

УДК 528.7; 069; 778.38

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1013-1021

ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАММЫ МЕТОДОМ ФОТОГРАММЕТРИИ

Е.В. Рабош^а, Д.А. Анкушин^а, Н.С. Балбекин^а, Ю.А. Вавилова^а, А.М. Тимошенкова^б,
 Е.С. Авдонина^а, Т.В. Шлыкова^б, Н.В. Петров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Санкт-Петербургский государственный институт культуры, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация

Адрес для переписки: Rabosh.ev7@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.09.19, принята к печати 05.10.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Рабош Е.В., Анкушин Д.А., Балбекин Н.С., Вавилова Ю.А., Тимошенкова А.М., Авдонина Е.С., Шлыкова Т.В., Петров Н.В. Построение 3D-модели изображения объемной отражательной голограммы методом фотограмметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 1013–1021. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1013-1021

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена возможность оцифровки изобразительных голограмм с целью обеспечения возможности их хранения и обработки с использованием цифровых технологий. Впервые предложен метод использования фотограмметрической технологии для построения цифровых изображений с голограмм. Обсуждены перспективы получения цифровой копии при помощи серии фотографий и программного пакета обработки. **Метод.** Для эксперимента выбран объект в виде керамической скульптуры высотой 89 мм. Записаны две изобразительные голограммы скульптуры с тыльной и лицевой сторон при помощи He-Ne-лазера на длине волны $\lambda = 633$ нм, мощностью $P = 50$ мВт; длительностью записи 90 с. Выполнена фотосъемка самого объекта при его вращении вокруг своей оси с шагом в $1,8^\circ$. Для фотосъемки выбран фотоаппарат Canon EOS 1100D с разрешением $4,2 \times 2,9$ Мп (12,2 Мп). Получена серия из 300 фотографий. Для восстановления зарегистрированных на объемных монохромных голограммах изображений использован точечный источник белого рассеянного света, расположенный под углом 45° относительно нормали к пластине. Получено 90 фотографий каждой голограммы при охвате области угла 120° . Фотосъемка скульптуры и голограмм производилась вокруг объекта под углами 0 и 45° . В качестве программного пакета обработки серии фотографий применена программа Agisoft PhotoScan (версия 1.4.5). Объем обработанных файлов составил около 4,5 ГБ. **Основные результаты.** Приведены результаты восстановления 3D-модели из двух голограмм одного и того же объекта. Проведен сравнительный анализ полученных 3D-моделей изображения. Показано, что построенная фотограмметрическим методом объемная модель голограммы имеет визуальное отличие от модели самого объекта. Повышение качества 3D-модели возможно при увеличении количества записанных фазовых голограмм одного и того же объекта с разных ракурсов. **Практическая значимость.** Предложенный метод оцифровки голограмм с применением технологии фотограмметрии может найти применение для решения задач по долгосрочному хранению информации об объектах культурного наследия.

Ключевые слова

изобразительная голография, фотограмметрия, цифровизация голограмм, культурное наследие, сохранение культурного наследия

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры реставрации и экспертизы объектов культуры Санкт-Петербургского государственного института культуры Т.В. Шлыковой и А.М. Тимошенковой за предоставление оригинальных объектов для исследований и за активное участие в проведении экспериментов и в обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках научного проекта № 3.1893.2017/4.6, выполняемого коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации.

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF VOLUME PICTORIAL HOLOGRAM BY PHOTOGRAMMETRY METHOD

E.V. Rabosh^a, D.A. Ankushin^a, N.S. Balbekin^a, Yu.A. Vavilova^a, A.M. Timoshenkova^b,
E.S. Avdonina^a, T.V. Shlykova^b, N.V. Petrov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Culture and Arts, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation

Corresponding author: Rabosh.ev7@gmail.com

Article info

Received 02.09.19, accepted 05.10.19

Article in Russian

For citation: Rabosh E.V., Ankushin D.A., Balbekin N.S., Vavilova Yu.A., Timoshenkova A.M., Avdonina E.S., Shlykova T.V., Petrov N.V. Three-dimensional simulation of volume pictorial hologram by photogrammetry method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1013–1021 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1013-1021

Abstract

Subject of Research. The digitizing possibility for pictorial holograms is considered aimed at their storage and processing with the use of digital technologies. A novel method is proposed for application of photogrammetric technology with the view to create digital images from holograms. The prospects of obtaining a digital copy are discussed by applying a series of photographs and processing software package. **Method.** The ceramic sculpture with 89 mm height was chosen as an object for the experiment. Two pictorial sculpture holograms were recorded from the back and front sides by He-Ne laser at the wavelength $\lambda = 633$ nm with the power $P = 50$ mW for 90 seconds. A photograph of the object was taken as it rotates around its axis with a step of 1.8° . The Canon EOS 1100D camera with a resolution of 12.2 million pixels was selected for photography. A series of 300 photos was performed. For recovery of images registered on volume monochrome holograms, a point source of white scattered light was used inclined at an angle of 45° to the normal of the plate. Ninety photos of each hologram were obtained with an angle area coverage of 120° . The sculpture and holograms were photographed around the object at the angles equal to 0 and 45° . Agisoft PhotoScan (version 1.4.5) software was used as a processing software package for a series of photographs. The volume of the processed files was about 4.5 GB. **Main Results.** The results of a 3D model restoration from two holograms of the same object are presented. Comparative analysis of the obtained 3D-models of the image is carried out. It is shown that the hologram volume model created by photogrammetric method has a visual difference from the model of the object itself. The 3D model quality improvement depends on increasing the number of recorded phase holograms of the same object from different angles. **Practical Relevance.** The proposed digitizing method for the holograms through the use of photogrammetry technology can find practical application for solving problems in the field of long-term storage of information about cultural heritage sites.

Keywords

pictorial holography, photogrammetry, hologram digitization, cultural heritage, cultural heritage preservation

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Shlykova T.V. and Timoshenkova A.M., the colleagues of the Department of Restoration and Examination of Cultural Objects (Saint Petersburg State University of Culture and Arts) for submitting the unique items and an active participation in the experiments and fruitful discussions.

This work was carried out as part of the scientific project No. 3.1893.2017 / 4.6 by scientific teams of scientific laboratories of educational institutions of higher education, subordinate to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Введение

Современный мир характеризуется увеличением количества объектов, созданных или сохраненных посредством цифровых технологий в различных отраслях нашей жизни. Стремительное развитие науки, появление новых техник и технологий сегодня оказывают влияние на всевозможные сферы деятельности человека. Не остаются без внимания и гуманитарные направления, в частности, исторические науки, такие как археология и музееведение, а также тема культурного досуга. Тенденция глобальной цифровизации изменяет восприятие музеев во всем мире: интерактивные инсталляции [1, 2], виртуальная реальность [3], искусственный интеллект и пр. Цифровое искусство и взаимодействие с ним в галереях и музеях привлекают большую публику разных возрастов. Однако музеи — это прежде всего кладовая уникальных экспонатов, сохраненных или найденных на раскопках, исторических драгоценностей, преимущественно представленных в единственных экземплярах. Любые памятники с течением времени разрушаются, и процесс износа объектов культурного наследия вследствие влияния факторов окружающей среды имеет ускоренный характер [4, 5]. Основными причинами являются: ухудшение экологической обстановки, техногенные катастрофы, а также существование факта негативного человеческого отношения к памятникам (похищение, акты вандализма и пр.) — все это отрицательно сказывается на времени жизни объектов культурного наследия. Поэтому в так называемую электронную эпоху помимо накопления, обработки и передачи информации, особенно остро стоит вопрос эффективного хранения исторических объектов и информации о них. Хотя ведение высокоточного контроля входит в обязательные задачи музейной работы и реставрационного дела, до сих пор нет устоявшегося регламента реставрационного процесса. Например, художник-реставратор, принимая в работу произведения изобразительного искусства, как правило, не имеет полной реставрационной документации,

либо получает разнородные, бессистемные сведения о состоянии целостности объекта [6]. Чтобы сохранить объекты культурного наследия для последующих поколений и максимально уберечь их от негативного воздействия, применяются в первую очередь классические методы, такие как описание и анализ, зарисовка, фотофиксация и картография. Однако они не являются исчерпывающими и малоэффективны [7, 8]. Поэтому целью нашей работы было продемонстрировать возможность использования изобразительной голографии и фотограмметрии в качестве существенного и эффективного дополнения к методам, применяемым для сохранения информации об объектах культурного наследия.

Среди компьютерных техник, осуществляющих мониторинг качества и сохранности объектов, особенно выделяется сегодня лазерное 3D-сканирование [9, 10]. Эта технология помогает вести документацию о состоянии архитектурных сооружений и объектов в картографии на высоком уровне. В области геодезии и архитектуры также хорошо известна другая техника — фотограмметрия, появившаяся практически одновременно с фотографией. Этот метод применяется в построении трасс и дорог [11], линий электропередач, для задач исследования микрорельефа, микроскопии [12]. Фотограмметрия по серии снимков позволяет строить 3D-модели исследуемых объектов и определять форму, габариты и положения объектов в пространстве. Также следует отметить распространение данной технологии в области реставрации памятников архитектуры и уникальных предметов [13–15].

Отдельно фотография как техника не способна передать полную фиксацию свойств предмета и его точные размеры, поэтому в качестве существенного и необходимого дополнения к классическим методам сохранения информации об объектах культурного наследия может применяться изобразительная голография. Эту технологию можно использовать для создания объемных изображений сокровищ истории. В сфере музейного дела изобразительная голография и лазерная реставрация появились благодаря работам пионера в этой области Дж. Асмуса, который записывал памятники г. Венеции [16, 17]. С изобретением метода изобразительной голографии Ю.Н. Денисюком (рис. 1) стало возможным активно внедрять данную технику для получения оптических копий музейных экспонатов с последующим восстановлением изображений при помощи белого света.

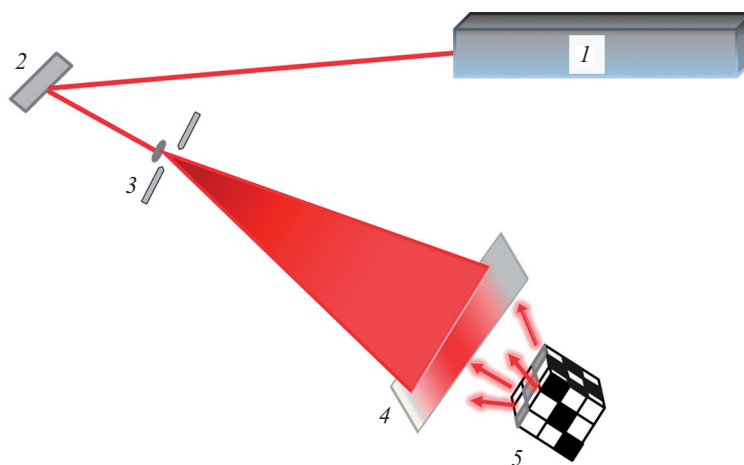


Рис. 1. Принципиальная схема записи изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка: 1 — лазер, 2 — зеркало, 3 — система микрообъектив-пинхол, 4 — фоточувствительная пластина, 5 — объект

Важными достоинствами голограмм являются: информационная емкость, превосходящая на несколько порядков емкость дисплеев и фотографий [18, 19], долговечность (превышающая время жизни фотографий), передача детальности свойств и характеристик объекта. Однако на сегодняшний день изобразительная голография еще не получила широкого распространения ввиду сложного и многостадийного процесса записи, что в свою очередь обуславливает их внушительную себестоимость. Изобразительная голография является самостоятельным жанром декоративно-прикладного искусства [20, 21], и, следовательно, нуждается в обеспечении сохранения, защиты, эффективной и безопасной передачи содержащейся в ней информации. К примеру, транспортировка голограмм (особенно широкоформатных) связана с риском механических повреждений и нарушения целостности эмульсионного слоя.

Экспериментальное исследование алгоритмов фотограмметрии

В качестве решения вышеупомянутой проблемы предложено использовать вместо изобразительной голограммы 3D-модель объекта, информация о котором содержится в голограмме (3Dh-модель), полученной посредством фотограмметрии. Распространение цифровой фотограмметрии, связанное с массовым переходом на компьютерные технологии в 1990-е годы, ведет к расширению границ применения данных техник. Однако до сих пор этот метод не применялся для оцифровки изобразительных голограмм, поэтому

объединение изобразительной голографии и фотограмметрии может стать решением проблемы по точной фиксации информации, содержащейся в голограммах, и их безопасной «транспортировки». Разработка подобных технологий может стать весьма перспективной задачей ввиду современных возможностей оптической физики и компьютерных технологий.

Фотограмметрия объекта. Для создания объемных моделей применялся программный пакет Agisoft Photoscan, который использует технологию быстрого преобразования цифровых фотографий в 3D-модель методом триангуляции на основе облачных вычислений. Для корректного построения модели необходимо предъявлять жесткие требования к фотосъемке, в частности, к сохранению фиксированного фокусного расстояния используемой оптики.

Работа в программном пакете осуществляется в три этапа: первый этап — выравнивание фотографий. На данном этапе происходит поиск общих точек на фотографиях и построение разреженного облака точек. Далее происходит привязка модели в требуемой системе координат и оптимизация (строгое уравнивание параметров ориентирования снимков). Точечная модель формируется на втором этапе построения плотного облака. Здесь выполняется повторный поиск общих точек и определение их положения. Поскольку параметры взаимного ориентирования снимков уже известны с высокой точностью, представляется возможным сузить область поиска общих точек и гарантировать достоверность определения их соответствия. Плотность результирующего облака точек при этом оказывается достаточно высокой — в наиболее детальном режиме построения плотного облака анализируется буквально каждый пиксель исходных фотографий, и для всех пикселей определяется положение соответствующих им точек на местности. Заключительный этап — создание полигональной модели фильтрацией и триангулированием плотного облака точек.

Апробация предложенного метода проводилась с использованием керамической статуэтки высотой 89 мм. Для этого статуэтка устанавливалась на моторизированный поворотный транслятор, а камера фиксировалась на расстоянии 25 см от объекта исследования (схема фотосъемки приведена на рис. 2). Была получена серия из 300 снимков, выполненных с разных ракурсов с шагом поворота транслятора в $1,8^\circ$. После импорта фотографий программный пакет выполнял расчет модели по алгоритму, описанному выше. Результат представлен на рис. 3.

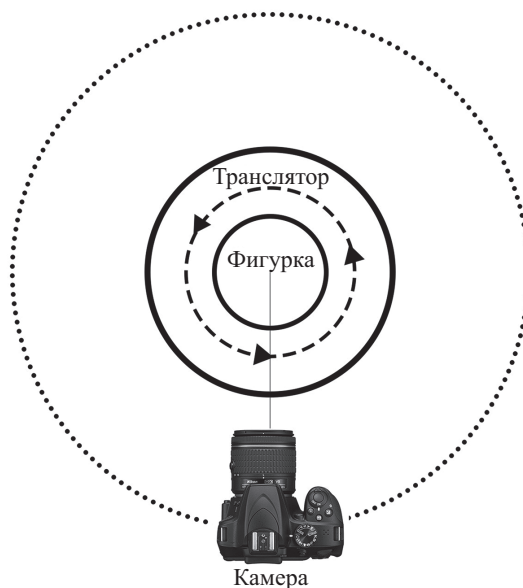


Рис. 2. Схема установки для съемки объекта

Фотограмметрия голограммы. На следующем этапе эксперимента была проведена регистрация двух монохромных отражательных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка. Для записи использовался He-Ne-лазер ($\lambda = 633$ нм, $P = 50$ мВт). На галогенсеребряных фоточувствительных пластинах ПФГ-03М размером 102×127 мм были записаны две голограммы статуэтки — с лицевой и с тыльной стороны — чтобы при фотосъемке и последующей обработке можно было получить объемную модель, рассматриваемую со всех сторон. Запись голограмм осуществлялась в течение 90 с.

Фотосъемка голограммы велась по отличной от первого этапа схеме (фотосъемка объекта): голограмма устанавливалась стационарно на расстоянии 25 см от источника освещения, фотоаппарат с фиксированным фокусным расстоянием перемещался по дуге (рис. 4). Было получено 90 фотографий каждой голограммы при охвате области в 120° (угол обзора используемой голограммы).

Запись фотографий как объекта, так и голограммы, производилась с максимальным заполнением кадра объектом и вокруг объекта под углами 0° и 45° относительно плоскости рабочей поверхности (рис. 5).

На рис. 6, 7 приведены фотографии исследуемых голограмм, где отчетливо видны мелкие детали рельефа объекта, зарегистрированного на монохромную голограмму. Результаты построения 3Dh-моделей представлены на рис. 8.

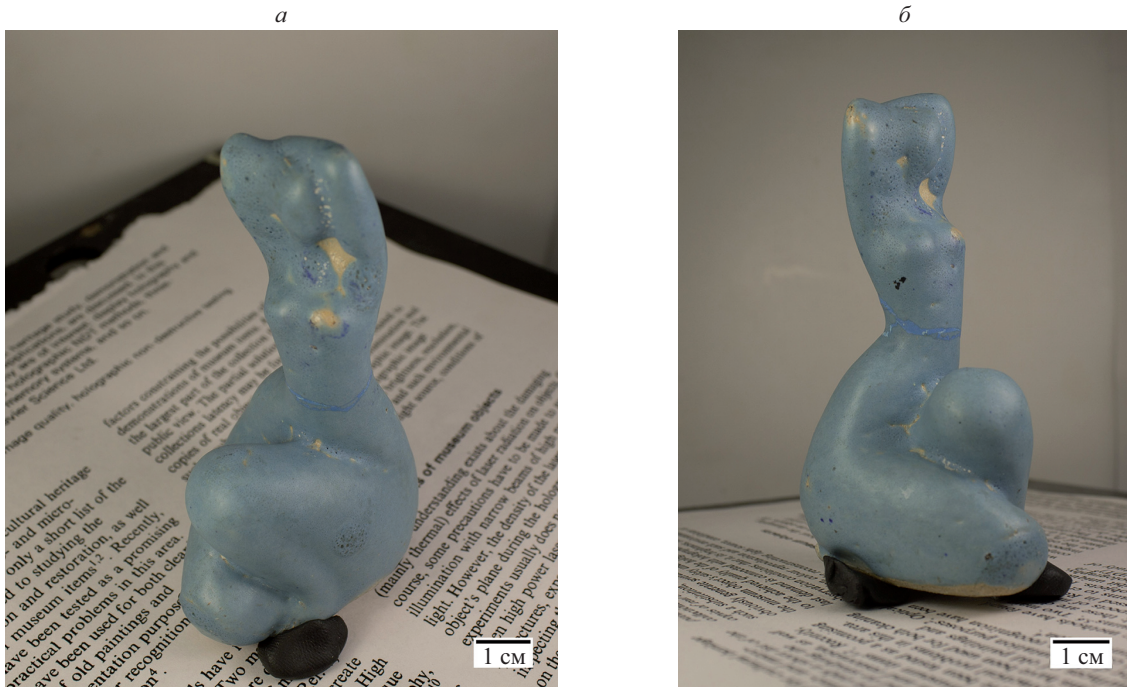


Рис. 3. Фотографии керамической статуэтки под углами 45° (а) и 0° (б)



Рис. 4. Схема установки для съемки изображения, зарегистрированного на объемной отражательной голограмме

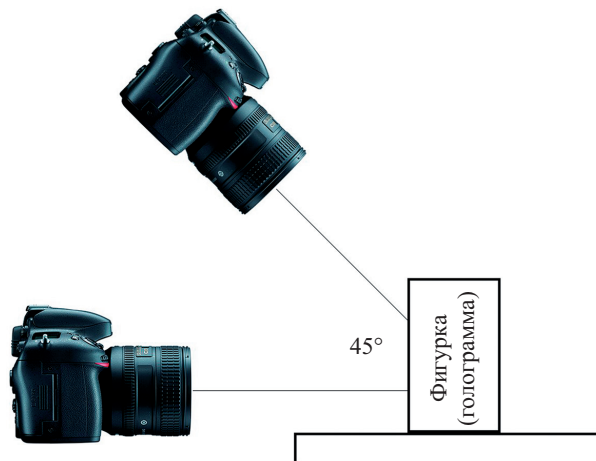


Рис. 5. Схематичное изображение процесса съемки

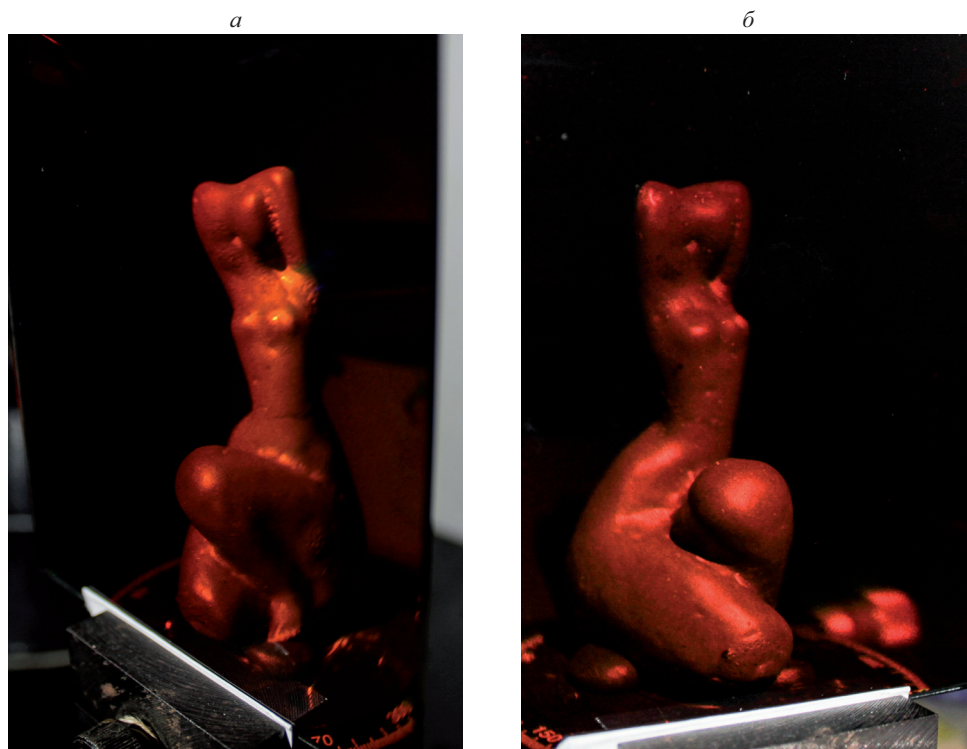


Рис. 6. Фотографии голограммы лицевой стороны статуэтки (а) и под углом 0° (б)

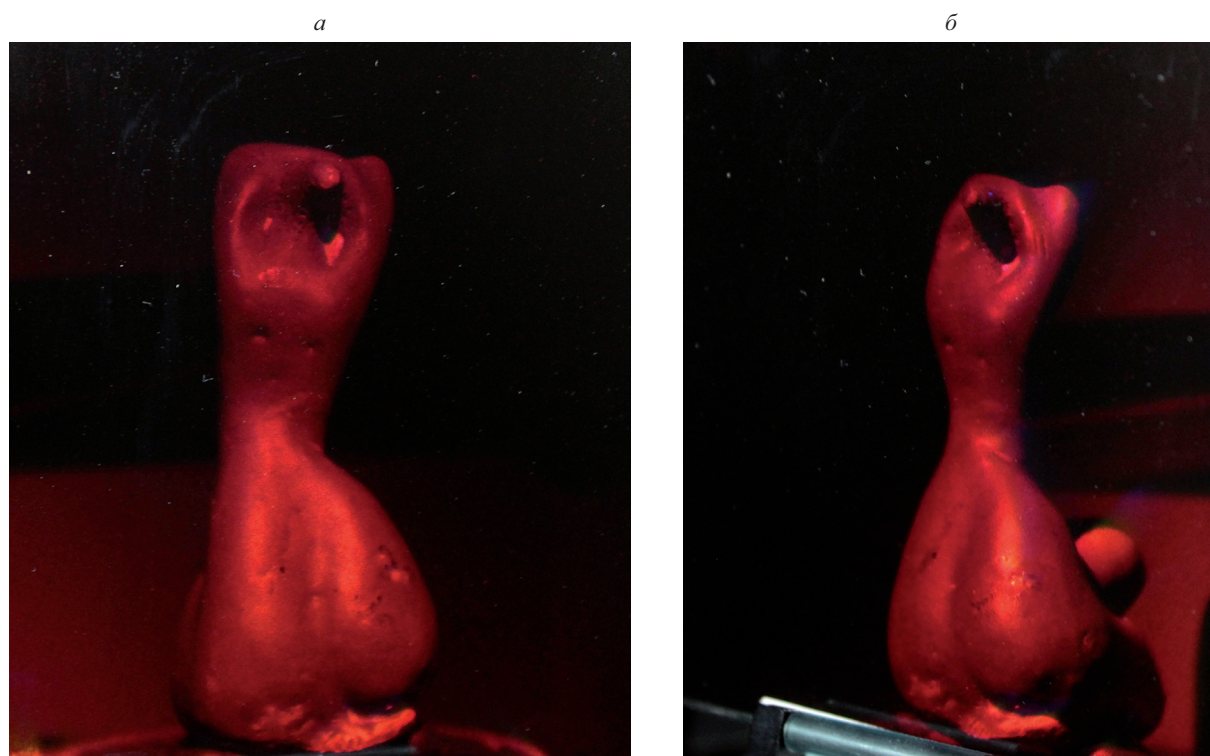


Рис. 7. Фотографии голограммы тыльной стороны статуэтки (а) и под углом 0° (б)

Обсуждение результатов

На финальном этапе работ построены и проанализированы две 3Dh-модели объекта (с лицевой и тыльной сторон). При сравнении моделей 3D и 3Dh заметна разница в цвете. Модель объекта соответствует истине: голубой цвет, белые следы воздействий в виде царапин и пр. (рис. 8, а). 3Dh-модель в свою очередь имеет бронзовый оттенок, что объясняется использованием монохромного излучения ($\lambda = 633$ нм) для записи

голограммы и не отражает следов внешнего воздействия (рис. 8, б, в). По форме модель объекта также соответствует самой скульптуре, в то время как обе 3Dh-модели представляют собой поверхности. Построить полноценную 3D-модель с использованием двух голограмм не представляется возможным, поскольку на процесс расчета высокоточной модели существенно влияет равномерное освещение объекта. Рельеф поверхности модели статуэтки коррелирует с объектом, но рельеф 3Dh-модели искажен из-за относительной деформации изображения на границах угла обзора.

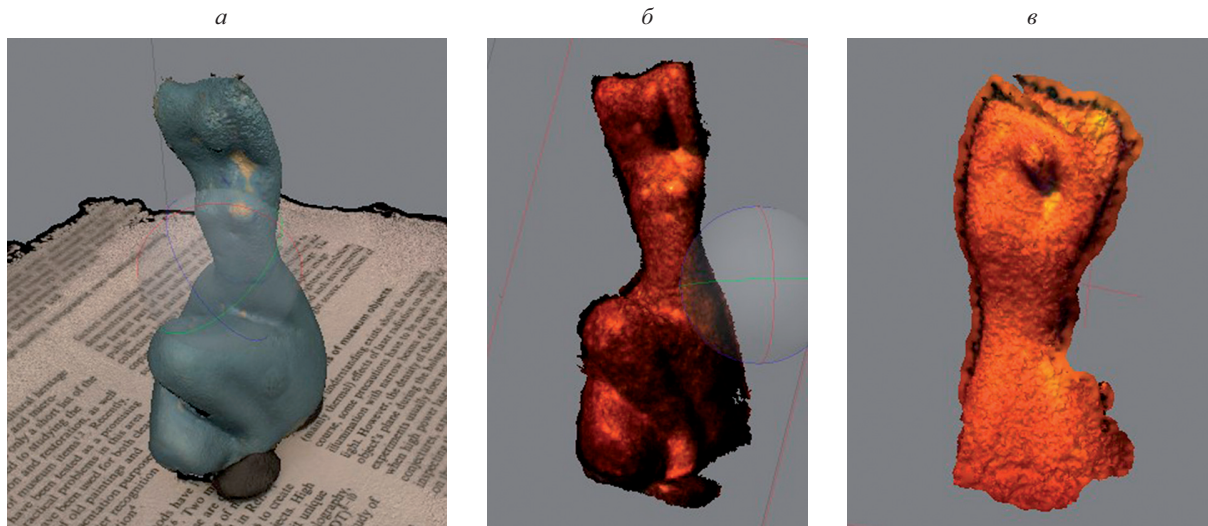


Рис. 8. 3D-модель керамической статуэтки (а), 3Dh-модели лицевой (б) и тыльной стороны голограммы (в)

Очевидно, что двух голограмм с углом обзора 120° недостаточно для построения точной 3D-модели объекта с применением техник фотограмметрии голограммы. В дальнейших исследованиях будут проработаны варианты с тремя и/или четырьмя монохромными голограммами, варьированием источников излучения для освещения голограмм и их расположением. Также будут записаны полноцветные голограммы для исследования цветопередачи при построении 3Dh-модели.

Заключение

В результате эксперимента были построены 3D-модели объекта и изображения, информация о котором содержится в голограмме (3Dh-модель). Оцифровка изобразительных отражательных голограмм является новым применением техник фотограмметрии. С научной точки зрения интерес вызывает проведение сравнительного анализа с целью адаптации фотограмметрических техник для достижения соответствия 3D- и 3Dh-моделей. Выявление визуальных различий, таких как цветопередача и детализация моделей формирует дальнейшие задачи для качественной оцифровки голограмм. Таким образом, в последующих работах планируется восстанавливать модель из трех-четырех голограмм одного и того же объекта, записанных с различных ракурсов, для получения наивысшей детализации 3Dh-модели.

Использование метода фотограмметрии применительно к голографии для получения 3D-моделей объектов, имеющих историческую ценность, возможно, но требует существенных доработок.

Литература

1. Huang H., Lo W.H., Ng K.H., Brailsford T., O'Malley C. Enhancing reflective learning experiences in museums through interactive installations // Proc. 13th International Conference of the Learning Sciences, ICLS 2018: Rethinking Learning in the Digital Age: Making the Learning Sciences Count. Volume 2. 2018. P. 776–783.
2. Koutsabasis P., Vosinakis S. Kinesthetic interactions in museums: conveying cultural heritage by making use of ancient tools and (re-) constructing artworks // Virtual Reality. 2018. V. 22. N 2. P. 103–118. doi: 10.1007/s10055-017-0325-0
3. Jung T.H., tom Dieck M.C. Augmented reality, virtual reality and 3D printing for the co-creation of value for the visitor experience at cultural heritage places // Journal of Place Management and Development. 2017. V. 10. N 2. P. 140–151. doi: 10.1108/JPM-D-2016-0045
4. Agapiou A., Alexakis D.D., Lysandrou V., Sarris A., Cuca B., Themistocleous K., Hadjimitsis D.G. Impact of urban sprawl to

References

1. Huang H., Lo W.H., Ng K.H., Brailsford T., O'Malley C. Enhancing reflective learning experiences in museums through interactive installations. Proc. 13th International Conference of the Learning Sciences, ICLS 2018: Rethinking Learning in the Digital Age: Making the Learning Sciences Count. Volume 2, 2018, pp. 776–783.
2. Koutsabasis P., Vosinakis S. Kinesthetic interactions in museums: conveying cultural heritage by making use of ancient tools and (re-) constructing artworks. Virtual Reality, 2018, vol. 22, no. 2, pp. 103–118. doi: 10.1007/s10055-017-0325-0
3. Jung T.H., tom Dieck M.C. Augmented reality, virtual reality and 3D printing for the co-creation of value for the visitor experience at cultural heritage places. Journal of Place Management and Development, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 140–151. doi: 10.1108/JPM-D-2016-0045
4. Agapiou A., Alexakis D.D., Lysandrou V., Sarris A., Cuca B., Themistocleous K., Hadjimitsis D.G. Impact of urban sprawl to

- cultural heritage monuments: The case study of Paphos area in Cyprus // *Journal of Cultural Heritage*. 2015. V. 16. N 5. P. 671–680. doi: 10.1016/j.culher.2014.12.006
5. Чулин А.В., Парфенов В.А. Использование лазерных технологий для реставрации металлических объектов истории и культуры // *Оптический журнал*. 2007. Т. 74. № 8. С. 56–60.
 6. Яблоков А.Л. Графика в паспорте реставрации памятника средневековой живописи // *Художественное наследие. Сборник научных трудов. Внеочередной выпуск. ВНИИР. М.* 1989. С. 126–133.
 7. Фирсова О., Шестопалова Л. Спасая шедевры // *Наука в России*. 2008. № 1. С. 78–84.
 8. Большакова Н.А., Шлыкова Т.В. О различных подходах к реставрации памятников античной керамики и европейского фарфора на примере ваз «Огонь» и «Земля» из серии И.И. Кендлера «Четыре стихии» // *Труды Исторического факультета Санкт-Петербургского университета*. 2015. № 22. С. 114–121.
 9. Fontana R., Gambino M.C., Greco M., Pampaloni E., Pezzati L., Scopigno R. High-resolution 3D digital models of artworks // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 5146. P. 34–43. doi: 10.1117/12.501248
 10. Boochs F., Huxhagen U., Kraus K. Potential of high-precision measuring techniques for the monitoring of surfaces from heritage objects // *Proc. International Workshop SMW08, Sesto Fiorentino (FI), Italy*. 2008. P. 87–96.
 11. Neukum G., Jaumann R., Scholten F., Gwinner K. The high resolution stereo camera (HRSC): acquisition of multi-spectral 3D-data and photogrammetric processing // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10569. P. 1056921. doi: 10.1117/12.2307899
 12. Gontard L.C., López-Castro J.D., González-Rovira L., Vázquez-Martínez J.M., Varela-Feria F.M., Marcos M., Calvino J.J. Assessment of engineered surfaces roughness by high-resolution 3D SEM photogrammetry // *Ultramicroscopy*. 2017. V. 177. P. 106–114. doi: 10.1016/j.ultramic.2017.03.007
 13. Balletti C., Ballarin M., Vernier P. Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2018. V. 42. N 2. P. 55–65. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018
 14. Balletti C., Ballarin M. An application of integrated 3D technologies for replicas in cultural heritage // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. V. 8. N 6. P. 285. doi: 10.3390/ijgi8060285
 15. Portalés C., Lerma J.L., Pérez C. Photogrammetry and augmented reality for cultural heritage applications // *Photogrammetric Record*. 2009. V. 24. N 128. P. 316–331. doi: 10.1111/j.1477-9730.2009.00549.x
 16. Asmus J.F., Guattari G., Lazzarini L., Musumeci G., Wuerker R.F. Holography in the conservation of statuary // *Studies in Conservation*. 1973. V. 18. N 2. P. 49–63. doi: 10.1179/sic.1973.005
 17. Asmus J.F. Light for art conservation // *Interdisciplinary Science Reviews*. 1987. V. 12. N 2. P. 171–179. doi: 10.1179/isr.1987.12.2.171
 18. Soskin S.I., Shoidin S.A. Расчет оптической системы голографического запоминающего устройства // *Оптика и спектроскопия*. 1978. Т. 44. № 3. С. 566–573.
 19. Li X., Chen L., Li Y., Zhang X., Pu M., Zhao Z., Ma X., Wang Y., Hong M., Luo X. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation // *Science advances*. 2016. V. 2. N 11. P. 1601102. doi: 10.1126/sciadv.1601102
 20. Задумина О.С. Экспонирование цифровых копий в музее // *Молодежный вестник Санкт-Петербургского государственного института культуры*. 2018. № 1. С. 102–104.
 21. Денисюк Ю.Н., Суханов В.И. Голограмма с записью в трехмерной среде как наиболее совершенная форма изображения // *Успехи физических наук*. 1970. Т. 101. № 6. С. 337–338. doi: 10.3367/UFNr.0101.197006h.0337
 5. Chulin A.V., Parfenov V.A. Using laser technologies for the restoration of metallic objects of history and culture. *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 8, pp. 555–559. doi: 10.1364/JOT.74.000555
 6. Iablokov A.L. Graphics in the restoration certificate of the medieval painting artifact. *Artistic heritage. Collection of scientific papers*, Moscow, 1989, pp. 126–133. (in Russian)
 7. Firsova O., Shestopalova L. Saving masterpieces. *Science in Russia*, 2008, no. 1, pp. 78–84. (in Russian)
 8. Bolshakova N.A., Shlykova T.V. On Diverse Conservation Approaches to Ancient Ceramics and European Porcelain as Exemplified in the Case of Vases «The Fire» and «The Earth» from the «Four Elements» Series by I.I. Kändler. *Trudy Istoricheskogo fakul'teta Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2015, no. 22, pp. 114–121. (in Russian)
 9. Fontana R., Gambino M.C., Greco M., Pampaloni E., Pezzati L., Scopigno R. High-resolution 3D digital models of artworks. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5146, pp. 34–43. doi: 10.1117/12.501248
 10. Boochs F., Huxhagen U., Kraus K. Potential of high-precision measuring techniques for the monitoring of surfaces from heritage objects. *Proc. International Workshop SMW08, Sesto Fiorentino (FI), Italy*, 2008, pp. 87–96.
 11. Neukum G., Jaumann R., Scholten F., Gwinner K. The high resolution stereo camera (HRSC): acquisition of multi-spectral 3D-data and photogrammetric processing. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10569, pp. 1056921. doi: 10.1117/12.2307899
 12. Gontard L.C., López-Castro J.D., González-Rovira L., Vázquez-Martínez J.M., Varela-Feria F.M., Marcos M., Calvino J.J. Assessment of engineered surfaces roughness by high-resolution 3D SEM photogrammetry. *Ultramicroscopy*, 2017, vol. 177, pp. 106–114. doi: 10.1016/j.ultramic.2017.03.007
 13. Balletti C., Ballarin M., Vernier P. Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 55–65. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018
 14. Balletti C., Ballarin M. An application of integrated 3D technologies for replicas in cultural heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 285. doi: 10.3390/ijgi8060285
 15. Portalés C., Lerma J.L., Pérez C. Photogrammetry and augmented reality for cultural heritage applications. *Photogrammetric Record*, 2009, vol. 24, no. 128, pp. 316–331. doi: 10.1111/j.1477-9730.2009.00549.x
 16. Asmus J.F., Guattari G., Lazzarini L., Musumeci G., Wuerker R.F. Holography in the conservation of statuary. *Studies in Conservation*, 1973, vol. 18, no. 2, pp. 49–63. doi: 10.1179/sic.1973.005
 17. Asmus J.F. Light for art conservation. *Interdisciplinary Science Reviews*, 1987, vol. 12, no. 2, pp. 171–179. doi: 10.1179/isr.1987.12.2.171
 18. Soskin S.I., Shoidin S.A. Holographic memory optical system calculation. *Optics and Spectroscopy*, 1978, vol. 44, no. 3, pp. 566–573. (in Russian)
 19. Li X., Chen L., Li Y., Zhang X., Pu M., Zhao Z., Ma X., Wang Y., Hong M., Luo X. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation. *Science advances*, 2016, vol. 2, no. 11, pp. 1601102. doi: 10.1126/sciadv.1601102
 20. Zadumina O.S. Digital reproduction exhibiting in the museum. *Molodezhnyj vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta kul'tury*, 2018, no. 1, pp. 102–104. (in Russian)
 21. Denisyuk Y.N., Sukhanov V.I. Hologram recorded in a three-dimensional medium as the most perfect form of image. *Soviet Physics – Uspekhi*, 1970, vol. 13, no. 3, pp. 414–415. doi: 10.1070/PU1970v013n03ABEH004268

Авторы

Рабощ Екатерина Владимировна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1231-1618, Rabosh.ev7@gmail.com

Authors

Ekaterina V. Rabosh — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1231-1618, Rabosh.ev7@gmail.com

Анкушин Даниил Андреевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8938-4500, ankushin.daniil42@gmail.com

Балбекин Николай Сергеевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55782919700, ORCID ID: 0000-0003-0152-6795, nbalbekin@niuitmo.ru

Вавилова Юлия Александровна — ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8610-9530, Vavilova_julia@mail.ru

Тимошенкова Анастасия Максимовна — студент, Санкт-Петербургский государственный институт культуры, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6229-7482, nastja_tim98@mail.ru

Авдонина Екатерина Сергеевна — кандидат экономических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-7222-6541, esavdonina@itmo.ru

Шлыкova Татьяна Викторовна — кандидат искусствоведения, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный институт культуры, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1183-9480, yasno-solnce@mail.ru

Петров Николай Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7202910606, ORCID ID: 0000-0002-8866-7592, n.petrov@niuitmo.ru

Daniil A. Ankushin — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8938-4500, ankushin.daniil42@gmail.com

Nikolay S. Balbekin — PhD, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55782919700, ORCID ID: 0000-0003-0152-6795, nbalbekin@niuitmo.ru

Yulia A. Vavilova — Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8610-9530, Vavilova_julia@mail.ru

Anastasiya M. Timoshenkova — Student, Saint Petersburg State University of Culture and Arts, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6229-7482, nastja_tim98@mail.ru

Ekaterina S. Avdonina — PhD, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-7222-6541, esavdonina@itmo.ru

Tatiana V. Shlykova — PhD, Senior Lecturer, Saint Petersburg State University of Culture and Arts, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1183-9480, yasno-solnce@mail.ru

Nikolay V. Petrov — PhD, Associate Professor, Leading Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7202910606, ORCID ID: 0000-0002-8866-7592, n.petrov@niuitmo.ru