



К вопросу о точности и источниках ошибок, возникающих при моделировании человеческого лица стереофотограмметрическим методом

Т.Н. Скрыпицына¹✉, А.В. Уколова¹, Д.О. Дрыга²

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН),
Москва, Россия

✉ mola_mola@rambler.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Скрыпицына Т.Н., Уколова А.В., Дрыга Д.О. К вопросу о точности и источниках ошибок, возникающих при моделировании человеческого лица стереофотограмметрическим методом // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 1. С. 50–63. DOI:10.30533/GiA-2025-009.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА специализированная многокамерная фотоустановка, трехмерные модели лица, источники ошибок, оценка точности

АННОТАЦИЯ Многокамерные фотоустановки зарубежного производства для создания трехмерных моделей человеческого тела применяются в медицинских учреждениях для пластической хирургии и ортодонтии. Эти системы обеспечивают высокую точность, достигающую 0,5 мм, но их стоимость может быть значительной, что ограничивает их доступность для государственных медицинских учреждений. Такая высокая точность фотограмметрических технологий достигается за счет сенсоров, которые обеспечивают высокодетальную съемку, и строгих алгоритмов фотограмметрической обработки. При этом важная задача оценки формы лица для анализа его асимметрии до конца не решена. В статье представлен опыт разработки российской 15-камерной фотограмметрической системы, предназначенной для количественной оценки изменения формы лица человека. Проанализированы источники ошибок, которые неизбежно возникают при моделировании лица живого человека, рассчитан реальный диапазон ошибок, который следует ожидать при съемке специализированной многокамерной фотоустановкой. В результате определено, что точность, которую обеспечивает стереофотограмметрический метод, позволяет воспроизводить формы рельефа лица (с учетом нестатичности) с точностью, не превышающей 1,5 мм. Ошибка, которую вносит процесс приведения моделей в единую

систему координат первой модели, порядка 1,2–1,4 мм, а достоверно оценить динамику изменения лица можно, если изменения по высоте (выпуклость) не менее 5 мм. Эти результаты удовлетворяют потребностям клиницистов, но могут быть повышены за счет улучшения алгоритмов взаимного ориентирования моделей в единой системе координат.

1 Введение

Технологии создания трехмерных моделей лица с использованием многокамерных установок активно развиваются и находят широкое применение в различных областях, таких как медицина, анимация, безопасность и развлечения. Такие системы съемки позволяют получать высокоточные 3D-модели, которые могут использоваться, например, для диагностики, планирования хирургических операций, создания анимационных персонажей и даже в системах распознавания лиц [1–6].

Зарубежные компании, такие как 3dMD (США), Artec 3D (Люксембург), 3D VECTRA (США), являются лидерами в области разработки систем для получения 3D-изображений лица и тела. Установки 3dMD применяются в медицинских учреждениях для пластической хирургии и ортодонтии [3, 6–8]. Эти системы обеспечивают высокую точность, достигающую 0,5 мм, но их стоимость может быть значительной, что ограничивает их доступность для государственных медицинских учреждений. Artec 3D и 3D VECTRA предлагают решения для оптического 3D-сканирования, которые также находят применение в здравоохранении и промышленности, обеспечивая точность на уровне 0,1 мм, однако их стоимость тоже высока. Кроме того, достаточно сложно обеспечить сравнение результатов при длительном лечении [6, 9].

В России разработки в этой области представлены компанией Texel. Она производит 3D-сканеры для создания моделей лица и тела, применяемые в ритейле и виртуальных примерочных, с точностью около 1–2 мм, но не предлагает методы оценки биометрических параметров.

Высокая точность фотограмметрических технологий достигается за счет сенсоров, которые обеспечивают высокдетальную съемку, и строгих алгоритмов фотограмметрической обработки. При этом, однако, в медицине недостаточно простого внедрения высокотехнологичного оборудования — в данном направлении требуется реализация методов и алгоритмов количественной оценки получаемого результата моделирования. Очевидно, что многие процедуры в ходе диагностики и наблюдения сложных неврологических заболеваний, связанных, в частности, с параличом лицевых мышц, требуют сложной системы оценки изменения лица на протяжении длительного процесса лечения. Это выражается не только в измерении определенных ключевых точек в плоскости лица [6, 7, 9], но и в оценке рельефов лица в целом, в том числе и определении объемов отдельных частей лица.

Естественным является вопрос о точности методов такой оценки. Предлагаемые производителями съемочные системы имеют практически равнозначную точность построения моделей, которая является, безусловно, высокой и обеспечивается возможностью сенсоров и алгоритмов обработки сигнала. Но здесь не учтены методические ошибки, которые неизбежно будут возникать при сравнении моделей, а также случайные ошибки, вызванные принципиальной нестатичностью лицевых мышц.

Данное исследование является продолжением и усовершенствованием разработки многокамерной системы, описанной в [10]. Соответственно, в статье рассмотрены вопросы проектирования фотограмметрической установки, процесс калибровки системы, влияние методических и случайных ошибок на конечную точность фотограмметрического метода оценки лица по его трехмерной модели.

Представленная в статье многокамерная фотограмметрическая установка состоит из 15 цифровых камер и позволяет одновременно производить съемку

пациента, чем отличается от сканерных систем [11]. Использование обычных неметрических, цифровых фотокамер делает ее доступной с экономической точки зрения для широкого круга медицинских учреждений, удовлетворяя специфические потребности медицинской сферы, обеспечивая высокую точность и надежность получаемых данных при оптимальных затратах.

2 Материалы и методы

Специализированная многокамерная фотоустановка (СМФ) для съемки лиц предназначена для одномоментного получения с различных ракурсов высококачественных изображений, которые затем будут использоваться для построения трехмерных моделей лица и оценки асимметрии лица человека по этим моделям. При этом оцениваться должны как отдельные модели, так и результаты сравнений этих моделей. Соответственно, среднеквадратическая ошибка (СКО), с которой будет производиться оценка асимметрии (m_A) отдельной модели, будет определяться такими параметрами (1): СКО измерений, которую позволяет получить установка (m_{xy}, m_z), случайные ошибки, которые возникают при съемке живого лица (вариабельность) (m_v). А результаты сравнений моделей m_D (т. е. динамика изменений) будут еще отягощены систематическими ошибками, которые возникают при приведении всех моделей к единой системе координат (СК) первой модели (m_o). Общие формулы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} 1 \quad & m_A = \sqrt{m_{xy}^2 + m_z^2 + m_v^2}; \\ 2 \quad & m_D = \sqrt{m_{A1}^2 + m_{A2}^2 + m_o^2}. \end{aligned}$$

2.1 Расчет параметров установки

При расчете геометрических параметров СМФ учитывалось следующее. Во-первых, снимков должно быть необходимо и достаточно для того, чтобы фотограмметрическая модель получалась без так называемых мертвых зон. А это значит, что изображение любой части лица должно быть получено не менее трех раз. Во-вторых, ракурс снимка зависит от положения камеры на станине (раме) в момент фотографирования. В-третьих, определение необходимого количества снимков напрямую влияет на стоимость установки и ресурсы для обработки.

Для проектирования оптимальных параметров установки использовались методы моделирования съемки в Blender3D. Для расчета минимально необходимого количества снимков была использована формула угла конвергенции [12]

$$3 \quad \gamma = \frac{\Omega(100-p)}{100},$$

где Ω — центральный угол между направлениями в пределах «эффективного сектора»; p — требуемое перекрытие, которое примем за 60 %.

Угол Ω рассчитывается по формуле

$$4 \quad \Omega = 2[45^\circ - \arcsin(\sin 45^\circ R/D)],$$

где R — радиус головы, равный 200 мм; D — расстояние от точки фотографирования до центра головы, равное 700 мм.

Расчеты показали, что угол конвергенции должен составлять около 27° для одного маршрута съемки. При съемке в два маршрута угол увеличивается до 30° . Для съемки участка «от уха до уха» (150°) необходимо 5 камер на одном маршруте, 10 камер для двух маршрутов [10] или 15 камер для трех маршрутов.

2.2 Предрасчет точности измерений по снимкам, полученным с помощью СМФ

Для выполнения фотограмметрической обработки важно заранее оценить точность определения координат точек объекта. Предрасчет точности определения координат точек объекта был выполнен на основе теоретических формул и исходных данных. Точность определения координат объекта в пространстве стереофотограмметрическим способом зависит от базиса съемки (B), фокусного расстояния (f), угла конвергенции (γ), расстояния до объекта (D) и ошибки измерения координат и продольных параллаксов изображений точек на стереопаре снимков параметров ($m_{x,y} \times m_p$).

Для оценки точности используются следующие формулы [12]:

— СКО по глубине

$$5 \quad m_Z = \frac{m_p \times D}{B \sin \gamma};$$

— СКО в плане

$$6 \quad m_{X,Y} = \frac{m_{x,y} \times D}{f}.$$

Эти формулы основаны на геометрии треугольника, образованного базисом съемки, фокусным расстоянием и расстоянием до объекта, и показывают СКО фотограмметрической засечки при съемке конвергентным способом.

Существует еще одна методика для оценки точности по глубине и в плане в конвергентной съемке. В этой методике используется классическая формула предрасчета точности определения координат с добавлением коэффициента для конвергентного случая съемки $q = 0,5$. Этот коэффициент основан на исследованиях Д.А. Никишина [13] и других авторов, которые экспериментально установили, что точность по глубине и в плане в конвергентной съемке увеличивается в 1,5–2 раза.

Таким образом, формулы для расчета точности принимают следующий вид:

— СКО по глубине

$$7 \quad m_Z = \frac{D}{b} \cdot m_p \cdot q;$$

— СКО в плане

$$8 \quad m_{X,Y} = \frac{D}{f} \cdot m_{x,y} \cdot q.$$

Этот подход позволяет более точно оценить погрешности в конвергентной съемке, учитывая специфику данного метода.

2.3 Определение точности измерений по тест-объекту

Для контроля определенных параметров и определения реальной точности измерений, которые можно получить по снимкам и построенной модели, использовались съемки экспериментального тест-объекта — гипсовой головы с марками (рис. 1). На поверхности тест-объекта были размещены 35 двенадцатибитных кодированных маркеров, между которыми выполнили измерение 52 контрольных отрезков. Промеры выбирались как длинные (от 19 см), так и короткие (до 3 см), в вертикальном и горизонтальных направлениях. Измерения проводились с использованием электронного штангенциркуля. Для повышения точности были вычислены средние значения каждого отрезка.

Замаркированная гипсовая голова / The marked plaster head

Расположение контрольных промеров / The location of the reference dimensions

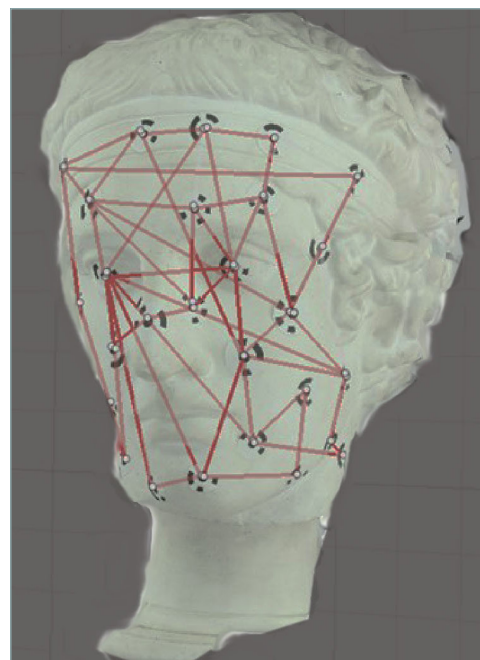


Рис. 1 ➔

Замаркированная гипсовая голова и расположение контрольных промеров на ней

Fig. 1

The marked plaster head and the location of the reference dimensions on the head

2.4 Способы приведения моделей к единой СК

Основной проблемой сравнительного анализа моделей лица является тот факт, что человек — это не гипсовый слепок, а динамичный объект. Это значит, что, во-первых, невозможно повторить позу пациента при пролонгированном мониторинге, во-вторых, требуется сравнивать лица при выполнении мимических упражнений (проб), в-третьих, отсутствует необходимое количество (три и более) устойчивых анатомических ориентиров на лице. В результате возникают ошибки, причиной которых являются линейные сдвиги и углы между моделями. Для минимизации этих погрешностей исследуемые модели серии приводятся к референсной модели. За референсную модель принимается модель лица пациента в спокойном состоянии первой серии съемок.

Существует три алгоритма для приведения всех моделей к единой СК.

Первый способ — по связующим точкам

Приведение в единую СК основано на сопоставлении связующих точек, извлеченных из изображений двух разновременных блоков. Алгоритм находит соответствия между точками из разных блоков, обычно выполняется путем определения разницы между двумя облаками точек (например, CloudtoCloud — C2C) для определения их местоположения и ориентации [14, 15]. После нахождения пар точек определяется трансформация, минимизирующая расхождения между ними. Методом Iterative Closest Point (ICP) осуществляют дальнейшую оптимизацию связи, уточняя положение блоков [16].

Второй способ — по опорным точкам

В этом методе используются опорные точки, которые измеряются на изображениях первой съемки. Алгоритм распознает эти точки на изображениях второй и последующих съемок и определяет их положение в 3D-пространстве. Затем присваивает им координаты референсной модели, рассчитывает параметры преобразования Гельмерта и пересчитывает координаты остальных точек [16].

Третий способ — по элементам внешнего ориентирования камер

Этот метод использует информацию о положении и ориентации камер, которые применялись для съемки. Алгоритм анализирует данные о расположении

камер и на основе этого определяет, как блоки изображений должны быть сориентированы относительно друг друга. Начальное приведение в единую СК по элементам внешнего ориентирования камер создает общее представление о сцене, после чего метод ИСР уточняет положение блоков.

Поскольку человек не способен воспроизводить одно и то же положение относительно стенда через значительный промежуток времени, начальное приближение работает неэффективно, что негативно сказывается на дальнейшем приведении данных в единую СК. Таким образом, данный метод не подходит для случая, когда положение объектов относительно центров проекций камер изменяется от съемки к съемке.

Для сравнения качества ориентирования в единую СК первым и вторым способами была проведена съемка одного человека (с надутыми щеками и в спокойном состоянии) дважды с промежутком в 30 дней. Полученные полигональные модели были ориентированы в СК первой модели первой съемки. Затем производилось вычитание для каждого из методов: из моделей второй серии съемок (24 — надуть щеки, 21 — спокойное состояние) вычитали соответствующие модели первой серии съемок (14 — надуть щеки, 11 — спокойное состояние). Разность определялась как кратчайшее расстояние между двумя моделями, нормали восстанавливались из референсной модели к поверхности сравниваемой модели.

3 Результаты и обсуждение

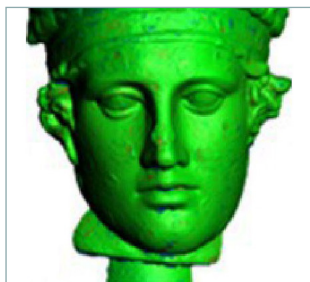
На этапе проектирования при выборе расположения камер производилась оценка качества построения моделей по гипсовому слепку. Анализировалось качество построения моделей при разных комбинациях маршрутов камер. Все фотограмметрические процессы обработки производились в ПО Agisoft Metashape Pro. При использовании всех трех рядов камер модель отображает все участки лица с равномерной плотностью сетки треугольников, чего нет при съемке только двумя рядами. Тем не менее использование только двух нижних рядов камер возможно для анализа нижней области лица, что важно при лечении (в том числе оперативном) челюстных заболеваний. Если использовать два верхних ряда камер, соответственно, получаются удовлетворительные результаты для верхней части лица, но в области подбородка образуются мертвые зоны (рис. 2).

Сравнение моделей показало, что среднеквадратичное отклонение расстояний между поверхностями моделей, построенных по двум и трем маршрутам, не превышает 0,2 мм, но расхождения в области подбородка достигают 3 мм при съемке только двумя верхними маршрутами (рис. 2).

С точки зрения времени обработки использование трех маршрутов требовало больше времени на обработку снимков до построения модели и ортофотоплана, чем использование двух маршрутов. Несмотря на небольшие различия в геометрических параметрах моделей и явное преимущество в скорости обработки (обработка двух маршрутов на 172 % быстрее), плотность триангуляционной

Рис. 2 
Построенные модели
Fig. 2
Built models

По двум верхним маршрутам /
By two upper routes



По верхнему и нижнему
маршрутам / By upper and lower
routes



По двум нижним маршрутам /
By two lower routes



По двум верхним маршрутам, вид
снизу / By two upper routes, bottom
view

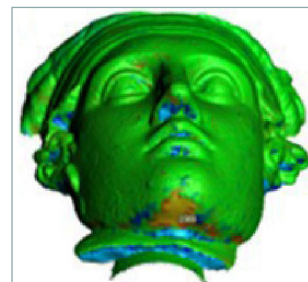


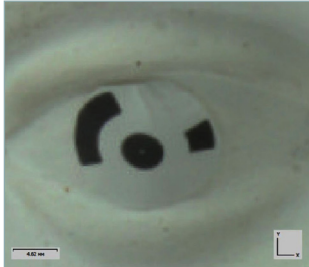
Рис. 3 ✓

Фрагменты ортофотоплана

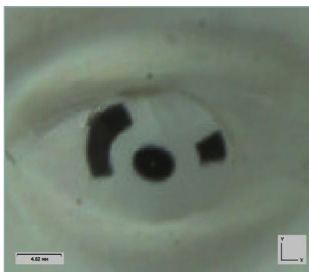
Fig. 3

Fragments of the orthophoto

Фрагмент, построенный
по 15 изображениям / Fragment
of the orthophoto constructed from
15 images



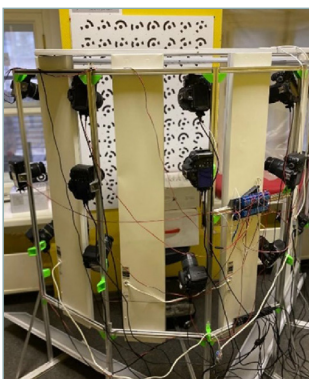
Фрагмент, построенный
по 10 изображениям / Fragment
of the orthophoto constructed from
10 images

**Рис. 4** ✓

Специализированная
многофункциональная
фотограмметрическая
установка

Fig. 4

Specialised multifunctional
photogrammetric installation



модели и размеры пикселей цифровой модели поверхности и ортофотоплана различаются. Размер пикселя составляет 0,19 мм для ортофотоплана, построенного по 15 снимкам, и 0,21 мм для ортофотоплана, построенного по 10 снимкам. При таком незначительном различии качество ортофотоплана, построенного по 10 снимкам, ниже, что заметно невооруженным глазом (рис. 3). Для визуального анализа текстуры лица это имеет значение.

В связи с этим для создания моделей было решено использовать все три ряда камер, что позволяет минимизировать мертвые зоны и повысить плотность триангуляции и качество ортофотоплана. В итоге была создана СМФ, которая представляет собой жесткую раму в форме полуцилиндра с радиусом 700 мм (рис. 4). На этой раме установлены 15 цифровых фотографических камер Canon EOS 550D и осветительное оборудование. Камеры имеют размер сенсора 5184×3456 пикселей, фокусное расстояние $f = 55$ мм и физический размер пикселя 0,0043 мм. Номинальный размер пикселя составляет $d = 0,06$ мм. В качестве источников освещения используются 12 светодиодных панелей, которые обеспечивают равномерное освещение всего объекта съемки и поддерживают фиксированную цветовую температуру для стабильности цветопередачи.

Управление процессом фотографирования осуществляется через группу реле, что позволяет точно синхронизировать время получения изображений. Это решение предпочтительнее по сравнению с программами удаленного управления, использующими USB-протокол, поскольку оно обеспечивает минимальную погрешность времени экспонирования (не более 1/100 секунды). Такая организация съемки исключает влияние неконтролируемой работы мимических мышц на разных снимках.

Для предварительной оценки точности конвергентной съемки были использованы следующие исходные данные. Расстояние D до объекта съемки (головы пациента) определяется как разность между радиусом установки камеры и средним радиусом головы человека. Радиус установки — 700 мм. Средний радиус головы рассчитывается на основе окружности: для мужчин он равен 560 мм (что соответствует радиусу примерно 89 мм), а для женщин — 540 мм (радиус — около 86 мм). В итоге средний радиус головы взрослого человека составляет примерно 87,5 мм. Таким образом, расстояние до объекта съемки вычисляется как $700 \text{ мм} - 87,5 \text{ мм} = 612,5 \text{ мм}$. Округляя, получаем значение $D = 613 \text{ мм}$.

Базис съемки $B = 385 \text{ мм}$, угол конвергенции $\gamma = 30^\circ$, СКО координат и продольных параллаксов изображений точек на стереопаре снимков 0,5 пикселя, или 0,03 мм.

СКО определения координат рассчитывалась по формулам (5), (6): $m_z = 0,95 \text{ мм}$, $m_{x,y} = 0,1 \text{ мм}$; по формулам (7, 8): $m_z = 0,53 \text{ мм}$, $m_{x,y} = 0,1 \text{ мм}$.

Расчеты показывают, что по изображениям СМФ можно получить измерения в пределах 1 мм по глубине и на порядок точнее в плане, что сопоставимо с отечественными и зарубежными аналогами.

Точность тестовой модели оценивалась по измерениям 52 контрольных отрезков, выполненных по фотограмметрической (монокулярно по снимкам) и полигональной моделям, чтобы оценить также влияние интерполяции на результат измерений. СКО на отрезках составила 1,0 мм для фотограмметрической модели и 0,96 мм для полигональной модели, что можно считать равнозначными измерениями. Полученные таким образом результаты соответствуют предварительным расчетам.

3.1 Определение диапазона случайных ошибок, вызванных принципиальной нестатичностью (вариабельностью) человеческого лица

Данное исследование было произведено ранее и подробно описано в [10]. Отметим методику определения нестатичности лицевых мышц и результат, который необходимо использовать в настоящем исследовании.

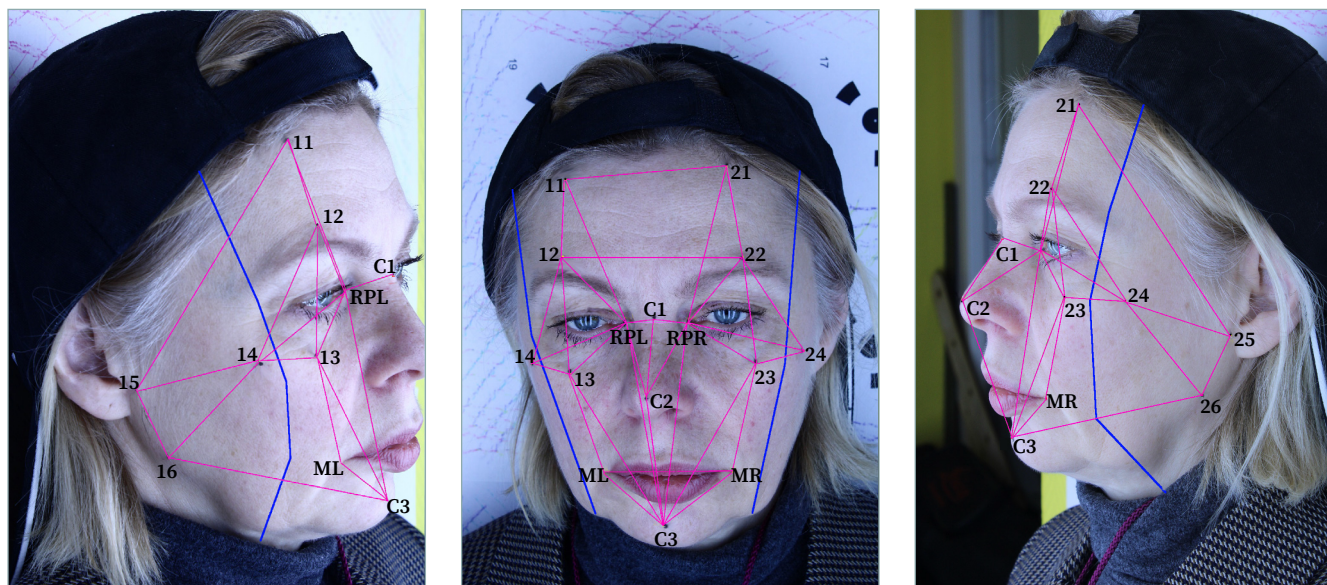


Рис. 5 ▲

Расположение маркированных точек и контрольных отрезков на лице (фронтальная область лица выделена синими линиями) [10]

Fig. 5

Location of labelled points and control segments on the face (the facial frontal region is highlighted by blue lines) [10]

На лице были выбраны 19 точек (замаркированные и естественные контуры), по координатам которых были вычислены 44 отрезка (рис. 5). Всего было проведено 10 съемок с временными промежутками. Вариабельность определялась посредством сравнения длин 44 отрезков по моделям лица. Положение отрезков выбиралось путем изучения подобных исследований [9, 17, 18]. За референсную была принята первая модель из серии.

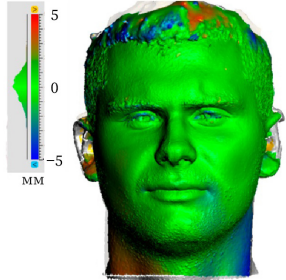
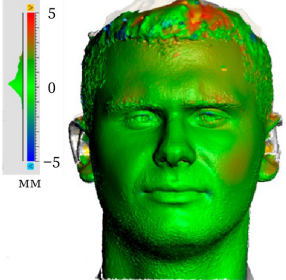
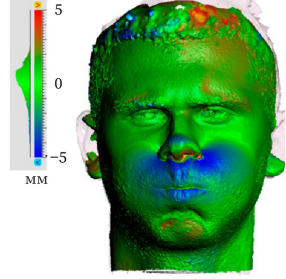
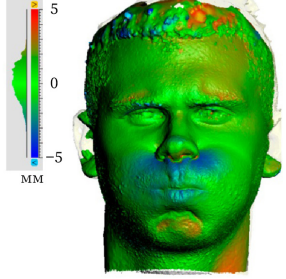
При анализе контрольных отрезков между маркированными точками были выявлены устойчивые и неустойчивые части лицевых мышц. Полученные данные индивидуальны, однако они согласуются с подобными зарубежными исследованиями [6, 9]. СКО определения вариабельности составила 0,47 мм.

3.2 Определение систематических ошибок, вызванных приведением моделей к единой СК

Обнаружение изменений обычно выполняется путем определения разницы между двумя облаками точек (C2C), либо между двумя ЦМР (DoD — DEMsofdifference), либо между двумя моделями (M3C2) [14]. M3C2 и DoD являются предпочтительными методами для определения изменения высоты и объемных изменений соответственно. Однако методы DoD могут оказаться неспособными правильно отобразить участки с крутым рельефом (например, область носа или подбородка), что и было выявлено в работе [10]. Поэтому для определения качества ориентирования был использован M3C2, который стал стандартным методом оценки топографических изменений, поскольку был специально разработан для применения на сложных участках.

В табл. 1 представлены результаты сравнения моделей, которые были приведены в единую СК двумя способами: по опорным точкам и по связующим точкам. СКО разностей моделей составляют 1,4 мм, 1,2 мм, 1,3 мм и 1,1 мм соответственно. Оба метода, по данным статистики, имеют практически одинаковые результаты. Но очевидна визуальная разница распределения этих ошибок, которая выявляет слабость способа «по связующим точкам» с точки зрения приведения моделей в единую СК. Так, при ориентировании модели 21 относительно 11 присутствует систематическая ошибка лица: в табл. 1 эти расхождения выделены оранжевым цветом на лбу и щеке модели (см. результат приведения в единую СК по связующим точкам). Это связано с неопределенностью нахождения соответственных точек на разных моделях, которое зависит от исходных элементов внешнего ориентирования и от плотности точек на каждой модели [15] при использовании метода C2C при совмещении облаков.

Таблица 1 ➔
Результаты приведения
трехмерных моделей
в единую СК
Table 1
Results of adjustment of three-
dimensional models into a single
coordinate system

	По опорным точкам	По связующим точкам
21–11	СКО 1,2 мм 	СКО 1,1 мм 
24–14	СКО 1,4 мм 	СКО 1,3 мм 

Поэтому при сравнении разновременных моделей рекомендуется использовать алгоритмы ориентирования, основанные на использовании опорных ориентиров. Для расчетов общей ошибки будем использовать СКО, вычисленную для моделей, ориентированных по опорным точкам.

В соответствии с выполненными исследованиями вычислим оценку точности стереофотограмметрического метода определения асимметрии лица человека. СКО измерений по отдельной трехмерной модели лица человека составляет

9 ➔
$$m_f = \sqrt{m_{xyz}^2 + m_v^2} = 1,1 \text{ мм.}$$

Общая СКО определений при сравнении разновременных, но приведенных к единой СК моделей (m_D) вычисляется по формуле (2) и составляет порядка 2 мм; максимальная величина, равная $2\text{СКО} = 4 \text{ мм}$.

Ошибка по высоте, вызванная погрешностями ориентирования, приводит к ошибочным результатам в плановом положении изменений, что можно увидеть в табл. 1 при сравнении моделей с надутыми щеками. Очевидны различия в площадях изменений (синий цвет на модели).

В работе [14] для оценки изменений в рельефе применяется параметр LoD (Level of Detection), так называемый уровень обнаружения, который может быть вычислен по формуле

10 ➔
$$LoD_{95} = t \left(\sqrt{m_{f1}^2 + m_{f2}^2} + reg \right),$$

где t — значение доверительного интервала;
 m_{f1} и m_{f2} — СКО для двух моделей;
 reg — потенциальное систематическое смещение.

Значения LoD обычно рассчитываются для 95-процентного уровня доверия, для которого, согласно t -распределению, $t = 1,96$. Смысл этого параметра в том, что изменения, меньшие, чем заданный LoD , могут быть проигнорированы. Поскольку модели строятся по единой технологии и одинаковыми датчиками, то $m_{A1} = m_{A2}$. Учитывая остаточную систематическую ошибку приведения в единую СК, $LoD \approx \pm 5 \text{ мм}$. Таким образом, для визуализации изменений рельефа по разницам моделей лица рекомендуется выбирать шаг измерений в 5 мм.

4 Выводы

Исследование имело своей целью, во-первых, рассчитать параметры СМФ для получения трехмерных моделей лица живого человека, во-вторых, определить источники ошибок, которые неизбежно возникают при моделировании лица живого человека при пролонгированном лечении, и на основе этих определений рассчитать реальный диапазон ошибок, ожидаемый при съемке СМФ. Основные результаты следующие:

1. Высокая точность, которую обеспечивает стереофотограмметрический метод, позволяет воспроизводить формы рельефа лица (с учетом нестатичности) с точностью, не превышающей 1,5 мм.
2. Основным источником ошибок при сравнительном анализе разновременных моделей являются остаточные угловые элементы, возникающие при ориентировании моделей в СК первой модели. Очевидно, что имеющиеся алгоритмы автоматического взаимного ориентирования моделей по связующим точкам, которые имеются в ПО Agisoft Metashape Pro, недостаточно качественно рассчитывают параметры трансформирования. Величина этих ошибок соразмерна точности модели, т. е. составляет порядка 1,2–1,4 мм.
3. На данный момент исследований достоверно оценить динамику изменения лица по разностям моделей можно, если изменения по высоте (выпуклость) не менее 5 мм.

Несмотря на то, что и такие результаты удовлетворяют потребностям клиницистов, их можно улучшить дополнительными алгоритмами уточнения по естественным устойчивым ориентирам. Отдельной задачей является приведение в соответствие измерений по моделям и привычных медицинских показателей и индексов.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ряховский А.Н., Левицкий В.В. Система 3D-визуализации лица и зубных рядов // Панорама ортопедической стоматологии. 2008. № 1. С. 2–4.
2. Кожевникова М.И., Михайлов А.П., Скрыпицына Т.Н. и др. Визуализация рельефа тела человека методом стереофотограмметрии и количественная оценка его параметров // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2012. Т. 154. № 10. С. 525–528.
3. Ort R., Metzler P., Kruse AL., et al. The Reliability of a Three-Dimensional Photo System- (3dMDface-) Based Evaluation of the Face in Cleft Lip Infants // Plastic Surgery International. 2012. 138090. DOI:10.1155/2012/138090.
4. Небаба С.Г., Захарова А.А. Применение алгоритма формирования индивидуальной трехмерной модели человеческого лица в системе распознавания личности по изображению лица // Сборник трудов 26-й Международной конференции GraphiCon2016 (Нижний Новгород, 19–23 сентября 2016 г.). Н. Новгород: ИФТИ, ННГАСУ, 2016. С. 310–313.
5. Pesce M., Galantucci L.M., Lavecchia F.A. 12-camera body scanning system based on close-range photogrammetry for precise applications // Virtual and Physical Prototyping. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 49–56. DOI:10.1080/17452759.2015.1101872.
6. Othman S.A., Saffai L., Wan Hassan W.N. Validity and reproducibility of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for the maxillofacial anthropometric measurement on cleft patients // Clinical Oral Investigations. 2020. Vol. 24. P. 2853–2866. DOI:10.1007/s00784-019-03150-1.
7. Zhuang J., Ma H., Wang C., et al. Applying 3D scanning to evaluate facial symmetry in Asian populations // Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery. 2024. Vol. 99. P. 11–17. DOI:10.1016/j.bjps.2024.09.025.
8. Nord F., Ferjencik R., Seifert B., et al. The 3dMD photogrammetric photo system in craniomaxillofacial surgery: Validation of interexaminer variations and perceptions // Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery. 2015. Vol. 43. No. 9. P. 1798–1803. DOI:10.1016/j.jcms.2015.08.017.
9. Savoldelli C., Benat G., Castillo L., et al. Accuracy, repeatability and reproducibility of a handheld three-dimensional facial imaging device: the Vectra H1 // Journal

- of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery. 2019. Vol. 120. No. 4. P. 289–296. DOI:10.1016/j.jormas.2019.03.012.
10. Скрыпицына Т.Н., Дрыга Д.О., Журкин И.Г. и др. Особенности применения и оценка точности фотограмметрического метода в доказательной медицине // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 4. С. 32–44. DOI:10.30533/GiA-2023-019.
 11. Shah P.B., Luximon Y. Review on 3D scanners for head and face modeling // Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management: Ergonomics and Design: Proceedings of 8th International Conference (Vancouver, BC, Canada, July 9–14, 2017). Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 47–56. DOI:10.1007/978-3-319-58463-8_5.
 12. Дрыга Д.О. Разработка методики съемки объектов культурного наследия для информационных систем музеев Российской Федерации: дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 138 с.
 13. Никишин Д.А. Разработка и исследование методов цифровой наземной стереофотограмметрической съемки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 159 с.
 14. Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z) // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. P. 10–26. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
 15. James M.R., Robson S., Smith M.W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys // Earth Surface Processes and Landforms. 2017. Vol. 42. No. 12. P. 1769–1788. DOI:10.1002/esp.4125.
 16. Маковецкий А.Ю., Воронин С.М., Тихоньких Д.В. и др. Точные решения вариационной задачи алгоритма ICP в классе аффинных преобразований // Челябинский физико-математический журнал. 2017. Т. 2. № 3. С. 282–294.
 17. Sforza C., Dellavia C., Rosati R., et al. Three-dimensional facial morphometry: from anthropometry to digital morphology // Handbook of Anthropometry: Physical Measures of Human Form in Health and Disease. Springer. 2012. P. 611–624. DOI:10.1007/978-1-4419-1788-1_32.
 18. Zhou S., Xiao S. 3D face recognition: a survey // Human-centric Computing and Information Sciences. 2018. Vol. 8. No. 35. P. 1–27. DOI:10.1186/s13673-018-0157-2.

АВТОРЫ Скрыпицына Татьяна Николаевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра фотограмметрии, геодезический факультет
канд. техн. наук, доцент
 0000-0003-4964-9196

Уколова Алина Владимировна

 gapizer@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра фотограмметрии, геодезический факультет
 0000-0002-4836-6605

Дрыга Данила Олегович

 dryga_do@pfur.ru
ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
Москва, Россия
кафедра механики и процессов управления, Инженерная академия
канд. техн. наук
 0000-0003-0557-2481

Поступила 20.01.2025. Принята к публикации 21.02.2025. Опубликовано 28.02.2025.



To the question of accuracy and sources of errors appeared at modelling of a human face by stereophotogrammetric method

Tatyana N. Skrypitsyna¹✉, Alina V. Ukolova¹, Danila O. Dryga²

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

✉ mola_mola@rambler.ru

CITATION Skrypitsyna TN, Ukolova AV, Dryga DO. To the question of accuracy and sources of errors appeared at modelling of a human face by stereophotogrammetric method. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(1): 50–63. DOI:10.30533/GiA-2025-009.

KEYWORDS specialized multifunctional photographic installation, three-dimensional facial models, accuracy estimation, variability

ABSTRACT Multicamera photographic systems for creating three-dimensional models of the human body produced abroad are used in medical institutions for plastic surgery and orthodontics. These systems provide high accuracy up to 0.5 mm, but the cost of such solutions can be significant, which limits their availability for public medical centres. This high accuracy of photogrammetric technologies is achieved by sensors that provide highly detailed imaging and rigorous photogrammetric processing algorithms. At the same time, the important task of face shape estimation to analyse its asymmetry is not fully solved. The paper presents the experience of developing a 15-camera photogrammetric system designed for quantitative estimation of human face shape changes. The sources of errors, which inevitably occur when modelling the face of a living person, have been analysed, the real range of errors, which should be expected when shooting with a specialised multicamera photographic systems, has been calculated. As a result, it was determined that the accuracy provided by the stereophotogrammetric method allows to reproduce the facial relief forms (taking into account the variability) with an accuracy not exceeding 1.5 mm. The error introduced by the process of bringing the models into a coherence system of coordinates of the first model is of the order of 1.2–1.4 mm, and the dynamics of facial changes can be reliably assessed if the changes in height (convexity) are not less than 5 mm. These results meet the needs of clinicians, but can be improved by improving the algorithms of mutual orientation of models into a coherence system of coordinates.

REFERENCES

1. Ryakhovsky AN, Levitsky VV. Sistema 3D-vizualizacii licaizubnyhrjadov [System of 3D-visualisation of a face and dental rows]. *Panorama of orthopaedic stomatology*. 2008;1: 2–4. (In Russian).
2. Kozhevnikova MI, Mikhailov AP, Skrypitsyna TN, et al. Vizualizacija rel'efa tela cheloveka metodom stereofotogrammetrii i kolichestvennaja ocenka ego parametrov [Visualisation of human body relief by stereophotogrammetry and quantitative assessment of its parameters]. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2012;154(10): 525–528. (In Russian).
3. Ort R, Metzler P, Kruse AL, et al. The Reliability of a Three-Dimensional Photo System- (3dMDface-) Based Evaluation of the Face in Cleft Lip Infants. *Plastic Surgery International*. 2012: 138090. DOI:10.1155/2012/138090.
4. Nebaba SG, Zakharova AA. Primenenie algoritma formirovaniya individual'noj trehmernoj modeli chelovecheskogo lica v sisteme raspoznavaniya lichnosti po izobrazheniju lica [Application of the algorithm of formation of individual three-dimensional model of human face in the system of personality recognition by face image]. *Proceedings of the 26th International Conference GraphiCon 2016 (Nizhny Novgorod, September 19–23, 2016)*. Nizhny Novgorod: IFTI, NNGASU; 2016: 310–313. (In Russian).
5. Pesce M, Galantucci LM, Lavecchia FA. 12-camera body scanning system based on close-range photogrammetry for precise applications. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016;11(1): 49–56. DOI:10.1080/17452759.2015.1101872.
6. Othman SA, Saffai L, Wan Hassan WN. Validity and reproducibility of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for the maxillofacial anthropometric measurement on cleft patients. *Clinical Oral Investigations*. 2020;24: 2853–2866. DOI:10.1007/s00784-019-03150-1.
7. Zhuang J, Ma H, Wang C, et al. Applying 3D scanning to evaluate facial symmetry in Asian populations. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*. 2024;99: 11–17. DOI:10.1016/j.bjps.2024.09.025.
8. Nord F, Ferjencik R, Seifert B, et al. The 3dMD photogrammetric photo system in craniomaxillofacial surgery: Validation of interexaminer variations and perceptions. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 2015;43(9): 1798–1803. DOI:10.1016/j.jcms.2015.08.017.
9. Savoldelli C, Benat G, Castillo L, et al. Accuracy, repeatability and reproducibility of a handheld three-dimensional facial imaging device: the Vectra H1. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*. 2019;120(4): 289–296. DOI:10.1016/j.jormas.2019.03.012.
10. Skrypitsyna TN, Dryga DO, Zhurkin IG, et al. Osobennosti primeneniya i ocenka tochnosti fotogrammetricheskogo metoda v dokazatel'noj medicine [Specifics of application and accuracy assessment of the photogrammetric method in evidence-based medicine]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(4): 32–44. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-019.
11. Shah PB, Luximon Y. Review on 3D scanners for head and face modeling. Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management: *Ergonomics and Design: Proceedings of 8th International Conference (Vancouver, BC, Canada, July 9–14, 2017)*. Cham: Springer International Publishing; 2017: 47–56. DOI:10.1007/978-3-319-58463-8_5.
12. Dryga DO. *Razrabotka metodiki s''emki ob''ektov kul'turnogo nasledija dlja informacionnyh sistem muzeev Rossijskoj Federacii* [Development of the methodology of surveying the objects of cultural heritage for the information systems of museums of the Russian Federation] [dissertation]. Moscow, 2020. 138 p. (In Russian).
13. Nikishin DA. *Razrabotka i issledovanie metodov cifrovoj nazemnoj stereofotogrammetricheskoy s''emki* [Development and research of the methods of digital ground stereophotogrammetric surveying] [dissertation]. Moscow, 2004. 159 p. (In Russian).
14. Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013;82: 10–26. DOI:1156 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
15. James MR, Robson S, Smith MW. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control

- and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017;42(12): 1769–1788. DOI:10.1002/esp.4125.
16. Makovetsky AYu, Voronin SM, Tikhon'kikh DB, et al. Tochnye reshenija variacionnoj zadachi algoritma ICP v klasse affinnyh preobrazovanij [Exact solutions of the variational problem of the ICP algorithm in the class of affine transformations]. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2017;2(3): 282–294. (In Russian).
 17. Sforza C, Dellavia C, Rosati R, et al. Three-dimensional facial morphometry: from anthropometry to digital morphology. *Handbook of Anthropometry: Physical Measures of Human Form in Health and Disease*. Springer, 2012. 611–624. DOI:10.1007/978-1-4419-1788-1_32.
 18. Zhou S, Xiao S. 3D face recognition: a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2018;8(35): 1–27. DOI:10.1186/s13673-018-0157-2.

AUTHORS**Tatyana N. Skrypitsyna**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Photogrammetry Department, Faculty of Geodesy
 PhD in Engineering, Associate Professor
 0000-0003-4964-9196

Alina V. Ukolova

 gapizer@mail.ru
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Photogrammetry, Faculty of Geodesy
 0000-0002-4836-6605

Danila O. Dryga

 dryga_do@pfur.ru
 Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
 Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering
 PhD in Engineering
 0000-0003-0557-2481

Submitted: January 20, 2025. Accepted: February 21, 2025. Published: February 28, 2025.