

УДК 72.025.3, 004.93, 535-15, 620.179.1

IN SITU³ ДВУХДИАПАЗОННАЯ 3D-ДЕФЕКТОСКОПИЯ СТЕНОПИСЕЙ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ

В.В. Кугуракова¹, Е.Ю. Зыков², А.В. Касимов³, А. Г. Ситдииков⁴,
А.А. Скобелев⁵, Е.Ф. Шайхутдинова⁶

^{1-3,5}Казанский (Приволжский) федеральный университет;

^{4,6}Институт археологии им. А.Х. Халикова АН РТ;

⁶Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²evgeniy.zykov@kpfu.ru, ³delaluna@mail.ru,

⁴sitdikov_a@mail.ru, ⁵v1212186@gmail.com, ⁶eugen.shaykhutdinova@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена проблеме создания методики мониторинга состояния и систематизации сведений о фресковой живописи объектов культурного наследия. Проблема может быть решена путем компиляции традиционного метода картографирования фресок с применением современных средств визуализации. Описана новая технология Project Tango для фиксации текстур сложных 3D внутренних объёмов архитектурных памятников. Предложены методика экспресс сканирования с автоматическим картограммированием для дальнейшего сравнительного анализа изменения состояния стенописей и методика оценки процента утраты.

Ключевые слова: дефектоскопия, трехмерная визуализация, Project Tango, инфракрасный датчик, SLAM, SFM, PTAM, Structure from motion, Monocular vision, Stereo vision, архитектурный памятник, объект культурного наследия, мониторинг, картограммирование

³ in situ (с лат. — «на месте»)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и сложных задач мониторинга состояния объектов культурного наследия является наблюдение за состоянием деградирующей фресковой живописи. На данный момент времени фиксация сюжетных композиций и их сохранность состоят в графическом или фотометрическом исполнении, которое не поддается автоматизации. Данный аспект серьезно затрудняет и усложняет мониторинг состояния объектов культурного наследия со сложными архитектурными расписанными элементами интерьера.

Картограммирование древних фресок – это создание полных копий всех росписей исследуемого храма не в отдельных фрагментах, а целиком в форме разверток стен помещения, выполненных в цвете с точным учетом масштабных соотношений всех частей расписанного интерьера [1].

Методика фиксации сюжета и состояния фресковой живописи практически не менялась с конца XIX в. Она состоит в выполнении схематического масштабного черно-белого изображения основных элементов живописи на полупрозрачной бумаге вручную. Однако такой метод имеет ряд недостатков. Прежде всего, чертеж выполняется в единственном экземпляре на один сюжет фрески без привязки к внутренним архитектурным элементам здания. Также на одной картограмме размещаются все дефекты живописного полотна, имеющие место на тот момент времени, в который они выполнялись, что затрудняет его расшифровку.

Использование фотометрии ограничивается фотофиксацией фресок. Огромное количество художественных деталей фресок на фотографии затрудняет чтение дефектов, поэтому произвести анализ состояния живописи достаточно проблематично. Таким образом, перечисленные выше методы не позволяют провести мониторинг изменений живописного полотна с целью выявления рисков и угроз состояния и выработать мероприятия по обеспечению их сохранения. Оптимальным решением данной проблемы является периодическое картограммирование фресок с универсальным систематизированным представлением их состояния во времени.

В настоящей работе реализован синтез классического метода и компьютерных технологий. Метод регулярного мониторинга состояния фресок с фикса-

цией их состояния позволит оптимизировать работу реставратора и оценить масштаб реставрационных и исследовательских работ.

ТЕХНОЛОГИЯ GOOGLE PROJECT TANGO

Можно с уверенностью сказать, что устройства, примечательные поддержкой технологии Google Project Tango, – это открытие 2016 года. В них, помимо короткофокусной широкоугольной камеры установлены обычные для смартфонов 4-мегапиксельная тыльная и 1-мегапиксельная лицевая камеры, а в случае смартфонов Intel 8- и 2- мегапиксельные камеры.

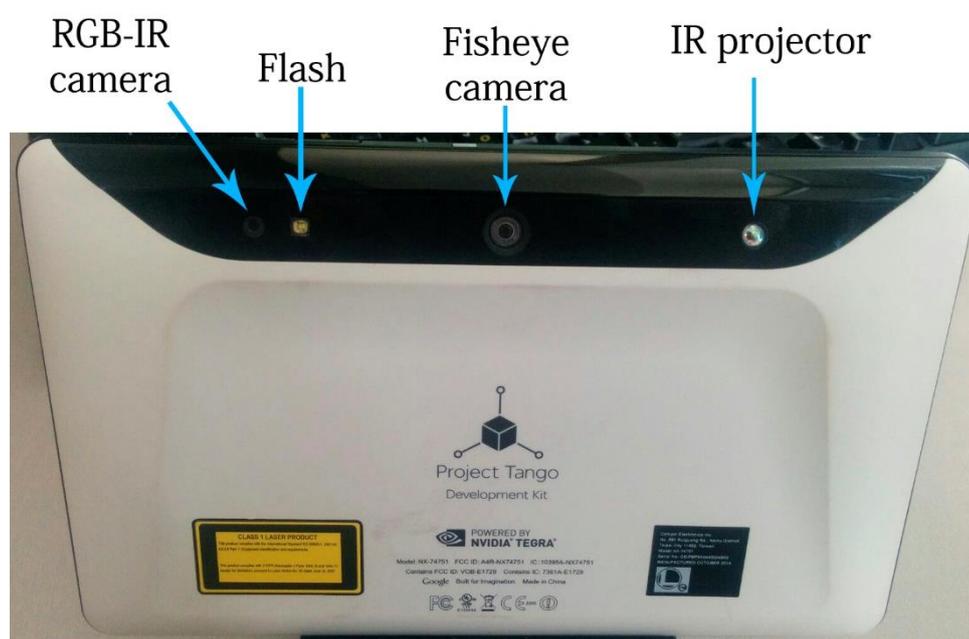


Рис. 1. Тыльная сторона планшета Project Tango Development Kit

На задней поверхности устройства (рис. 1), слева направо, расположены:

- цветная камера, совмещенная с инфракрасной времяпролетной (time-of-flight) камерой;
- вспышка;
- короткофокусная широкоугольная камера, обеспечивающая поддержку распознавания движений;
- инфракрасный лазерный проектор.

Обычная камера и сопутствующая ей вспышка рассчитаны на съёмку внешнего мира; лазерный проектор накладывает инфракрасную сетку на объек-

ты, на которые он направлен; времяпролетная камера обеспечивает захват картинки. Камера определяет дальность через скорость света, измеряя время пролета светового сигнала, испускаемого инфракрасной камерой, и отраженного каждой точкой получаемого изображения. Скорость обработки данных о глубине пространства составляет более 10 миллионов точек в секунду. Кроме того, смартфон включает в себя широкоугольную камеру с разрешением VGA и углом зрения более 160 градусов, вместе с которой работает высокоточная комбинация акселерометра и гироскопа. Такой комплекс называют гиросtabilизатором (Inertial Measurement Unit, IMU) и применяют в задачах слежения за перемещениями объектов и особенностями сцены. Таким образом, технология Project Tango даёт мобильной отрасли три базовых технологии: отслеживание перемещений; исследование окружающей среды; восприятие глубины пространства.

Технология отслеживания перемещений использует гиросtabilизатор для выяснения текущего положения устройства по отношению к месту начала движения. Подобный подход можно использовать для навигации в помещениях без использования GPS.

Для исследования окружающей среды использован метод одновременной локализации и построения карты (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) [2], который является развитием метода Structure-from-Motion (SFM) [3]. Сущность SLAM заключается в объединении данных сканирования пространства и отслеживания местоположения. Это можно использовать для «поправки на смещение» в сценариях использования, где отслеживание перемещений выполняется на достаточно длительных отрезках времени.

СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ SFM, SLAM И PTAM

SFM решает проблемы реконструкции 3D сцены из небольших наборов изображений, а проективная геометрия используется как метод построения сцены. SLAM проводит оценку движения в режиме реального времени, при этом непрерывно наблюдается среда по датчикам, которые могут включать или отключать камеры. SFM- и SLAM-подходы исследованы в последние годы (см., например, [4]).

Технология восприятия глубины пространства предполагает использование камеры для создания облака точек, представляющего информацию о глубине пространства и расположении различных объектов перед камерой.

Развитие SLAM-подхода описано в работе [5], где для отслеживания изменения положения объекта в реальном времени использована вероятностная фильтрация. В [6, 7] реализован SLAM-подход в обучении, базирующийся на SFM и названный PTAM (Parallel tracking and mapping): отображение и отслеживание разделены на две отдельные задачи и выполняются в параллельных потоках. В последнее время алгоритм PTAM широко применяется в некоторых системах отображения [8, 9] и роботизированных системах [10–12]. В [13, 14] предложен визуальный алгоритм одометрии, который несколько отличается от PTAM. В [15] продолжен анализ PTAM с целью развития этого подхода.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ PROJECT TANGO ДЛЯ БЫСТРОГО СНЯТИЯ 3D СЦЕН ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ

Одним из внедрений технологии Project Tango является визуализация внутренних объёмов архитектурных памятников для создания их высокореалистичных 3D моделей с детализированными текстурами [16]. Традиционно археологи используют устаревший метод рисования 3D-модели на бумаге карандашом. Этот метод по сравнению с использованием современных технологий отстаёт по многим показателям, поскольку визуализация с помощью такого традиционного подхода становится неявной. Автоматическая 3D-реконструкция обеспечивает большую точность и детальность фиксации изображений, размещённых на внутренних объёмах архитектурных памятников (фрески, роспись, иконы).

В [17] представлена разработка CHISEL – система высокореалистичной 3D реконструкции в режиме реального времени с использованием динамического пространственного хэширования [18], карты глубины [5] и визуально-инерционной одометрии для точной локализации. Отбраковывая части сцены, которые не содержат поверхностей, авторы CHISEL избегают ненужных вычислений и избыточного использования памяти.

Даже в условиях сильной зашумлённости (мало освещения, имеются взвеси пыли, направленные лучи света) эта система позволяет реконструировать и

отображать очень большие сцены с разрешением 2–3 см в реальном времени на мобильном устройстве без использования вычислений на GPU. Реконструкции CHISEL намного ниже, чем современные методы картирования TSDF (truncated signed distance field) [19], которые обычно требуют разрешения в сантиметровом диапазоне. В частности, Nießner и др. [18] получают карты с разрешением 4 мм сопоставимого или большего размера с использованием аппаратных средств GPU и динамической пространственной хеш-карты. В конечном счете, по мере появления более мощных мобильных графических процессоров, реконструкции на этих разрешениях станут возможными и на мобильных устройствах.

Однако CHISEL пока не может гарантировать отслеживания цельности глобальной карты и накопления ошибок позиционирования со временем («поправки на смещение»). Многие предыдущие работы (например, [20, 21]) комбинировали отображение некоторых ключевых точек, визуальную одометрию и предварительную реконструкцию, чтобы уменьшить накопление ошибок. Отмечается, что будущие исследования должны адаптировать методы SLAM, сочетающие визуальную инерционную одометрию, редкую локализацию ориентира и плотную трехмерную реконструкцию более эффективным способом, чтобы обеспечить релокализацию в реальном времени на мобильном устройстве.

В [23] предложено использовать устройства, оснащенные Project Tango, для картографических приложений исследования помещений с пониженными требованиями к точности, чтобы конкурировать с такими приборами высокого уровня съемки, как тахеометры, наземные лазерные сканеры или фотограмметрические камеры ближнего действия.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТЕНОПИСЕЙ

Одной из важных задач контроля сохранности объектов культурного наследия (ОКН), в частности, состояния художественных изображений (стенописей) является анализ состояния внутренних поверхностей архитектурных памятников.

Наблюдения за температурно-влажностным режимом архитектурных памятников были начаты лишь в 1970-е годы. Такие исследования в большинстве памятников с настенными росписями проводились путем регистрации темпера-

туры и относительной влажности воздуха внутри помещений и сравнения этих данных с параметрами наружного воздуха за определенный период. Оценкой состояния объекта служил характер изменений этих измерений [24-26]. Также косвенным показателем температурно-влажностного состояния конструкций, включая материалы стенописей, является их микробиологическая оценка [27]. Следуя правилам музейного хранения, многие специалисты и по сей день считают тождественными состояние микроклимата внутри памятника и температурно-влажностный режим его конструкций, не имея каких-либо объективных количественных данных об их реальном состоянии. Сейчас чаще всего оценить состояние памятника можно лишь уже на стадии видимых разрушений поверхностного слоя стенописей визуально – с применением микроскопии или специальных видов фотосъёмки. Одной из основных причин такого «визуально-поверхностного» подхода к оценке состояния сохранности конструкций памятника и физически связанных с ними стенописей Б. Сизов [27] назвал «недостаточное распространение неразрушающих методов оценки влажностного состояния материалов памятников архитектуры».

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАРТОГРАММИРОВАННЫХ ТЕКСТУР

Копирование древнерусской живописи, создание полных картограмм [1] храмовых росписей – до недавних пор единственный метод сохранения церковной живописи отечественной реставрационной школы. Картограммирование древних фресок – это создание полных копий всех росписей исследуемого храма не в отдельных фрагментах, а целиком в форме разверток стен помещения, выполненных в цвете с точным учетом масштабных соотношений всех частей расписанного интерьера. Традиционные методы картограммирования стенописей описаны в работе [28]. При разработке автоматизированной системы мониторинга архитектурных памятников [29–31] мы столкнулись с аналогичными проблемами привязки картограмм к реальной геометрии ОКН [32] и способов их оценки. На данный момент для всех значимых ОКН существуют архивы картограммированных стенописей, которые тем не менее не имеют чёткой привязки к их внутренней геометрии.



Рис. 2. Диаграмма работы модуля экспресс дефектоскопии стенописей

Используя предложенную технологию Google Project Tango для экспресс-оценки состояния стенописей ОКН (рис. 2), можно выделить следующие задачи, выполняемые на всех этапах автоматически и *in situ*:

- сканирование внутренней геометрии ОКН;
- получение предварительной 3D модели;
- параллельное снятие текстур;
- очистка полученных данных (геометрии и текстур) от шумов при помощи низкочастотных и/или медианных фильтров;
- привязка текстур к 3D модели;
- картограммирование стенописи из очищенных текстур;
- привязка ранних архивных картограмм к полученной геометрии;
- сравнение свежей картограммы с архивными при помощи вычислений среднеквадратичных отклонений;
- выделение проблемных зон, отражающих наибольшее изменение состояния;
- оценка процента утрат;
- архивирование снятых данных на удаленный сервер;
- динамика проблемных мест по полученным количественным экспресс-характеристикам.

В [33] предложен метод автоматической обработки больших коллекций

документов, включая их валидацию и семантический анализ, который можно распространить для архивирования картограмм, полученных в разные периоды оценки ОКН.

ОЦЕНКА ПРОЦЕНТА УТРАТЫ

Оценка утраты осуществляется по трём независимым каналам регистрации: яркостных RGB-каналов оптической камеры, данных ИК-камеры и карты дальностей, что позволяет повысить репрезентативность полученных результатов.

Алгоритм выявления проблемных участков для одного канала таков: на начальном этапе производится наложение полученной текущей карты дефектоскопии на архивную эталонную и производятся их нормировки как по геометрическим, так и по амплитудным характеристикам при помощи аффинных преобразований; возможно, корректировки яркости и контрастирования для оптических данных отдельных фильтров для каждого из цветонесущих каналов. При необходимости изображения очищаются от помех при помощи низкочастотных и/или медианных фильтров. На следующем этапе вычисляются среднеквадратичные отклонения для каждой точки всего массива данных. При превышении пороговых значений среднеквадратичных отклонений координаты и амплитуды мест, принимаемых за проблемные, записываются в отдельный файл или слой для возможности в дальнейшем наблюдать динамику разрушения и принятия решений для каждого конкретного случая. Как изменение площади проблемных мест, так и увеличение значений среднеквадратичного отклонения от эталонного будут свидетельствовать о постоянном характере изменений (разрушений) и необходимости принятия мер для предотвращения дальнейшей деградации проблемных участков. Количественными экспресс-характеристиками проблемных мест могут выступать процент поражённой площади и максимум среднеквадратичного отклонения. В качестве экспресс-анализатора можно применять гистограммный метод [34, 35].

Аналогичным образом производится дефектоскопия и остальных независимых каналов регистрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высококачественные пространственные данные высокой плотности, которые способна захватить пара инфракрасных камер, можно использовать для трёхмерного сканирования помещений, построения карт глубины и реконструкции захваченных сцен. Широкоугольная камера, гиростабилизатор и выверенные программные механизмы синхронизации сенсоров через фиксирование отметок времени позволяют устройству реализовывать возможности Google Project Tango, в частности, для быстрой двухдиапазонной 3D-дефектоскопии стенописей архитектурных памятников, автоматизируя процесс мониторинга сложных текстурируемых объектов с существенной точностью фиксирования плоских изображений на внутренних поверхностях объемных архитектурных элементов ОКН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А.К., Крылова О.Ю. Итоги работ по копированию и картографированию фресок XVI в. церкви Св. Троицы в селе Большие Вяземы // Троицкие чтения 1997. Сб. научных исследований по материалам конференции. Большие Вяземы, 1998. С. 22–33, 148.
2. Davison A.J. Mobile Robot Navigation Using Active Vision, University of Oxford, Oxford, UK, 1998.
3. Tomono M. 3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-motion with Automatic Baseline Selection // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '05), April 2005. P. 3342–3347
4. Strasdat H., Montiel J.M.M., and Davison A.J. Visual SLAM: why filter? // Image and Vision Computing. 2012. V. 30, no. 2. P. 65–77.
5. Davison A.J. Real-time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera // in Proceedings of the 9th IEEE Int. Conference on Computer Vision, October 2003. P. 1403–1410.
6. Klein G. and Murray D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces // in Proceedings of the 6th IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '07), Nara, Japan, November 2007. P. 225–234.

7. Klein G. and Murray D. Improving the Agility of Keyframe-based SLAM // in Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision (ECCV '08), October 2008. P. 802–815.

8. Stühmer J., Gumhold S., and Cremers D. Parallel Generalized Thresholding Scheme for Live Dense Geometry from a Handheld Camera // in Trends and Topics in Computer Vision, Springer, Berlin, Germany, 2012. P. 450–462.

9. Newcombe R.A. and Davison A.J. Live dense reconstruction with a single moving camera // in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '10), June 2010. P. 1498–1505.

10. Blösch M., Weiss S., Scaramuzza D., and Siegwart R. Vision Based MAV Navigation in Unknown and Unstructured Environments // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '10), P. 21–28, Anchorage, Alaska, USA, May 2010.

11. Weiss S., Achtelik M.W., Lynen S. et al. Monocular Vision for Long-term Micro aerial Vehicle State Estimation: a Compendium // J. of Field Robotics. 2013. V. 30, no. 5. P. 803–831.

12. Sheng J., Tano S., and Jia S. Mobile Robot Localization and Map Building Based on Laser Ranging and PTAM // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '11), Beijing, China, August 2011. P. 1015–1020.

13. Forster C., Pizzoli M., and Scaramuzza D. SVO: Fast Semi-direct Monocular Visual Odometry // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '14), Hong Kong, June 2014. P. 15–22.

14. Engel J., Sturm J., and Cremers D. Semi-dense Visual Odometry for a Monocular Camera // in Proceedings of the 14th IEEE Int. Conference on Computer Vision (ICCV '13), Sydney, Australia, December 2013. P. 1449–1456.

15. Songmin Jia, Ke Wang, and Xiuzhi Li. Mobile Robot Simultaneous Localization and Mapping Based on a Monocular Camera // J. of Robotics. 2016. V. 2016. Article ID 7630340, 11 p.

16. Quentin Gautier, Steven Lee, Sungwook Son, and Jin Yu. 3D Reconstruction Using Tango // Kastner Research Group, 2016.

17. Klingensmith M., Dryanovski I., Srinivasa S.S., and Xiao J. CHISEL: Real Time Large Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device Using Spatially-hashed

Signed Distance Fields // Proceedings of Conference “Robotics: Science and Systems”, Rome, Italy, July 2015. 9 p. <https://robotics.ccny.cuny.edu/sites/default/files/publications/p40.pdf>.

18. Nießner M., Zollhöfer M., Izadi S., and Stamminger M. Real-time 3d Reconstruction at Scale Using Voxel Hashing // ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013. V. 25, no. 3. P. 579–588. http://gvv.mpi-inf.mpg.de/projects/MZ/Papers/SGASIA2013_VH/paper.pdf.

19. Curless B. and Levoy M. A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images // Proceedings of SIGGRAPH '96, 1996. <https://graphics.stanford.edu/papers/volrange/>.

20. Stueckler J., Gutt A., and Behnke S. Combining the Strengths of Sparse Interest Point and Dense Image Registration for RGB-D Odometry // Proceedings of the Joint 45th Int. Symposium on Robotics (ISR) and 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK), June 2014.

21. Nießner M., Dai A., and Fisher M. Combining Inertial Navigation and ICP for Real-time 3d Surface Reconstruction // EUROGRAPHICS. 2014. <https://graphics.stanford.edu/~mdfisher/papers/inertialNavigation.pdf>.

23. Eberhard Gülch. Investigations on Google Tango Development Kit for Personal Indoor Mapping // The 19th AGILE Int. Conference on Geographic Information Science was hosted by the Finnish Geospatial Research Institute, National Land Survey of Finland (NLS) and the University of Helsinki, 2016. 3 p. https://agile-online.org/conference_paper/cds/agile_2016/posters/102_Paper_in_PDF.pdf.

24. Сизов Б.Т. Наблюдения за температурно-влажностным режимом собора Рождества Богородицы Ферапонтова монастыря // Реставрация, исследование и хранение музейных художественных ценностей: Реф. сб. М.: Информкультура, 1982. Вып. 2.

25. Девина Р.А., Илларионова И.В., Сизова Е.А., Бойко В.А. Нормализация температурно-влажностного режима собора Рождества Богородицы Ферапонтова монастыря с помощью проветривания // Реставрация, исследование и хранение музейных художественных ценностей: Экспресс-информация. М.: Информкультура, 1985. Вып. 3. 7 с.

26. Гордеев Ю.И., Илларионова И.В., Сизова Е.А. Аэрационные устройства для зданий-памятников культовой архитектуры (клапаны-хлопушки) // Вопросы температурно-влажностного режима памятников истории и культуры: Сб. науч. тр. М., 1990. 98 с.

27. Сизов Б.Т. Мониторинг температурно-влажностного режима памятников архитектуры (на примере собора Рождества Богородицы Ферапонтова монастыря) // Журнал «Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК)». 2003. № 2. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1990.

28. Петрусенко Е.В. О методике картограммирования стенописей (из опыта работ 1996–1997 гг. в церкви Св. Троицы с. Б. Вязёмы) // Библиотека реставратора. 1998. С. 41–48.

29. Шайхутдинова Е.Ф., Касимов А.В., Ситдииков А.Г. Разработка автоматизированной системы учета результатов исследования и мониторинга текущего состояния историко-архитектурных объектов острова-града Свияжск // Историко-культурное и духовное наследие Свияжска: сборник материалов Международного конгресса (г. Казань, 15–16 июля 2015 г.) / Под общ. ред. Р.М. Валеева. Казань, Татарское республиканское издательство «ХЭТЕР», 2015. С. 254–258.

30. Шайхутдинова Е.Ф., Касимов А.В., Ситдииков А.Г., Азизов А.Р. Практический подход к разработке автоматизированной системы учета результатов исследования историко-архитектурных объектов острова-града Свияжска // Электронные библиотеки. 2015. Т. 18. № 6. С. 337–349.

31. Shaykhutdinova E., Kasimov A., Sitdikov A. Preliminary results of the development of a unified system for the research and monitoring of the current condition of the 17th century Assumption Cathedral in the island town of Sviyazhsk (Tatarstan, Russia) // Proceedings of the 5th Int. Conference on Heritage and Sustainable Development. Lisbon, Portugal, 12–15 July, 2016. V. 2. P. 1481–1488.

32. Шайхутдинова Е.Ф., Ситдииков А.Г., Касимов А.В. Опыт картограммирования фресок для мониторинга их состояния и сохранения в Успенском соборе (Свияжск, Россия) // Труды рабочего семинара Института археологии АН РТ, 2016.

33. *Елизаров А.М., Липачёв Е.К., Хайдаров Ш.М.* Автоматизированная система сервисов обработки больших коллекций научных документов // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных. XVIII Межд. конференция DAMDID/RCDL-2016 (11–14 октября 2016 года, Ершово, Московская обл., Россия): труды конференции / под. ред. Л.А. Калиниченко, Я. Манолопулоса, С.О. Кузнецова. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. С. 109–115.

34. *Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д.* Исследовательский ионзонд 'Циклон' Казанского университета и программное обеспечение автоматической обработки ионограмм // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 39–46.

35. *Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н.* Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Ученые записки Казанского университета. 2008. Т. 150. Кн. 3. С. 36–45.

IN SITU TWO-DIAGNOSTIC 3D-DEFECTOSCOPY OF THE FRESCOES ARCHITECTURAL MONUMENTS

V.V. Kugurakova¹, E.Yu. Zыkov², A.V. Kasimov³, A.G. Sitdikov⁴, A.A. Skobelev⁵, E.F. Shaykhutdinova⁶

^{1-3,5}*Kazan (Volga Region) Federal University;*

^{4,6}*Khalikov Institute of Archaeology of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan;*

⁶*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI*

¹*vlada.kugurakova@gmail.com, ²evgeniy.zыkov@kpfu.ru, ³delaluna@mail.ru,*

⁴*sitdikov_a@mail.ru, ⁵v1212186@gmail.com, ⁶eugen.shaykhutdinova@gmail.com*

Abstract

In this paper, we discuss monitoring of the state of murals, retrieval of data pertaining to this state and management and storing of the said data. We discuss the possibility of integration of traditional methods of mural mapping and modern methods of data visualization, including Project Tango for fixation of complex textures of inner 3D volumes of architectural monuments. We further discuss the express-

scanning of automated cartogramming for further comparison of states and methods of assessing the damage done to the mural.

Keywords: *defectoscopy, 3D visualization, Project Tango, infrared sensor, SLAM, SFM, PTAM, Structure from motion, monocular vision, stereo vision, architectural monument, monitoring*

REFERENCES

1. Krylov A.K., Krylov O.Yu. Itogi po kopirovaniyu I kartogrammirovaniyu fresok XVI v. tserkvi Sv. Troitsy s. B.Vyazyomy // Troitskie tschteniya, 1997. Sb. nauch nykh issledovaniy po materialam konferentsii. Bolshie Vyazyomy, 1998. S. 22–33, 148.
2. Davison A.J. Mobile Robot Navigation Using Active Vision, University of Oxford, Oxford, UK, 1998.
3. Tomono M. 3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-motion with Automatic Baseline Selection // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '05), April 2005. P. 3342–3347
4. Strasdat H., Montiel J.M.M., and Davison A.J. Visual SLAM: why filter?// Image and Vision Computing. 2012. V. 30, No 2. P. 65–77.
5. Davison A.J. Real-time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera // in Proceedings of the 9th IEEE Int. Conference on Computer Vision, October 2003. P. 1403–1410.
6. Klein G. and Murray D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces // in Proceedings of the 6th IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '07), Nara, Japan, November 2007. P. 225–234.
7. Klein G. and Murray D. Improving the Agility of Keyframe-based SLAM // in Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision (ECCV '08), October 2008. P. 802–815.
8. Stühmer J., Gumhold S., and Cremers D. Parallel Generalized Thresholding Scheme for Live Dense Geometry from a Handheld Camera // in Trends and Topics in Computer Vision, Springer, Berlin, Germany, 2012. P. 450–462.
9. Newcombe R.A. and Davison A.J. Live dense reconstruction with a single moving camera // in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '10), June 2010. P. 1498–1505.

10. *Blösch M., Weiss S., Scaramuzza D., and Siegwart R.* Vision Based MAV Navigation in Unknown and Unstructured Environments // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '10), P. 21–28, Anchorage, Alaska, USA, May 2010.

11. *Weiss S., Achtelik M.W., Lynen S. et al.* Monocular Vision for Long-term Micro aerial Vehicle State Estimation: a Compendium // J. of Field Robotics. 2013. V. 30, No 5. P. 803–831.

12. *Sheng J., Tano S., and Jia S.* Mobile Robot Localization and Map Building Based on Laser Ranging and PTAM // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '11), Beijing, China, August 2011. P. 1015–1020.

13. *Forster C., Pizzoli M., and Scaramuzza D.* SVO: Fast Semi-direct Monocular Visual Odometry // in Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA '14), Hong Kong, June 2014. P. 15–22.

14. *Engel J., Sturm J., and Cremers D.* Semi-dense Visual Odometry for a Monocular Camera // in Proceedings of the 14th IEEE Int. Conference on Computer Vision (ICCV '13), Sydney, Australia, December 2013. P. 1449–1456.

15. *Songmin Jia, Ke Wang, and Xiuzhi Li.* Mobile Robot Simultaneous Localization and Mapping Based on a Monocular Camera // J. of Robotics. 2016. V. 2016. Article ID 7630340, 11 p.

16. *Quentin Gautier, Steven Lee, Sungwook Son, and Jin Yu.* 3D Reconstruction Using Tango // Kastner Research Group, 2016.

17. *Klingensmith M., Dryanovski I., Srinivasa S.S., and Xiao J.* CHISEL: Real Time Large Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device Using Spatially-hashed Signed Distance Fields// Proceedings of Conference “Robotics: Science and Systems”, Rome, Italy, July 2015. 9 p.

<https://robotics.ccny.cuny.edu/sites/default/files/publications/p40.pdf>.

18. *Nießner M., Zollhöfer M., Izadi S., and Stamminger M.* Real-time 3d Reconstruction at Scale Using Voxel Hashing // ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013. V. 25, No 3. P. 579–588. http://gvv.mpi-inf.mpg.de/projects/MZ/Papers/SGASIA2013_VH/paper.pdf.

19. *Curless B. and Levoy M.* A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images // Proceedings of SIGGRAPH '96, 1996. 10 p. <https://graphics.stanford.edu/papers/volrange/>.

20. *Stueckler J., Gutt A., and Behnke S.* Combining the Strengths of Sparse Interest Point and Dense Image Registration for RGB-D Odometry // Proceedings of the Joint 45th Int.l Symposium on Robotics (ISR) and 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK), June 2014. 6 p.

22. *Nießner M., Dai A., and Fisher M.* Combining Inertial Navigation and ICP for Real-time 3d Surface Reconstruction // EUROGRAPHICS. 2014. <https://graphics.stanford.edu/~mdfisher/papers/inertialNavigation.pdf>.

23. *Eberhard Gülch.* Investigations on Google Tango Development Kit for Personal Indoor Mapping // The 19th AGILE Int. Conference on Geographic Information Science was hosted by the Finnish Geospatial Research Institute, National Land Survey of Finland (NLS) and the University of Helsinki, 2016. 3 p. https://agile-online.org/conference_paper/cds/agile_2016/posters/102_Paper_in_PDF.pdf.

24. *Sizov B.T.* Monitoring temperaturno-vlazhnostnogo rezhima pamyatnikov arkhitektury (na primery sobora Rozhdestva Bogoroditsy Ferapontova monastyrya) // Journal «Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanir vozdukh, teplosnabzhenie i stroitelnaya teplofizika (AVOK)». 2003. #2. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1990.

25. *Sizov B.T.* Nabludenie za temperaturno-vlazhnostnym rezhimom sobora Rozhdestva Bogoroditsy Ferapontova monastyrya // Restavratsiya, issledovaniy i khranenie muzeynykh khudozhestvennykh tsennostey. M.: Informkultura, 1982. Vyp. 2.

26. *Devina R.A., Illarionova I.V., Sizova E.A., Boyko V.A.* Normalizatsiya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima sobora Rozhdestva Bogoroditsy Ferapontova monastyrya s pomotschiyu provetrivaniya // Restavratsiya, issledovaniy i khranenie muzeynykh khudozhestvennykh tsennostey, M.: Informkultura, 1985. Vyp. 3. S. 7.

27. *Gordeeva Yu.I., Illarionova I.V., Sizova E.A.* Aeratsionnye ustroystva dlya zdaniy-pamyatnikov kul'tovoy arkhitektury (klapany-khlopushki) // Voprosy temperaturno-vlazhnostnogo rezhima pamyatnikov istorii i kultury: Sb. nauch. tr. M., 1990. 98 p.

28. *Petrusenko E.V.* O metodike kartogrammirovaniya stenopisey (iz opyta rabot 1996–1997 gg. V tserkvi Sv. Troitsy s. B.Vyazyomy) // Biblioteka Restavatora, 1998. S. 41–48.

29. *Shaykhutdinova E.F., Kasimov A.V., Sitdikov A.G.* Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy ucheta rezul'tatov issledovaniya i monitoringa tekutshego sostoyaniya istoriko-arkhitekturnykh ob'ektov ostrova-grada Sviyazhsk // Istoriko-kul'turnoe i dukhovnoe nasledie Sviyazhska: sbornik materialov Mezhdunarodnogo kongressa (Kazan, 15, 16 jule 2015). Kazan, Tatarskoe respublikanskoe izdatel'stvo «Kheter», 2015. S. 254–258.

30. *Shaykhutdinova E.F., Kasimov A.V., Sitdikov A.G., Azizov A.R.* Prakticheskiy podkhod k razrabotke avtomatizirovannoy sistemy ucheta rezul'tatov issledovaniya istoriko-arkhitekturnykh ob'ektov ostrova-grada Sviyazhska // Russian Digital Libraries Journal. 2015. T. 18. # 6. S. 337–349.

31. *Shaykhutdinova E., Kasimov A., Sitdikov A.* Preliminary results of the development of a unified system for the research and monitoring of the current condition of the 17th century Assumption Cathedral in the island town of Sviyazhsk (Tatarstan, Russia) // Proceedings of the 5th Int. Conference on Heritage and Sustainable Development. Lisbon, Portugal, 12–15 July, 2016. V. 2. P. 1481–1488.

32. *Shaykhutdinova E., Sitdikov A., Kasimov A.* Opyt kartogrammirovaniya dlya monitoringa ikh sostoyaniya i sokhraneniya v Uspenskom sobore (Sviyazhsk, Russia) // Workshop of Khalikov Institut of Archaeology, 2016.

33. *Elizarov A.M., Lipachyov E.K., Haydarov Sh.M.* Avtomatizirovannaya sistema servisov obrabotki bolshih kollektsey nauchnykh dokumentov // Analitika i upravlenie dannymi v oblastiakh s intensivnyim ispolzovaniem dannykh. XVIII Mezhd. konferentsiya DAMDID/RCDL-2016 (11–14 oktyabrya 2016 goda, Ershovo, Moskovskaya obl., Rossiya): trudy konferentsii / pod. red. L.A. Kalinichenko, Ya. Manolopulosa, S.O. Kuznetsova. M.: FITs IU RAN, 2016. S. 109–115.

34. *Zykov E.Yu., Sherstyukov O.N., Akchurin A.D.* Issledovatel'skiy ionozond 'Tsi-klon' Kazanskogo universiteta i programmnoe obespechenie avtomaticheskoy obrabotki ionogramm // Gelogeofizicheskie issledovaniya. 2013. T. 4. S. 39–46.

35. Zikov E.Yu., Akchurin A.D., Sapaev A.N., Sherstyukov O.N. Avtomaticheskaya interpretatsiya ionogramm vertikal'nogo zondirovaniya // Uchenye zapiski Kazan. Universiteta. 2008. T. 150. Kn. 3. S. 36–45.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – старший преподаватель Высшей школы информационных технологий и информационных систем КФУ, руководитель Научно-исследовательской лаборатории «Виртуальные и симуляционные технологии в биомедицине».

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA, senior Lecturer of Higher School of Information Technology and Information Systems, Head of Laboratory «Virtual and simulational technologies in biomedicine».

email: vlada.kugurakova@gmail.com



ЗЫКОВ Евгений Юрьевич – к. ф.-м. н., доцент Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ). Квалификация: радиофизик, научные интересы: распространение радиоволн, ионосфера, автоскалирующие ионограммы, искусственные ионосферные возмущения, а также алгоритмы искусственного интеллекта и распознавания образов.

Evgeniy Yurievich ZYKOV is currently Associate Professor in the Institute of Physics of the Kazan Federal University (KFU), Russia. He received Ph.D. degree in Physics and Mathematics from KFU. His qualification radio physicist, research interests include the radio-wave propagation, ionosphere, autoscaling ionograms, artificial ionospheric disturbances and also artificial intelligence and pattern-recognition algorithms.

email: evgeniy.zykov@kpfu.ru



КАСИМОВ Алексей Валерьевич – научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Этническая история» Института международных отношений, истории и востоковедения КФУ. Сфера научных интересов – картограммирование стенописей архитектурных памятников.

Alexey Valer'evich KASIMOV, researcher at Research laboratory "Ethnic History" of the Institute of International Relations, History and Oriental Studies of of Kazan Federal University. His research scientific interests – cartograms of the frescoes.

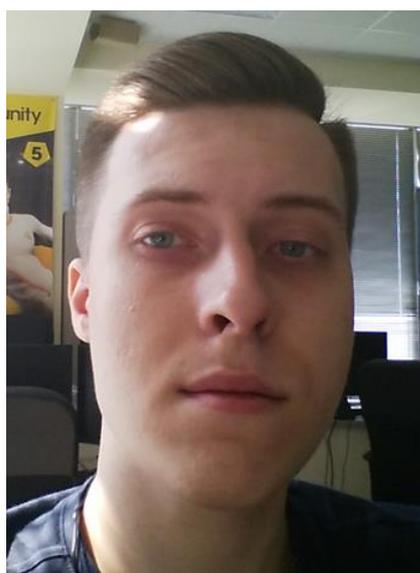
email: delaluna@mail.ru



СИТДИКОВ Айрат Габитович – директор Института археологии им. А.Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан, российский, татарстанский археолог, доктор исторических наук, специалист по средневековой археологии Поволжья, археологии Казани.

Ayrat Gabitovich SITDIKOV, Director of the Khalikov Institute of Archaeology, Doctor of Sciences in History. Research interests: Volga region medieval archaeology; archaeology of Kazan.

email: sitdikov_a@mail.ru



СКОБЕЛЕВ Андрей Андреевич – студент Высшей школы информационных технологий и информационных систем КФУ, лаборант Научно-исследовательской лаборатории «Виртуальные и симуляционные технологии в биомедицине». Сфера интересов – распознавание образов, виртуальная и дополненной реальности.

Andrey Andreevich SKOBELEV, student at Higher School of Information Technology and Information Systems, assistant at Laboratory «Virtual and simulational technologies in biomedicine». His research interests include pattern-recognition algorithms for augmented reality, application for virtual reality.

email: v1212186@gmail.com



ШАЙХУТДИНОВА Евгения Флюровна – канд. техн. наук, сотрудник Института археологии Академии наук Республики Татарстан. Сфера научных интересов – разработка автоматизированных системы для мониторинга состояния архитектурных памятников, учет многофакторных результатов их исследования, с последующим анализом.

Evgeniya Flyurovna SHAYKHUTDINOVA, Ph.D, researcher of the Khalikov Institute of Archaeology.
email: eugen.shaykhutdinova@gmail.com

Материал поступил в редакцию 3 ноября 2016 года