URL: <https://www.khanacademy.org/computing/computer-programming/programming-natural-simulations/programming-noise/a/perlin-noise> (дата обращения: 07.06.2024).



где (u, v) – координаты пикселя в карте смещений,

A_{max} – максимальная глубина складки,

R – радиус складки

Для преобразования карты смещений в карту нормалей авторы ищут градиенты (изменения высоты) карты смещений в направлении u и v .

Градиенты для карты смещений вычисляются с помощью частных производных:

$$\begin{aligned}\frac{\partial d}{\partial u} &= -2A_{max} \cdot \left(1 - \frac{u^2+v^2}{R^2}\right) \cdot \frac{2u}{R^2} \\ \frac{\partial d}{\partial v} &= -2A_{max} \cdot \left(1 - \frac{u^2+v^2}{R^2}\right) \cdot \frac{2v}{R^2}\end{aligned}\quad (12)$$

Градиенты смещений используются для построения нормали на каждой точке поверхности.

$$N = \left(-\frac{\partial d}{\partial u}, -\frac{\partial d}{\partial v}, 1\right), \quad (13)$$

Полученный вектор нормали нормализуется для дальнейшего использования в карте нормалей.

К преимуществам метода можно отнести:

- карта нормалей добавляет реалистичное освещение, создавая иллюзию рельефа без изменения геометрии;
- вычислительная сложность.

А к недостаткам:

- ограниченная точность на близких расстояниях, поскольку карта нормалей не изменяет геометрию.

В результате анализа существующих технологий было выяснено, что алгоритмы, основанные на картах смещений, демонстрируют высокую эффективность в создании рельефа поверхности, так как позволяют быстро и гибко добавлять и изменять детали, такие как поры, морщины и складки. Благодаря своей гибкости, вычислительной простоте и обширному контролю параметров такие методы нашли широкое применение в различных областях: от визуализации кожи до моделирования складок на ткани. Однако карты смещений так же имеют свои ограничения: их работа не всегда физически корректна, и они не учитывают все тонкости поведения материала.

В данной статье результат стремится к более детальному контролю над параметрами пор и морщин, чтобы достичь высокой степени реализма и гибкости. Поэтому будет разработан собственный алгоритм визуализации микрорельефа кожи, в котором в качестве основы будет использоваться карта смещений.

3. Визуализация пор и морщин

Визуализация пор и морщин достигается путем создания текстуры, представленной в виде карты смещений (*displacement map*).

Причина, по которой была выбрана именно карта смещений вместо карты нормалей (*normal map*) заключается в достижении визуального эффекта: от карт смещений эффект будет гораздо реалистичнее, поскольку каждая пора и морщина действительно «выдавливается» или «вырезается» из поверхности, а не просто имитируется с помощью изменений освещения.

В свою очередь вычисление текстуры производится в шейдере на основе графа.

Процесс создания текстуры состоит из нескольких этапов:

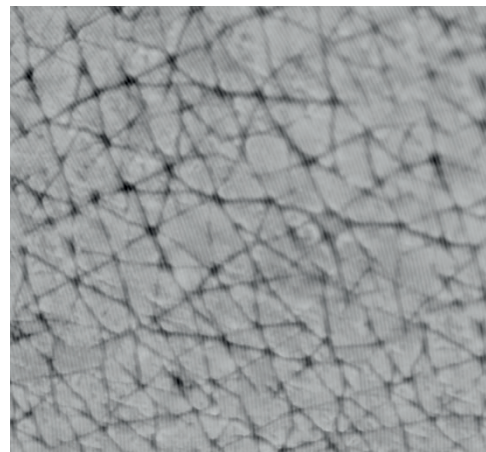
1. Инициализация текстуры.
2. Добавление пор.

3. Добавление морщин.

4. Добавление шумов.

5. Обработка пересечений морщин.

На рис. 2 показан пример сгенерированной текстуры (карты смещений) пор и морщин человеческого лица.



Р и с. 2. Сгенерированная текстура пор и морщин

F i g. 2. Generated texture of pores and wrinkles

Источник: здесь и далее в статье все таблицы и рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all tables and figures were made by the authors.

3.1. Инициализация текстуры

Первым шагом является создание карты смещений — выходного изображения.

Для каждого пикселя на карте смещений определяется значение, которое указывает, на сколько должна быть смещена точка поверхности вдоль нормали к ней в этой точке. Это позволяет создавать точные углубления (например, поры) и выпуклости (например, складки кожи):

$$P' = P + d(u, v) \cdot n, \quad (14)$$

где P' – новая позиция вершины после смещения,

P – исходная позиция,

$d(u, v)$ – значение смещения из карты,

n – нормаль к поверхности в точке P .

Карта создаётся с высоким разрешением (в статье используется разрешение 4096×4096 пикселей), чтобы обеспечить детализированное отображение микрорельефа кожи. Изначально карта заполняется нулями, что символизирует отсутствие изменений на поверхности.

3.2. Добавление пор

Поры визуализируются как небольшие круговые области с плавным изменением значений смещения от центра к краям.

Для каждой поры:

- определяется центр поры и ее радиус;
 - в пределах радиуса поры для каждого пикселя вычисляется смещение, которое уменьшается по мере удаления от центра, что создаёт плавное углубление в области поры.
- Для расчета смещения для поры будет использоваться формула 5.



$$d_{pore}(r) = d_{max} e^{-\frac{r^2}{R^2}}, \quad (15)$$

где d_{max} – максимальная глубина поры,
 α – параметр спада,
 r – текущее расстояние от центра поры,
 R – радиус поры.

3.3. Добавление морщин

Морщины в отличие от пор визуализируются как линии, проходящие между двумя точками (порами). Эти линии разбиваются на сегменты для визуализации, и вдоль каждого сегмента добавляется смещение, формируя углубления, имитирующие морщины.

При генерации морщин используется функция, которая определяет форму морщины в поперечном сечении. Она задаёт, насколько глубокой и широкой будет морщина в её центре, и как будут изменяться смещения от центра к краям. Также функция позволяет варьировать морщины от глубоких складок до тонких линий.

В статье используется следующая функция.

$$S_{wrinkle}(x) = A \cdot \left(1 - \frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}\right), \quad (16)$$

где A – максимальная глубина морщины,
 x_0 – центр морщины,
 ω – ширина морщины,
 x – текущее расстояние от центральной оси морщины.

Максимальная глубина морщины (A) задаётся пользователем или определяется на основе характеристик кожи. Эта величина представляет собой смещение в самой глубокой точке морщины, то есть в её центре.

Ширина морщины также задаётся как параметр и контролирует, насколько сильно смещение распространяется от центра к краям. Чем больше значение ω , тем шире будет морщина.

Для каждой точки вдоль линии морщины (вдоль её длины и поперёк) вычисляется расстояние x от центральной оси морщины (x_0). По мере удаления от центра, смещение уменьшается по квадратичной зависимости. Когда расстояние от центра достигает ω , смещение становится нулевым. Это создаёт плавный спад от глубокой части морщины к её краям, обеспечивая естественный вид. Квадратичная функция задаёт плавное изменение формы морщины. Такое распределение смещений имитирует форму реальных морщин, которые глубже в центре и плавно «сходят на нет» по краям.

3.4. Добавление шумов

Чтобы морщины выглядели естественными, нерегулярными и реалистичными, добавляется шум. В статье добавляется шум Перлина.

При создании текстуры пор и морщин с помощью математических функций результат выглядит слишком симметричным. Это создаёт эффект искусственности, поскольку в реальной жизни кожа не имеет идеальных, одинаково распределённых пор и морщин. Поверхность кожи характеризуется неровностями, случайными дефектами, вариациями в форме и глубине, которые делают её более сложной и естественной.

Шум Перлина генерирует псевдослучайные значения, которые накладываются на карту смещений, создавая небольшие случайные вариации, чтобы кожа выглядела менее гладкой и более реалистичной.

$$d_{final}(u, v) = d(u, v) + \lambda \cdot Noise(u, v), \quad (17)$$

где d_{final} – итоговое значение смещения с добавленным шумом,
 $d(u, v)$ – исходное значение карты смещений,
 λ – коэффициент, который регулирует интенсивность шума,
 $Noise(u, v)$ – значение шума Перлина в координатах пикселя.

Для создания естественного и нерегулярного микрорельефа кожи с помощью шума Перлина важную роль играют гиперпараметры. Эти параметры регулируют разнообразие и реалистичность пор и морщин, добавляя случайные вариации, которые смягчают симметричность текстуры и делают её более правдоподобной. Основные гиперпараметры шума Перлина включают следующие:

1. Детализация (*details*). Этот параметр задаёт уровень детализации шума, определяя, сколько мелких и крупных вариаций будет присутствовать в текстуре. Чем выше значение детализации, тем больше слоёв и мелких деталей добавляется к текстуре, что позволяет усилить сложность и многослойность морщин.

2. Грубость (*roughness*). Грубость контролирует резкость переходов между светлыми и тёмными областями шума. Высокая грубость создаёт более резкие и контрастные переходы, делая рельеф кожи заметнее и более выразительным. Низкие значения грубости, наоборот, обеспечивают более плавные и мягкие переходы, что делает текстуру более гладкой.

3. Лакунарность (*lacunarity*). Лакунарность определяет, насколько быстро уменьшаются или увеличиваются частоты в каждом следующем слое шума. При высокой лакунарности мелкие элементы становятся более заметными, а текстура — более насыщенной. В контексте кожи это создаёт более естественные переходы между областями с различной плотностью морщин и пор.

3.5. Обработка пересечений морщин

Морщины могут пересекаться в одном и том же месте на карте смещений. Это может привести к резким переходам, если эти значения смещений просто суммировать. Для решения этой проблемы было применено логарифмическое сглаживание, которое плавно объединяет несколько значений смещений, обеспечивая естественное наложение.

$$S_{final} = \log\left(\frac{N-1+e^{\beta \cdot S_{new}}}{N}\right)/\beta, \quad (18)$$

где S_{final} – результирующее сглаженное смещение,
 S_{new} – новое значение смещения, которое добавляется (например, от новой морщины или поры),
 N – количество пересекающихся смещений (можно использовать как параметр для контроля степени сглаживания),
 β – коэффициент, контролирующий уровень сглаживания. Чем больше значение β , тем резче будут переходы, и, наоборот, при меньших значениях β сглаживание будет плавным.

4. Результаты исследования

Сначала будут рассмотрены результаты с изменением параметров морщин, затем пор, и, наконец, будут показаны изменённые параметры поры и морщины вместе. Значения параметров, которые будут представлены далее, были выбраны авторами в результате обширной серии экспериментов, как параметры наиболее показательные для тех или иных случаев.

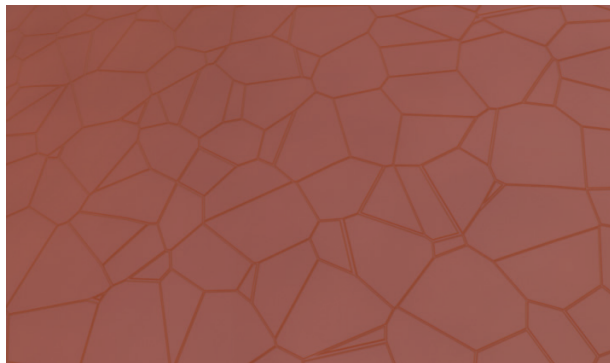


На рис. 3 показана кожа без морщин (глубина 0).

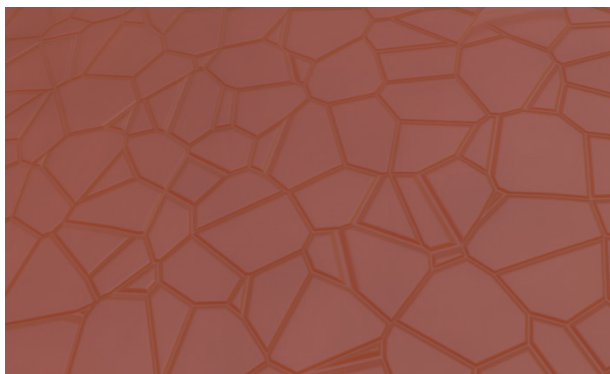


Р и с. 3. Кожа с глубиной морщин 0
F i g. 3. Skin with wrinkle depth 0

При фиксации параметра средней глубины морщин Δ и изменении параметра средней ширины морщин ω получается результат, который показан на рис. 4.



а)



б)

Р и с. 4. Кожа с фиксацией параметра средней глубины и изменения средней ширины морщин

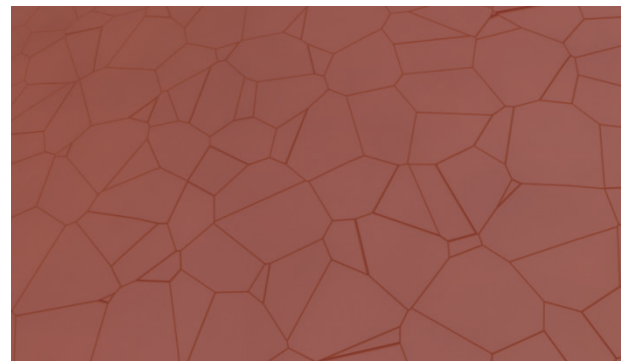
F i g. 4. Skin with fixed average depth and changing average width of wrinkles

На рис. 4 а) показаны морщины со средней глубиной (Δ) 2.255 и средней шириной (ω) 0.2, а на рисунке 4 б) средняя ширина (ω) была увеличена до 0.8. Согласно формуле (16) изменение

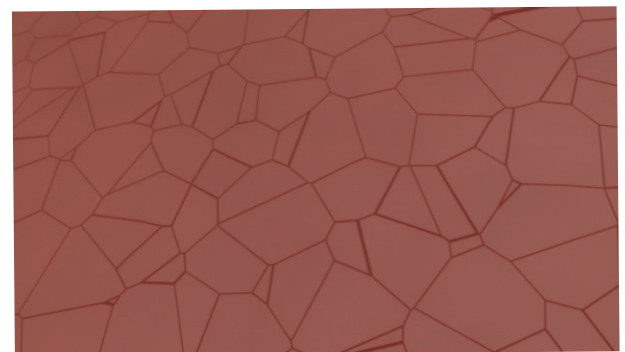
параметра ω ожидаемо влечет за собой изменение ширины морщины.

На рис. 4 а) визуально видна «узость» морщин, а на 4 б) уже просматривается четкая структура морщины: прорез и глубина.

При фиксации параметра средней ширины морщин (ω) и изменении средней глубины (Δ) и получается результат, который показан на рис. 5.



а)



б)

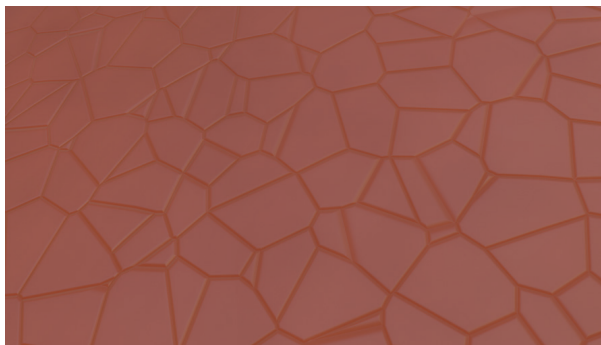
Р и с. 5. Кожа с фиксацией параметра средней ширины и изменения средней глубины морщин

F i g. 5. Skin with a fixed average width and a change in the average depth of wrinkles

На рис. 5 а) показаны морщины со средней глубиной (Δ) 1 и средней шириной (ω) 0.5, а на рис. 5 б) средняя глубиной (Δ) была увеличена до 6. Как и в формуле 16, изменение параметра Δ ожидаемо влечет за собой изменение глубины морщины. На рис. 5 а) сразу стала заметна плоскость кожи, поскольку высота параболы изменилась (16). Видны лишь незначительные углубления. На рис. 5 б) после увеличения глубины стала заметна «резкость» в переходах.

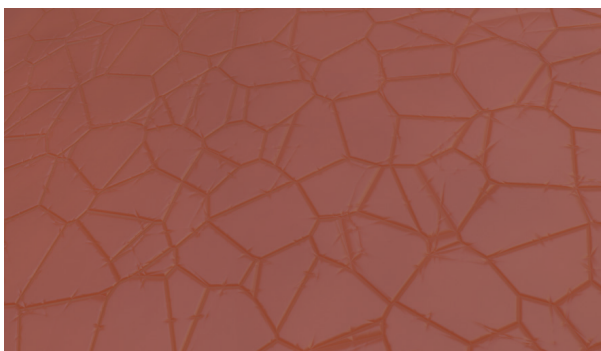
Теперь перейдем к изменению параметров шума. Зафиксируем среднюю глубину морщин (Δ) в 2.255, а среднюю ширину (ω) – в 0.8. При выставлении параметров *details* или *roughness*, или *lacunarity* в 0 шум не применяется к морщинам (рис. 6).





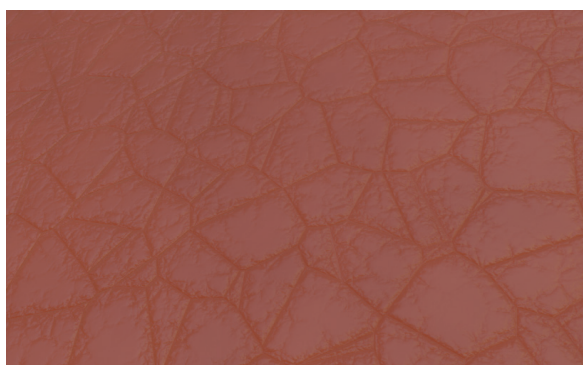
Р и с. 6. Параметры details или roughness или lacunarity выставлены в 0
F i g. 6. Parameters details or roughness or lacunarity are set to 0

При задании details – 5, roughness – 0.667, а lacunarity – 0.9 происходит добавление зашумленности, пропадает регулярность в морщинах (рис. 7).



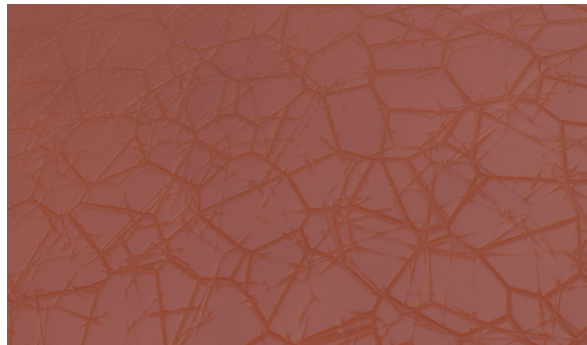
Р и с. 7. Параметры details – 5, roughness – 0.667 и lacunarity – 0.9
F i g. 7. Parameter details – 5, roughness – 0.667 or lacunarity – 0.9

При фиксации параметров details и roughness и изменении lacunarity (2.9) добавляется больше мелких деталей и появляется «воздушность» кожи (рис. 8).



Р и с. 8. Параметры details – 5, roughness – 0.667 и lacunarity – 2.3
F i g. 8. Parameter details – 5, roughness – 0.667 or lacunarity – 2.3

А при фиксации параметров details и lacunarity и изменении roughness (0.859) добавляется больше мелких деталей, но появляется «шершавость» кожи (рис. 9).



Р и с. 9. Параметры details – 5, roughness – 0.859 и lacunarity – 2.3
F i g. 9. Parameter details – 5, roughness – 0.859 or lacunarity – 2.3

Теперь перейдем к рассмотрению пор. На рис. 10 показана кожа без пор.



Р и с. 10. Кожа с глубиной и радиусом пор равной 0
F i g. 10. Skin with pore depth and radius equal to 0

При фиксации параметров средней глубины пор (d_{max}) в 0.9, радиуса (R) 0.5 и параметра спада (α) получается результат, который показан на рис. 11.



а)



б)

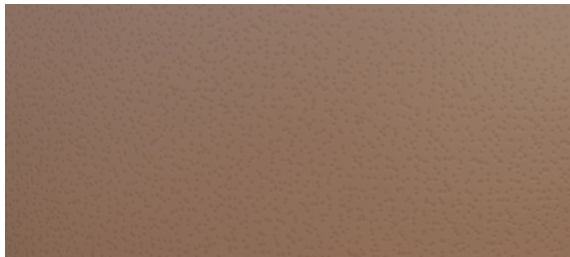
Р и с. 11. Кожа с фиксацией параметров средней глубины и средней ширины поры и изменения параметра спада

F i g. 11. Skin with fixation of the parameters of average pore depth and width, and changes in the recession parameter

На рис. 11 а) показаны поры с параметром спада (α) 0.885 а на рис. 11 б) параметр спада был увеличен до 2.1. Согласно формуле (15), изменение параметра α ожидаемо влечет за собой изменение формы углубления.

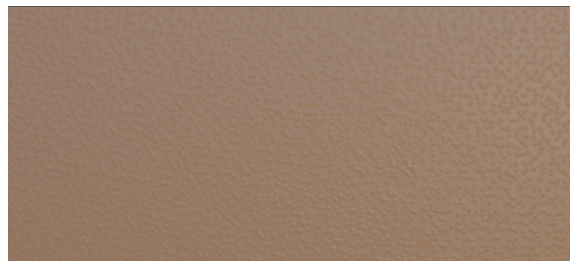
На рис. 11 а) виден плавный переход между границами и центром, а на рис 11 б) виден резкий переход от границ к центру поры.

При задании средней глубины пор в 0.5, радиуса 0.5 и параметра спада 0.7 получается следующая текстура пор, которую можно наблюдать на рис. 12.



Р и с. 12. Поры на коже с глубиной – 0.9,
радиусом 0.5 и параметром спада – 2.1
F i g. 12. Skin pores with a depth of 0.9,
a radius of 0.5 and a recession parameter of 2.1

Здесь видна четкая структура пор с плавным углублением. При изменении параметра спада на отрицательные значения, получаются «выдавленные» в сторону наблюдателя поры. Такой эффект называется «гусиная кожа», и его можно наблюдать на рис. 13.



Р и с. 13. Поры на коже с глубиной – 0.9,
радиусом 0.5 и параметром спада – -0.885
F i g. 13. Skin pores with a depth of 0.9,
a radius of 0.5 and a recession parameter of -0.885

Теперь рассмотрим результаты визуализации пор и морщин вместе.

Зададим следующие параметры для пор: средняя глубина – 1.839, средний радиус – 0.832 и средний параметр спада – 1.175, а для морщин: средняя глубина – 2.255 и средняя ширина – 0.85 (рис. 14).



Р и с. 14. Поры и морщины на коже
F i g. 14. Pores and wrinkles on the skin

Здесь можно наблюдать равномерную структуру пор и морщин. Поры едва заметны, а морщины задают рельеф. Визуальных артефактов не наблюдается.

Теперь изменим глубину пор на общем фоне. Параметры для пор: средняя глубина – 3, средний радиус – 0.832 и средний параметр спада – 1.175, а для морщин: средняя глубина (A) – 2.255 и средняя ширина – 0.85.



Р и с. 15. Поры и морщины на коже
F i g. 15. Pores and wrinkles on the skin

Здесь видно много углублений, морщины стали едва заметны. Появились визуальные артефакты кожи из-за увеличения глубины пор.

Теперь изменим глубину морщин. Параметры для пор: средняя глубина – 1.839, средний радиус – 0.832 и средний параметр спада – 1.175, а для морщин: средняя глубина (A) – 3 и средняя ширина – 0.85.



Р и с. 16. Поры и морщины на коже
F i g. 16. Pores and wrinkles on the skin



Здесь островки кожи, которые создают поры, визуально увеличился, по сравнению с рисунком 14. Морщины стали четче задавать структуру кожи.

Рис. 14 и 16 можно назвать приемлемыми в рамках вычислительного эксперимента.

В результате вычислительного эксперимента получились выявить диапазоны приемлемых значений пор и морщин (таблица 1).

Таблица 1. Приемлемые диапазоны параметров

Table 1. Acceptable ranges of parameters

Название параметра	Диапазон значений
Глубина пор (d_{max})	[0-2]
Радиус пор (R)	[0-1]
Параметр спада (α)	[0-1.5]
Глубина морщин (A)	[0-2.5]
Ширина морщин (ω)	[0-1.5]

На основе проведенных экспериментов удалось выявить значения параметров для различных случаев моделирования пор и морщин на коже: для «шершавой» кожи, для «гусиной» кожи, угревая кожа (глубокие поры). Главным достоинством предлагаемого подхода является его гибкость и масштабируемость. При оперировании небольшим количеством параметров возможно достигать разных эффектов, при этом присутствует как независимая настройка параметров и визуализация пор и морщин по отдельности, так и совместная.

Масштабируемость алгоритма обусловлена процедурным подходом, использующим карты смещений и рассматриваемые функции с задаваемыми параметрами, которые обеспечивают детерминированность. Это позволяет гибко генерировать текстуры пор и морщин для различных моделей и уровней детализации без значительных изменений в алгоритме. Высокое разрешение карты (40964096 пикселей) обеспечивает детали-

зированное отображение.

Процедурные методы, повышают быстродействие за счет автоматической генерации текстур, не требующей ручного вмешательства. Это снижает время на создание текстур для каждой модели лица, ускоряя процесс визуализации. В то же время, использование шума Перлина помогает избежать симметрии, делая текстуры реалистичными без потери производительности. Генерация 1000 пор и 500 морщин в разрешении 40964096 пикселей заняло около 25 мс на видеокарте nVidia RTX 3080. С учетом того, что это не должно работать в реальном времени (16 мс) результат является приемлемым.

5. Обсуждение и заключение

Реалистичная визуализация микрорельефа кожи, включающего поры и морщины, является важной составляющей для создания правдоподобных цифровых лиц, особенно в сценах кино и видеоиграх, где лицо находится большую часть времени в крупном плане.

В работе были рассмотрены алгоритмы генерации складок на одежде и кожи. В основном были рассмотрены методы, основанные на картах смещений, как эффективные для быстрой и детализированной генерации рельефа. Эти методы позволяют гибко контролировать параметры (глубина и радиус пор и морщин), что позволяет повысить степень реалистичности визуализации. Тем не менее, для достижения большей точности и гибкости в передаче микродеталей кожи был предложен собственный алгоритм визуализации микрорельефа, основанный на картах смещений, который обеспечивает детерминированный выход и позволяет точно задавать параметры рельефа, необходимые для создания точного визуального образа человеческого лица. В конце были продемонстрированы результаты работы алгоритма при разных параметрах, а также предложены допустимые диапазоны.

References

- [1] Vaitonytė J., Blomsma P.A., Alimardani M., Louwerse M.M. Realism of the face lies in skin and eyes: Evidence from virtual and human agents. *Computers in Human Behavior Reports*. 2021;3:100065. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2021.100065>
- [2] Freiknecht J., Effelsberg W. A Survey on the Procedural Generation of Virtual Worlds. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017;1(4):27. <https://doi.org/10.3390/mti1040027>
- [3] Pak V.V. Asymptotic Study of Instability in a Three-Layer Stokes Flow with an Inhomogeneous Layer Thickness. Modeling of the Folding Process. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60(6):1020-1030. <https://doi.org/10.1134/S0021894419060063>
- [4] Sanjon C.W., Leng Yu., Yan Yi, Groche P., Hauptmann M., Ludat N., Majschak J.-P. Characterization and Modeling of Out-of-Plane Behavior of Fiber-Based Materials: Numerical Illustration of Wrinkle in Deep Drawing. *Materials*. 2024;17(17):4177. <https://doi.org/10.3390/ma17174177>
- [5] Leng Yu., Sanjon C.W., Tan Q., Groche P., Hauptmann M., Majschak J.-P. Study of Parameters Influencing Wrinkles in the Deep Drawing of Fiber-Based Materials Using Automatic Image Detection. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(6):237. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060237>
- [6] Li C., Fu T., Li F., Song R. Design and Implementation of Fabric Wrinkle Detection System Based on YOLOv5 Algorithm. *Cobot*. 2024;3(5):1-14. <https://doi.org/10.12688/cobot.17687.1>
- [7] Liu Z., Qi Q., Wang S., Zhai G. A novel approach to the detection of facial wrinkles: Database, detection algorithm, and evaluation metrics. *Computers in Biology and Medicine*. 2024;174:108431. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.108431>
- [8] Buhler M.C., et al. Cafca: High-quality Novel View Synthesis of Expressive Faces from Casual Few-shot Captures. In: SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers (SA '24). New York, NY, USA: IEEE Press; 2024. Article number: 29. <https://doi.org/10.1145/3680528.3687580>
- [9] Fedorov A.E., Samartsev V.A., Adamov A.A. On modelling of the human skin. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2007;7(2):57-61. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2007-7-2-57-61>



- [10] Cutler L.D., Gershbein R., Wang X.C., Curtis C., Maigret E., Prasso L., Farson P. An art-directed wrinkle system for CG character clothing and skin. *Graphical Models*. 2007;69(5-6):219-230. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2006.09.003>
- [11] Wang Yu, Wang Charlie C.L., Yuen Matthew M.F. Fast energy-based surface wrinkle modeling. *Computers & Graphics*. 2006;30(1):111-125. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2005.10.010>
- [12] Venkataraman K., Lodha S., Raghavan R. A kinematic-variational model for animating skin with wrinkles. *Computers & Graphics*. 2005;29(5):756-770. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2005.08.024>
- [13] Rocha P.R., Neto J. do E.S.B. Three-Dimensional Modeling of Faces Utilizing Robust Characteristics. *Semina: Ciências Exatas E Tecnológicas*. 2024;45:e48505. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2024.v45.48505>
- [14] Lee T.-Y., Yen S.-W., Yeh I.-C. Texture Mapping with Hard Constraints Using Warping Scheme. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2008;14(2):382-395. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.70432>
- [15] Li L., Liu F., Li C., Chen G. Realistic wrinkle generation for 3D face modeling based on automatically extracted curves and improved shape control functions. *Computers & Graphics*. 2011;35(1):175-184. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2010.08.003>
- [16] Yap M.H., Batool N., Ng C.-C., Rogers M., Walker K. A Survey on Facial Wrinkles Detection and Inpainting: Datasets, Methods, and Challenges. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*. 2021;5(4):505-519. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2021.3075723>
- [17] Dachsbacher C., Stamminger M. Translucent Shadow Maps. *Eurographics Symposium on Rendering*. 2004;2(9):197-201. <https://doi.org/10.2312/EGWR/EGWR03/197-201>
- [18] Debevec P., Hawkins T., Tchou Ch., Duiker H.-P., Sarokin W., and Sagar M. Acquiring the reflectance field of a human face. In: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '00). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., USA; 2000. p. 145-156. <https://doi.org/10.1145/344779.344855>
- [19] Sander P.V., Gosselin D., Mitchell J.L. Real-time skin rendering on graphics hardware. In: ACM SIGGRAPH 2004 Sketches (SIGGRAPH '04). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2004. 148 p. <https://doi.org/10.1145/1186223.1186409>
- [20] Vanderfeesten R., Bikker J. Example-Based Skin Wrinkle Displacement Maps. In: 2018 31st SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI). Parana: IEEE Press; 2018. p. 212-219. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2018.00034>
- [21] Raman C., Hewitt C., Wood E., Baltrusaitis T. Mesh-Tension Driven Expression-Based Wrinkles for Synthetic Faces. *arXiv:2210.03529*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03529>
- [22] Cao C., Bradley D., Zhou K., Beeler T. Real-time high-fidelity facial performance capture. *ACM Transactions on Graphics*. 2015;34(4):1-9. <https://doi.org/10.1145/2766943>
- [23] Wang H., Hecht F., Ramamoorthi R., O'Brien J.F. Example-Based Wrinkle Synthesis for Clothing Animation. *ACM Transactions on Graphics*. 2010;29(4):107. <https://doi.org/10.1145/1778765.1778844>
- [24] Zhang J.E., James D., Kaufman D.M. Progressive Dynamics for Cloth and Shell Animation. *ACM Transactions on Graphics*. 2024;43(4):104. <https://doi.org/10.1145/3658214>
- [25] Decaudin P., Julius D., Wither J., Boissieux L., Sheffer A., Cani M.-P. Virtual Garments: A Fully Geometric Approach for Clothing Design. *Computer Graphics Forum*. 2006;25:625-634. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.00982.x>

Поступила 07.06.2024; одобрена после рецензирования 23.08.2024; принята к публикации 26.09.2024.

Submitted 07.06.2024; approved after reviewing 23.08.2024; accepted for publication 26.09.2024.

Об авторах:

Сырых Александр Сергеевич, аспирант кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий факультета прикладной математики, информатики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8326-3743>, zsryrhz@mail.ru

Медведев Сергей Николаевич, доцент кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий факультета прикладной математики, информатики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6971-5069>, s_n_medvedev@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Alexander S. Syryh, Postgraduate Student of the Chair of Mathematical Support of Computing Electronic Computers at Applied Mathematics, Informatics and Mechanics Faculty, Voronezh State University (1 University square, Voronezh 394018, Russian Federation), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8326-3743>, zsryrhz@mail.ru

Sergei N. Medvedev, Associate Professor of the Chair of Mathematical Support of Computing Electronic Computers, Applied Mathematics, Informatics and Mechanics Faculty, Voronezh State University (1 University square, Voronezh 394018, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6971-5069>, s_n_medvedev@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

