

T3D: Модульный программно-аппаратный комплекс реконструкции 3D-объектов

А. О. Жирков¹, Р. О. Родионов¹, П. Д. Копанев², В. А. Фролов¹

¹Институт перспективных исследований проблем искусственного интеллекта и интеллектуальных систем МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт технологических инноваций, Абу Даби, ОАЭ

Аннотация. В данной работе предложен модульный программно-аппаратный комплекс для создания цифровых копий объектов с поверхностями, трудновоспроизводимыми при помощи существующих решений на основе фотограмметрии и активных трехмерных сканеров. Комплекс включает: (1) специализированную студию с вращающимся подиумом, антибликовой прозрачной платформой, системой фона, контролируемым LED-освещением и маркерной системой; (2) ПО на базе интеграции COLMAP и OpenMVS; (3) модуль оптимизации SVBRDF на основе обратного рендеринга при помощи рендер-системы Mitsuba3. Предложенный комплекс решает проблему создания цифровых копий объектов с проблемными поверхностями: полупрозрачными, зеркально отражающими, однотонными и тонкими. Это достигается за счёт введения классификации объектов и выбора метода реконструкции под каждый класс: например, при необходимости может быть подключен программный модуль 3DGS для реконструкции особо тонких и полупрозрачных поверхностей. Ключевой результат нашей работы – возможность автоматизированного создания фотorealистичной цифровой копии (геометрия, параметры материалов SVBRDF, текстура в высоком разрешении) за одно сканирование без перемещения объекта. Система ориентирована на относительно бюджетное и быстрое создание цифровых копий, но имеет возможность подключения аппаратурного модуля оптического сканера в случае необходимости увеличения точности реконструкции геометрии. Экспериментально достигнуты метрики качества PSNR > 35 dB, SSIM > 0.98, IoU > 98 % при времени сканирования менее 10 минут на объект. Система ориентирована на области применения, где важно достижение фотorealистичного визуального совпадения с оригиналом, а также требуется возможность помещения цифровой копии в другую виртуальную сцену (с другим освещением).

Ключевые слова: 3D-реконструкция, фотограмметрия, нейронный рендеринг, обратный рендеринг, цифровая копия, SVBRDF, материалы, автоматизация, компьютерное зрение, поворотный стол, антибликовое стекло, HDR-панorama.

T3D: Modular hardware and software complex for reconstruction of 3D objects

A. O. Zhirkov¹, R. O. Rodionov¹, P. D. Kopanev², V. A. Frolov¹

¹IAI Moscow State University, Moscow

² Technology Innovation Institute, Abu Dhabi, UAE

Abstract. In this paper, we propose a modular hardware and software package for creating digital copies of objects with surfaces that are difficult to reproduce using existing solutions based on photogrammetry and active three-dimensional scanners. The complex includes: (1) a specialized studio with a rotating podium, an anti-glare transparent platform, a background system controlled by LED lighting and a marker system; (2) Software based on the integration of COLMAP and OpenMVS; (3) SVBRDF optimization module based on reverse rendering using the Mitsuba3 rendering system. The proposed complex solves the problem of creating digital copies of objects with problematic surfaces: translucent, specularly reflecting, monophonic and thin. This is achieved by introducing a classification of objects and choosing a reconstruction method for each class: for example, if necessary, the 3DGS software module can be connected to reconstruct particularly thin and translucent surfaces. The key result of our work is the possibility of automated creation of a photorealistic digital copy (geometry, SVBRDF material parameters, texture in high resolution) in one scan without moving the object. The system is focused on relatively low-cost and fast creation of digital copies, but it has the ability to connect the optical scanner hardware module if it is necessary to increase the accuracy of geometry reconstruction. The quality metrics PSNR > 35 dB, SSIM > 0.98, and IoU > 98% have been experimentally achieved with a scan time of less than 10 minutes per object. The system is focused on applications where it is important to achieve a photorealistic visual match with the original, and also requires the ability to place a digital copy in another virtual scene (with different lighting).

Keywords: 3D reconstruction, photogrammetry, neural rendering, reverse rendering, digital copy, SVBRDF, materials, automation, computer vision, turntable, anti-glare glass, HDR panorama.

Введение

Актуальность разработки систем 3D-реконструкции обусловлена растущим спросом на цифровые копии для различных задач, таких как Web/AR/VR, виртуальные музеи и электронная коммерция [Petrelli19]. Это чрезвычайно обширная область, существующие работы в которой можно условно разделить на три класса: (1) методы и алгоритмы реконструкции [Luan21; Huang24; Gao24];

(2) программно-аппаратные комплексы [Menna, et al., 2017; Apollonio F. I., et al., 2021; Karami, et al., 22]; (3) работы, которые ориентируются не на процесс реконструкции как таковой, а на создание набора данных (датасетов) для решения определенной задачи [Kuang23; Ummenhofer24; Dong25]. Методы обычно сфокусированы на решении некоторой выделенной проблемы реконструкции в условиях, близких к идеальным. Они часто игнорируют проблемы в исходных данных, порожденные неточностью измерительной и съемочной аппаратуры, неидеальными условиями съемки и т.д. Программно-аппаратные комплексы много внимания уделяют построению и функционированию самой аппаратуры с целью создания некоторой универсальной системы. При этом, как правило, используются существующие методы, которые комбинируются нетривиальным образом. Работы по датасетам уделяют больше внимания самому датасету в некоторой ограниченной постановке и, как правило, не претендуют ни на универсальность или новизну используемого программно-аппаратного комплекса, ни на создание новых методов.

Все три класса задач могут быть направлены на достижение различных целей: (A) решение базовой задачи реконструкции, которая заключается в синтезе новых видов объекта для альтернативного ракурса камеры [Mildenhall21; Kerbl23]; (B) решение задачи восстановления геометрии трехмерной модели или геометрии и цветовой текстуры [Laine20; Nicolet21; Huang24]; (C) решение комплексной задачи восстановления геометрии и материалов [Luan21; Gao24; Wang24]. Последний тип задачи, как правило, является наиболее сложным, поскольку он требует решения проблемы с неоднозначным решением: множество различных моделей могут корректно отображаться в виртуальной сцене, в которой проводилась реконструкция, но только некоторые из них сохраняют корректное отображение при переносе в другую виртуальную сцену с измененными условиями освещения и окружения. К этой категории относятся такие проблемы, как классическая задача запекания бликов в диффузных текстурах при использовании метода обратного рендеринга [Luan21; Wang24] и ограничения на реконструкцию зеркальных объектов с использованием методов 3DGS [Kerbl23].

В соответствии с предложенной классификацией данная работа относится к категории 2-С, что указывает на ее принадлежность к исследованиям, связанным с разработкой программно-аппаратного комплекса, решающего задачу одновременной реконструкции 3D геометрии и материалов. Комплекс является модульным в том смысле, что он позволяет нам относительно легко менять как отдельные аппаратные составляющие, так и программные компоненты. Это позволяет воспроизводить конвейер 3D-реконструкции в различных вариантах, в зависимости от особенности снимаемых объектов и требований к качеству цифровой копии.

Обзор предыдущих работ

Существующие работы по дифференцированному рендерингу ([Luan21; Wang24] и др.) демонстрируют, что решение задачи (С) возможно с неплохой точностью в условиях, близких к идеальным. Однако подобные работы реконструируют объекты относительно простой формы, без характерных невыпуклых элементов поверхности и мелких деталей. Кроме того, существует большое число специализированных алгоритмов реконструкции, способных восстанавливать лишь определенные типы объектов, например, тела вращения или здания, состоящие из прямоугольных коробок [Ryabogin24; Garifullin24]. Однако 3D-реконструкция по реальным данным съемки и измерений сталкивается с большим числом неточностей, неизвестных данных и неопределенностей, которые не позволяют применить существующие методы как есть. Некоторые работы пытаются решать эту проблему «додумыванием» неизвестной информации на основе имеющейся обучающей выборки [Szymanowicz24; Zou24].

Один из наиболее подробных обзоров систем реконструкции можно найти в [Zhou 24]. Мы не будем повторять его, однако отметим наиболее близкие и важные к нашей работе системы и комплексы. Многие существующие решения, например Fraunhofer Cultlab3D [cultlab3d] и Witikon [witikon], используют лазерное сканирование и фотограмметрию. Они решают задачи восстановления геометрии и текстур достаточно качественно для определенных типов объектов, например музейных экспонатов, но достигается это созданием больших дорогостоящих комплексов с применением промышленных активных 3D-сканеров. Есть и более доступные решения [Petrelli19; Menna, et al., 2017]. Однако на

практике вместо этого часто используется ручное моделирование и обратное проектирование, когда 3D-художники фактически вручную воссоздают 3D-объект со всеми его материалами, что является примером наиболее трудоемкого, но максимально гибкого способа. Кроме того, задача реконструкции всегда сталкивается с рядом проблем, порожденных неточностью измерительной и съемочной аппаратуры, что в большинстве научных работ попросту игнорируют; однако это легко приводит к потери точности и неприемлемым артефактам. Например, в работе [Apollonio F. I., et al., 2021] авторы предлагают метод комбинирования фотометрии и стерео различия для достижения точной и полной 3D-реконструкции для поверхностей с блестящими текстурными поверхностями, но обходят стороной проблемы с одноцветными поверхностями.

Из работ, ориентированных на создание датасета, можно выделить Stanford-ORB [Kuang23], Objects With Lighting [Ummenhofer24] и DTC [Dong25]. Stanford-ORB позиционирует себя как одну из первых работ, предлагающих набор данных для соревнования систем обратного рендеринга. Геометрия реконструировалась при помощи оптического сканера с высокой точностью. Затем объекты помещались в центр комнаты, для которой с использованием известного метода [Yu99] реконструировалась HDR-панорама. Эта панорама использовалась в качестве окружения, чтобы различные исследователи могли тестировать свои решения задачи восстановления материалов при известной геометрии либо решать совместную задачу восстановления материалов и текстур. Слабым местом этого набора данных является отсутствие нормальных эталонов текстур. В действительности они были получены очень приближенным образом, используя достаточно простой дифференцируемый рендер (*nvdiffrast* [Laine20]) без поддержки глобального освещения, и Stanford-ORB не предоставляет какой-либо оценки точности этих эталонов.

Набор данных DTC [Dong25] был создан с той же целью, что и Stanford-ORB. Однако он значительно более обширен (содержит 2000 объектов), а также имеет отдельно реконструированные SVBRDF для материалов в виде набора PBR текстур: алbedo (диффузная текстура), металличность, шероховатость, карта нормалей. Для реконструкции геометрии использовался коммерческий оптический сканер, для реконструкции материалов – «проприетарный» [Dong25] конвейер реконструкции на основе обратного рендеринга. Окружение, как и в Stanford-ORB, представлено панорамной текстурой. Валидация производилась путем сопоставления рендера реконструированной модели в синтетической сцене и фотографии. В целом данная работа выглядит как одна из наиболее завершенных и результативных. Однако одна из сложностей, с которой столкнулись авторы [Dong25], заключалась в том, что оптимизация материалов объектов с зеркальными свойствами работала с низкой точностью. В связи с этим авторы [Dong25] прибегли к услугам профессиональных 3D-художников для тщательной доработки материалов, используемых в создании глянцевых и отражающих объектов. Несмотря на обширный каталог объектов, отметим, что в этой работе отсутствуют объекты, содержащие полупрозрачные элементы и объекты с мелкими деталями, также отсутствуют высоко-зеркальные объекты и объекты, сделанные из мягких материалов. Это обусловлено ограничением технологической базы.

В качестве базовых методов в нашей работе были использованы библиотеки с открытым исходным кодом COLMAP [COLMAP] и MVS. COLMAP представляет собой комплексную систему, которая обеспечивает полный цикл обработки данных Structure-from-Motion (SfM) и Multi-View Stereo (MVS) [MVS; MSV2]. Эта библиотека позволяет автоматически создавать как разреженные, так и плотные облака точек на основе множества изображений. OpenMVG, в свою очередь, ориентирован на этап SfM. Он выполняет извлечение характерных точек, оценку параметров камер и формирование начального разреженного облака точек. OpenMVS использует результаты, полученные OpenMVG или частью COLMAP, Mitsuba3 [Mitsuba3] представляет собой физически обоснованный рендерер (PBR), который предоставляет возможности для оптимизации/подгонки материалов и освещения при помощи дифференцируемого рендеринга.

Просуммируем ключевые проблемы, возникающие при создании цифровых копий посредством 3D-сканирования. Во-первых, ограничения, связанные с характеристиками поверхностей: лазерные и оптические сканеры испытывают трудности с высокоотражающими материалами из-за бликов и отражений, снижая точность измерений до неприемлемых уровней, а полупрозрачные материалы, такие

как стекло и пластик, вызывают ошибки в определении глубины; фотограмметрия плохо работает с однородными поверхностями. Во-вторых, ограничена область сканирования: например, системы с поворотными столами не способны захватить нижнюю часть объекта, что усложняет процесс, а другие методы требуют переворачивания и объединения полученных с разных позиций объекта данных. Третий момент – большинство технологий фиксируют лишь базовую геометрию и диффузную альбедо-текстуру, не предоставляя параметров BRDF/PBR (шероховатость, металличность) для физически корректного рендеринга. Эти факторы неизбежно ведут к значительной ручной постобработке для устранения артефактов, ремоделинга геометрии и ретекстурирования, что существенно увеличивает временные и ресурсные затраты.

Предложенный программно-аппаратный комплекс

Целью предлагаемого подхода является разработка системы, обеспечивающей создание цифровых копий физических объектов с требуемой точностью сохранения геометрии, текстуры и оптических свойств материалов со всех сторон объекта без перемещения, за один сеанс сканирования и без необходимости ручного ремоделирования и редактирования полученной модели. Важно отметить, что данная система должна быть способна обрабатывать объекты различных габаритов и с разнообразными характеристиками поверхностей, включая полупрозрачные, однотонные, отражающие и тонкие структуры.

Для достижения данной цели, предлагается модульная система, состоящая из трёх базовых компонент:

1. Студия на базе вращающейся платформы с метками со стеклом повышенной прозрачности, системой нанесения текстурированного покрытия, однородным фоном с меткой, управляемой системой освещения и фотографирования. Такая конструкция позволяет получать полный набор изображений объекта, включая нижнюю часть, без необходимости его перемещения или переворота. Использование текстурных покрытий должно обеспечить стабильность процесса фотограмметрии даже для объектов с однотонными или отражающими поверхностями. Фон и платформа с метками позволит определять взаимное расположения платформы, фона и освещения.

2. Двухэтапная методика съемки и обработки:

2.1. Фотограмметрическая реконструкция геометрии. На первом этапе выполняется фотограмметрическая реконструкция объекта на основе серии фотографий, снятых с применением маркеров и временных текстурирующих покрытий. Такой подход позволяет существенно повысить точность и детализацию геометрии, обеспечивая корректное выравнивание и сопоставление изображений.

2.2. На втором этапе осуществляются восстановление цветовой информации и оптимизация параметров материалов (SVBRDF), используя методы обратного рендеринга. Для этого используются фотографии объекта без текстурирующих покрытий, что позволяет получить чистую цветовую компоненту. В качестве ПО для реконструкции геометрии и базового текстурирования предлагается использовать классические алгоритмы 3D-реконструкции, например, COLMAP[COLMAP] и OpenMVS[MVS]. Важно, чтобы в них можно было сделать модификацию, в которой калибровка и определение положения камер было общим модулем, а реконструкция геометрии и реконструкция текстур использовала разные исходные фотографии. В качестве ПО для реконструкции материалов, предлагается использовать пайплайн обратного рендеринга Mitsuba3 [Mitsuba3].

3. Альтернативные варианты сканирования и обработки данных. В зависимости от свойств объекта и требований к цифровой копии системе могут быть подключены модули активного 3D-сканера и модуль реконструкции в альтернативное полигональному представлению, например, в представления 3D Гауссиановским сплассингом 3DGS (3D Gaussian Splatting) [3DGS] или посредством неявного представления сцены объемным полем излучательности NeRF (Neural Radiance Fields) [NERF]. Эти технологии повышают стоимость системы и ограничивают универсальность, поэтому их следует использовать только там, где недостаточно точности базовых методов.

Структура работы данных модулей показана на рисунке 1 в зависимости от классов обработки. На выходе работы системы на рисунке представлены результаты работы рендера соответствующим полученные классом обработки.



Рисунок 1. Блок-схема работы классов конвейеров обработки реконструкции объекта с предложенными модулями с отметкой «T3D».

На рисунке 2 представлено сравнение различных методов обработки данных съемки для идентичных исходных данных. Анализ показал, что реконструкция с использованием 3DGS (класс 1) демонстрирует высокую эффективность при работе с полупрозрачными моделями, однако отмечается значительное снижение четкости текстур и геометрии по сравнению с методами, использующими полигональные модели (другие классы).



Рисунок 2. Реконструкция объекта, содержащего полупрозрачные и тонкие поверхностные:
1 – конвейером 1-го класса; 2 – конвейером 2-го класса; 0 – фотография объекта
из исходных данных для реконструкции

На рис. 3. метод фотограмметрии с применением текстурного покрытия (класс 4) демонстрирует существенное улучшение результатов на объектах с однородным фоном по сравнению с классической фотограмметрией (класс 2). Применение оптического сканера для реконструкции геометрии значительно повышает ее точность в классе 3, однако при переосвещении и наложении текстур данное улучшение становится менее заметным по сравнению с предложенным методом обработки по классу 4.



Рисунок 3. Реконструкция объекта, содержащего чёткую геометрию (чёткие углы) и чёткую текстуру (надписи, мелкие детали): 1 – конвейером 1-го класса; 2 – конвейером 2-го класса; 3 – конвейером 3-го класса; 3* – конвейером 3-го класса, с визуализацией модели, полученной непосредственно после оптического сканера без модулей Т3Д-текстурирования и восстановления материалов модели

На рисунке 4 показано, что различные методы классической фотограмметрии демонстрируют неприемлемое качество реконструкции объектов с одноцветными гладкими поверхностями. Предложенный конвейер по классу 4 справляется с задачей обработки объектов с однородными поверхностями.



Рисунок 4. Реконструкция объекта, содержащего одноцветные гладкие поверхности конвейерами обработки: 2 – конвейером 2-го класса; 4 – конвейером 4-го класса; 2* – конвейера 2-го класса, где вместо базовой фотограмметрии на основе COLMAP и OpenMVS, использовалась платная версия модуля фотограмметрии Polycam.Inc. [Polycam]

В настоящей работе был разработан модуль реконструкции параметров материалов реальных объектов, представленных с помощью пространственно варьирующейся функции распределения отражения (рис. 5). Основой для реализации послужил физически обоснованный рендер-движок Mitsuba3 и его Python-API, что позволило организовать дифференцируемый рендеринг с высоким

контролем над процессом оптимизации. В качестве исходных данных используется геометрическая сетка и диффузная текстура с запечённым освещением, полученные на этапе реконструкции поверхности объекта. Освещение моделировалось с помощью HDR-панорам реальной комнаты. Для оптимизации использовались эталонные фотографии объекта на однородном фоне.

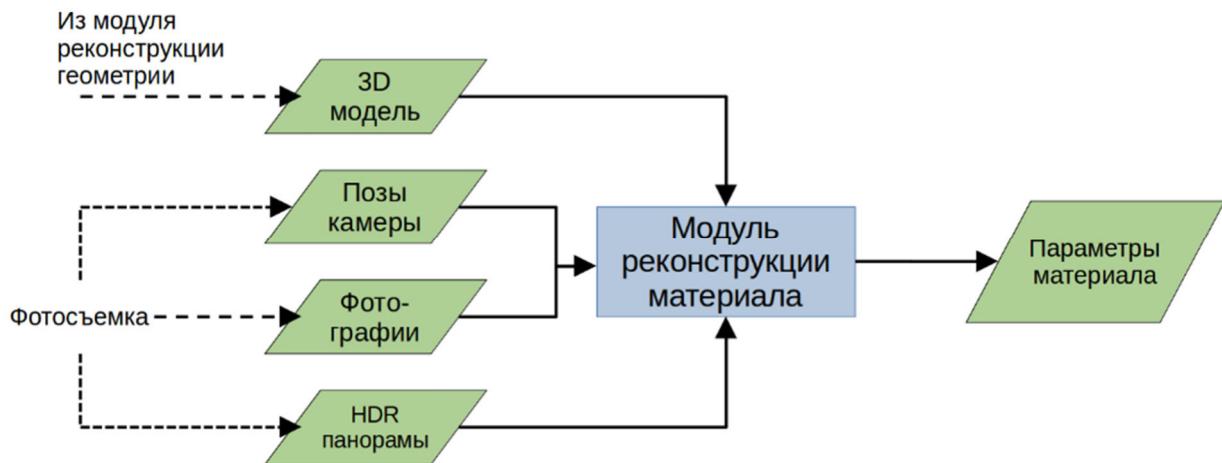


Рисунок 5. Входные и выходные данные для модуля реконструкции материалов

В качестве модели материала была выбрана составная BSDF-модель «Principled», способная описывать широкий спектр поверхностей – от чистых металлов до шероховатых диэлектриков. Для обеспечения совместимости результатов с форматом glTF 2.0 и снижения вычислительной нагрузки оптимизация велась лишь по трём ключевым текстурам: базового (диффузного) цвета, шероховатости и металличности. Тестировалось также использование текстуры для дополнительного прозрачного покрытия (clearcoat) – присутствующего в специальном расширении формата glTF 2.0.

Процесс съёмки HDR-панорамы включал многокадровую экспозиционную серию 360° камерой и последующий блендинг в специальном ПО. Такой подход вызывает ряд трудностей: необходимо восстановить положение окружения относительно снимаемого объекта, а также исправить различия в яркости, цветовой температуре и других параметрах, возникающие из-за использования разных камер.

Для реконструкции положения меша относительно окружения на фон наносятся маркеры, затем с помощью ключевых точек на маркере определяется положение камеры. Поскольку положение камеры относительно меша известно с прошлого этапа, можно получить положение объекта относительно окружающего освещения. Дополнительно восстанавливались параметры вращающейся платформы – её ось и угол поворота при каждом кадре – чтобы обеспечить согласованность между всеми матрицами трансформации.

В процессе оптимизации материалы и параметры яркости и цветовой температуры освещения реконструировались одновременно. Используется взвешенная функция потерь, в которой ошибка внутри маски объекта и за её пределами учитываются с разными коэффициентами, поскольку реконструкция окружения по освещению реконструируемого объекта в ряде случаев может вносить сильную неоднозначность.

Процесс восстановления включал адаптивное разрешение текстур – низкое разрешение в начале оптимизации, с автоматическим удвоением разрешения каждые несколько итераций – и при необходимости сглаживающую регуляризацию, помогающую избавиться от шума в текстурах, а также сгладить границы фрагментов текстуры.

Получаемая в результате работы модуля реконструкции геометрии диффузная текстура в ряде случаев подходит для начальной инициализации PBR текстуры диффузного альбено, что позволяет получить высокоточные детали в начале оптимизации.

Диффузная текстура, полученная в результате работы модуля реконструкции геометрии подходит для начальной инициализации PBR-текстуры диффузного альбено, что полезно для обеспечения высокой детализации на начальных этапах оптимизации. Процесс оптимизации материала и освещения на сцене из нашего набора данных показан на рисунке 6.

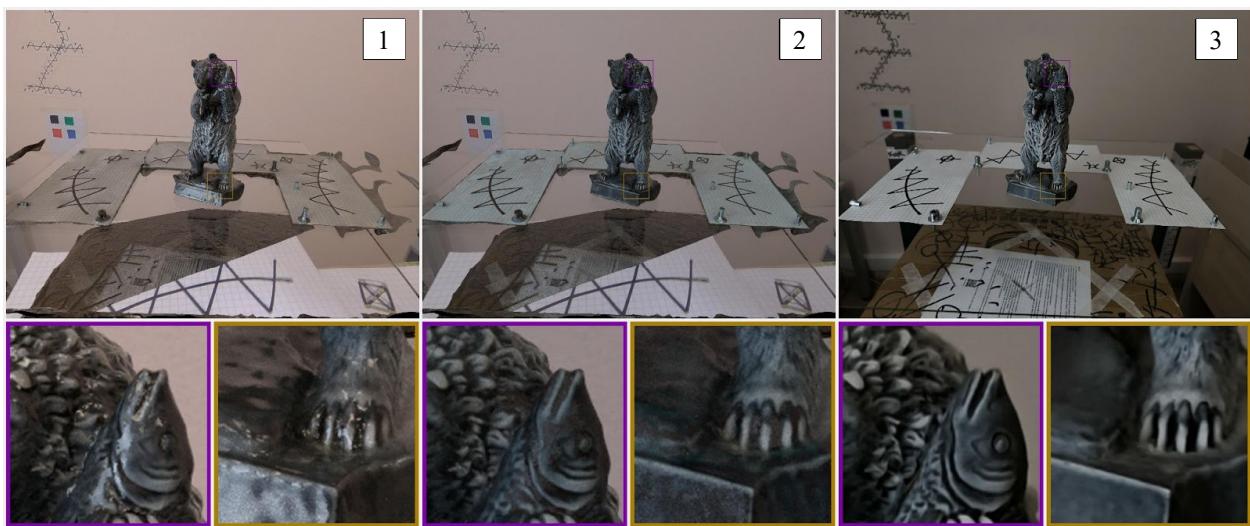


Рисунок 6. Оптимизация параметров материала и освещения на сцене bear: 1 – панорама и объект в начале оптимизации; 2 – через 15 шагов оптимизатора; 3 – референсное изображение

Результаты экспериментов

Модуль реконструкции материалов был протестирован на собственном наборе из 8 объектов (matryoshka, hedgehog, router, bear, dragon, thermos, colored_cup, white_cup). Время реконструкции материалов составляло от 8 до 15 минут. Тестовая выборка составляет 20 % от обучающей. По итогу замеров модуль реконструкции на большинстве сцен набирает $\text{PSNR} > 31$ и $\text{IoU} > 0.97$. Однако возникают трудности с отдельными сценами. Так, сцена thermos представляет собой объект с металлическим анизотропным материалом, что плохо описывается используемой моделью. Сцена router показала проблемы с согласованием положения камеры и панорамы, из-за чего для остальных замеров был использован обновленный маркер. В таблице 1 указаны усреднённые на тестовой выборке данные PSNR (с указанием стандартного отклонения) для синтезированных и эталонных изображений, а также значения метрики IoU для маски объекта (эталонные маски получены вручную).

Переосвещение полученных моделей и материалов в условиях искусственно смоделированного окружения (cornell box) демонстрирует их пригодность для PBR-рендеринга: блики и тени ведут себя физически корректно, а реконструированный объект реалистично взаимодействует со сценой, что крайне важно для задач дополненной и виртуальной реальности (AR и VR) (рис. 7).

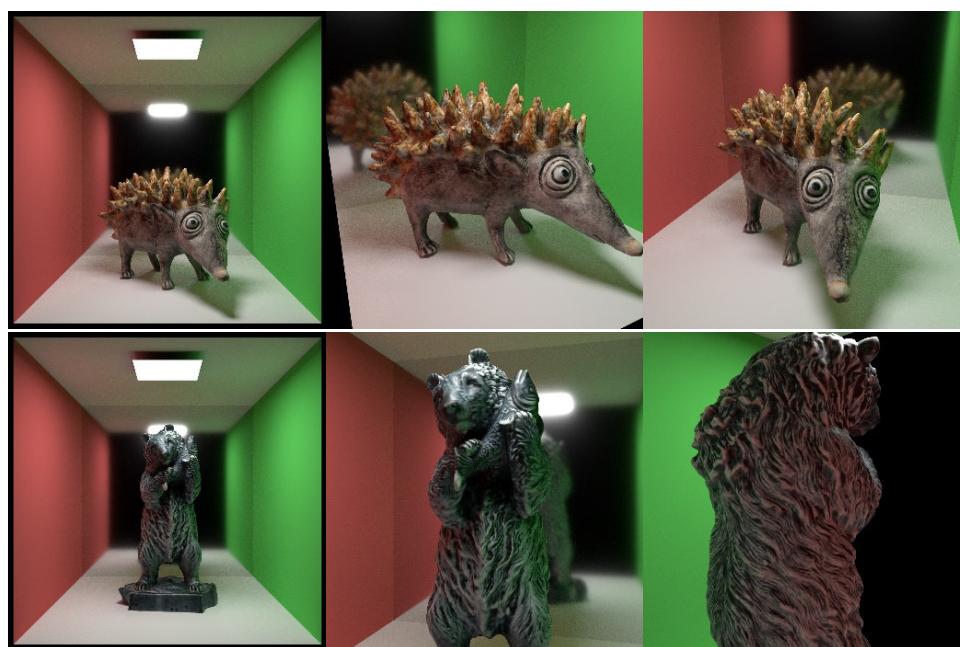
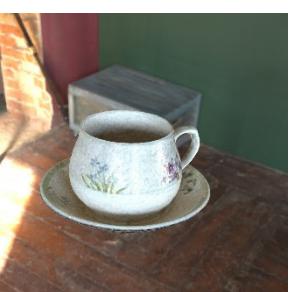


Рисунок 7. Сцены hedgehog и bear из собственного набора, реконструированные и помещенные в cornell box

Таблица 1. Оценка качества реконструкции на собственном наборе данных

Параметры	Эталонное изображение	Реконструкция (оригинальное освещение)	Реконструкция (новое освещение)
Сцена: matryoshka			
PSNR (среднее): 31.317+/-0.866			
IoU (среднее): 0.9813			
Сцена: hedgehog			
PSNR (среднее): 34.572+/-1.359			
IoU (среднее): 0.9794			
Сцена: router			
PSNR (среднее): 27.646+/-1.286			
IoU (среднее): 0.9857			
Сцена: bear			
PSNR (среднее): 33.666+/-0.739			
IoU (среднее): 0.9785			
Сцена: dragon			
PSNR (среднее): 35.689+/-1.326			
IoU (среднее): 0.9736			

Окончание таблицы 1

Параметры	Эталонное изображение	Реконструкция (оригинальное освещение)	Реконструкция (новое освещение)
Сцена: thermos			
PSNR (среднее): 25.867+-1.151			
IoU (среднее): 0.9836			
Сцена: colored_cup			
PSNR (среднее): 31.396+-1.381			
IoU (среднее): 0.9775			
Сцена: white_cup			
PSNR (среднее): 33.104+-0.651			
IoU (среднее): 0.9707			

Обсуждение результатов

Эксперименты показали, что предложенная система с разным конвейером выполнения модулей позволяет получать результаты лучшие, чем один определённый вариант выполнения.

Стоит отметить сложность корректного сравнения с другими существующими программно-аппаратными системами ввиду отсутствия доступа как к самим подобным системам, так и снятым с помощью их объектам. К объективным преимуществам можно отнести лишь существенно более низкую стоимость комплекса по сравнению с аналогами, её масштабируемость и потенциальную воспроизводимость. Более полный сравнительный качественный анализ приведён в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ методов получения цифровой копии

Метод получения цифровой копии	Время оператора	Стоимость обору- дования, ₽	Универсаль- ность поверх- ностей	Геометри- ческая точность	Текстур- ная точность	Точность материа- лов	Полный охват объекта 360'x360'
Оптический ручной сканер со спреем для сложных материалов	От 10 минут до 10 часов (зависит от поверхностей)	~ 1 млн	+ -	+	- +	-	- +

Окончание таблицы 2

Метод получения цифровой копии	Время оператора	Стоимость оборудования, ₽	Универсальность поверхностей	Геометрическая точность	Текстурная точность	Точность материалов	Полный охват объекта 360°x360°
Стационарный оптический сканер вместе с фотостудией [Dong25]	~20 минут скан + ручная коррекция сложных поверхностей	>10 млн	+ -	+	+	+	- +
AI генерация	~10 минут	~100 тыс.	+ -	-	-	-	+
3DGS [Kerbl23]	~10 минут	~200 тыс.	+	- +	- +	+ -	- +
Классическая фотограмметрия	~10 минут	~300 тыс.	- +	- +	+	- +	- +
T3D: фотограмметрия + текстурное окрашивание	~20 минут	~500 тыс.	+ -	+ -	+	+ -	+ -
T3D: фотограмметрия + текстурное окрашивание + ручной сканер	От 20 минут до 10 часов (зависит от поверхностей)	~1.5 млн	+ -	+	+	+ -	+ -

Среди выявленных недостатков разработанной системы следует отметить сложность процесса нанесения текстурирующего покрытия как с использованием меловых аэрозольных баллончиков, так и смыываемых маркеров, требующую навыка для предотвращения смещения объекта и предотвращения окрашивания самой студии.

Текстурирующие покрытия поддаются удалению посредством применения обычной воды, но их использование может быть ограничено в отношении определенных типов объектов. В частности, для музеиных экспонатов, требующих особой сохранности, рекомендуется применять бесконтактные методы 3D-сканирования. На впитывающие поверхности объектов в качестве текстурирующего покрытия можно наносить стикеры, но не маркеры и баллончики с краской.

Несмотря на заявленную масштабируемость системы в зависимости от размеров и веса объектов, в текущей реализации лучшая конфигурация используется для объектов менее 40 сантиметров и массой до 10 килограммов, для которых в качестве антибликовой прозрачной платформы используется специальное музейное стекло с высокой прозрачностью. Для более крупных или тяжелых объектов применяется стандартное осветленное стекло. Музейное стекло обладает светопропускающей способностью в диапазоне 97-99 % и коэффициентом светоотражения менее 1 %. Осветленное стекло обладает существенно худшими характеристиками прозрачности: имеет светопропускание только около 90 % и коэффициент светоотражения примерно 20 %.

Использование разработанного модуля реконструкции материалов на реальных данных показало целесообразность применения обратного рендеринга для данной задачи, но выявило ограничения, вызывающие артефакты и неточности. К ограничениям относится необходимость в тщательном подборе гиперпараметров, неоднозначность значений шероховатости и металличности для сложных материалов, а также необходимость в качественном моделировании источников освещения. Как показано в работе [Ling24], использование environment map может не подходить для реконструкции материалов с пространственно варьирующими параметрами. Недостаточная информация об окружении может приводить к наблюдаемым на реконструированных моделях артефактам (запеченные блики, некорректные тени и др.). Перспективным направлением видится объединение дифференцируемого рендеринга с методом NeRF для моделирования окружения и подбор более эффективных регуляризаций для более надёжной оптимизации параметров.

Выводы

Программно-аппаратный комплекс «T3D» предлагает модульную систему, интегрирующую существующие и ряд инновационных решений для задачи реконструкции 3D-копий объектов, в особенности для объектов, традиционно сложных для систем реконструкции. Предложенный алгоритм вариантов использования модулей и соответствующих классификации объектов для их применения может помочь для создания цифровых копий с достаточным качеством при минимизации трудозатрат. Так, объект при одноэтапной реконструкции требует в среднем порядка 5 минут трудозатрат оператора, а при двухэтапной с нанесением покрытия – порядка 20 минут.

Список литературы

1. [Luan21] Unified shape and svbrdf recovery using differentiable monte carlo rendering / Luan F., et al. // Computer Graphics Forum. 2021. Vol. 40. No. 4. P. 101-113.
2. [Huang24] 2d gaussian splatting for geometrically accurate radiance fields / Huang B., et al. // ACM SIGGRAPH 2024 conference papers. 2024. P. 1-11.
3. [Gao24] Relightable 3d gaussians: Realistic point cloud relighting with brdf decomposition and ray tracing / Gao Jian, et al. // European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
4. [Kuang23] Kuang Z., et al. Stanford-orb: a real-world 3d object inverse rendering benchmark // Advances in Neural Information Processing Systems. 2023. Vol. 36. P. 46938-46957.
5. [Petrelli19] Petrelli, D. Making virtual reconstructions part of the visit: An exploratory study. Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit. 2019.
6. [cultlab3d] Available online: <https://www.cultlab3d.de/> (accessed on 21 November 2020).
7. [witikon] Available online: <http://witikon.eu/> (accessed on 21 November 2020).
8. [sketchfab] Available online: <https://sketchfab.com/> (accessed on 13 June 2020).
9. [Menna, et al. 2017] An open source low-cost automatic system for image-based 3D digitization / Menna F., et al. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. 42. P. 155-162.
10. [Apollonio F. I., et al. 2021] A photogrammetry-based workflow for the accurate 3D construction and visualization of museums assets / Apollonio F. I., et al. // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 3. P. 486.
11. [Karami et al 22] Combining photogrammetry and photometric stereo to achieve precise and complete 3D reconstruction / Karami A., Menna F., Remondino F. // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 21. P. 8172.
12. [Zhou 24] A comprehensive review of vision-based 3d reconstruction methods / Zhou L., et al. // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 7. P. 2314.
13. [Dong25] Digital twin catalog: A large-scale photorealistic 3d object digital twin dataset / Dong Z., et al. // Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference. 2025. P. 753-763.
14. [Ummenhofer24] Objects with lighting: A real-world dataset for evaluating reconstruction and rendering for object relighting / Ummenhofer B., et al. // 2024 International Conference on 3D Vision (3DV). IEEE, 2024. P. 137-147.
15. [Wang24] A simple approach to differentiable rendering of sdfs / Wang Z., et al. // SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers. 2024. P. 1-11.
16. [Nicolet21] Large steps in inverse rendering of geometry / Nicolet B., Jacobson A., Jakob W. // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2021. Vol. 40. No. 6. P. 1-13.
17. [Mildenhall21] Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis / Mildenhall B., et al. // Communications of the ACM. 2021. Vol. 65. No. 1. P. 99-106.
18. [Kerbl23] 3D Gaussian splatting for real-time radiance field rendering / Kerbl B., et al. // ACM Trans. Graph. 2023. Vol. 42. No. 4. P. 139:1-139:14.
19. [Laine20] Modular primitives for high-performance differentiable rendering / Laine S., et al. // ACM Transactions on Graphics (ToG). 2020. Vol. 39. No. 6. P. 1-14.
20. [Ling24] NeRF as a Non-Distant Environment Emitter in Physics-based Inverse Rendering / Ling J., et al. // ACM SIGGRAPH 2024 Conference Papers. 2024. P. 1-12.
21. [Ryabogin24] Reconstruction of convex bodies of revolution from the areas of their shadows / Ryabogin D., Zvavitch A. // Archiv der Mathematik. 2004. Vol. 83. No. 5. P. 450-460.
22. [Garifullin24] Single-view 3d reconstruction via differentiable rendering and inverse procedural modeling / Garifullin A., et al. // Symmetry. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 184.
23. [Szymanowicz24] Splatter image: Ultra-fast single-view 3d reconstruction / Szymanowicz S., Rupprecht C., Vedaldi A. // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2024. P. 10208-10217.
24. [Zou24] Triplane meets gaussian splatting: Fast and generalizable single-view 3d reconstruction with transformers / Zou Z. X., et al. // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2024. P. 10324-10335.

25. [Yu99] Inverse global illumination: Recovering reflectance models of real scenes from photographs / Yu Y., et al. // Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1999. P. 215-224.
26. [Mitsuba3] Mitsuba 2: A retargetable forward and inverse renderer / Nimier-David M., et al. // ACM Transactions on Graphics (ToG). 2019. Vol. 38. No. 6. P. 1-17.
27. [COLMAP] COLMAP. General-purpose Structure-from-Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) pipeline. <https://colmap.github.io/>
28. [MVS] OpenMVS: open Multi-View Stereo reconstruction library. <https://github.com/cdcseacave/openMVS>
29. [MVS2] Structure-from-motion revisited / Schonberger J. L., Frahm J. M. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 4104-4113.
30. [Polycam] Polycam Inc. (2025). Polycam: 3D Capture & Photogrammetry Platform. Доступно по адресу: <https://poly.cam>