

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-923-935

УДК 53.082.5, 681.78, 004.93

Современные оптические методы бесконтактных геометрических измерений и восстановления 3D-формы поверхности объектов: обзор

Александр Николаевич Чертов¹✉, Демид Денисович Хохлов²

^{1,2} Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация

¹ chertov.an@ntcup.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2015-0458>

² khokhlov.dd@ntcup.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>

Аннотация

Введение. Работа посвящена изучению и систематическому обобщению существующего опыта в области определения и контроля геометрических параметров различных объектов при помощи оптических методов. **Метод.** При поиске научных источников по тематике работы использовались открытые международные библиографические базы и поисковые машины. Для рассмотрения отбирались работы, посвященные описанию аппаратно-программных средств для бесконтактных геометрических измерений и/или восстановления 3D-формы поверхности материальных объектов, построенных на основе оптических методов, а также примеров их применения для решения практических задач. Критерием отбора рассматриваемых работ было соответствие набору ключевых слов и публикация в высокорейтинговых отечественных и зарубежных изданиях не старше 2010 года. **Основные результаты.** Предложена систематическая классификация описанных в рецензируемых научных изданиях оптических методов и аппаратно-программных средств для бесконтактных геометрических измерений и восстановления 3D-формы поверхности объектов. Выполнена сравнительная качественная оценка методов и аппаратно-программных средств. Выявлены методы, наиболее эффективные при решении отдельных практических задач. Обозначены основные ограничения рассмотренных методов и средств. Выделены основные тенденции развития рассмотренных методов. Установлено, что тенденции развития сопряжены с миниатюризацией и развитием технологий производства электронных компонентов, повышением чувствительности и увеличением пространственной и временной разрешающей способности детектирующих элементов. Также тенденции оказывают влияние на развитие методов расширения номенклатуры и функциональных возможностей источников излучения и на увеличение возможностей автоматизированной обработки данных. **Обсуждение.** Выполненный систематический обзор может быть использован при выборе оптического метода, оптимального для решения практических задач в таких областях, как неразрушающий контроль и малоинвазивная диагностика, навигация роботизированных систем, создание цифровых копий материальных объектов. Представленная работа может быть полезна студентам профильных специальностей технических учебных заведений для ознакомления с актуальным срезом современных методических и аппаратно-программных средств.

Ключевые слова

измерение бесконтактное, параметр геометрический, восстановление 3D-формы, компьютерное зрение, подсветка структурированная, лазерное сканирование, компьютерная томография, система оптоволоконная изображающая, метод интерференционный

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках исследовательской тематики молодежной лаборатории «Оптические зондовые приборы и методы технической и биомедицинской диагностики» (FFNS-2024-0002).

Ссылка для цитирования: Чертов А.Н., Хохлов Д.Д. Современные оптические методы бесконтактных геометрических измерений и восстановления 3D-формы поверхности объектов: обзор // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 923–935. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-923-935

Modern optical methods of non-contact geometric measurements and reconstruction of object 3D surface shape: a review

Aleksandr N. Chertov¹✉, Demid D. Khokhlov²

^{1,2} Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation

¹ chertov.an@ntcup.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2015-0458>

² khokhlov.dd@ntcup.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>

Abstract

The article is devoted to the study and systematic generalization of the existing experience in the field of determination and control of geometric parameters of various objects using optical methods. When searching for literary sources on the work subject, open international bibliographic databases and search engines were used. Scientific articles devoted to the description of hardware and software for contactless geometric measurements and/or restoration of the three-dimensional surface shape of material objects constructed on the basis of optical methods as well as examples of their application to solve practical problems were selected for consideration. The selection criterion for the works under consideration corresponded to the set of keywords and publication in highly rated domestic and foreign publications no older than 2010. A systematic classification of optical methods and hardware and software for contactless geometric measurements and restoration of the three-dimensional surface shape of objects described in peer-reviewed scientific publications is proposed, a comparative qualitative assessment is performed. The most effective methods for solving individual practical problems are identified. The main limitations of the considered methods and means are indicated. The main trends in the development of the considered methods associated with miniaturization and development of electronic component manufacturing technologies, increased sensitivity, spatial and temporal resolution of detecting elements, expanded range and functionality of radiation sources, and the development of automated data processing capabilities are highlighted. The article is a systematic review that can be used to select an optical method that is optimal for solving practical problems in such areas as non-destructive testing and minimally invasive diagnostics, navigation of robotic systems, and creation of digital copies of material objects. In addition, the presented article can be useful for students of specialized specialties of technical educational institutions to familiarize themselves with the current cross-section of modern methodological and hardware-software tools.

Keywords

non-contact measurement, geometric parameters, 3D shape recovery, computer vision, structured illumination, laser scanning, computed tomography, fiber-optic imaging system, interference method

Acknowledgements

This study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FFNS-2024-0002).

For citation: Chertov A.N., Khokhlov D.D. Modern optical methods of non-contact geometric measurements and reconstruction of object 3D surface shape: a review. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 923-935 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-923-935

Введение

Область применения бесконтактных измерений непрерывно растет — все больше научных, производственных, логистических и медицинских задач требуют определения различных параметров объектов контроля с минимизацией влияния на них. Методы, основанные на использовании оптического излучения, не оказывают негативного влияния на объект, при этом являются информативными и демонстрируют высокое быстродействие.

В зависимости от области применения, особенностей задачи и физических свойств объектов контроля существует множество разнообразных подходов, методов, измерительных схем и алгоритмов. В то же время сама постановка задачи определения размеров и параметров формы предполагает конечное количество возможных технических решений.

Целью настоящей работы является обобщение и систематизация опыта, накопленного в данной предметной области, и изучение тенденций развития оптических технологий.

В работе не была поставлена задача выполнить всеобъемлющий обзор всех существующих решений и подходов. Однако отметим, что важно систематизиро-

вать и классифицировать их, а также сформулировать и обратить внимание научного сообщества на актуальные тенденции и перспективы развития аппаратно-программных и методических средств в рамках представленной классификации. Также, поскольку очевидным общемировым трендом является миниатюризация и увеличение мобильности устройств контроля, в данной работе основное внимание уделяется портативным (носимым) аппаратным средствам. При этом рассмотрены и средства, которые могут быть использованы для стационарного и квазистационарного анализа.

В настоящей работе последовательно разбираются и анализируются методологические, схемные и алгоритмические решения. Также выполнены их обобщение и систематизация.

Оптические методы, используемые для дистанционного определения размеров и параметров формы

Каждая задача контроля, как правило, имеет несколько вариантов решения с точки зрения используемого метода, геометрии измерения и алгоритмических подходов. Часть методов могут плотно пересекаться, поэтому их классификация достаточно условна. Однако

всегда есть некоторый базовый, ключевой элемент, вокруг которого выстраивается вся система, и именно он и может являться классификационным маркером. Таким образом, предлагается рассматривать методы по следующим группам.

Компьютерное зрение. Наибольшее применение для решения обозначенного класса задач находят методы компьютерного зрения. Среди них можно выделить несколько основных подходов: многоракурсная съемка с использованием двух-трех каналов регистрации [1–3]; использование одиночной стационарной камеры и работа с одним цифровым изображением [4–6]; перемещение камеры относительно объекта анализа — панорамная съемка [7, 8]. Также популярно использование в качестве устройства регистрации изображений камеры смартфона [9–11], которая является распространенным, доступным и универсальным средством регистрации и обмена информацией.

При организации стереозрения, особенно для задач определения параметров формы объектов и ее искажений, все больше отходят от схем «камера-камера», используя структурированную подсветку проектором [12–14] и лазерную подсветку [15, 16] (рис. 1).

Такие решения основаны на регистрации искажений на объекте исходного проецируемого паттерна, тест-объекта или излучения с заданными параметрами, что облегчает дальнейшую алгоритмическую обработку.

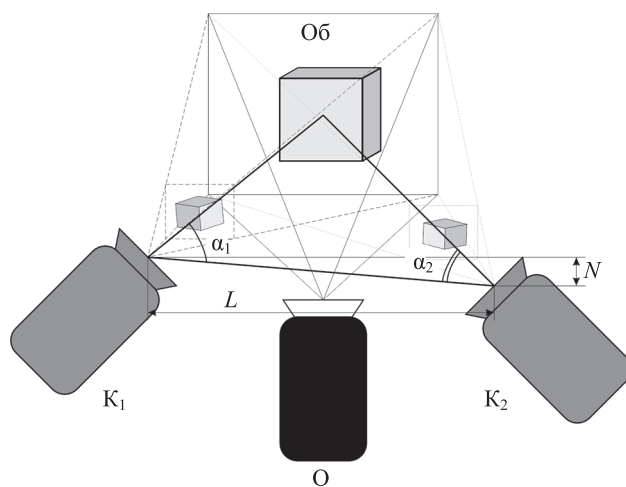


Рис. 1. Общая схема взаимного расположения каналов для метода компьютерного зрения.

Об — объект анализа; K_1, K_2 — каналы регистрации 1 и 2; О — канал подсветки; α_1 и α_2 — углы, образованные линией, соединяющей оптические центры каналов регистрации, и линиями, соединяющими оптический центр каждого из каналов с геометрическим центром объекта наблюдения; L и N — расстояния между каналами регистрации в вертикальной и горизонтальной плоскостях

Fig. 1. General diagram of the relative position of channels for the computer vision method.

Об — the object of analysis; K_1, K_2 — registration channels 1 and 2; О — the illumination channel; α_1 and α_2 — the angles formed by the line connecting the optical centers of the registration channels and the lines connecting the optical center of each channel with the geometric center of the observation object; L and N — the distances between the registration channels in the vertical and horizontal planes

В случае одного канала регистрации конструктивное решение упрощается, если не используются дополнительные оптические элементы для имитации съемки объекта с разных ракурсов, как, например, в работах [4, 5]. Но упрощение измерительной схемы, в свою очередь, может приводить к повышению требований к условиям съемки, усложнению алгоритмов анализа изображений и извлечения данных об анализируемом объекте [17] для исключения потерь в скорости и точности анализа.

Панорамная съемка предполагает организацию перемещения камеры относительно объекта анализа или, наоборот, объекта относительно камеры, что затруднительно в условиях контроля с жесткими временными ограничениями. Кроме того, возникает необходимость учитывать факторы, сопровождающие сам процесс перемещения, в том числе оптимизацию траектории сканирования, сложность которой зависит от структуры объекта и требований к точности определения его параметров.

При использовании штатных камер смартфонов возникают проблемы получения корректной, пригодной для дальнейшего анализа информации, поэтому могут требоваться специальные оптические насадки [9]. Существуют проблемы чувствительности к положению смартфона относительно объекта контроля, а также передачи, анализа больших объемов данных и получения оперативного ответа.

Алгоритмические решения для систем компьютерного зрения весьма многочисленны. Для реконструкции и параметрического анализа изображений используют:

- одно изображение и метаданные о нем, например, известные условия освещения и регистрации, угол съемки и т. д. [18];
- реперные метки [6] на объекте или координатные сетки [19–21], накладываемые на изображение (изображения) объекта с целью получения данных о его форме или ее искажениях;
- эталоны — образцовые объекты анализа или элементы изображения с известными параметрами, подлежащими анализу или контролю в ходе проведения измерений [7];
- нейросетевые алгоритмы [22, 23];
- фазовую информацию [1, 24, 25]: глобальную или локальную фазу изображений;
- данные о глубине наблюдаемой сцены [8, 26] — технология «time of flight»;
- информацию о поляризации [27, 28] — метод поляризационной 3D-визуализации.

К преимуществам методов компьютерного зрения можно отнести большое разнообразие в выборе схемных и алгоритмических решений, элементной базы под конкретную задачу контроля; возможность определения геометрических параметров объектов с высокими разрешениями, скоростью и точностью.

Отметим, что перечисленные преимущества обуславливают и соответствующие недостатки. Широкие возможности по анализу объектов различной геометрии и структуры приводят к разнообразию измерительных схем и компоновок каналов освещения и регистрации. В результате перед исследователями и разработчика-

ми встают задачи оптимального выбора схемного и алгоритмического решений, и часто — создания уникального алгоритма калибровки. Также может быть поставлена задача формирования исчерпывающей и достоверной обучающей выборки в случае использования нейросетевых алгоритмов. Все перечисленные факторы определяют ресурсоемкость конкретной задачи контроля.

Для передвижных комплексов и носимых устройств возникает дилемма между реализацией обработки информации непосредственно в устройстве с соответствующим его усложнением и необходимостью передачи информации на внешний сервер для обработки и анализа. Такой процесс может быть сложно реализуем в случае больших объемов данных и/или нестабильности мобильной связи.

Лазерное сканирование. Метод лазерного сканирования широко используется для высокоточного измерения и контроля геометрических параметров различных объектов в решении задач робототехники и беспилотного транспорта: в лидарных комплексах [29–32]; в строительной отрасли [33, 34]; добывающей промышленности [35] и металлургии [36]; в архитектуре и при изучении сохранности культурных объектов [37, 38]; антропологии [39]; археологических изысканиях [40]; медицинских приложениях [41] и стоматологии [42]; кадастровом учете [43]. Физическая реализация устройств лазерного сканирования самая разнообразная [44]: от стационарных систем наземного и воздушного базирования до компактных и носимых приборов.

В основе метода лежит принцип построения облака точек с фиксированными пространственными координатами, с последующим расчетом параметров и/или восстановлением формы объекта анализа. Количество таких опорных точек, необходимых для решения каждой конкретной задачи, определяет точность и производительность метода. Общая схема представлена на рис. 2.

Предварительная обработка массива данных может содержать процедуры сшивки облаков точек, получен-

ных с нескольких станций, прореживание облаков точек с целью сокращения объема данных для дальнейшего анализа, а также сегментирование отдельных участков облаков точек.

На втором этапе обработки, как и в случае компьютерного зрения, часто используются базы данных известных объектов и/или их элементов, с которыми сравниваются сегментированные облака точек, и различные дескрипторы формы и/или нейронные сверточные сети, позволяющие сформировать итоговую модель объекта.

Достоинствами метода являются высокая, более 1 млн точек в секунду, скорость и полнота данных об изучаемом объекте, возможность обращения к облаку точек для уточнения необходимой информации в любой момент времени.

Ограничениями использования метода [45] являются: сам процесс распознавания (трудоемкий и требующий экспертных знаний в области), а также возможная потеря информации, возникающая из-за ограничения прямой видимости отдельных участков поверхности объекта и образования так называемых закрытых облаков точек. Потери информации можно избежать, увеличивая количество станций сканирования, но в этом случае возникает задача их оптимального взаимного расположения, для уменьшения количества собираемых данных и упрощения процесса обработки. В целом, метод лазерного сканирования является достаточно ресурсоемким с точки зрения необходимых вычислительных мощностей.

Отметим, что потери информации могут быть следствием выбора неоптимального рабочего расстояния, в результате чего формируются облака точек недостаточной плотности. В результате это может стать причиной невозможности распознавания отдельных элементов объектов анализа.

Кроме того, для исследования строительных и архитектурных объектов проблемой могут являться неблагоприятные погодные условия, создавая зашумленную среду и внося дополнительные искажения в собираемые данные, что, очевидно, усложняет их обработку и параметрический анализ.

Компьютерная томография. Метод рентгеновской компьютерной томографии (КТ) широко применяется в медицинских целях, для диагностики заболеваний [46, 47], в биологии [48], для контроля качества сельскохозяйственной продукции [49], инспекции различных материалов [50–52].

Алгоритмическая особенность метода — исходный массив данных содержит послойную информацию о 3D-объекте анализа: геометрические координаты и яркость всех точек изображения для каждого среза, а также расстояние между отдельными срезами. Как следствие, для реконструкции объектов, их визуализации и выполнения расчетов искомых параметров выполняется процедура послойной сборки.

Для решения задач распознавания и поиска областей исследования часто используют нейросети, обученные на отобранных наборах данных изображений.

К преимуществам метода относятся высокое, порядка 0,2 мм, разрешение и возможность неразрушающего

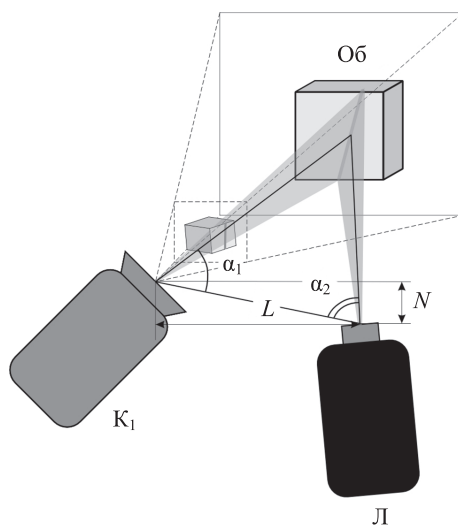


Рис. 2. Иллюстрация принципа лазерного сканирования.

Л — лазер

Fig. 2. Illustration of the laser scanning principle, Л — laser

последнего анализа внутренней структуры объектов и их дефектов.

Отметим, что для медицинских применений, для каждой конкретной задачи, требуется создание уникальных алгоритмов распознавания, а обучающие выборки формируются вручную из изображений, размеченных профильными специалистами. Также существует проблема появления дефектов на полученных изображениях, которые могут восприниматься как патологии и затруднять принятие решения при назначении лечения [53]. Существенный недостаток метода — необходимость работы с ионизирующим излучением, что обуславливает соответствующие дополнительные требования к конструкции КТ-приборов и меры по обеспечению промышленной безопасности, а также ограничивает продолжительность безопасного наблюдения биологических объектов.

Вследствие значительных габаритов оборудования данный метод подходит главным образом для стационарного анализа. Часто процесс подготовки объекта к проведению КТ и интерпретация данных требуют непосредственного участия специалиста, однако существуют и роботизированные системы, отличающиеся большей автономностью. Они находят применение как системы промышленного контроля качества [54] и дефектоскопии [55], а также как хирургические роботизированные комплексы [56]. Для таких систем требуется разработка специальных решений по траектории сканирования — для увеличения скорости работы и сокращения массива анализируемой информации.

Волоконно-оптические методы. Измерительные технологии, относящиеся к данной группе методов, можно условно подразделить на два класса.

Класс 1 представляет собой распределенные системы мониторинга окружающей среды и протяженных промышленных объектов и используется в судостроении [57], атомной [58] и нефтегазовой [59] отраслях промышленности, авиационно-космической отрасли [60] и др.

Принцип действия технологий класса 1, как правило, встроенных в контролируемую среду пассивных систем, заключается в мониторинге физических параметров объекта (деформации, давление, температура) посредством регистрации изменения характеристик оптического волокна. Эта информация позволяет вовремя диагностировать нарушение исходной геометрии контролируемого объекта на определенном его участке и предотвратить возможные разрушения.

При помощи волоконно-оптических датчиков измеряется не абсолютное значение некоторого параметра, а относительное отклонение измеряемой величины. Чувствительность волоконно-оптических датчиков деформации, выраженная как величина относительной деформации, приведенная к длине оптического волокна, может составлять менее 10 мкм/м [61] при частоте опроса до нескольких десятков герц.

Недостатками метода для систем класса 1 является необходимость контакта с объектом контроля, высокие требования к прочности и износостойкости элементов измерительных схем, определяемых конкретными условиями эксплуатации.

Класс 2 — изображающие волоконно-оптические системы, предназначенные для наблюдения, определения и восстановления формы объектов и их визуализации в условиях ограниченного пространства. Принцип работы систем класса 2 заключается в попиксельной передаче данных по многомодовому волокну с последующим восстановлением изображения (рис. 3).

Такие системы широко применяются в медицине [62–64] и биологии [65] как эндоскопические системы для диагностики и хирургических вмешательств.

Также встречаются интересные и перспективные вариации. Например, в работе [66] описана оптоволоконная «time-of-flight» система, позволяющая контролировать движущиеся объекты на расстоянии 40 см от торца оптического волокна со скоростью 23 000 точек в секунду.

К преимуществам систем класса 2 можно отнести компактность и возможность работы на микрообъектах и в труднодоступных местах. Основными недостатками являются высокая чувствительность к внешним воздействиям (изгибу и скручиванию волокон), изменениям температуры и необходимость реконструкции матрицы передачи для расшифровки спекл-структур, образующихся из-за разницы скоростей в разных модах. Исходя из этого, для восстановления и коррекции полученного изображения часто требуются сложные алгоритмы [67, 68], в том числе нейросетевые. Кроме того, качество работы подобных систем очень зависимо от стабильности используемого источника излучения [69].

Интерференционные методы. Данная группа методов когерентных оптических измерений основана на получении и интерпретации интерференционных картин и отличается очень высоким пространственным разрешением, составляющим доли длины волны зондирующего излучения.

Среди методов данного класса с точки зрения задачи исследований интерес представляют когерентная сканирующая интерферометрия, цифровая голография и оптическая когерентная томография (Optical Coherence Tomography, OCT).

Сканирующая интерферометрия белого света [70] как частный случай когерентной сканирующей интерфе-

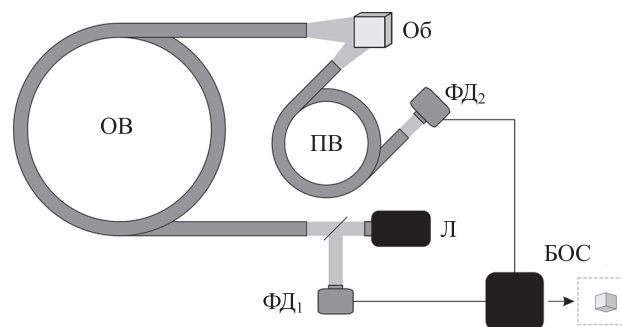


Рис. 3. Принцип работы изображающих волоконно-оптических систем класса 2.

ОВ — осветительное волокно; ПВ — приемное волокно; ФД₁ и ФД₂ — фотоприемные устройства; БОС — блок обработки

Fig. 3. Operating principle of imaging fiber-optic systems. ОВ — illuminating fiber; ПВ — receiving fiber; ФД₁ and ФД₂ — photo-receiving devices; БОС — signal processor

Таблица 1. Систематизация рассмотренных оптических методов анализа
Table 1. Systematization of the considered methods of optical analysis

Метод	Основные области применения	Достоинства	Недостатки
Компьютерное зрение	Видеонаблюдение и охранные системы с функциями распознавания объектов. Беспилотный транспорт: активные системы безопасности, ассистенты водителя, мониторинговые функции, предиктивная аналитика. Робототехника: сенсорные системы промышленных и медицинских роботов. Промышленный неразрушающий контроль: определение положения объектов, анализ качества, дефектоскопия. Медицинская малоинвазивная диагностика: системы поддержки принятия решений, интерпретация данных.	Простота и доступность схемных решений. Широкий выбор алгоритмических решений, реализованных, в том числе в виде программ и модулей с открытым исходным кодом.	Необходимость предварительной и периодической калибровки оборудования. Высокая чувствительность к изменению светотеневой обстановки в пределах наблюдаемой сцены.
Лазерное сканирование	Беспилотный транспорт: автономная навигация. Строительство, архитектура, кадастровые работы: контроль положения и состояния объектов. Промышленный неразрушающий контроль: дефектоскопия, контроль формы заготовок и конечных изделий, реверс-инжиниринг. Аддитивное производство: обратное проектирование. Медицинская малоинвазивная диагностика: протезирование зубов.	Полнота информации об объекте анализа. Отработанные алгоритмы сшивки облаков точек, позволяющие получить детализированную форму поверхности всего объекта в целом.	Трудоемкий процесс распознавания и анализа полученной информации. Для внешних систем — чувствительность к изменению погодных условий.
Компьютерная томография	Медицинская неинвазивная диагностика: широкий набор применений, с поправкой на допустимые дозы облучения. Промышленный неразрушающий контроль: дефектоскопия, реверс-инжиниринг.	Послойный анализ внутренней структуры объектов.	Сложная алгоритмизация (для медицинских приложений). Большие габариты и высокая стоимость оборудования. Использование ионизирующего излучения.
Волоконно-оптические методы	Медицинская малоинвазивная диагностика: неизображающая плетизмография по данным об изменениях характеристик волокна, изображающая эндоскопия. Промышленный неразрушающий контроль: интегрированные датчики, волоконные эндоскопические зонды.	Интеграция непосредственно в объект измерения (для неизображающих волоконно-оптических датчиков). Малые габариты. Возможность анализа в труднодоступных местах.	Чувствительность к влиянию внешних механических и термических воздействий. Сложность эксплуатации.
Интерференционные методы	Медицинская малоинвазивная диагностика: восстановление 3D-формы оптически прозрачных объектов, ангиография. Промышленный неразрушающий контроль: выходной контроль высокоточных поверхностей и оптических деталей.	Анализ микроструктуры объектов с высокой точностью.	Высокая чувствительность к механическим вибрациям, деформациям, изменениям температуры.

Таблица 2. Сравнительная качественная оценка технического уровня
Table 2. Comparative qualitative assessment of the technical level

Метод	Определяемые параметры объектов	Информативный параметр	Активный/пассивный	Неинвазивный анализ	Пространственное разрешение	Скорость	Стоимость
Компьютерное зрение	Размеры, положение в пространстве, 3D-форма, границы, цвет, текстура	Координаты объекта или его элементов в системе координат устройства, цветовой сигнал, фаза изображения, поляризационная информация	Активный и пассивный	Нет	Низкое	Высокая	Средняя
Лазерное сканирование	Размеры, положение, 3D-форма, рельеф поверхности	Облако точек, каждая из которых содержит информацию о координатах (x, y, z), интенсивности и цвете	Активный	Нет	Среднее	Очень высокая	Средняя
Компьютерная томография	Размеры, 3D-форма, внутренняя структура	Пространственное распределение рентгеновской плотности	Активный	Да	Высокое	Низкая	Высокая
Волоконно-оптические методы в том числе, для изображающих систем	Относительная деформация Размеры, положение в пространстве, 3D-форма	Пространственное распределение интенсивности, время прихода лазерных импульсов То же, что и для компьютерного зрения	Активный	Да	Низкое	Высокая	Средняя
Интерференционные методы	Профиль поверхности, 3D-форма	Пространственное распределение показателя преломления. Пространственное распределение интенсивности отраженного и рассеянного излучения	Активный	Да (ОСТ)	Очень высокое	Средняя	Высокая

рометрии широко используется для высокоскоростного анализа с нанометровым разрешением микроскопической 3D-морфологии объектов, в том числе в производстве полупроводниковых и микроэлектромеханических изделий. Ограничения метода связаны с возможностями оптики: полем зрения (обычно до 15 мм) и разрешающей способностью. При контроле протяженных объектов, например, кремниевых пластин или полупроводниковых панелей, время анализа существенно увеличивается за счет процедур сканирования площади изделия и объединения результатов отдельных измерений.

Цифровая голография также находит применение при решении задач профилирования формы поверхности объекта, измерения ее деформаций, шероховатости [71], в медицине и биологических исследованиях [72]. Возможности метода ограничиваются его чувствительностью к вибрациям, нежелательным деформациям и изменениям температуры, а также сравнительно невысокой скоростью получения конечного результата. Однако, благодаря новым разработкам в области глубокого машинного обучения и подходов сверхразрешения [73], цифровая голография является перспективной аналитической технологией.

Отдельно стоит отметить высокий интерес исследователей к методу некогерентной цифровой голографии [74, 75], которая имеет преимущества перед классическим методом за счет использования источников естественного освещения, но на данный момент уступает ему в качестве получаемых изображений.

Метод ОСТ хорошо известен в офтальмологии, где применяется для быстрой неинвазивной диагностики различных глазных патологий [76], в отоологии и дерматологии [77], возможно использование в микрофлюидике и реологии [78]. Ограничениями метода являются осевое разрешение и глубина визуализации (порядка 2–3 мм). Кроме того, ОСТ не может распознавать ткани с похожей отражательной способностью.

Систематизация рассмотренных методов

На основании проведенных исследований все рассмотренные методы систематизированы в двух таблицах. В табл. 1 представлены области применения, общие достоинства и недостатки методов. В табл. 2 приведен технический уровень реализации методов.

Как видно из таблиц, области применения рассмотренных методов дополняют друг друга, а распределение методов по конкретным областям согласуется с набором их характерных свойств. Реализуемые на более простой и относительно дешевой элементной базе методы компьютерного зрения и лазерного сканирования часто используются при создании носимых устройств и передвижных комплексов, применяемых для решения широкого спектра задач. Узкие направления специализации изображающих и неизображающих волоконно-оптических методов обусловлены тем, что конкретные технические реализации волоконных устройств являются сложным компромиссом между достаточной освещенностью и пространственным разрешением с одной стороны и малыми габаритами с другой. Чувствительные и обладающие высоким пространственным разреше-

нием устройства, основанные на интерференционных методах и методе КТ, являются очень требовательными к окружающей вспомогательной инфраструктуре и потому наиболее оптимально подходят для лабораторных условий при стационарном размещении.

Интересным представляется сравнение рассмотренных методов также и с точки зрения конкретных параметров и характеристик. Однако реализация такого сравнения осложняется необходимостью проведения параметрического анализа множества конкретных применений, поскольку зависит как от особенностей самого объекта контроля и окружающей среды, так и выбора элементной базы, алгоритмических подходов и имеющихся в распоряжении исследователей вычислительных мощностей. Таким образом, подобное сравнение будет корректным или при анализе технологически близких методов, внутри каждой группы, или в том случае, если рассматривать возможности контроля однотипных объектов с близкими свойствами.

Подобное сравнение не является предметом исследования в настоящей работе, однако может быть реализовано в дальнейшем.

Заключение

Выполненный обзор показывает срез актуальных технических решений и подходов к бесконтактным геометрическим измерениям, восстановлению формы и объемной структуры объектов на основе оптических методов и цифровой обработки изображений. Отметим, что за последние 10–15 лет существенно увеличилось количество технических решений, построенных с использованием управляемой активной подсветки и алгоритмов глубокого обучения, что позволяет с высокой точностью восстанавливать изображения и определять по ним параметры объектов со сложной структурой поверхности. При разработке пассивных систем также делается акцент на разработку интеллектуальных алгоритмов анализа наблюдаемого пространства.

Комбинирование возможностей различных технологий, например, компьютерного зрения и активной лазерной подсветки, оптоволоконных систем и «time of flight» подхода, компьютерной томографии и нейросетевых алгоритмов анализа, позволяет добиваться положительного синергетического эффекта: увеличивать эффективность процессов контроля или даже выходить на новые приложения. В фокусе специалистов и решение частных надпредметных задач, таких как, например, сверхразрешение и предвзятость моделей машинного обучения.

Можно отметить устойчивую тенденцию в исследованиях возможностей использования мобильных устройств на базе Android в качестве средств измерения. Однако заметим, что более перспективной представляется область разработки компактных портативных устройств с частично вынесенной в мобильные приложения обработкой данных и визуализацией результатов.

Наибольшее количество прикладных исследований в данной области приходится на беспилотный транспорт, робототехнику, неразрушающий контроль, медицину и биологию.

Литература

1. Lu F., Wu C., Yang J. High-speed 3D shape measurement using Fourier transform and stereo vision // *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*. 2018. V. 14. N 1. P. 22. <https://doi.org/10.1186/s41476-018-0090-z>
2. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks // *Ocean Engineering*. 2016. V. 117. P. 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.012>
3. Мищенко Н.И. Трехмерные активно-импульсные системы наблюдения и измерения параметров объектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 3. С. 119–123. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-3-119-123>
4. Wu Z., Guo W., Chen Z., Wang H., Li X., Zhang Q. Three-dimensional shape and deformation measurement on complex structure parts // *Scientific Reports*. 2022. V. 12, pp. 7760. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11702-x>
5. Pan B., Yu L., Zhang Q. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement // *Science China Technological Sciences*. 2018. V. 61. N 1. P. 2–20. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9090-x>
6. Ferková Z., Urbanová P., Černý D., Žuži M., Matula P. Age and gender-based human face reconstruction from single frontal image // *Multimedia Tools and Applications*. 2020. V. 79. N 5-6. P. 3217–3242. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6869-5>
7. Мурынин А.Б., Рихтер А.А. Особенности применения методов и алгоритмов реконструкции трехмерной формы ригидных объектов по данным панорамной съемки // Машинное обучение и анализ данных. 2018. Т. 4. № 4. С. 235–247. <https://doi.org/10.21469/22233792.4.4.02>
8. Cui Y., Schuon S., Thrun S., Stricker D., Theobalt C. Algorithms for 3D shape scanning with a depth camera // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2013. V. 35. N 5. P. 1039–1050. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.190>
9. Онищенко С.В., Козловский А.В., Мельник Э.В. Разработка бесконтактной системы измерения геометрических параметров объектов на изображении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 177–182. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-177-182>
10. Yu L., Tao R., Lubineau G. Accurate 3D shape, displacement and deformation measurement using a smartphone // *Sensors*. 2019. V. 19. N 3. P. 719. <https://doi.org/10.3390/s19030719>
11. Foysal K.H., Chang H.-J., Bruess F., Chong J.-W. Body size measurement using a smartphone // *Electronics*. 2021. V. 10. N 11. P. 1338. <https://doi.org/10.3390/electronics10111338>
12. Wang R., Law A.C., Garcia D., Yang S., Kong Z. Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 117. N 3-4. P. 845–862. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07780-2>
13. Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review // *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. V. 106. P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.017>
14. Dvoinishnikov S.V., Anikin Yu.A., Kabardin I.K., Kulikov D.V., Meledin V.G. An optoelectronic method of contactless measurement of the profile of the surface of large complexly shaped objects // *Measurement Techniques*. 2016. V. 59. N 1. P. 21–27. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0910-8>
15. Kim G., Kim Y., Yun J., Moon S.-W., Kim S., Kim J., Park J., Badloe T., Kim I., Rho J. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging // *Nature Communications*. 2022. V. 13. P. 5920. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32117-2>
16. Chen B., Shi P., Wang Y., Xu Y., Ma H., Wang R., Zheng C., Chu P. Determining surface shape of translucent objects with the combination of laser-beam-based structured light and polarization technique // *Sensors*. 2021. V. 21. N 19. P. 6587. <https://doi.org/10.3390/s21196587>
17. Yin W., Feng S., Tao T., Huang L., Trusiak M., Chen Q., Zuo C. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system // *Optics Express*. 2019. V. 27. N 3. P. 2411–2431. <https://doi.org/10.1364/OE.27.002411>
18. Niu Y., Liu L., Huang F., Huang S., Chen S. Overview of image-based 3D reconstruction technology // *Journal of the European Optical*

References

1. Lu F., Wu C., Yang J. High-speed 3D shape measurement using Fourier transform and stereo vision. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 22. <https://doi.org/10.1186/s41476-018-0090-z>
2. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks. *Ocean Engineering*, 2016, vol. 117, pp. 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.012>
3. Mishchenko N.I. Three-dimensional active-pulse systems of observation and object parameter measurements. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 119–123. (in Russian). <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-3-119-123>
4. Wu Z., Guo W., Chen Z., Wang H., Li X., Zhang Q. Three-dimensional shape and deformation measurement on complex structure parts. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, pp. 7760. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11702-x>
5. Pan B., Yu L., Zhang Q. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement. *Science China Technological Sciences*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–20. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9090-x>
6. Ferková Z., Urbanová P., Černý D., Žuži M., Matula P. Age and gender-based human face reconstruction from single frontal image. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 5-6, pp. 3217–3242. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6869-5>
7. Murynin A.B., Rikhter A.A. Features of using methods and algorithms for reconstructing the three-dimensional shape of rigid objects based on panoramic photography data. *Mashinnoe obucheniye i analiz dannyh*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 235–247. <https://doi.org/10.21469/22233792.4.4.02>
8. Cui Y., Schuon S., Thrun S., Stricker D., Theobalt C. Algorithms for 3D shape scanning with a depth camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, vol. 35, no. 5, pp. 1039–1050. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.190>
9. Onishchenko S.V., Kozlovsky A.V., Melnik E.V. Development of a contactless system for measuring geometric parameters of objects in the image. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2022, no. 9, pp. 177–182. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-177-182>
10. Yu L., Tao R., Lubineau G. Accurate 3D shape, displacement and deformation measurement using a smartphone. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 719. <https://doi.org/10.3390/s19030719>
11. Foysal K.H., Chang H.-J., Bruess F., Chong J.-W. Body size measurement using a smartphone. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 11, pp. 1338. <https://doi.org/10.3390/electronics10111338>
12. Wang R., Law A.C., Garcia D., Yang S., Kong Z. Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, no. 3-4, pp. 845–862. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07780-2>
13. Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 106, pp. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.017>
14. Dvoinishnikov S.V., Anikin Yu.A., Kabardin I.K., Kulikov D.V., Meledin V.G. An optoelectronic method of contactless measurement of the profile of the surface of large complexly shaped objects. *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 21–27. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0910-8>
15. Kim G., Kim Y., Yun J., Moon S.-W., Kim S., Kim J., Park J., Badloe T., Kim I., Rho J. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, pp. 5920. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32117-2>
16. Chen B., Shi P., Wang Y., Xu Y., Ma H., Wang R., Zheng C., Chu P. Determining surface shape of translucent objects with the combination of laser-beam-based structured light and polarization technique. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 19, pp. 6587. <https://doi.org/10.3390/s21196587>
17. Yin W., Feng S., Tao T., Huang L., Trusiak M., Chen Q., Zuo C. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 2411–2431. <https://doi.org/10.1364/OE.27.002411>
18. Niu Y., Liu L., Huang F., Huang S., Chen S. Overview of image-based 3D reconstruction technology. *Journal of the European Optical*

- Society-Rapid Publications, 2024. V. 20. N 1. P. 18. <https://doi.org/10.1051/jeos/2024018>
19. Tang W., Jia F., Wang X. An improved adaptive triangular mesh-based image warping method // *Frontiers in Neurorobotics*. 2023. V. 16. P. 1042429. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1042429>
 20. Клячин А.А., Клячин В.А. Алгоритм восстановления поверхности объекта по его изображению // *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2021. Т. 24. № 1. С. 16–24. <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.1.2>
 21. Шахрамьян М.А., Казарян М.Л., Рихтер А.А. Построение 3D-моделей жестких объектов по косвенным изображениям методом координатных сеток // *Информация и космос*. 2018. № 3. С. 104–110.
 22. Zhang H.M., Dong B. A review on deep learning in medical image reconstruction // *Journal of the Operations Research Society of China*. 2020. V. 8. N 2. P. 311–340. <https://doi.org/10.1007/s40305-019-00287-4>
 23. Левашев С.П. Распознавание 3D объектов на основе спектральных инвариантов с использованием глубокого машинного обучения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2019. № 3(205). С. 20–31. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-3-20-31>
 24. Horaud R., Hansard M., Evangelidis G., Ménier C. An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies // *Machine Vision and Applications*. 2016. V. 27. N 7. P. 1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
 25. Павельева Е.А. Обработка и анализ изображений на основе использования информации о фазе // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42. № 6. С. 1022–1034. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034>
 26. Shiba Y., Ono S., Furukawa R., Hiura S., Kawasaki H. Learning-based active 3D measurement technique using light field created by video projectors // *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*. 2019. V. 11. N 1. P. 6. <https://doi.org/10.1186/s41074-019-0058-y>
 27. Li X., Liu Z., Cai Y., Pan C., Song J., Wang J., Shao X. Polarization 3D imaging technology: a review // *Frontiers in Physics*. 2023. V. 11. P. 1198457. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1198457>
 28. Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and preclinical applications // *Journal of Optics*. 2020. V. 22. N 12. P. 123001. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/abbf8a>
 29. Wu D., Liang Z., Chen G. Deep learning for LiDAR-only and LiDAR-fusion 3D perception: a survey // *Intelligence and Robotics*. 2022. V. 2. P. 105–129. <https://doi.org/10.20517/ir.2021.20>
 30. Li H.T., Todd Z., Bielski N., Carroll F. 3D lidar point-cloud projection operator and transfer machine learning for effective road surface features detection and segmentation // *Visual Computer*. 2022. V. 38. N 5. P. 1759–1774. <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02103-8>
 31. Di Stefano F., Chiappini S., Gorreja A., Balestra M., Pierdicca R. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2021. V. 12. N 1. P. 2387–2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>
 32. Asvadi A., Premebeda C., Peixoto P., Nunes U. 3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes // *Robotics and Autonomous Systems*. 2016. V. 83. P. 299–311. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2016.06.007>
 33. Nguyen T.A., Nguyen P.T., Do S.T. Application of BIM and 3D laser scanning for quantity management in construction projects // *Advances in Civil Engineering*. 2020. V. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8839923>
 34. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 4(46). С. 326–332.
 35. Рада А.О., Кузнецов А.Д., Непомнищев И.Л., Конков Н.Ю. Совершенствование измерений объемных объектов по данным лазерного сканирования // *Уголь*. 2023. № 12. С. 37–43. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-37-43>
 36. Дайнеко О.В., Калиновская Л.Ф., Бессонов Н.В. Особенности метрологического контроля бесконтактных систем измерения геометрических размеров металлопродукции // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 91–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-91-94>
 37. Гиря Л.В., Трофимов Г.П. Обследование памятников архитектуры с использованием современных технологий трёхмерного
- Society-Rapid Publications*, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 18. <https://doi.org/10.1051/jeos/2024018>
19. Tang W., Jia F., Wang X. An improved adaptive triangular mesh-based image warping method. *Frontiers in Neurorobotics*, 2023, vol. 16, pp. 1042429. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1042429>
 20. Klyachin A.A., Klyachin V.A. Algorithm for restoring the surface of an object from its image. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 16–24. (in Russian). <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.1.2>
 21. Shakhramanyan M., Kazaryan M., Richter A. 3D modeling of indirect image based rigid objects by applying the coordinate grid method. *Information and Space*, 2018, no. 3, pp. 104–110. (in Russian)
 22. Zhang H.M., Dong B. A review on deep learning in medical image reconstruction. *Journal of the Operations Research Society of China*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 311–340. <https://doi.org/10.1007/s40305-019-00287-4>
 23. Levashev S.P. Recognition of 3D objects based on spectral invariants using deep machine learning. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2019, no. 3(205), pp. 20–31. (in Russian). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-3-20-31>
 24. Horaud R., Hansard M., Evangelidis G., Ménier C. An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. *Machine Vision and Applications*, 2016, vol. 27, no. 7, pp. 1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
 25. Pavelyeva E.A. Image processing and analysis based on the use of phase information. *Computer Optics*, 2018, vol. 42, no. 6, pp. 1022–1034. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034>
 26. Shiba Y., Ono S., Furukawa R., Hiura S., Kawasaki H. Learning-based active 3D measurement technique using light field created by video projectors. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 6. <https://doi.org/10.1186/s41074-019-0058-y>
 27. Li X., Liu Z., Cai Y., Pan C., Song J., Wang J., Shao X. Polarization 3D imaging technology: a review. *Frontiers in Physics*, 2023, vol. 11, pp. 1198457. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1198457>
 28. Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and preclinical applications. *Journal of Optics*, 2020, vol. 22, no. 12, pp. 123001. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/abbf8a>
 29. Wu D., Liang Z., Chen G. Deep learning for LiDAR-only and LiDAR-fusion 3D perception: a survey. *Intelligence and Robotics*, 2022, vol. 2, pp. 105–129. <https://doi.org/10.20517/ir.2021.20>
 30. Li H.T., Todd Z., Bielski N., Carroll F. 3D lidar point-cloud projection operator and transfer machine learning for effective road surface features detection and segmentation. *Visual Computer*, 2022, vol. 38, no. 5, pp. 1759–1774. <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02103-8>
 31. Di Stefano F., Chiappini S., Gorreja A., Balestra M., Pierdicca R. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 2387–2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>
 32. Asvadi A., Premebeda C., Peixoto P., Nunes U. 3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes. *Robotics and Autonomous Systems*. 2016, vol. 83, pp. 299–311. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2016.06.007>
 33. Nguyen T.A., Nguyen P.T., Do S.T. Application of BIM and 3D P.T. laser scanning for quantity management in construction projects. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8839923>
 34. Bogdanov A.N., Aleshutin I.A. Land laser scanning in construction and BIM-technologies. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, 2018, no. 4(46), pp. 326–332. (in Russian)
 35. Rada A.O., Kuznetsov A.D., Nepomnishchev I.L., Konkov N.Yu. Improving measurements of volumetric objects in the coal industry using laser scanning data. *Ugol'*, 2023, no. 12, pp. 37–43. (in Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-37-43>
 36. Daineko O.V., Kalinovskaya L.F., Bessonov N.V. Particularities of metrological control of non-contact systems for measuring the geometric dimensions of metal products. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 91–94. (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-91-94>
 37. Giry L.V., Trofimov G.P. Laser 3D scanning of architectural monuments. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta — Journal of Construction and Architecture*,

- сканирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 35–43. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-35-43>
38. Casula G., Cuccuru F., Bianchi M.G., Fais S., Ligas P. High resolution 3-D modelling of cylinder shape bodies applied to ancient columns of a church // *Advances in Geosciences*. 2020. V. 54. P. 119–127. <https://doi.org/10.5194/adgeo-54-119-2020>
 39. Toneva D., Nikolova S., Georgiev I., Lazarov N. Impact of resolution and texture of laser scanning generated three-dimensional models on landmark identification // *Anatomical Record*. 2020. V. 303. N 7. P. 1950–1965. <https://doi.org/10.1002/ar.24272>
 40. Bhatti A.Q., Wahab A., Sindi W. An overview of 3D laser scanning techniques and application on digitization of historical structures // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021. V. 6. N 4. P. 186. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00550-9>
 41. Haleem A., Javaid M. 3D scanning applications in medical field: a literature-based review // *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019. V. 7. N 2. P. 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>
 42. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Current status and applications of 3D scanning in dentistry // *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019. V. 7. N 2. P. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.07.005>
 43. Алтынцев М.А., Чернов А.В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // *Геодезия и картография*. 2018. Т. 79. № 9. P. 52–63. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63>
 44. Hu C., Kong L., Lv F. Application of 3D laser scanning technology in engineering field // *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 233. P. 04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304014>
 45. Kim H., Yeo C., Cha M., Mun D. A method of generating depth images for view-based shape retrieval of 3D CAD models from partial point clouds // *Multimedia Tools and Applications*. 2021. V. 80. N 7. P. 10859–10880. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10283-z>
 46. Руденко А.В., Руденко М.А., Каширина И.Л. Алгоритмы 3D-реконструкции и расчета параметров объектов по результатам детектирования на медицинских изображениях // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12. № 2(45). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.013>
 47. Лиманова Н.И., Атаев С.Г. Метод анализа снимков компьютерной томографии на основе поэтапной бинаризации изображений и его программная реализация // *Информационно-управляющие системы*. 2018. № 3. С. 98–106. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2018.3.98>
 48. Kerstens A., Corthout N., Pavie B., Huang Z., Vernailen F., Vande Velde G., Munck S. A Label-free multicolor optical surface tomography (ALMOST) imaging method for nontransparent 3D samples // *BMC Biology*. 2019. V. 17. N 1. P. 1. <https://doi.org/10.1186/s12915-018-0614-4>
 49. Du Z., Hu Y., Ali Buttar N., Mahmood A. X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review // *Food Science and Nutrition*. 2019. V. 7. N 10. P. 3146–3160. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1179>
 50. Zhang X., Cheng L., Liu Y., Tao B., Wang J., Liao R. A review of non-destructive methods for the detection tiny defects within organic insulating materials // *Frontiers in Materials*. 2022. V. 9. P. 995516. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.995516>
 51. Szabo I., Sun J., Feng G., Kanfoud J., Gan T.H., Selcuk C. Automated defect recognition as a critical element of a three dimensional X-ray computed tomography imaging-based smart non-destructive testing technique in additive manufacturing of near net-shape parts // *Applied Sciences*. 2017. V. 7. N 11. P. 1156. <https://doi.org/10.3390/app7111156>
 52. Kastner J., Heinzl C. X-ray computed tomography for non-destructive testing and materials characterization // *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications*. Springer, 2015. P. 227–250. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6741-9_8
 53. Veikutis V., Budrys T., Basevicius A., Lukosevicius S., Gleizniene R., Unikis R., Skaudickas D. Artifacts in computer tomography imaging: how it can really affect diagnostic image quality and confuse clinical diagnosis? // *Journal of Vibroengineering*. 2015. V. 17. N 2. P. 995–1003.
 54. Bauer F., Forndran D., Schromm T., Grosse C.U. Practical part-specific trajectory optimization for robot-guided inspection via computed tomography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2022. V. 41. N 3. P. 55. <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00888-9>
 - 2022, vol. 24, no. 6, pp. 35–43. (in Russian). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-35-43>
 38. Casula G., Cuccuru F., Bianchi M.G., Fais S., Ligas P. High resolution 3-D modelling of cylinder shape bodies applied to ancient columns of a church. *Advances in Geosciences*, 2020, vol. 54, pp. 119–127. <https://doi.org/10.5194/adgeo-54-119-2020>
 39. Toneva D., Nikolova S., Georgiev I., Lazarov N. Impact of resolution and texture of laser scanning generated three-dimensional models on landmark identification. *Anatomical Record*, 2020, vol. 303, no. 7, pp. 1950–1965. <https://doi.org/10.1002/ar.24272>
 40. Bhatti A.Q., Wahab A., Sindi W. An overview of 3D laser scanning techniques and application on digitization of historical structures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 186. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00550-9>
 41. Haleem A., Javaid M. 3D scanning applications in medical field: a literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>
 42. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Current status and applications of 3D scanning in dentistry. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.07.005>
 43. Altynytsev M.A., Chernov A.V. Application of laser scanning technology for modelling real estate objects in 3D cadastre. *Geodesy and Cartography*, 2018, vol. 79, no. 9, pp. 52–63. (in Russian). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63>
 44. Hu C., Kong L., Lv F. Application of 3D laser scanning technology in engineering field. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 233, pp. 04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304014>
 45. Kim H., Yeo C., Cha M., Mun D. A method of generating depth images for view-based shape retrieval of 3D CAD models from partial point clouds. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, no. 7, pp. 10859–10880. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10283-z>
 46. Rudenko A.V., Rudenko M.A., Kashirina I.L. Algorithms for 3D reconstruction and calculation of object parameters based on the results of detection in medical images. *Modeling, optimization and information technology*, 2024, vol. 12, no. 2(45). (in Russian). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.013>
 47. Limanova N.I., Ataev S.G. Computer aided tomography picture analysis on the base of stage-by-stage binarization and its software implementation. *Information and Control Systems*, 2018, no. 3, pp. 98–106. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2018.3.98>
 48. Kerstens A., Corthout N., Pavie B., Huang Z., Vernailen F., Vande Velde G., Munck S. A Label-free multicolor optical surface tomography (ALMOST) imaging method for nontransparent 3D samples. *BMC Biology*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 1. <https://doi.org/10.1186/s12915-018-0614-4>
 49. Du Z., Hu Y., Ali Buttar N., Mahmood A. X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review. *Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 7, no. 10, pp. 3146–3160. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1179>
 50. Zhang X., Cheng L., Liu Y., Tao B., Wang J., Liao R. A review of non-destructive methods for the detection tiny defects within organic insulating materials. *Frontiers in Materials*, 2022, vol. 9, pp. 995516. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.995516>
 51. Szabo I., Sun J., Feng G., Kanfoud J., Gan T.H., Selcuk C. Automated defect recognition as a critical element of a three dimensional X-ray computed tomography imaging-based smart non-destructive testing technique in additive manufacturing of near net-shape parts. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 11, pp. 1156. <https://doi.org/10.3390/app7111156>
 52. Kastner J., Heinzl C. X-ray computed tomography for non-destructive testing and materials characterization. *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications*, Springer, 2015, pp. 227–250. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6741-9_8
 53. Veikutis V., Budrys T., Basevicius A., Lukosevicius S., Gleizniene R., Unikis R., Skaudickas D. Artifacts in computer tomography imaging: how it can really affect diagnostic image quality and confuse clinical diagnosis?. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 995–1003.
 54. Bauer F., Forndran D., Schromm T., Grosse C.U. Practical part-specific trajectory optimization for robot-guided inspection via computed tomography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2022, vol. 41, no. 3, pp. 55. <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00888-9>

55. He B., Zhang Y., Zhao L., Sun Z., Hu X., Kang Y., Wang L., Li Z., Huang W., Li Z., Xing G., Hua F., Wang C., Xue P., Zhang N. Robotic-OCT guided inspection and microsurgery of monolithic storage devices // *Nature Communication*. 2023. V.14. P. 5701. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41498-x>
56. Smakic A., Rathmann N., Kostrzewa M., Schönberg S.O., Weiß C., Diehl S.J. Performance of a robotic assistance device in computed tomography-guided percutaneous diagnostic and therapeutic procedures // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2018. V. 41. N 4. P. 639–644. <https://doi.org/10.1007/s00270-017-1841-8>
57. Егорова Д.А., Куликов А.В., Мухтубаев А.Б., Плотников М.Ю. Волоконно-оптическая измерительная система для определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 3. С. 346–352. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352>
58. Бутов О.В., Базакуца А.П., Чаморовский Ю.К., Федоров А.Н., Шевцов И.А. Полностью волоконный высокочувствительный датчик изгиба для атомной промышленности // *Фотон-Экспресс*. 2019. № 6. С. 26–27. <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16008>
59. Исламов Р.Р., Агинеи Р.В., Исупова Е.В. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017. № 6. С. 31–40.
60. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5(77). С. 52–61. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>
61. Di H., Xin Y., Jian J. Review of optical fiber sensors for deformation measurement // *Optik*. 2018. V. 168. P. 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2018.04.131>
62. Fröch J.E., Huang L., Tanguy Q.A., Colburn S., Zhan A., Ravagli A., Seibel E.J., Böhringer K.F., Majumdar A. Real time full-color imaging in a Meta-optical fiber endoscope // *eLight*. 2023. V. 3. N 1. P. 13. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00044-4>
63. Belinsky A.V., Gostev P.P., Magnitskiy S.A., Chirkin A.S. Ghost fiber optic 3D endoscopy // *JETP Letters*. 2023. V. 117. N 3. P. 202–206. <https://doi.org/10.1134/S0021364022602718>
64. Peng X., Kong L. Design of a real-time fiber-optic infrared imaging system with wide-angle and large depth of field // *Chinese Optics Letters*. 2022. V. 20. N 1. P. 011201. <https://doi.org/10.3788/COL202220.011201>
65. Amitonova L.V. Multimode fiber endoscopes for computational brain imaging // *Neurophotonics*. 2024. V. 11. N S1. P. S11509. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.11.S1.S11509>
66. Stellinga D., Phillips D.B., Mekhail S.P., Selyem A., Turtaev S., Čizmar T., Padgett M.J. Time-of-flight 3D imaging through multimode optical fibers // *Science*. 2021. V. 374. N 6573. P. 1395–1399. <https://doi.org/10.1126/science.abl3771>
67. Caramazza P., Moran O., Murray-Smith R., Faccio D. Transmission of natural scene images through a multimode fibre // *Nature Communications*. 2019. V. 10. P. 2029. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10057-8>
68. Rahmani B., Oguz I., Tegin U., Hsieh J., Psaltis D., Moser C. Learning to image and compute with multimode optical fibers // *Nanophotonics*. 2022. V. 11. N 6. P. 1071–1082. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0601>
69. Wang L., Qi T., Liu Z., Meng Y., Li D., Yan P., Gong M., Xiao Q. Complex pattern transmission through multimode fiber under diverse light sources // *APL Photonics*. 2022. V. 7. N 10. P. 106104. <https://doi.org/10.1063/5.0098370>
70. Xin L., Liu X., Yang Z., Zhang X., Gao Z., Liu Z. Three-dimensional reconstruction of super-resolved white-light interferograms based on deep learning // *Optics and Lasers in Engineering*. 2021. V. 145. P. 106663. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106663>
71. Osten W., Pedrini G. 55 years of holographic non-destructive testing and experimental stress analysis: is there still progress to be expected? // *Light: Advanced Manufacturing*. 2022. V. 3. N 1. P. 121–136. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.008>
72. Petrov V., Pogoda A., Sementin V., Sevryugin A., Shalymov E., Venediktov D., Venediktov V. Advances in digital holographic interferometry // *Journal of Imaging*. 2022. V. 8. N 7. P. 196. <https://doi.org/10.3390/jimaging8070196>
73. Javidi B., Carnicer A., Anand A., Barbastathis G., Chen W., Ferraro P., Goodman J.W., Horisaki R., Khare K., Kujawinska M., Leitgeb R.A., Marquet P., Nomura T., Ozcan A., Park Y., Pedrini G., Picart P.,
55. He B., Zhang Y., Zhao L., Sun Z., Hu X., Kang Y., Wang L., Li Z., Huang W., Li Z., Xing G., Hua F., Wang C., Xue P., Zhang N. Robotic-OCT guided inspection and microsurgery of monolithic storage devices. *Nature Communication*, 2023, vol.14, pp. 5701. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41498-x>
56. Smakic A., Rathmann N., Kostrzewa M., Schönberg S.O., Weiß C., Diehl S.J. Performance of a robotic assistance device in computed tomography-guided percutaneous diagnostic and therapeutic procedures. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 2018, vol. 41, no. 4, pp. 639–644. <https://doi.org/10.1007/s00270-017-1841-8>
57. Egorova D.A., Kulikov A.V., Mukhtubaev A.B., Plotnikov M.Yu. Fiber optic measurement system for determination of extended object position and bends in 3D space. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 346–352. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-346-352>
58. Butov O.V., Bazakutca A.P., Chamorovskii Iu.K., Fedorov A.N., Shevtsov I.A. All-fiber high-sensitivity bend sensor for nuclear industry. *Foton-Expres*, 2019, no. 6, pp. 26–27. <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16008>
59. Islamov R.R., Aginey R.V., Isupova E.V. Analysis of ways and methods of monitoring the stressed state of underground oil and gas pipelines, working in complicated engineering-geological conditions. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2017, no. 6, pp. 31–40. (in Russian)
60. Kachura S.M., Postnov V.I. Perspective optical fiber sensors and their application (review). *Proceedings of VIAM*, 2019, no. 5(77), pp. 52–61. (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>
61. Di H., Xin Y., Jian J. Review of optical fiber sensors for deformation measurement. *Optik*, 2018, vol. 168, pp. 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2018.04.131>
62. Fröch J.E., Huang L., Tanguy Q.A., Colburn S., Zhan A., Ravagli A., Seibel E.J., Böhringer K.F., Majumdar A. Real time full-color imaging in a Meta-optical fiber endoscope. *eLight*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 13. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00044-4>
63. Belinsky A.V., Gostev P.P., Magnitskiy S.A., Chirkin A.S. Ghost fiber optic 3D endoscopy. *JETP Letters*, 2023, vol. 117, no. 3, pp. 202–206. <https://doi.org/10.1134/S0021364022602718>
64. Peng X., Kong L. Design of a real-time fiber-optic infrared imaging system with wide-angle and large depth of field. *Chinese Optics Letters*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 011201. <https://doi.org/10.3788/COL202220.011201>
65. Amitonova L.V. Multimode fiber endoscopes for computational brain imaging. *Neurophotonics*, 2024, vol. 11, no. S1, pp. S11509. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.11.S1.S11509>
66. Stellinga D., Phillips D.B., Mekhail S.P., Selyem A., Turtaev S., Čizmar T., Padgett M.J. Time-of-flight 3D imaging through multimode optical fibers. *Science*, 2021, vol. 374, no. 6573, pp. 1395–1399. <https://doi.org/10.1126/science.abl3771>
67. Caramazza P., Moran O., Murray-Smith R., Faccio D. Transmission of natural scene images through a multimode fibre. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, pp. 2029. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10057-8>
68. Rahmani B., Oguz I., Tegin U., Hsieh J., Psaltis D., Moser C. Learning to image and compute with multimode optical fibers. *Nanophotonics*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1071–1082. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0601>
69. Wang L., Qi T., Liu Z., Meng Y., Li D., Yan P., Gong M., Xiao Q. Complex pattern transmission through multimode fiber under diverse light sources. *APL Photonics*, 2022, vol. 7, no. 10, pp. 106104. <https://doi.org/10.1063/5.0098370>
70. Xin L., Liu X., Yang Z., Zhang X., Gao Z., Liu Z. Three-dimensional reconstruction of super-resolved white-light interferograms based on deep learning. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, vol. 145, pp. 106663. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106663>
71. Osten W., Pedrini G. 55 years of holographic non-destructive testing and experimental stress analysis: is there still progress to be expected?. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 121–136. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.008>
72. Petrov V., Pogoda A., Sementin V., Sevryugin A., Shalymov E., Venediktov D., Venediktov V. Advances in digital holographic interferometry. *Journal of Imaging*, 2022, vol. 8, no. 7, pp. 196. <https://doi.org/10.3390/jimaging8070196>
73. Javidi B., Carnicer A., Anand A., Barbastathis G., Chen W., Ferraro P., Goodman J.W., Horisaki R., Khare K., Kujawinska M., Leitgeb R.A., Marquet P., Nomura T., Ozcan A., Park Y., Pedrini G., Picart P.,

- Marquet P., Nomura T., Ozcan A., Park Y., Pedrini G., Picart P., Rosen J., Saavedra G., Shaked N.T., Stern A., Tajahuerce E., Tian L., Wetzstein G., Yamaguchi M. Roadmap on digital holography // *Optics Express*. 2021. V. 29. N 22. P. 35078–35118. <https://doi.org/10.1364/OE.435915>
74. Behal J., Memmolo P., Miccio L., Bianco V., Ferraro P. On the optical performance of incoherent digital holography for extended 3D objects // *Optics & Laser Technology*. 2024. V. 170. P. 110286. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110286>
 75. Tahara T. Review of incoherent digital holography: applications to multidimensional incoherent digital holographic microscopy and palm-sized digital holographic recorder–holosensor // *Frontiers in Photonics*. 2022. V. 2. <https://doi.org/10.3389/fphot.2021.829139>
 76. Zeppieri M., Marsili S., Enaholo E.S., Shuaibu A.O., Uwagboe N., Salati C., Spadea L., Musa M. Optical coherence tomography (OCT): A brief look at the uses and technological evolution of ophthalmology // *Medicina*. 2023. V. 59. N 12. P. 2114. <https://doi.org/10.3390/medicina59122114>
 77. Zheng S., Bai Y., Xu Z., Liu P., Ni G. Optical coherence tomography for three-dimensional imaging in the biomedical field: A review // *Frontiers in Physics*. 2021. V. 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.744346>
 78. Koponen A., Haavisto S. Analysis of industry-related flows by optical coherence tomography – a review // *KONA Powder and Particle Journal*. 2020. V. 37. P. 42–63. <https://doi.org/10.14356/kona.2020003>
 - Rosen J., Saavedra G., Shaked N.T., Stern A., Tajahuerce E., Tian L., Wetzstein G., Yamaguchi M. Roadmap on digital holography. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 22, pp. 35078–35118. <https://doi.org/10.1364/OE.435915>
 74. Behal J., Memmolo P., Miccio L., Bianco V., Ferraro P. On the optical performance of incoherent digital holography for extended 3D objects. *Optics & Laser Technology*, 2024, vol. 170, pp. 110286. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110286>
 75. Tahara T. Review of incoherent digital holography: applications to multidimensional incoherent digital holographic microscopy and palm-sized digital holographic recorder–holosensor. *Frontiers in Photonics*, 2022, vol. 2. <https://doi.org/10.3389/fphot.2021.829139>
 76. Zeppieri M., Marsili S., Enaholo E.S., Shuaibu A.O., Uwagboe N., Salati C., Spadea L., Musa M. Optical coherence tomography (OCT): A brief look at the uses and technological evolution of ophthalmology. *Medicina*, 2023, vol. 59, no. 12, pp. 2114. <https://doi.org/10.3390/medicina59122114>
 77. Zheng S., Bai Y., Xu Z., Liu P., Ni G. Optical coherence tomography for three-dimensional imaging in the biomedical field: A review. *Frontiers in Physics*, 2021, vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.744346>
 78. Koponen A., Haavisto S. Analysis of industry-related flows by optical coherence tomography — a review. *KONA Powder and Particle Journal*, 2020, vol. 37, pp. 42–63. <https://doi.org/10.14356/kona.2020003>

Авторы

Чертов Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, [sc 55303364600](https://orcid.org/0000-0002-2015-0458), <https://orcid.org/0000-0002-2015-0458>, chertov.an@ntcup.ru

Хохлов Демид Денисович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, [sc 57188552491](https://orcid.org/0000-0003-0919-7762), <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, khokhlov.dd@ntcup.ru

Authors

Aleksandr N. Chertov — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, 117342, Russian Federation, [sc 55303364600](https://orcid.org/0000-0002-2015-0458), <https://orcid.org/0000-0002-2015-0458>, chertov.an@ntcup.ru

Demid D. Khokhlov — PhD, Head of Laboratory, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, 117342, Russian Federation, [sc 57188552491](https://orcid.org/0000-0003-0919-7762), <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, khokhlov.dd@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2024
Одобрена после рецензирования 19.10.2024
Принята к печати 27.11.2024

Received 14.09.2024
Approved after reviewing 19.10.2024
Accepted 27.11.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»