

## Особенности автоматизации боди-сканирования на базе фотограмметрии

*А.Г. Кузьмин*

*РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва*

**Аннотация:** Исследование посвящено анализу современных подходов к организации процессов боди-сканирования с применением фотограмметрических технологий. Рассматриваются различные методы цифровой реконструкции человеческого тела, включая ручные и роботизированные системы сканирования. Проведен сравнительный анализ точности измерений, качества текстур и временных характеристик различных подходов. Особое внимание уделено вопросам жесткости конструкций сканирующих систем и их влиянию на качество получаемых трехмерных моделей. Результаты показывают превосходство специализированных ручных сканеров над фотограмметрическими методами по точности, но большую универсальность последних в различных условиях применения.

**Ключевые слова:** фотограмметрия, трехмерное сканирование, цифровая реконструкция, точность измерений, жесткость конструкции, роботизированные системы.

### Введение

Трехмерное сканирование человеческого тела представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной компьютерной графики и цифрового моделирования. Данная технология находит широкое применение в медицине, антропологии, индустрии моды, кинематографе, игровой индустрии и судебной экспертизе. Развитие методов цифровой реконструкции человеческого тела обусловлено растущей потребностью в точных антропометрических данных, персонализированном медицинском обслуживании и создании реалистичных цифровых аватаров.

В отечественной научной литературе вопросы боди-сканирования на основе фотограмметрии освещены крайне фрагментарно, что создает значительный пробел в понимании современных технологических решений. Большинство российских исследований сосредоточены на общих принципах фотограмметрии без специализации на задачах сканирования человеческого тела. В противоположность этому, зарубежная научная литература

демонстрирует активное развитие данного направления с множественными техническими решениями и детальной проработкой методологических подходов.

Характерными примерами зарубежных исследований являются работы "Mechatronic Design and Experimental Research of an Automated Photogrammetry-Based Human Body Scanner", которая описывает комплексное техническое решение для роботизированного сканирования, и "Virtobot - A Robot System for Optical 3D-Scanning in Forensic Medicine", представляющая специализированную систему для судебно-медицинских целей. Исследование "A consistent methodology for forensic photogrammetry scanning of human remains using a single handheld DSLR-camera" раскрывает методологические аспекты применения обычных цифровых камер для решения специализированных задач, а работа "Advanced 3D-body scanning techniques and its clinical applications" демонстрирует медицинские применения современных технологий сканирования.

Современные методы боди-сканирования можно классифицировать по нескольким критериям: принципу действия (контактные и бесконтактные), типу используемых датчиков (оптические, лазерные, структурированного света), степени механизации процесса (ручные, полуавтоматические, роботизированные) и областям применения (медицинские, антропометрические, развлекательные, судебные). Каждый из подходов обладает специфическими преимуществами и ограничениями, что определяет целесообразность их использования в конкретных условиях.

Фотограмметрический подход к боди-сканированию привлекает исследователей своей относительной доступностью и универсальностью. Использование одной цифровой камеры с механизированным перемещением и специализированного программного обеспечения позволяет создавать качественные трехмерные модели без привлечения дорогостоящих

---

многокамерных установок [1]. Данный метод сталкивается с рядом технических ограничений, связанных с необходимостью точной калибровки системы позиционирования, обеспечения стабильности освещения и минимизации движений объекта во время съемки.

Критическим аспектом успешной реализации фотограмметрических систем с подвижной камерой является обеспечение механической стабильности установок. Жесткость конструкций, точность позиционирования камеры и устойчивость к внешним воздействиям прямо влияют на качество получаемых результатов. Системы с вертикальным перемещением и вращением особенно требовательны к точности механических компонентов, поскольку любые отклонения в траектории движения камеры могут приводить к искажению геометрии получаемых моделей.

Актуальность данного исследования определяется необходимостью систематизации современных подходов к боди-сканированию, выявления их сильных и слабых сторон, а также формулирования рекомендаций по выбору оптимальных технических решений для конкретных задач. Растущие требования к точности и скорости получения трехмерных моделей человеческого тела в различных областях применения делают данную тематику особенно значимой для российского научного сообщества.

### **Результаты и обсуждения**

Целью настоящего исследования является проведение комплексного анализа особенностей организации процессов боди-сканирования на основе фотограмметрии с акцентом на сравнительную оценку различных технических решений и изучение влияния жесткости конструкций на качество получаемых трехмерных моделей.

Для проведения сравнительного анализа были исследованы три основных подхода к трехмерному сканированию: ручное сканирование с использованием устройства Creality CR-Scan, фотограмметрическая обработка с применением программного обеспечения Agisoft Metashape и инфракрасной (ИК) метод с использованием программы KScan3D на базе сенсоров Kinect 360 [2]. Ручное сканирование предполагает применение портативного ручного сканера Creality CR-Scan, который отличается высокой точностью до 0,1 мм и разрешением трехмерного моделирования 0,16 мм. Устройство подходит даже для начинающих пользователей, обеспечивая плавное сканирование со скоростью до 30 кадров в секунду. Принцип работы основан на технологии структурированного света, что позволяет получать детализированные модели в режиме реального времени.

Разработанная фотограмметрическая установка представляет собой принципиально новый подход к организации процесса сканирования, основанный на использовании одной камеры высокого разрешения с механизированной системой позиционирования. В отличие от традиционных многокамерных систем, требующих создания сложных клеточных конструкций с множественными точками съемки, данное решение обеспечивает полноценное сканирование посредством контролируемого перемещения единственной камеры.

Принцип работы установки основан на двухосевой системе позиционирования, включающей вертикальное перемещение камеры по направляющим и её вращение вокруг сканируемого объекта. Вертикальная ось позволяет охватить полную высоту человеческого тела, обеспечивая получение изображений с различных уровней от головы до стоп [3].

Зеркальная цифровая камера производит определенное количество снимков с заданным временным интервалом между кадрами. Функция автозатвора реализована на базе микроконтроллера Arduino Nano и

---

настраивается в соответствии со скоростью вращения камеры вокруг объекта 3D-сканирования.

Движение камеры осуществляется по линейной направляющей и приводится в действие шаговым двигателем при помощи зубчатого ремня. Управление перемещением осуществляется микроконтроллером Arduino Uno. Скорость перемещения задана в исполнительном коде и может быть настроена при помощи органов управления.

Горизонтальное вращение камеры вокруг объекта на 360 градусов гарантирует полное покрытие всех ракурсов без образования слепых зон [4]. Консоль, с закрепленной камерой, вращается ремнем и аналогичным шаговым двигателем NEMA большей мощности (Рисунок 1). Управление осуществляется ШИМ-модулятором, в который интегрирован экран и органы управления мощностью и частотой вращения.



Рис. 1. – Общий вид системы боди-сканирования

Механизированная система позиционирования обеспечивает высокую повторяемость траектории движения камеры, что критически важно для получения качественных результатов фотограмметрической обработки. Программируемый контроллер движения позволяет задавать точные координаты съемочных позиций, угловые интервалы поворота и скорость

перемещения, что обеспечивает оптимальное перекрытие между соседними кадрами. В рамках экспериментального исследования было выполнено 285 фотографий с различных позиций, равномерно распределенных по высоте и углу обзора [5]. Данное количество снимков было определено как оптимальное для получения качественной трехмерной реконструкции при заданных параметрах установки и требованиях к детализации модели.

Система KScan3D представляет компромиссное решение на базе анализа в ИК-спектре с дополнительными алгоритмами обработки данных. Данный подход направлен на удобство и простоту получения итоговых моделей при сохранении приемлемого времени обработки.

Оценка качества сканирования проводилась по нескольким критериям: четкость получаемых моделей, качество передачи текстур, схожесть с реальным объектом, временные затраты на весь процесс сканирования и обработки, характеристики полигональной сетки и присутствие артефактов. Особое внимание уделялось анализу влияния механической стабильности сканирующих систем на конечный результат [6].

Качество передачи текстур также демонстрирует существенные различия между методами. Ручной сканер Creality обеспечивает практически полную передачу текстурной информации (100%), в то время как фотограмметрическая система с одной подвижной камерой характеризуется размытыми и нечеткими текстурами. KScan3D показывает промежуточные результаты с эффективностью 80-90%, что можно объяснить гибридным характером используемых алгоритмов обработки.

Проведенный сравнительный анализ программ 3D-сканирования и соответствующих им технологий оцифровки поверхности объектов выявил существенные различия между исследуемыми методами сканирования. Детальные результаты экспериментального исследования качества трёхмерного сканирования представлены в таблице 1.

---

Таблица №1

Сравнительная характеристика методов сканирования

Параметры	Creality Scan	Agisoft	KScan3D
Четкость сканирования	В среднем от 80 до 90%, в зависимости от качества выполнения сканирования	Около 50–60%, при использовании 285 фотографий, модель низкого качества	От 60 до 70%, имеет достаточное количество артефактов
Текстуры	Текстуры передаются полностью, на 100%	Текстуры достаточно размытые, не особо четкие	Текстуры передаются на 80-90%
Схожесть с реальным объектом	Очень близка	Среднее сходство	Сходство реалистичное
Время, занимаемое на весь процесс	20-25 мин.	45 мин.	30 мин.
Модель	Четкая и детализированная модель	Большое количество артефактов и дефектов	Гладкая модель, низкая детализация мелких элементов
Полигоны	Распределены равномерно	Расположены неравномерно, разного размера	Расположены неравномерно, большое количество



Система Creality Scan продемонстрировала наивысшие показатели четкости сканирования в диапазоне 80-90%, что значительно превышает результаты фотограмметрического подхода с механизированной камерой Agisoft (50-60%) и гибридной системы KScan3D (60-70%). Данное превосходство обусловлено использованием специализированных оптических датчиков и технологии структурированного света, обеспечивающих высокую точность измерений в режиме реального времени.

Разработанная система фотограмметрического сканирования с одной камерой демонстрирует как преимущества, так и ограничения по сравнению с традиционными многокамерными установками. Основным преимуществом является значительное упрощение конструкции и снижение стоимости оборудования. Отсутствие необходимости в синхронизации множественных камер исключает сложности с калибровкой и настройкой системы.

Механизированное перемещение камеры по заданной траектории обеспечивает высокую повторяемость процесса сканирования. Программируемый контроллер позволяет точно воспроизводить условия съемки для различных объектов, что критически важно для получения сопоставимых результатов. Вертикальное перемещение в диапазоне от 0,5 до 2,0 метров позволяет охватить практически любую антропометрическую вариацию роста человека.

Однако, данный подход имеет существенные ограничения, связанные с увеличением времени сканирования. Последовательное получение 285 кадров с различных позиций требует значительно меньше времени (3 минуты), по сравнению с одновременной съемкой множественными камерами. Это создает дополнительные требования к неподвижности сканируемого объекта в течение всего процесса.



Жесткость конструкции механизированной фотограмметрической системы играет критическую роль в обеспечении стабильности результатов. Любые деформации направляющих вертикального перемещения или люфты в системе поворота могут привести к отклонениям камеры от расчетной траектории, что существенно снижает точность измерений.

Вибрации механической системы во время перемещения камеры представляют особую проблему для качества получаемых изображений. Даже незначительные колебания могут вызывать размытие снимков, что негативно влияет на точность сопоставления характерных точек при фотограмметрической обработке [7]. Поэтому конструкция установки должна обеспечивать максимальную жесткость при минимальном весе подвижных элементов. Механические деформации несущих элементов конструкции при максимальных нагрузках, вне веса камера, значительно выше.

Также могут оказывать влияние на точность позиционирования камеры. При длительной работе установки нагрев приводных двигателей и направляющих может вызывать изменения геометрических параметров системы, что требует периодической калибровки. Анализ механической прочности вращающейся консоли производился в среде Solidworks (Рисунок 2).

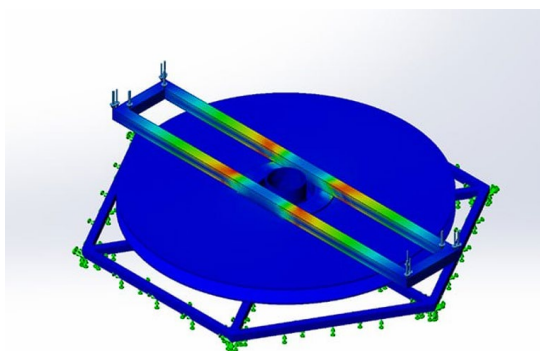


Рис. 2. – Симуляция механической нагрузки поворотной консоли

Распределение полигонов в трехмерных моделях, полученных с помощью механизированной фотограмметрической системы, характеризуется неравномерностью, которая зависит от участка модели [8]. Области с большим количеством характерных точек (лицо, руки) демонстрируют более высокую плотность полигонов, в то время как относительно гладкие поверхности (спина, бедра) характеризуются разреженной полигональной сеткой.

Присутствие артефактов в моделях, полученных методом фотограмметрии с одной камерой, связано с несколькими факторами. Ошибки сопоставления характерных точек между кадрами возникают в областях с недостаточной текстурной информацией или при изменении условий освещения во время сканирования. Недостаточное перекрытие между соседними кадрами в некоторых ракурсах может приводить к образованию пропусков в модели [9].

Механическая нестабильность системы позиционирования проявляется в виде искажений геометрии модели, особенно заметных при анализе симметричных частей тела. Чрезмерные люфты в поворотном механизме могут вызывать смещение осей симметрии, что делает модель непригодной для точных антропометрических измерений.

Экспериментальные данные позволяют сформулировать практические рекомендации по выбору оптимального метода сканирования. Creality Scan выделяется как лидер по четкости и точности воспроизведения реального объекта. Система обеспечивает детализированные текстуры и равномерное распределение полигонов, что делает её оптимальным решением для быстрого и качественного сканирования.

Фотограмметрическая система с механизированным перемещением одной камеры подходит для задач, где допустимы менее строгие требования к детализации, но существуют ограничения по стоимости

---

оборудования. Данный подход особенно привлекателен для исследовательских целей и образовательных проектов, где важна доступность технологии [10].

KScan3D может служить альтернативой, обеспечивающей компромисс между качеством и доступностью, но с меньшим качеством по сравнению с Creality Scan. Система демонстрирует более высокое качество текстур по сравнению с чистой фотограмметрией, что может быть критично для некоторых применений.

### **Выводы**

Проведенное исследование выявило значительную неоднородность характеристик различных подходов к боди-сканированию на основе фотограмметрии. Специализированные ручные сканеры демонстрируют превосходство в точности и качестве текстур, однако требуют значительных финансовых затрат и ограничены в мобильности применения.

Разработанная система фотограмметрического сканирования с механизированным перемещением одной камеры представляет перспективное направление развития доступных технологий трехмерного моделирования. Отказ от многокамерных клеточных конструкций в пользу подвижной системы позиционирования существенно упрощает техническую реализацию и снижает стоимость оборудования.

Экспериментальные данные подтверждают, что для достижения наилучшего качества рекомендуется использовать Creality Scan. Данная система показала наивысшие результаты по всем ключевым параметрам: четкости сканирования (80-90%), качеству текстур (100%), схожести с реальным объектом и равномерности распределения полигонов.

Фотограмметрический подход с механизированной одной камерой, несмотря на более низкие показатели точности (50-60%), обладает

существенными преимуществами в универсальности и доступности. Метод подходит для задач, где допустимы менее строгие требования к детализации, но требуется экономически эффективное решение.

Жесткость конструкции механизированных систем является критически важным фактором, определяющим стабильность и воспроизводимость результатов. Вертикальные направляющие и поворотные механизмы требуют высокой точности изготовления и тщательной настройки для минимизации влияния механических погрешностей на качество получаемых моделей.

Дальнейшее развитие фотограмметрических систем с подвижной камерой видится в направлении оптимизации траекторий движения, повышения скорости позиционирования и внедрения систем компенсации механических погрешностей в режиме реального времени. Совершенствование алгоритмов обработки данных позволит минимизировать влияние конструктивных ограничений на качество конечного результата.

### Литература

1. Севостьянов П.А., Фирсов А.В. Информационные и компьютерные технологии в текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. — 2018. — № 4 (376). С. 107-109.
2. Гетманцева В.В., Андреева Е.Г. Обобщенная модель процесса параметрического проектирования одежды // Международный научно-технический симпозиум «Современные задачи инженерных наук». — Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017. С. 86–90.
3. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Инженерный

- вестник                      Дона.                      2016.                      №4.                      URL:  
ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_207\_Goncharova\_Berezhnoj\_i\_dr.pdf\_fe52c  
d4af3.pdf.
4. Михайлов И.В., Яснгов М.С. Анализ существующих конструкционных решений внутритрубных инспекционных роботов: выбор оптимального типа движения и шасси для 3D-сканирования рельефа сварного шва в сварных прямошовных трубах большого диаметра с использованием лазерного триангуляционного датчика // Инженерный вестник Дона. 2024. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9730/.
  5. Смирнов, В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности // Опыт ФГБОУ УГАТУ. Новости материаловедения. Наука и техника. №2 (14). 2015. С. 23- 27
  6. Ciampini C., Petrillo A. An innovative method for human height estimation combining video images and 3D laser scanning // Journal of Forensic Sciences. 2023. Volume 69, Issue 1. pp. 43-49.
  7. Поротикова И.В. Оценка точности 3D-сканирования детали сложной формы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2022. № 3. С. 95-99.
  8. Шахов М.А. Выбор программных средств при разработке современного программного обеспечения для работы с компьютерной графикой // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. 2023. С. 123-129.
  9. Дьякова Г.Н., Смеян В.Е., Кордикова Е.И. 3D-сканирование и последующее изготовление анатомических моделей методами аддитивных технологий // Труды БГТУ. Серия 2: химические технологии, биотехнология, геоэкология. №1. 2023. С. 15-20.
-

10. Trebuňa P., Mizerák M., Trojan J., Rosocha L. 3D scanning as a modern technology for creating 3d models // Acta tecnológica. №1. 2020. pp. 21-24.

### References

1. Sevostyanov P.A., Firsov A.V. Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promy'shlennosti. 2018. № 4 (376). pp. 107-109.
2. Getmanceva V.V., Andreeva E.G. Obobshhennaya model' processa parametricheskogo proektirovaniya odezhdy' [Generalized model of the parametric clothing design process]. Mezhdunarodny'j nauchno-texnicheskij simpozium «Sovremennyy'e zadachi inzhenerny'x nauk». Moskva: RGU im. A.N. Kosy'gina, 2017. pp. 86–90.
3. Goncharova O.N., Berezhnoj Yu.M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gajnutdinov T.M., Nagopet'yan E.M., Kovina V.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_207\\_Goncharova\\_Berezhnoj\\_i\\_dr.pdf\\_fe52cd4af3.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_207_Goncharova_Berezhnoj_i_dr.pdf_fe52cd4af3.pdf).
4. Mixajlov I.V., Yasnov M.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9730/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2024/9730/).
5. Smirnov, V.V., Barzali V.V., Ladnov P.V. Opy't FGBOU UGATU. Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. №2 (14). 2015. pp. 23- 27.
6. Ciampini C., Petrillo A. Journal of Forensic Sciences. 2023. Volume 69, Issue 1. pp. 43-49.
7. Porotikova I.V. Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. 2022. № 3. pp. 95-99.
8. Shaxov M.A. Vy'bor programmny'x sredstv pri razrabotke sovremennogo programmnoho obespecheniya dlya raboty' s komp'yuternoj grafikoj [The choice of software tools in the development of modern software for working with computer graphics]. Innovacionnoe razvitie tekhniki i tehnologij v promy'shlennosti. 2023. pp. 123-129.



9. D'yakova G.N., Smeyan V.E., Kordikova E.I. Trudy` BGTU. Seriya 2: ximicheskie texnologii, biotexnologiya, geoe`kologiya. №1. 2023. pp. 15-20.
10. Trebuña P., Mizerák M., Trojan J., Rosocha L. Acta tecnología. №1. 2020. pp. 21-24.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 2.12.2025**

**Дата публикации: 24.01.2026**