

Концепция системы цифрового сканирования насыщенных оборудованием помещений в целях реверсивного проектирования для образовательных проектов и стартапов

К.А. Мочкин, М.Г. Жабицкий, К.В. Черненко, Е.С. Лагутина, Г.В. Свердлик

Аннотация — Настоящая статья является стартовой в серии работ по формированию низко бюджетного функционального инструментария для реверсивного проектирования и построения BIM-моделей существующих инженерных объектов на базе методов трехмерного лазерного сканирования изнутри помещений с высокой степенью заполненности оборудованием и инженерными коммуникациями. Выполнен обзор подходов к реверсивному построению информационных моделей зданий с применением обследования геометрических параметров объекта трехмерными лидарами на базе цифровой обработки облаков точек. Разработана техническая концепция низко бюджетного лидарного измерительного комплекса на базе двумерных лидара заводской готовности. Поставлены задачи на разработку компонент комплекса и его интеграцию. Описана общая архитектура, программа серии НИОКР. Выполнена разработка физической и программной архитектуры. Описан результат выполнения первого этап серии - проектирование, изготовление и испытания прототипа трехмерного лазерного сканирования на базе двумерного лидара. Проведена обработка полученного облака точек, выявлены ошибки в его формировании с использованием первой версии программного обеспечения. Обсуждены выявленные проблемы, их причины и скорректирована программы исследований и разработок.

Ключевые слова— реверсивное проектирование, BIM-технологии, цифровая обработка облаков точек, лазерное сканирование, лидар.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современной цифровой трансформации индустрии и бизнес становится

Статья получена 11 июня 2022.

Мочкин К.А. – магистр ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: k.mochkin@yandex.ru);

Жабицкий М.Г. – заместитель директора ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: jabitsky@mail.ru);

Черненко К.В. - студент ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: kost.chernenko@gmail.com);

Лагутина Е.С. – ведущий инженер ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: sambob@bk.ru);

Свердлик Г.В. – к.т.н., заместитель начальника отдела ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: promexpress@bk.ru).

построение цифровых двойников различных сложных инженерных объектов. В рамках настоящей статьи мы понимаем под сложным инженерным объектом насыщенное инженерным оборудованием общего или производственного назначения здания и сооружение. Это может быть жилое здание, общественное здание, офисный центр - практически любой современный объект имеет в своём составе базовые инженерные системы, такие как системы водоснабжения и водоотведения, теплоснабжения, воздухоподготовки, вентиляция и кондиционирования, силового электропитания и слаботочные кабельные системы. В случае производственных зданий и помещений насыщенность их оборудованием и технологическими коммуникациями ещё выше, а разнообразие такого наполнения имеет огромное количество вариантов. В литературе последнего десятилетия широко освещены преимущества эксплуатации зданий и сооружений, имеющих комплексные цифровые двойники, интегрирующее пространственные данные и атрибутивную информацию как по архитектурно-планировочных параметрах, так и о инженерных системах, технологических коммуникациях и развёрнутом оборудовании. Такой подход к интеграции информации в единый цифровой комплекс носит устойчивое наименование BIM-технологии. Аббревиатура BIM расшифровывается как как Building Information Model и является фактически универсальным технологическим стандартом, широко применяемым при описании полного жизненного цикла таких объектов. Внедрение BIM-технологии естественным образом началось с этапа проектирования. Ведущие производители инженерного программного обеспечения во всём мире (и в России, в частности) представляют на рынок широкий спектр цифровых продуктов для BIM-моделирования. При этом, созданные на этапе проектных работ BIM-модели используются затем на протяжении всего времени существования объекта (жизненного цикла) и существенно повышают эффективность всех его этапов. Однако надо понимать, что в настоящий момент по технологии BIM разработана лишь часть проектов последних лет, что составляет в лучшем случае единицы процентов общего количества объектов капитального строительства, эксплуатируемых практически в любой стране мира. Стоимость проектирования достаточно велика (до 10% затрат на сооружение объекта. Тем не

менее, соблазн обладания BIM- моделью сложного инженерного объекта на этапах эксплуатации, модернизации и реконструкции, вывода из эксплуатации настолько велик, что на наших глазах рождается новый рынок в высокотехнологичных, в базе своей цифровых услуг, носящих название "реверсивное проектирование", то есть создание BIM-моделей существующих зданий и сооружений. В отличие от изначального проектирования в цифровом виде, реверсивное проектирование имеет в качестве источников объективной информации не только замысел проектного бюро, опирающийся на технические требования заказчика. Для создания цифровой модели существующего объекта приходится учитывать и имеющуюся проектную документацию (зачастую не полную либо частично несоответствующая объекту, изменённого в ходе жизненный цикл), но и физическую реальность - конкретное здание, включая актуальные архитектурно-планировочные данные, трассировку различных видов технологических коммуникаций, размещение промышленного оборудования обеспечивающего и производственного назначения. Таким образом, приходится иметь дело с весьма объёмной, зачастую противоречивой (а при этом парадоксальным образом неполной информацией) для построения актуальной адекватной цифровой информационной модели за разумные деньги и в короткие сроки. Данная задача является, фактически, технологическим фронтиром для цифровых BIM-технологий. Одним из бурно развивающихся инструментов её решение является технология работы с облаками точек. Существует несколько подходов к инструментальному обеспечению решению задачи реверсивного проектирования на базе автоматизированных обмеров зданий и сооружений. Наиболее быстрым и точным представляется технология лазерного сканирования. Соответствующие приборы носят название лидаров. Есть и альтернативные технологии - фотограмметрия (определение фактических физических размеров по результатам молекулярный или бинокулярный фотосъёмки объектов с различных позиций). Для ряда специальных задач (обнаружение скрытых элементов строительных конструкций и инженерных систем) применяются методы и оборудования магнитного сканирования, ультразвукового сканирования скрытых и труднодоступных полостей и ряд других методов. В результате таких измерений формируется новые цифровые сущности - облака точек. В общем виде это набор информации, объединяющий чисто геометрические характеристики (координаты каждой точки из облака) и физические характеристики для каждой точки. Общая задача реверсивного проектирования в этом случае сводится формированию более сложных и содержательных моделей на основании анализа данных о таких облаках точек (выделение разных типов поверхностей, распознавание архитектурных элементов, конструкции технологических коммуникаций и промышленного оборудования). Общая задача носят достаточно комплексный характер, и на данном этапе мы сосредоточимся на вопросе формирования первичного набора данных - облаков точек. Методы их цифровой

обработке также весьма интересны и всё ещё нетривиальны, однако их обсуждение выходит за рамки данной работы.

II. АНАЛИЗ ПОТРЕБНОСТЕЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках настоящей работы мы будем обсуждать прикладные цифровые программные и аппаратные средства для формирования облаков точек достаточного объёма и плотности расположения для получение достоверного представления об устройстве помещений, включая:

- архитектурные элементы (несущие конструкции, перекрытия, ограждающие конструкции, лестничные марши и лифтовые шахты);
- инженерно-технологические коммуникации (трубопроводы, воздуховоды, кабельные лотки, кабеля и т.п.);
- производственное оборудование обеспечивающих функционирование зданий инженерных систем;
- оборудование технологического производственного назначения.

Нас будут особенно интересовать задачи обмера и генерация облаков точек не столько для относительно пустых помещений (жилые комнаты, учебные аудитории, общественные и торговые пространства), сколько производственные помещения, с высокой интенсивностью заполненные оборудованием и коммуникациями. Такой подход связан просто с тем, что решение задачи формирования облака точек для помещений с высокой наполненности очевидным образом методически решает и задачу для более простых объектов. При этом, практически в каждом здании имеются как минимум несколько помещений, укомплектован обеспечивающими инженерными системами - насосная, вентиляционная, электропитовая, тепловые пункты и другие. То есть ограничиться обмером слабо заполненных помещений нельзя даже для обычных зданий непроизводственного назначения. Также мы будем рассматривать задачу обмера помещений изнутри - поскольку внешние обмеры лучше автоматизированы к настоящему моменту путем использования дронов. Для поставленной задачи не очень существенно на время сканирования в определённых разумных пределах. Зато, для получения адекватной цифровой BIM- модели важна полнота сканирования и его точность. На первом этапе, которому соответствует настоящая работа, мы ограничимся с обсуждением формирование облаков точек, не вдаваясь пока в технология и цифровые методы дальнейшей обработки этих данных и применяемых программных средств для преобразования облака точек в структурированную BIM-модель. Однако, важно понимать, что для дальнейшей обработки необходимо обеспечить относительную равномерность распределение генерируемого в ходе сканирования облака точек по всем поверхностям внутри помещения.

В качестве базовой технологии мы выбрали лазерное сканирование на базе лидаров [1-11]. Это наиболее проработанный и точный метод, хорошо приспособленный на аппаратном уровне для генерации цифровых данных в формате облаков точек. Однако он имеет ряд ограничений. Наиболее существенное из них

порождено базовым физическим принципом - измерения производятся за счёт отражения световых лучей от поверхностей. Таким образом, в случае высокой заполненности помещений фиксируемыми объектами формируется большое количество теневых зон. Более близкие к измерительной системе предметы затеняют удалённые, а при сканировании объёмного элемента облако точек формируется лишь в зоне прямой видимости, и соответствует "лицевой" части объекта. Следовательно, необходимо сканирование помещения с большого количества разных точек, в общем случае с изменением всех трех координат измерительной системы - перемещение лидара как по плоскости пола помещения, так и по высоте. После этого необходимо обеспечить высокоточную сшивку фрагментов сканирования - локальных облаков точек, получаемых при измерении с фиксированными положением и ориентацией измерительной системы. Только тогда да можно надеяться на достаточно низкий уровень искажений интегрального облака точек и получению достаточно корректных пространственных данных.

В принципе, на мировом рынке представлены профессиональные измерительные системы на базе технологии лидарного сканирования, в которых описанные проблемы решены как минимум частично. Однако, такие системы имеют слишком высокую стоимость для массового применения. Они слишком дороги для небольших проектных или строительных компаний, высокотехнологичных стартапов в сфере строительства и строительного контроля, а также для образовательных целей. Альтернативная бизнес-модель - аренда оборудования для разовых измерений имеет преградой квалификационные требования к операторам системы. Поскольку технология и программное обеспечение пока не стандартизованы в достаточной мере, данное цифровое оборудование остаётся в сфере применения подготовленными профессионалами, что безусловно снижает широту его применения. В настоящей работе описываются подходы к построению низко бюджетной системы генерации облаков точек для внутренних помещений малого и среднего размера с высоким уровнем наполненности объёма элементами оборудования и технологическими коммуникациями. Примером таких задач может быть реверсивное проектирование насосных, тепловых пунктов или вентиляционных в жилых, общественных и производственных зданий, а также малых цехов производственных предприятий.

III. КОНЦЕПЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Как следует из приведённых выше рассуждений, для реализации адекватной системы лазерного (лидарного) сканирования, применимой для целей реверсивного проектирования отдельных помещений с высоким заполнением оборудованием, необходимы решение двух различных задач. Первая задача - конструирование, изготовление и наладка непосредственно трехмерного лидара с удовлетворительными параметрами измерения и умеренной стоимостью. Именно эта задача и решена авторами в рамках настоящей работы. Концептуальная идея решения состоит в применении не специализированных трёхмерных сканирующих систем

заводского изготовления дизайнера и производства зарубежных фирм, а применение упрощённых устройств - двухмерных лидаров. Этот класс оборудования гораздо более широко применяется для различных перемещающихся в одной плоскости устройств - например, автомобилей, оборудованных интеллектуальными ассистентами водителя или беспилотных автомобилей [12-13]. Ещё более простой и массовой сферой применения является серийно выпускаемые роботы-пылесосы, как раз предназначенные для автономного перемещения по зданию с непрерывным контролем положения устройства внутри помещения. Также подобные устройства широко используются для образовательных целей в составе комплектов-конструкторов интеллектуальных робототехнических устройств, доступно к применению с уровня средней школы. Вследствие больших тиражей выпуска и необходимости встраивания в бытовую технику, такие двумерные системы позиционирования на технологической базе двумерных лидаров обладают тут крайне низкой стоимостью (в пределах 150–200 долларов). Естественно, для задачи трехмерного сканирования необходима доработка системы поворотной платформой, пошагово регулирующей наклон плоскости сканирования к горизонту. При этом, необходимо синхронизировано с двумерным сканированием контролировать углы возвышения и перегиба платформы-носителя системы и формировать соответствующие потоки цифровых данных. Эта задача в механической части многократно решена даже для простых устройств в станкостроении, а также для строительных инструментов. Генерация цифровых данных и управление такими системами на современном уровне легко осуществляется простейшими массовыми контроллерами, такими как ARDUINO или Raspberry. Именно эта концепция применения простых поворотных платформ в сочетании с двумерными лидаром представляется перспективной, позволяющей уменьшить стоимость изделия (трёхмерной лидарной измерительной системы для реверсивного проектирования) на порядок и более без потери функциональных возможностей. В последующих разделах более подробно обсуждается выполненная работа по проектированию изготовлению и первичным испытаниям прототипа такого устройства.

Однако, прежде чем перейти к описанию непосредственно работ по созданию прототипа, поставим ещё одну задачу, без решения которой технологически эффективно невозможно реализовать необходимые для реверсивного проектирования помещений измерительные процедуры. Как мы упоминали, необходимо проводить лазерное сканирование с различных точек внутри помещения для устранения эффекта затенения значительной части контролируемого пространства. Это неизбежно приводит к генерации многих облаков точек, достоверно позиционируемых лишь относительно мгновенного положения измерительного прибора. Для формирования сводного облака точек, необходимо корректное совмещение данных локальных измерений в едином пространстве помещения. Поскольку для получения достоверной модели помещения необходима достаточно

высокая плотность покрытия всех поверхностей облаком точек, надо закладывать автоматизированную процедуру программной обработки и интеграции локальных облаков в единое целостное облако. Для этого надо корректно, с минимальным участием оператора измерять положение и ориентацию приборной платформы внутри замкнутых, в том числе радио изолированных помещениях относительно локальной системы координат. В прямую, на рынке готовых измерительных систем такое решение отсутствует. Заметим, на что оно востребована для широкого класса сходных задач, в том числе связанных с радиационными измерениями, например в ходе комплексного на инженерно-радиационного обследования при организации работ на объектах использования атомной энергии. С точки зрения настоящей работы, данная задача пока не решена нами даже на уровне прототипа. Однако концепция технического решения системы лазерного сканирования помещений в целях реверсивного цифрового проектирования должна содержать аппаратно-программные решение и для этой задачи тоже.

IV. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА

В данном разделе рассматриваются физическая и логическая архитектура системы для определения основных ее компонентов и принципа их взаимодействия друг с другом. Определяются основные инструменты для разработки системы и описывается ее реализация.

IV.1. ФИЗИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА

На рисунке 1 представлена концептуальная схема физической архитектуры разрабатываемой системы:



Рис. 1 - Концептуальная схема физической архитектуры разрабатываемой системы

Данная система включает в себя следующие компоненты:

- Двумерное лазерное сканирующее устройство;
- Контроллер контроля и управления ориентацией исполнительного механизма. Получает данные с акселерометра. Для прототипа использовались простые контроллеры Arduino UNO;
- Поворотный механизм для вращения платформы со сканирующим устройством. Для корректной работы системы в промышленном режиме необходимо вращение платформы мы как минимум относительно двух осей (а для полной автоматизации измерений-относительно трёх осей). В прототипе реализовано управляемое вращение только вокруг одной оси (изменение угла наклона плоскости сканирования);

- Датчики контроля углов наклона и поворота измерительной платформы (акселерометры). Для прототипа измерительной системы мы использовали контроллеры Arduino со встроенными акселерометрами.

- Устройства передачи потока данных с двумерного сканера и данных об ориентации измерительные платформы локальное устройство обработки данных системы. - В прототипе применялись два канала передачи данных. Для передачи данных об ориентации измерительной платформы использовался WiFi- канал. Данные с двумерного лидара передавались по проводному каналу. В перспективе все данные планируется внутри помещения передавать по беспроводным каналам связи.

- Локальное устройство обработки информации. В качестве такого устройства применяется ноутбук, оснащённый WiFi каналами связи. Ноутбук обеспечивает обработку данных при измерениях в рамках одного помещения.

- Удаленный сервер. В перспективе запроектировано развёртывание облачного сервера хранения и обработки данных, получающего с ноутбука при выходе его в глобальную сеть Интернет. Сервер в конечной конфигурации должен обеспечить получение данных с произвольного количества измерительных систем.

Для создания системы по описанной концепции необходимо учитывать ряд технических характеристик компонентов: мощность, номинальное напряжение электрических устройств, их интерфейсы, крутящий момент исполнительного механизма и пр.

IV.1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ

Архитектуру системы можно условно разделить на внутреннюю и внешнюю. К внутренней архитектуре относятся компоненты, которые непосредственно крепятся к корпусу разрабатываемого устройства. К внешней архитектуре относятся компоненты, которые играют важную роль в работе системы, но физически от корпуса отделены. Таким образом, к внутренним компонентам разрабатываемой системы можно отнести следующие элементы:

- Плата Arduino Uno Wi-Fi Rev2 – это устройство, которое обладает своим собственным процессором и памятью. Оно включает в себя 8-битный микроконтроллер семейства megaAVR, беспроводной модуль Ublox NINA-W102 и инерциальный датчик LSM6DS3. Наличие данных датчиков предоставляет возможность использовать беспроводные технологии Wi-Fi, Bluetooth, данные с трёхосевого акселерометра и гироскопа без использования дополнительных компонентов. Питание контроллера за счет внешнего подключения или USB-разъёма от источника с напряжением от 7 до 12 вольт.

- RPLIDAR A1M8 (рисунок 2) – устройство, которое представляет из себя 2D-лазерный сканер, который может выполнять сканирование на 360 градусов. Дальность измерения составляет 12 метров. Система делает 8000 измерений в секунду. RPLIDAR основан на принципе лазерной триангуляции и используется для сбора и обработки изображений. Датчик вращается по часовой стрелке, выполняя сканирование окружающей среды на 360 градусов, и создает карту очертаний помещения. Устройство подключается к компьютеру с

помощью технологии plug and play – для этого необходим micro USB кабель. Устройство разработано компанией Slamtec.



Рис. 2 - Лидар модели RPLIDAR A1M8

– Шаговый двигатель обеспечивает дискретные механические перемещения (поворот) измерительной платформы. Шаг вращения в 1,8 градус. Момент удержания двигателя – 14 кг*см. Для взаимодействия устройства с платой Arduino и обеспечения контроля вращения применялся драйвер двигателя L298n.

К внешним компонентам разрабатываемой системы относятся:

- ноутбук, управляющий локальной измерительной системой;
- Wi-Fi модем для передачи данных между ноутбуком и контроллером Arduino [16];
- удалённый интернет-сервер, которая выступает базой данных для хранения всех полученных данных.

IV. III. ФИЗИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА

Опишем основные процессы, происходящие на физическом уровне системы:

- Контроллер Arduino связан с ноутбуком через беспроводную Wi-Fi связь для обмена данными. Он собирает данные с акселерометра и осуществляет управление двигателем (регулирование наклона плоскости сканирования). Питание контроллера обеспечивается аккумулятором.
- Лидар крепится на корпусе устройства, но подключен через проводной интерфейс к ноутбуку для передачи данных об измерении. Через нее же осуществляется управление лидаром и подача питания.
- Через локальную машину и удаленный сервер происходит обмен данными, что позволяет хранить их в базе данных и при необходимости получать к ним доступ.

V. IV. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА

Она включает в себя следующие компоненты:

- Сканирующее устройство и акселерометр, которые отвечают за генерацию данных (пространственные координаты точек и угол поворота вращающейся платформы соответственно);
- Контроллер, который считывает данные с акселерометра, управляет двигателем и обменивается информацией с локальной машиной;
- Локальная машина, с которой происходит управлением лидаром и считывание данных

сканирования, преобразование данных, обмен данными с контроллером и с БД.

– Удаленный сервер, на который отправляются данные с локальной машины для их дальнейшего хранения и предоставления по запросу.

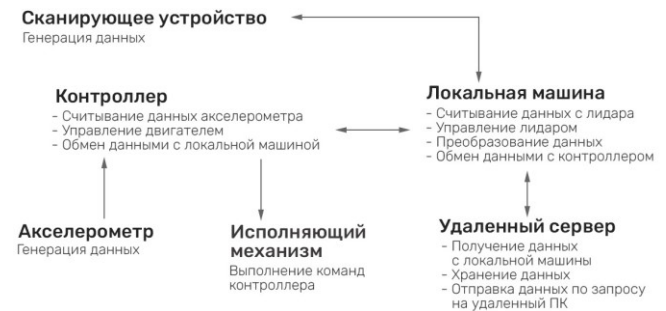


Рис. 3. Концептуальная схема логической архитектуры системы

IV.V. ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА

А. Клиентская часть ПО, исполняемая на плате Arduino.

Данный модуль разрабатывался с помощью Arduino IDE, которая является интегрированной средой разработки с открытым исходным кодом. Данный модуль реализует следующие функции:

- Считывание данных акселерометра;
- Управление двигателем;
- Отправка данных через беспроводную сеть Wi-Fi на локальную машину.

В рамках проекта Arduino реализовано огромное число библиотек разных разработчиков, применяемых для управления различными устройствами. Нами использовались находящиеся в свободном доступе библиотеки, в частности [15-17].

Б. ПО обработки данных на ноутбуке. Модуль реализован на языке программирования Python [18] и обеспечивает выполнение следующих функций:

- получение данных от контроллера Arduino об ориентации измерительной платформы;
- получение данных с лидара;
- формирование массива декартовых координат точек облака;
- синхронизация изменения ориентации платформы и проведения цикла измерений 2D-лидаром
- синхронизация с удаленным сервером: отправка и получение данных;

Алгоритм работы системы следующий:

1. Контроль текущего угла наклона платформы, при его отклонении от горизонтали – устранение наклона путем управления шаговым двигателем. Фиксация ориентации измерительной платформы (запись в файл протокола сессии измерений).

2. Старт серии измерений. Запуск лидара.

3. Двумерное сканирование с помощью лидара в плоскости. Полученные данные записываются в файл протокола сессии измерений

4. Передача сигнала о завершении цикла сканирования в плоскости.

5. Поворот платформы на заданное число шагов двигателя (для прототипа – 1 шаг равен

1,8 градусов). Контроль текущего угла наклона платформы. Фиксация ориентации измерительной платформы (запись в файл протокола сессии измерений).

Циклическое повторение процедуры 3-5 до завершения серии сканирований (пошаговое преобразование из полярной в декартову систему координат, формирование массива координат облака точек. Формирование итогового протокола, включающего метаданные серии измерения и массив координат облака точек [19].

4. Предобработка данных измерений на ноутбуке - преобразование из полярной в декартову систему координат, формирование массива координат облака точек. Формирование итогового протокола, включающего метаданные серии измерения и массив координат облака точек [19].

5. Пересылка итогового протокола на удаленный интернет-сервер. Очистка буферных хранилищ данных.

6. Дальнейшая работа с облаками точек производится с данными на сервере.

V. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.

На рисунке 4 представлен собранный прототип разрабатываемого устройства. В его основе лежит металлический корпус (А), часть из которого является подвижной на 180 градусов платформой (Б). На платформе крепится 2D-лидар рисунок (В). На платформе крепятся плата Arduino (Г), внешний источника питания (Д), двигатель (Е), драйвер шагового двигателя(Ж).

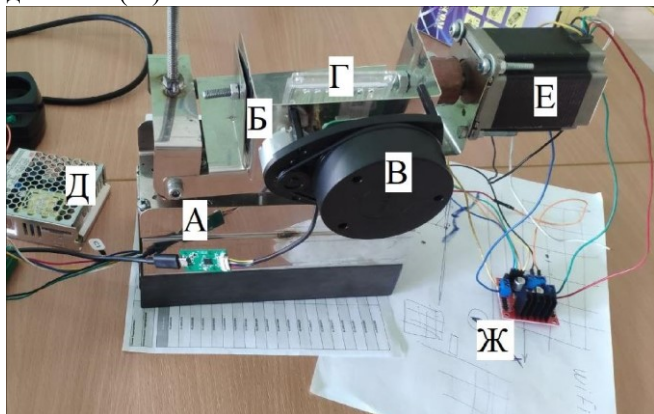


Рис. 4. Прототип устройства

VI. ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.

Испытания системы проводились в одном из помещений учебной лаборатории, примерные габариты которого 5 на 5 метров. В центре комнаты был установлен экспериментальный стенд. Вокруг сканера были расставлены объекты разной геометрической формы для оценки точности и качества сканирования (в частности, пластиковая труба высотой 1 метр, диаметром 15 сантиметров и прямоугольная коробка с размерами 40смх20смх20см). На первых измерениях сканирующая головка лидара делала один оборот вокруг своей оси при положении платформы, но плотность сканирования оказалась слишком низкой и объекты с трудом можно было различить. Тогда было увеличено количество оборотов сканирующей головки лидара до 5 оборотов

Полученные данные были загружены в программный комплекс Autodesk Rescar. Это десктопное приложение, которое помогает пользователям работать с результатом лазерного сканирования – облаком точек. Также

программа предоставляет возможность загружать фотографии и на их основе создавать трехмерную триангулированную модель. Autodesk Rescar предоставляет множество функций для взаимодействия с загруженными данными: от привычного зуммирования/панорамирования полученного облака точек до изменения окраса точек по различным признакам. Также проект Autodesk Rescar в дальнейшем можно экспортировать в Autodesk Revit.

На рисунке 5 представлено облако точек, полученное в результате тестового запуска устройства. При детальном рассмотрении полученных результатов можно увидеть очертания стола и расставленных на нем предметов. В правом верхнем углу изображения представлено помещение, в котором проводилось сканирование, а также расставленные геометрические объекты.

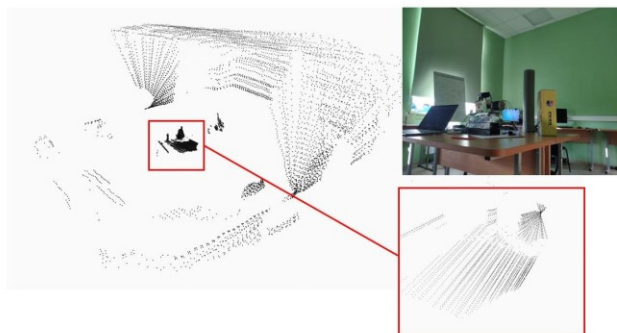


Рис. 5. Результаты тестового запуска

Дальнейший алгоритм обработки данных (координат облака точек):

- Выделение базовых паттернов точек в виде поверхностей;
- Соотношение полученных поверхностей с реальными объектами;
- Построение пространственной модели, которая включает в себя 3D геометрию сканируемых объектов;

В настоящее время при анализе данных были выявлена проблема геометрического искажения. Преобразование сферической в декартову систему координат осуществлялось относительно статическая центра (0;0;0). Однако на практике движение центра сканирования сложнее – движется платформа и вращается головка лидара. На рисунке 36 на примере потолка можно увидеть, что на полученных данных он отображается криволинейной поверхностью, хотя в реальности приближен к плоскости. Также надо учитывать и уровень перекоса сканирующей установки, так как она может находиться на неровной поверхности. Для практического использования необходимо уточнение программ пересчета координат конечного облака точек.

VI. ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.

По результатам испытаний была подтверждена принципиальная работоспособность предложенной схемы аппаратно-программного комплекса, предназначенного для низкобюджетного полнофункционального формирования облаков точек поверхностей, насыщенным оборудованием и инженерными коммуникациями помещений. Было

принципиально решена первая из двух инженерных задач, необходимых для прототипирования комплексной системы трехмерного лазерного сканирования таких объектов. На следующих этапах НИОКР необходимо решить ряд задач для полноценного достижения поставленной цели - создание низко бюджетной технологически независимой системы подготовки цифровых данных для реверсивного проектирования сложных инженерных объектов путём формирования облаков точек.

Этими задачами являются:

- Доработка программных алгоритмов обработки данных измерений первой измерительной системы - трехмерного лазерного сканирования на базе двухмерного цифрового лидара.

- Доработка механической части первой измерительной системы - платформы контролируемого поворота двухмерного лидара с нужным уровнем точности и дискретности.

- Разработка промышленной версии программного обеспечения комплекса, включая серверное программное обеспечение для перевода модели эксплуатации системы в парадигму цифрового сервиса.

- Разработка системы точного изменения положения и ориентации платформы измерительной системы в закрытых, в том числе радио изолированных помещениях.

- Интеграция двух разработанных подсистем в единый цифровой приборный комплекс.

- Проведение испытаний, опытной и опытно промышленной эксплуатация цифрового приборного комплекса для образовательных приложений.

Даная программа исследований и разработок планируется к выполнению в 2022–2024 годах и результаты её реализации предполагается поэтапно публиковать.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Руденко Ю.М., Богданец Е.С. Актуальность лидарной съемки на данном этапе развития лазерного сканирования // Технические науки – от теории к практике. 2016. №5-1 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-lidarnoy-semki-na-dannom-etape-razvitiyazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 11.05.2022).
- [2] Лазерное сканирование. — Текст : электронный // СОВЗОНД : [сайт]. — URL: <https://sovzond.ru/services/laser-scanning/> (дата обращения: 12.05.2022).
- [3] Обзор лазерного сканирования. — Текст : электронный // Гео Стандарт : [сайт]. — URL: https://www.geost.ru/articles/obzor_lazernogo_skanirovaniya/ (дата обращения: 13.05.2022).
- [4] Сарычев Дмитрий Сергеевич Мобильное лазерное сканирование // ООО «ИндорСофт». 2013. №1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnoe-lazernoe-skanirovanie> (дата обращения: 11.05.2022).
- [5] Виды лазерных 3D сканеров. — Текст : электронный // Технокауф : [сайт]. — URL: https://technokauf.ru/branches/promyshlennoe_stroitelstvo_modernizatsiya_i_remont/vidy_lazernykh_skanerov/#yakor_1 (дата обращения: 13.05.2022).
- [6] Виды лазерных сканеров. Принципы измерения. — Текст : электронный // НГКИ : [сайт]. — URL: https://www.ngce.ru/pg_publications11.html (дата обращения: 13.05.2022).
- [7] Сканирующие лазерные дальномеры. — Текст : электронный // Solar Laser Systems : [сайт]. — URL: <https://solarlaser.com/wp-content/uploads/2020/11/LIDAR-SOLARLS-2020-10-10.pdf> (дата обращения: 13.05.2022).
- [8] Брылев И.С. применение технологии наземного лазерного сканирования для создания 3d моделей // Столыпинский вестник. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniyadlya-sozdaniya-3d-modeley> (дата обращения: 11.05.2022).
- [9] Середович В.А., Алтынцева М.А., Попов Р.А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // ЖБТ. 2013. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-dannyh-razlichnyh-vidov-lazernogoskanirovaniya-pri-monitoringe-prirodnyh-i-promyshlennyh-obektov> (дата обращения: 11.05.2022).
- [10] Шарафутдинова А.А., Брынь М.Я. опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya-i-informatsionnogo-modelirovaniya-dlya-upravleniya-inzhenernymi-dannymi-v> (дата обращения: 11.06.2022).
- [11] Киямов И.К., Мингазов Р.Х., Музафаров А.Ф., Ибрагимов Р.А., Сибгатуллин А.А. Технология лазерного сканирования в 3D проектировании // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №7 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-lazernogo-skanirovaniya-v3d-proektirovanii> (дата обращения: 11.06.2022). 12) Md Shah Alam, Jared Oluoch, A survey of safe landing zone detection techniques for autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs), Expert Systems with Applications, Volume 179, 2021, 115091, ISSN 0957-4174
- [12] Беспилотные автомобили «Яндекса» перевели на собственные лидары. — Текст : электронный // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/news/t/591117/> (дата обращения: 13.05.2022).
- [13] Georgios Zamanakos, Lazaros Tsochatzidis, Angelos Amanatiadis, Ioannis Pratikakis, A comprehensive survey of LIDAR-based 3D object detection methods with deep learning for autonomous driving, Computers & Graphics, Volume 99, 2021, Pages 153-181, ISSN 0097- 8493 63
- [14] Библиотека Stepper. — Текст : электронный // Arduino : [сайт]. — URL:

- <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/stepper/>
(дата обращения: 13.06.2022)
- [15] Библиотека Arduino_LSM6DS3. — Текст : электронный // Arduino : [сайт]. — URL: https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/arduino_lsm6ds3/ (дата обращения: 22.05.2022).
- [16] Библиотека WiFiNINA. — Текст : электронный // Arduino : [сайт]. — URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/wifinina/> (дата обращения: 13.06.2022).
- [17] Библиотека RPLidar. — Текст : электронный // GitHub : [сайт]. — URL: <https://github.com/Roboticia/RPLidar> (дата обращения: 13.06.2022)
- [18] Сокеты в Python для начинающих. — Текст : электронный // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/post/149077/> (дата обращения: 13.06.2022).
- [19] Сарычев Дмитрий Сергеевич Обработка данных лазерного сканирования // ООО «ИндорСофт». 2014. №1 (2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-dannyhlazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 13.05.2022).

The concept of a digital scanning system for equipment-saturated premises of reverse engineering at educational projects and startups

K.A. Mochkin, M.G. Zhabitskii, K.V. Chernenko, E.S. Lagutina, G.V. Sverdlik

Annotation — This article is the starting point in a series of works on the formation of low-budget functional tools for reverse engineering and building BIM models of existing engineering facilities based on methods of three-dimensional laser scanning from inside premises with a high degree of occupancy of equipment and engineering communications. The review of approaches to the reverse construction of information models of buildings using the survey of geometric parameters of the object with three-dimensional lidars based on digital processing of point clouds is carried out. A technical concept of a low-budget lidar measuring complex based on two-dimensional factory-ready lidars has been developed. Tasks have been set for the development of the components of the complex and its integration. The general architecture and the program of the R&D series are described. The physical and software architecture has been developed. The result of the first stage of the series - design, manufacture and testing of a prototype of a three-dimensional laser scanning based on a two-dimensional lidar is described. The obtained point cloud was processed, errors in its formation using the first version of the software were revealed. The identified problems, their causes were discussed and the research and development program was adjusted.

Key words — reverse engineering, BIM technologies, point clouds digital processing, laser scanning, lidar.

REFERENCES

- [1] Rudenko Yu.M., Bogdanets E.S. The relevance of lidar imaging at this stage of the development of laser scanning // Technical sciences – from theory to practice. 2016. №5-1 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-lidarnoy-semki-na-dannom-etape-razvitiya-lazernogo-skanirovaniya> (Accessed: 11.05.2022).
- [2] Laser scanning. —Electronic text // URL: <https://sovzond.ru/services/laser-scanning/> (Accessed: 12.05.2022).
- [3] Laser scanning overview. — Electronic text // URL: https://www.geo-st.ru/articles/obzor_lazernogo_skanirovaniya/ (Accessed: 13.05.2022).
- [4] Dmitry Sergeevich Sarychev Mobile laser scanning // JSC «IndorSoft». 2013. №1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnoe-lazernoe-skanirovanie> (Accessed: 11.05.2022).
- [5] Types of 3D laser scanners. — Electronic text // URL: https://technokauf.ru/branches/promyshlennoe_stroitelstvo_modernizatsiya_i_remont/vidy_lazernykh_skanerov/#yakor_1 (Accessed: 13.05.2022).
- [6] Types of laser scanners. Principles of measurement. — Electronic text // URL: https://www.ngce.ru/pg_publications11.html (Accessed: 13.05.2022).
- [7] Scanning laser rangefinders. Electronic text // Solar Laser Systems : [сайт]. — URL: <https://solarlaser.com/wp-content/uploads/2020/11/LIDAR-SOLARLS-2020-10-10.pdf> (Accessed: 13.05.2022).
- [8] Brylev I.S. Application of ground-based laser scanning technology to create 3D models // Stolypin Bulletin. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-tehnologii-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya-dlya-sozdaniya-3d-modeley> (Accessed: 11.05.2022).
- [9] Seredovich V.A., Altyntsev M.A., Popov R.A. Features of application of data of various types of laser scanning in monitoring of natural and industrial objects // CJ. 2013. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-dannyh-razlichnyh-vidov-lazernogo-skanirovaniya-pri-monitoringe-prirodnyh-i-promyshlennyh-obektov> (дата обращения: 11.05.2022).
- [10] Sharafutdinova A.A., Bryn M.Ya. Experience in the use of ground-based laser scanning and information modeling for engineering data management during the life cycle of an industrial facility // Bulletin of SGUGIT (Siberian State University of Geosystems and Technologies). 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya-i-informatsionnogo-modelirovaniya-dlya-upravleniya-inzhenernymi-dannymi-v> (Accessed: 11.06.2022).
- [11] Kiyamov I.K., Mingazov R.H., Muzafarov A.F., Ibragimov R.A., Sibgatullin A.A. Laser scanning technology in 3D design // Oil and Gas Exposition. 2013. №7 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-lazernogo-skanirovaniya-v3d-proektirovanii> (Accessed: 11.06.2022).
- [12] Yandex self-driving cars were transferred to their own lidars. Accessed //URL:

- <https://habr.com/ru/news/t/591117/> (Accessed: 13.05.2022).
- [13] Georgios Zamanakos, Lazaros Tsochatzidis, Angelos Amanatiadis, Ioannis Pratikakis, A comprehensive survey of LIDAR-based 3D object detection methods with deep learning for autonomous driving, *Computers & Graphics*, Volume 99, 2021, Pages 153-181, ISSN 0097- 8493 63
- [14] Stepper Library. // Arduino : [сайт]. URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/stepper/> (Accessed: 13.06.2022)
- [15] Arduino_LSM6DS3 Library. — Electronic text // Arduino: URL: https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/arduino_lsm6ds3/ (Accessed: 22.05.2022).
- [16] Библиотека WiFinINA. — Electronic text // Arduino: URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/wifinina/> (Accessed: 13.06.2022).
- [17] RPLidar library. — Electronic text // GitHub: URL: <https://github.com/Roboticia/RPLidar> (Accessed: 13.06.2022)
- [18] Sockets in Python for beginners. — Electronic text // URL: <https://habr.com/ru/post/149077/> (Accessed: 13.06.2022).
- [19] Dmitry Sergeevich Sarychev Processing of laser scanning data // JSC «IndorSoft». 2014. №1 (2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-dannyhlazernogo-skanirovaniya> (Accessed: 13.05.2022).